

Direction des bibliothèques

AVIS

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal

Méthodes de détection et de classification des naines brunes

par
Jasmin Robert

Département de physique
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en physique

DÉCEMBRE, 2006

© Jasmin Robert, 2006.



Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

Méthodes de détection et de classification des naines brunes

présenté par:

Jasmin Robert

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

Nicole St-Louis,	président-rapporteur
Daniel Nadeau,	directeur de recherche
Pierre Bastien,	membre du jury

Mémoire accepté le:

RÉSUMÉ

Les naines brunes sont des objets ayant une masse intermédiaire entre les planètes et les étoiles et qui ont été découvertes il y a un peu plus d'une dizaine d'années. Grâce aux données recueillies par CPAPIR au CTIO, nous avons ciblé plusieurs candidates naines brunes. Nous utilisons deux stratégies pour détecter celles-ci. La première utilise la couleur $H - CH_4$ élevée des naines T. La seconde utilise le grand mouvement propre des naines brunes, celles-ci étant situées dans le voisinage solaire. Nous avons découvert que la seconde méthode est beaucoup plus efficace que la première à cause de la dispersion élevée de la couleur $H - CH_4$ à $H \geq 15$. Nous utilisons par la suite deux techniques différentes afin de classifier les objets découverts. La première méthode utilise le mode imagerie de SIMON afin d'effectuer une analyse photométrique en bande I, J, H et K_s de nos candidates, ce qui nous permet de confirmer leur type spectral. La seconde méthode consiste à utiliser le mode spectroscopique de SIMON, qui s'étend de $0.8 \mu\text{m}$ à $2.35 \mu\text{m}$ à $R \equiv \lambda / \Delta\lambda \approx 40$, afin de classifier nos objets jusqu'à une précision de 1 sous-type. Les spectres de cinq naines L connues sont utilisés pour déterminer que les indices spectraux les plus efficaces pour classifier nos candidates sont ceux définis dans Testi et al. (2001,[78]). La comparaison visuelle avec d'autres spectres de naines L connues a également été utilisée. C'est ainsi que nous avons réussi à identifier une nouvelle naine L2, SIMP0858055+221458, et avons déterminé que C1628069+051703, malgré son rapport S/B très faible, est probablement une naine M7.

Mots clés: Infrarouge : étoiles, naines brunes, étoiles : faible-masse.

ABSTRACT

Brown dwarfs are objects with a mass intermediate between planets and stars, which were first discovered approximately a decade ago. Thanks to the data collected by CPA-PIR at CTIO, we targeted several brown dwarf candidates. We use two strategies to select those candidates. The first one uses the high $H - CH_4$ color of T dwarfs. The second one uses the large proper motion of brown dwarfs, these objects being located in the solar neighbourhood. We discovered that the second method is much more reliable than the first one because of the high dispersion of the $H - CH_4$ color at $H \geq 15$. We then use two different techniques in order to classify the objects discovered. The first method uses the imagery mode of SIMON in order to carry out a photometric analysis in I , J , H and K_s band of our candidates, which enables us to confirm their spectral type. The second method consists in using the spectroscopic mode of SIMON, which covers the interval from $0.8 \mu\text{m}$ to $2.35 \mu\text{m}$ at $R \equiv \lambda/\Delta\lambda \approx 40$, in order to classify our objects with an accuracy of 1 sub-type. The spectra of five known L dwarfs are used to determine that the most effective spectral indices to classify our candidates are those defined in Testi and al. (2001,[78]). The visual comparison with other spectra of known L dwarfs was also used. Thus we succeeded in identifying a new L2 dwarf, SIMP0858055+221458, and determined that C1628069+051703, in spite of its very weak S/N ratio, is probably a M7 dwarf.

Key words Infrared: stars, brown dwarfs, stars: low-mass.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES SIGLES	xi
REMERCIEMENTS	xii
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Caractéristiques des naines L et T	3
1.2 Méthodes de détection de naines brunes	10
CHAPITRE 2 : MÉTHODES DE DÉTECTION DE NAINES BRUNES	16
2.1 L'instrument de détection : CPAPIR, Caméra PANoramique Proche-Infrarouge	16
2.1.1 La réduction des données CPAPIR	17
2.2 Stratégie par détection de couleur $H - CH_4$	17
2.2.1 Critère de sélection initial	17
2.2.2 Critères de sélection complémentaires	20
2.2.3 Estimation de l'incertitude sur les magnitudes	23
2.2.4 Résultats	26
2.2.5 Discussion des résultats	32
2.3 Stratégie par détection de mouvement propre	38
2.3.1 Résultats	40
2.3.2 Discussion des résultats	46

CHAPITRE 3 : MÉTHODES DE CLASSIFICATION DES NAINES L ET T	48
3.1 L'instrument de classification : SIMON, Spectromètre Infrarouge de MONT-réal	48
3.1.1 Réduction des données spectroscopiques de SIMON	49
3.2 Classification par photométrie	50
3.3 Classification par spectroscopie	51
3.3.1 Définition des indices spectraux	53
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS DE LA CLASSIFICATION DE CANDIDATES	58
4.1 Classification par analyse spectroscopique	62
4.1.1 Analyse par comparaison visuelle des spectres	63
4.1.2 Analyse à l'aide des indices spectraux	84
4.1.3 Discussion des résultats	104
4.2 Classification par analyse photométrique	107
4.2.1 Résultats des naines T connues et des étoiles de référence	108
4.2.2 Résultats des candidates	109
CHAPITRE 5 : CONCLUSION	111
BIBLIOGRAPHIE	116

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Couleur $H - CH_4$ moyenne selon le type spectral de l'objet.	19
2.2	Liste de quelques candidates découvertes par détection de couleur $H - CH_4$	31
2.3	Moyenne et écart-type pour deux différents domaines de magnitude aux trois ouvertures utilisées.	33
2.4	Liste de sources communes aux trois ouvertures ayant une couleur ($H - CH_4$) ≥ 0.2	37
2.5	Liste des naines L et T connues détectées par leur mouvement propre.	43
2.6	Liste des candidates naines L et T découvertes par détection de mouvement propre.	46
3.1	Indices spectraux de Reid.	54
3.2	Indices spectraux de Testi.	55
3.3	Indices spectraux de Geballe.	56
3.4	Intervalles de valeurs des indices de Geballe les reliant au type spectral correspondant.	57
4.1	Liste des candidates par détection de mouvement propre observées en spectroscopie avec SIMON.	59
4.2	Liste des candidates par détection de couleur $H - CH_4$ observées en photométrie avec SIMON.	60
4.3	Liste des naines L connues et des candidates suivies en spectroscopie par SIMON.	62
4.4	Liste des indices spectraux de 2MASS1104+1959.	87
4.5	Liste des indices spectraux de 2MASS1153+5032.	90
4.6	Liste des indices spectraux de 2MASS1221+0257.	93
4.7	Liste des indices spectraux de 2MASS1439+1929.	96
4.8	Liste des indices spectraux de 2MASS1506+1321.	97
4.9	Liste des indices spectraux de C0858+2214.	101

4.10	Liste des indices spectraux de C1628+0517.	102
4.11	Liste des types spectraux découverts par notre analyse spectroscopique.	106
4.12	Liste des candidates suivies en photométrie par SIMON.	107
4.13	Photométrie en bande <i>I, J, H</i> et <i>K_s</i> des naines T connues.	108
4.14	Photométrie en bande <i>I</i> d'étoiles de référence dans notre champ.	109
4.15	Photométrie en bande <i>I, J, H</i> et <i>K_s</i> des candidates obtenue par SIMON.	109
4.16	Couleurs des candidates obtenues par SIMON.	110
5.1	Liste des types spectraux découverts par notre analyse spectroscopique.	114

LISTE DES FIGURES

1.1	Images de Gl 229B.	4
1.2	Couleur $I - J$ en fonction du type spectral pour les naines M, L et T. . .	7
1.3	Couleur $J - H$ en fonction du type spectral pour les naines M, L et T. . .	7
1.4	Couleur $H - K_s$ en fonction du type spectral pour les naines M, L et T. . .	8
1.5	Couleur $J - K_s$ en fonction du type spectral pour les naines M, L et T. . .	8
1.6	Distance moyenne des naines L et T en fonction du type spectral.	12
2.1	Rapport S/B des quatre étoiles en fonction de la magnitude en bande H	25
2.2	Incertitude sur la magnitude des quatre étoiles en fonction de la magnitude en bande H	25
2.3	Diagramme couleur $H - CH_4$ en fonction de la magnitude en bande H . . .	28
2.4	Diagramme couleur $H - CH_4$ en fonction du mouvement propre total en seconde d'arc entre l'époque CPAPIR (2005.805) et 2MASS (1998.795).	29
2.5	Diagramme couleur $H - CH_4$ en fonction de la couleur $H - K_s$	30
2.6	Différence des magnitudes CPAPIR et 2MASS en fonction de la magnitude en bande H de 2MASS pour l'ouverture 1.25 pixel.	34
2.7	Différence des magnitudes CPAPIR et 2MASS en fonction de la magnitude en bande H de 2MASS pour l'ouverture 2 pixels.	34
2.8	Différence des magnitudes CPAPIR et 2MASS en fonction de la magnitude en bande H de 2MASS pour l'ouverture 3 pixels.	35
2.9	Image JPEG pour l'analyse de la candidate C013656+093347.	42
4.1	Carte d'identification des candidates.	61
4.2	Spectres de naines M et L utilisées comme standards.	65
4.3	Spectre de 2MASS1104+1959 (L4) avec les spectres de naines M et L connues.	70
4.4	Spectre de 2MASS1153+5032 (L1) avec les spectres de naines M et L connues.	72

4.5	Spectre de 2MASS1221+0257 (L0) avec les spectres de naines M et L connues.	74
4.6	Spectre de 2MASS1439+1929 (L1) avec les spectres de naines M et L connues.	76
4.7	Spectre de 2MASS1506+1321 (L3) avec les spectres de naines M et L connues.	78
4.8	Spectre de C0858+2214 avec les spectres de naines M et L connues. . .	81
4.9	Spectre de C1628+0517 avec les spectres de naines M et L connues. . .	83
4.10	Spectre de 2MASS1104+1959 avec les intervalles des différents indices spectraux.	86
4.11	Spectre de 2MASS1153+5032 avec les intervalles des différents indices spectraux.	89
4.12	Spectre de 2MASS1221+0257 avec les intervalles des différents indices spectraux.	92
4.13	Spectre de 2MASS1439+1929 avec les intervalles des différents indices spectraux.	95
4.14	Spectre de 2MASS1506+1321 avec les intervalles des différents indices spectraux.	98
4.15	Spectre de C0858+2214 avec les intervalles des différents indices spectraux.	100
4.16	Spectre de C1628+0517 avec les intervalles des différents indices spectraux.	103

LISTE DES SIGLES

2MASS	Two Micron All Sky Survey
ADU	Analog-to-Digital Unit
CPAPIR	Caméra PANoramique Proche Infrarouge
CTIO	Cerro Tololo Inter-american Observatory
DENIS	DEep Near-Infrared Southern Sky Survey
DSS	Digitized Sky Survey
GRISM	Grating Prism
M_{jup}	Masse de Jupiter
OMM	Observatoire du Mont Mégantic
PSC	Point Source Catalog
PSF	Point Spread Function
S/B	Signal sur Bruit
SDSS	Sloan Digital Sky Survey
SIMON	Spectromètre Infrarouge de MONtréal
SIMP	Sondage Infrarouge de Mouvement Propre
UA	Unité Astronomique
UAI	Union Astronomique Internationale
USNO	United States Naval Observatory

REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord remercier celle qui est devenue ma femme cet été, pour son support et sa compréhension, surtout lors de mes longs séjours nuageux à Mégantic où nous devons être séparés durant des jours. J'aimerais remercier également ma famille qui m'encourage dans mes études et m'incite sans cesse à poursuivre.

Un gros merci à mes collègues de travail, particulièrement à mon directeur de recherche, Daniel, qui a su m'accorder cette chance d'étudier dans un domaine qui me passionne. À Étienne, car, sans ses précieux conseils, je ne serais certainement pas rendu où j'en suis aujourd'hui. À David qui m'a également aidé à plusieurs reprises. À René, qui m'a dirigé plus d'une fois au téléphone jusqu'aux petites heures du matin pour s'assurer que tout fonctionnait parfaitement. À Philippe, que j'ai réveillé plus d'une fois à cause d'une roue de SIMON qui bloquait ou autres problèmes graves en pleine nuit claire d'observation ! À Benjamin, Paul et Simon, mes amis du bacc., qui m'ont aidé pendant certains cours d'astronomie à lutter contre le sommeil qui m'envahissait.

Finalement, merci à Bernard, Ghislain et Pierre-Luc pour leur bon travail, surtout lorsqu'ils réussissent à retrouver en peu de temps une étoile de guidage perdue !

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Les naines brunes sont des objets célestes dont l'existence a d'abord été prédite durant les années 60 (Kumar 1963a,b, ([46, 47]) ; Hayashi & Nakano 1963, [34]).¹ Il avait été démontré à cette époque que si une étoile naît avec une masse inférieure à la masse limite qui permet de soutenir la fusion de l'hydrogène ($\sim 80 M_{jup}$), celle-ci va subsister sans jamais atteindre l'évolution stellaire normale. Ceci est dû au fait que, durant la phase de contraction d'un tel objet, les électrons de son noyau deviennent dégénérés, empêchant ainsi le noyau de se contracter davantage. Ce dernier n'atteint donc jamais la température permettant à l'hydrogène de fusionner et l'objet ne devient pas une étoile telle qu'on les connaît. Il est donc important de mentionner que les naines brunes se formeraient par le même processus que les étoiles, c'est-à-dire par l'effondrement d'un nuage moléculaire. C'est la définition qu'utilisent certains chercheurs pour différencier les naines brunes des planètes, ces dernières se formant plus tard à partir du disque protoplanétaire. D'autres utilisent plutôt une définition faisant appel à la masse minimale permettant la fusion du deutérium, atteinte dans les naines brunes mais non dans les planètes.

Il peut y avoir, dans les noyaux de naines brunes, fusion du deutérium (requérant une masse minimum de $\sim 13 M_{jup}$) parce que celle-ci nécessite une température moins élevée que la fusion des protons. Les naines brunes les plus massives vont également connaître une période de fusion de l'hydrogène pur, mais ces réactions ne durent jamais assez longtemps (< 100 millions d'années) pour que la naine brune atteigne un état stable permettant de soutenir cette fusion. Leur principale source d'énergie est donc la contraction gravitationnelle. Les naines brunes sont ainsi condamnées à se refroidir lentement et graduellement au cours de leur existence, devenant de moins en moins lumineuses. Ces caractéristiques font en sorte que les naines brunes sont des objets in-

¹Le terme initial pour désigner de tels objets était « naine noire » mais, quelques années plus tard, ce terme est devenu « naine brune » et le terme « naine noire » a été réservé pour décrire une étoile naine blanche qui s'est refroidie à un point où elle n'émet plus de lumière.

trinsèquement faibles et qu'elles émettent la majeure partie de leur flux dans l'intervalle proche-infrarouge du spectre électromagnétique, plus particulièrement entre $1.0 \mu\text{m}$ et $2.5 \mu\text{m}$.

Pour ces raisons, ces objets sont restés cachés des yeux des observateurs durant près de trente ans après la prédiction de leur existence, et n'ont été découverts qu'avec le développement de l'astronomie proche-infrarouge. La recherche de naines brunes a mené éventuellement à la découverte de deux objets particuliers qui ont par la suite mené à la définition de deux nouvelles classes spectrales.

La première candidate naine brune a été identifiée par Becklin et Zuckerman (1988, [6]) lors d'un relevé cherchant des compagnons autour de 200 étoiles de type naine blanche situées près de notre système solaire. Ces chercheurs trouvèrent un compagnon très rouge à la naine blanche GD 165. L'objet fut nommé GD 165B et cinq années plus tard, son spectre dans l'intervalle de 6400 \AA à 9000 \AA a été publié par Kirkpatrick, Henry et Liebert (1993, [40]). Le spectre montrait des particularités qui distinguaient cet objet des étoiles de classe M (aucune présence de l'absorption par le TiO) et des planètes connues (aucune absorption par le CH_4 ou le NH_3 comme on l'observe sur Jupiter et Saturne).

Cependant, certains chercheurs restaient sceptiques face à cet objet et le qualifiait d'« irrégularité », et comme aucune preuve concluante ne pouvait permettre d'identifier cet objet comme étant une naine brune, on ne peut le qualifier comme étant la première naine brune à avoir été découverte. Encore aujourd'hui, son statut en est au stade de « naine brune probable » désigné par Kirkpatrick et al. (1999, [38]).

Puis en 1995, une nouvelle annonce allait prouver officiellement l'existence des naines brunes. En effet, Nakajima et al. (1995, [64]), lors d'un relevé effectué à l'aide d'un coronographe sur une centaine d'étoiles de faible masse dans le voisinage solaire, découvrirent un compagnon à la naine de type M1 G1 229 située à 5.7 pc. La magnitude du compagnon impliquait que celui-ci avait une luminosité plus faible que GD 165B. Il fut nommé G1 229B et le spectre proche-infrarouge de cet objet (Oppenheimer 1995, [68]) révéla de l'absorption en bande *H* et *K* qui signifiait la présence de CH_4 dans l'atmosphère de l'objet, caractéristique non présente dans le spectre de GD 165B, ni d'aucun

autre objet stellaire, et que l'on retrouvait jusqu'à ce moment seulement dans des atmosphères planétaires. Cependant, la température et la luminosité de cet objet impliquait qu'il ne pouvait être une planète.

Ainsi, la découverte de ces deux nouveaux objets, qui sont non seulement différents des objets célestes communs, mais également différents l'un de l'autre, a forcé la communauté scientifique à ajouter non seulement une, mais deux nouvelles classes spectrales à la séquence habituelle, OBAFGKM. Ces objets sont en effet plus froids que la classe spectrale la plus froide déjà connue (M), et, de ces deux objets, Gl 229B est indéniablement plus froid que GD 165B.

C'est Martín et al. (1997,[58]) et Kirkpatrick et al. (1999, [43]) qui suggérèrent l'utilisation de la lettre « L » pour les objets ressemblant à GD 165B. Kirkpatrick et al. (1999, [43]) suggérèrent également la lettre « T » pour les objets encore plus froids, ressemblant à Gl 229B. Cette suggestion fut approuvée par l'ensemble de la communauté étudiant les naines brunes et par les membres de la commission 45 de l'UAI. Deux nouvelles classes spectrales sont ainsi nées : GD 165B est devenue la première naine à être classée L et Gl 229B la première naine à être classée T.

Depuis ces découvertes, plus de 480 naines L et 100 naines T ont été détectées grâce à des relevés couvrant de très grandes parties du ciel comme 2MASS (Skrutskie et al., 2006, [76]), DENIS (Epchtein, 1997, [21]) et SDSS (York et al., 2000, [85]).²

1.1 Caractéristiques des naines L et T

Il est important de bien distinguer les caractéristiques de ces deux classes spectrales et de comprendre la place qu'occupent les naines brunes dans celles-ci.

Commençons par les naines L, dont la température effective se situe entre ~ 2500 K et ~ 1300 K (Vrba et al. 2004,[84]). Les naines L précoces ($< L5$) regroupent à la fois deux sortes d'objets célestes. D'abord, on y retrouve des étoiles de faible masse ($< 85 M_{jup}$) qui sont âgées d'au moins 300 millions d'années ce qui leur a permis de se refroidir suffisamment pour être sous les températures des naines M. On retrouve également pour

²Pour une liste exhaustive de naines L et T régulièrement mise à jour, voir <http://dwarfarchives.org>

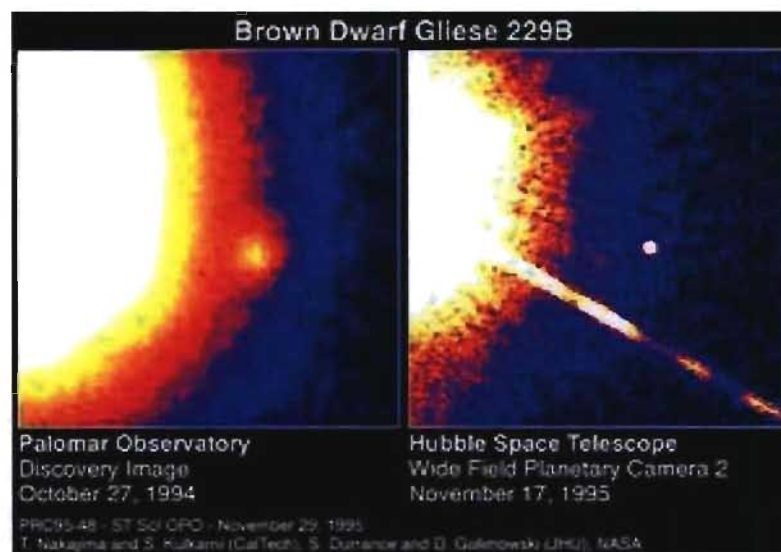


Figure 1.1 – Images de Gl 229B. À gauche on voit une image en bande R prise au télescope de 60 pouces de Palomar le 27 octobre 1994 par T. Nakajima (Caltech), S. Durrance (JHU) et à droite une image prise par Hubble en bande R le 17 novembre 1995 faite par S. Kulkarni (Caltech), D. Golimowski (JHU) et la NASA.

les naines L précoces des objets de masse substellaire (les naines brunes) généralement plus jeunes que 3 milliards d'années, n'ayant pas eu le temps de se refroidir jusqu'à un type spectral plus tardif. Les naines L tardives (ainsi que l'ensemble des naines T) sont cependant toutes des naines brunes, ayant des températures trop faibles ($< 1800\text{K}$) pour qu'elles puissent être des objets stellaires (voir Kirkpatrick et al. 2005,[37]). Ces faibles températures procurent aux naines L des caractéristiques spectrales différentes des naines M. En effet, dans la partie rouge du spectre optique des naines L (entre $0.6\ \mu\text{m}$ et $1.0\ \mu\text{m}$), on retrouve des bandes d'oxide (TiO et VO) qui s'affaiblissent et disparaissent, des bandes fortes de métaux hybrides (FeH et CrH) et des bandes larges d'absorption résonnante de métaux alcalins (Na, K, Rb et Cs). Dans la partie proche-infrarouge du spectre (entre $1.0\ \mu\text{m}$ et $2.5\ \mu\text{m}$), on retrouve des bandes d'absorption du H_2O (entre $1.09\ \mu\text{m}$ et $1.20\ \mu\text{m}$, $1.30\ \mu\text{m}$ et $1.51\ \mu\text{m}$, $1.75\ \mu\text{m}$ et $2.05\ \mu\text{m}$ et plus loin que $2.3\ \mu\text{m}$), du FeH ($1.01\ \mu\text{m}$) et du CO (entre $2.29\ \mu\text{m}$ et $2.41\ \mu\text{m}$) (Martín et al. 1999,[60]; Kirkpatrick et al. 1999a,[43]; Kirkpatrick et al. 2000,[44]; Leggett et al. 2001,[48]). De plus, la distribution d'énergie spectrale devient de plus en plus rouge au

fur et à mesure que l'on avance dans les types spectraux des naines L.

Pour les naines T, la température effective s'étend de ~ 1400 K à ~ 700 K (Vrba et al. 2004,[84]). Ces faibles températures viennent modifier l'aspect général du spectre. En optique, on retrouve, comme c'est le cas pour les naines L, de l'absorption due aux raies des métaux alcalins, bien que les raies dues à la présence du Na et du K soient élargies par la pression. Ce qui distingue ces objets des naines L est cependant l'apparition dans le proche-infrarouge de bandes d'absorption très fortes du CH_4 (qui remplacent les bandes du CO présentes pour les naines L) et du H_2O , ainsi que de l'absorption induite par collision due au H_2 . Ces absorptions du CH_4 et du H_2 réduisent le flux en bande H et K_s (à $1.69 \mu\text{m}$ et $2.08 \mu\text{m}$), au point que les couleurs $J - H$ et $H - K_s$ deviennent beaucoup plus bleues que pour les naines L. Dans le cas des naines T précoces, ces couleurs peuvent être confondues avec celles des naines M (Tsuji, Ohnake, & Aoki 1999,[82]; Burrows, Morley et Sharp 2000,[15]; Oppenheimer et al. 1995,[68] & 1998,[69]; Geballe et al. 1996,[24]; Strauss et al. 1999,[77]; Burgasser et al. 1999,[10]; Cuby et al. 1999,[19]; Tsvetanov et al. 2000,[83]). À cause de la présence de CH_4 dans l'atmosphère de ces objets, on les nomme également des « naines de méthane ».

Pour illustrer les caractéristiques des naines L et T, trois diagrammes présentent les couleurs essentielles de ces objets en fonction du type spectral et qui peuvent aider à différencier les naines L et T des autres objets célestes.

La figure 1.2, dont les données proviennent exclusivement de Dahn et al. (2002,[20]), illustre la couleur $I - J$ pour les différents types spectraux. On remarque que plus l'objet est froid, plus la couleur $I - J$ est élevée. La couleur semble évoluer de façon linéaire pour les naines M, qui ont une couleur $I - J$ se situant entre 1.0 pour les naines M précoces et 3.5 pour les naines M tardives. La pente diminue pour les naines L, dont les couleurs se situent entre 3.5 et 4.5 pour les naines L précoces et tardives respectivement. À noter qu'il manque des données pour les naines T précoces, qui étaient peu étudiées lors de la publication de cet article. On remarque tout de même que la couleur $I - J$ continue à augmenter et qu'elle atteint presque 6.0 pour les naines T tardives. Tel que mentionné dans la thèse de Loïc Albert (2006,[1]), la couleur $I - J$ est déterminante pour différencier les naines brunes des autres sources stellaires ou extragalactiques. Seuls

les quasars très éloignés peuvent être une source inquiétante de contamination, mais heureusement la densité de ceux-ci reste très faible.

La figure 1.3 nous indique la couleur $J - H$ pour les différents types spectraux. Nous avons ajouté aux données de Dahn et al. (2002,[20]), quelques données provenant de Burgasser et al. (2004,[13]) afin de combler le manque de naines T précoces observé pour la couleur $I - J$. La couleur proche-infrarouge $J - H$ est plus facilement accessible que la couleur $I - J$ parce que ces bandes (ainsi que la bande K_s) sont disponibles dans le catalogue 2MASS, dont les observations sont accessibles à la communauté scientifique par l'entremise du Catalogue des sources ponctuelles (PSC)³. Nous constatons que le bleuissement de cette couleur dû à l'apparition du CH_4 dans la bande H (et également dans la bande K_s) se fait de façon brutale. L'ajout de quelques données de naines T précoces facilite cette observation. On remarque également que la dispersion de cette couleur pour les naines L est très élevée, et qu'elle est moindre pour les naines M et T (bien que le manque de données nous empêche de bien illustrer ceci pour les naines T). En effet, Leggett et al. (2002a,[52]) nous indique que les couleurs $J - H$ et $H - K_s$ des naines L sont relativement dispersées, ce qui signifie probablement que le flux dans ces bandes est sensible aux variations des propriétés de la poussière photosphérique. Il est donc difficile de classifier les différents sous-types de naines L uniquement par leurs couleurs proche-infrarouges.

Les figures 1.4 et 1.5 utilisent les mêmes ensembles de données que la figure 1.3 mais illustrent la couleur $H - K_s$ et $J - K_s$ respectivement. La couleur $H - K_s$ nous permet encore une fois de vérifier qu'il y a un bleuissement important de cette couleur pour les naines T, bien que celui-ci se produise un peu moins abruptement que pour la couleur $J - H$. On remarque également une dispersion élevée pour les naines L, et également une dispersion plus importante pour les naines T que pour la couleur $J - H$. En effet, Leggett et al. (2002a,[52]) suggèrent que pour les naines T, la dispersion de la couleur $H - K_s$ est due à des variations de l'opacité de l'absorption H_2 qui diffère d'une naine T à une autre. En effet, l'opacité serait sensible à la gravité et à la métallicité de l'objet, ce qui explique ces variations.

³voir <http://irsa.ipac.caltech.edu/>

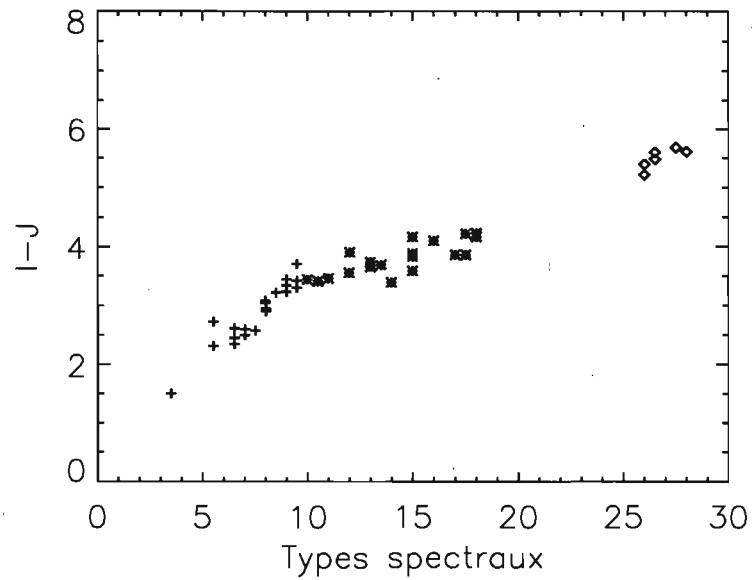


Figure 1.2 – Couleur $I - J$ en fonction du type spectral pour les naines M, L et T. Les données proviennent de Dahn et al. (2002,[20]). Le symbole $[+]$ désigne les naines M (où $M0 \equiv 0$), le symbole $[*]$ les naines L (où $L0 \equiv 10$) et le symbole $[\diamond]$ les naines T (où $T0 \equiv 20$).

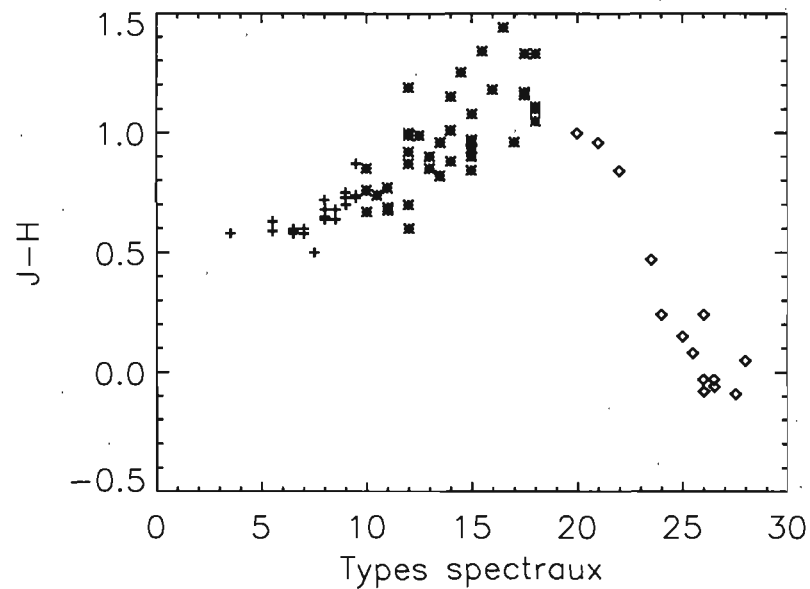


Figure 1.3 – Couleur $J - H$ en fonction du type spectral pour les naines M, L et T. Les données proviennent de Dahn et al. (2002,[20]) et Burgasser et al. (2004,[13]). Le symbole $[+]$ désigne les naines M (où $M0 \equiv 0$), le symbole $[*]$ les naines L (où $L0 \equiv 10$) et le symbole $[\diamond]$ les naines T (où $T0 \equiv 20$).

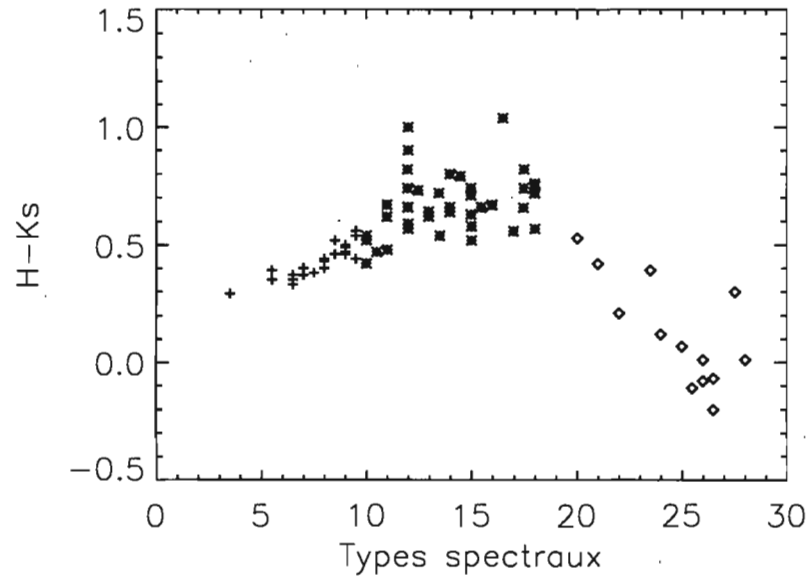


Figure 1.4 – Couleur $H - K_s$, en fonction du type spectral pour les naines M, L et T. Les données proviennent de Dahn et al. (2002,[20]) et Burgasser et al. (2004,[13]). Le symbole $[+]$ désigne les naines M (où $M_0 \equiv 0$), le symbole $[*]$ les naines L (où $L_0 \equiv 10$) et le symbole $[\diamond]$ les naines T (où $T_0 \equiv 20$).

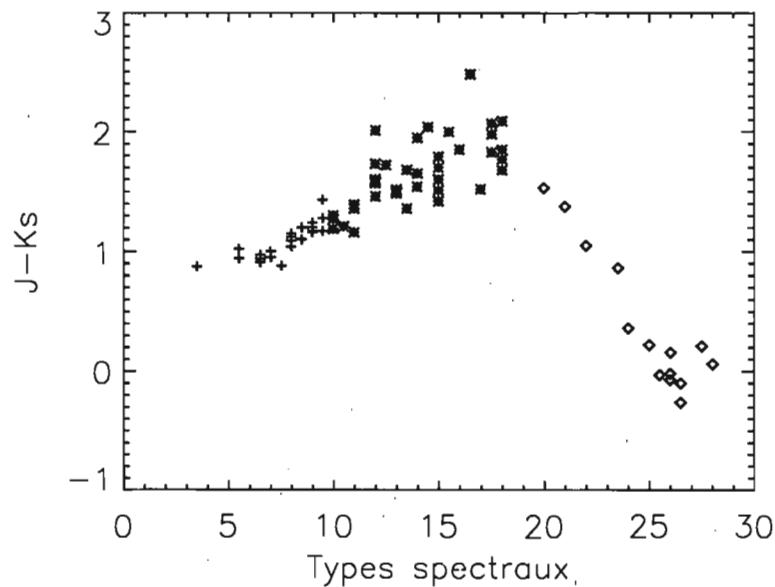


Figure 1.5 – Couleur $J - K_s$, en fonction du type spectral pour les naines M, L et T. Les données proviennent de Dahn et al. (2002,[20]) et Burgasser et al. (2004,[13]). Le symbole $[+]$ désigne les naines M (où $M_0 \equiv 0$), le symbole $[*]$ les naines L (où $L_0 \equiv 10$) et le symbole $[\diamond]$ les naines T (où $T_0 \equiv 20$).

La caractéristique qui différencie la limite entre la classe L et la classe T est, telle que proposée par Geballe et al. (2002,[23]) et appuyée par Burgasser et al. (2006,[9]), l'apparition de l'absorption due au CH₄ dans la bande *H*, observable à $R \approx 300 - 500$, qui se produit à une température efficace plus élevée que son apparition dans la bande *K*. La raison de ce choix est que la première apparition du CH₄ en bande *H* est plus évidente et prononcée que celle en bande *K*. De plus, le niveau de bruit est généralement plus faible aux longueurs d'onde plus courtes. Le continuum d'énergie est également plus élevé dans cette bande qu'en bande *K*. Il est à noter que Noll et al. (2000,[66]) ont démontré que le CH₄ apparaît d'abord dans la bande *L* (près de 3.3 μm) vers le type spectral L5. Cependant, Leggett et al. (2000,[50]) et Geballe et al. (2001,[25]) argumentent que nous ne pouvons utiliser cette première apparition du CH₄ comme étant la marque pour différencier les naines L des naines T étant donné la difficulté d'observer la bande *L* à partir du sol à cause de l'atmosphère terrestre. De plus, il est impossible d'observer entre 2.5 μm et 2.9 μm , car l'atmosphère terrestre est totalement opaque entre ces longueurs d'onde. Il est donc inutile de chercher une caractéristique spectrale pour définir les naines T à des longueurs d'onde plus grandes que 2.5 μm .

Ainsi, en sachant les caractéristiques des naines L et T, on peut dire que la séquence spectrale allant de M à L à T en est une où la température effective et la luminosité diminuent (Burgasser et al. 2006,[9]). Les naines L et T sont particulières car leur type spectral dépend de l'âge et de la masse de l'objet (une séquence évolutive), contrairement aux étoiles de la séquence principale, dont le type spectral ne dépend pas de l'âge. Ainsi, une naine brune pourrait naître avec un type spectral L puis se refroidir tranquillement pour devenir une naine T et poursuivre ainsi son évolution avec le temps. Ceci est le consensus adopté par la communauté scientifique. Il n'est donc pas possible, pour un tel objet, de déterminer sa masse en se servant uniquement de son type spectral.

Vrba et al. (2004,[84]) nous font également remarquer que les températures effectives ne varient pas énormément entre les types spectraux allant de L6 à T5. L'intervalle de température entre ces types est situé entre ~ 1550 K et ~ 1200 K. Ce phénomène, encore mal compris par la communauté, pourrait être dû au fait que la transition de naines L aux naines T serait dominée par l'évolution des nuages condensés, sans la présence d'un

refroidissement, tel que prédit par Burgasser et al. (2002b,[12]). Cependant, un modèle de Tsuji & Nakajima (2003,[81]) prédit quant à lui une évolution rapide de L à T sans faire intervenir l'évolution des nuages condensés.

En suivant le raisonnement du refroidissement progressif, au-delà de ces deux classes, il pourrait exister des objets encore plus froids et plus vieux que ceux que l'on connaît actuellement. Ainsi, il est fort possible que ce ne soit qu'une question de temps avant que l'on découvre de tels objets. Comme en discute Burgasser et al. (2006,[9]), il est probable que nous devions changer la séquence de naines T que nous utilisons présentement. Il est également probable que nous devions ajouter une nouvelle classe spectrale si les caractéristiques des nouveaux objets diffèrent significativement de celles que l'on connaît actuellement pour les naines T. La communauté scientifique a déjà réservé la lettre « Y » pour désigner de tels objets (Kirkpatrick et al. 1999,[43] ; Burrows et al. 2003,[16] ; Knapp et al. 2004,[45]). Ces naines Y pourraient également avoir des caractéristiques spécifiques au-delà de $2.5 \mu\text{m}$ étant donné que le maximum de la distribution d'énergie spectrale serait de plus en plus loin dans l'infrarouge à cause de leur température plus faible. Cependant, nous ne le saurons pas tant qu'un objet plus froid que ceux connus présentement ne sera découvert.

1.2 Méthodes de détection de naines brunes

Connaissant les caractéristiques spectrales des naines T, on peut affirmer qu'un relevé basé entièrement sur les couleurs proche-infrarouges (tel que 2MASS qui a couvert 99.9998% de la surface du ciel jusqu'à des magnitudes en bande *J* de 15.8 à 10σ , et jusqu'à une magnitude plus profonde dans le PSC *faint extension* bien que des parties du ciel soient évitées lors de la recherche de naines brunes) permet de détecter l'ensemble des naines L ainsi que les naines T tardives. La profondeur de ce relevé fait en sorte que les naines L et les naines T peuvent être observées jusqu'à une certaine distance, que nous allons déterminer.

Grâce aux parallaxes mesurées pour plusieurs naines L et T, la distance de celles-ci a pu être déterminée par Vrba et al. (2004, [84]). Ces auteurs ont par la suite calculé la

magnitude absolue moyenne en bande J , H et K_s pour les types spectraux allant de L0 à T8. Nous nous servons de ces valeurs afin de calculer la distance typique des types spectraux L et T détectables à l'aide de 2MASS (magnitude apparente limite de $J = 16$). C'est ce qui est présenté à la figure 1.6.

Les naines L les plus brillantes (L0) sont détectables dans le catalogue 2MASS jusqu'à une distance d'environ 75 pc et les naines T les plus faibles (T8) jusqu'à environ 8 pc. On remarque également l'effet que produisent les caractéristiques spectrales de la transition des naines L aux naines T en bande J sur la distance calculée : celle-ci stagne lors de cette transition.

De plus, il faut rappeler qu'il est difficile de différencier les naines T précoces des naines M à cause des couleurs proche-infrarouges similaires pour ces deux types spectraux différents. Comme 2MASS utilise uniquement des critères de sélection par couleur proche-infrarouge pour détecter les naines L et naines T ($J - K_s \geq 1.3$ et $J - K_s \leq 0.3$) et que ces critères excluent les naines T précoces afin d'éviter un trop grand nombre de détections de naines M (voir la figure 1.5), on peut affirmer qu'il reste beaucoup de naines T précoces non-découvertes par ce relevé.

Un moyen efficace de différencier les naines M des naines T précoces est par les couleurs $I - Z$ ou $I - J$, qui sont beaucoup plus rouges pour les naines T que pour les naines M. C'est ce qu'utilise le relevé SDSS (qui a une magnitude limite ~ 25 en bande I et peut trouver des objets jusqu'à l'équivalent de $J = 17$) pour trouver les naines L et T. Ce relevé couvre donc un volume quatre fois plus grand que 2MASS, mais comme il n'a couvert qu'environ 20% du ciel, son efficacité à trouver de nouvelles naines L et T est limitée par la surface observée. Malgré ce fait, le nombre de naines T précoces (T4 et moins) découvertes par SDSS durant les derniers mois est impressionnant si on le compare à 2MASS : 36 contre 9. Comme 2MASS a recherché des naines T sur une surface qui est plus de trois fois plus grande que SDSS, il resterait environ une centaine de naines T (dont une majorité de naines T précoces) à être découvertes à des magnitudes de l'ordre de celles mesurées par SDSS.

Une autre caractéristique des naines brunes complique davantage la découverte de nouvelles naines brunes. En effet, des études effectuées par Marcy et Butler (1998, [56])

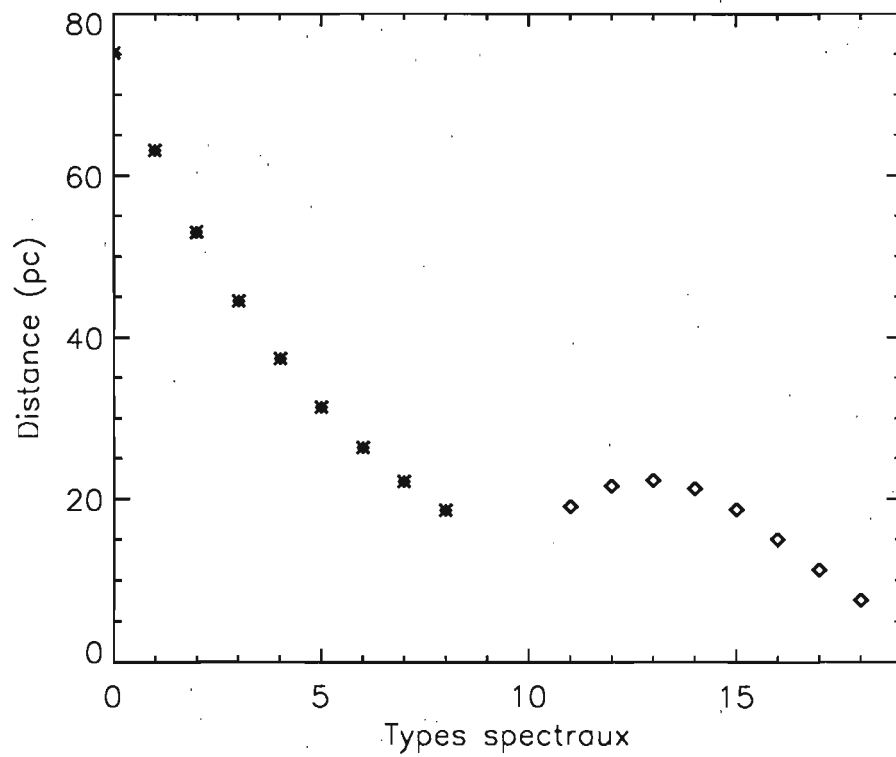


Figure 1.6 – Distance moyenne des naines L et T en fonction du type spectral à une magnitude apparente limite de $J = 16$. Le symbole [*] désigne les naines L ($L_0 \equiv 0$) et le symbole [\diamond] désigne les naines T ($T_0 \equiv 10$). À noter qu'il manque les valeurs des naines L9 et T0, la magnitude absolue n'étant pas calculée par Vrba et al. pour ces deux types d'objet.

portant sur la recherche de compagnons de faible masse à des étoiles de la séquence principale ont révélé qu'environ 6% des étoiles avaient un compagnon de très faible masse (entre $0.5 M_{jup}$ et $5 M_{jup}$) à l'intérieur de 2.1 UA. Cependant, peu de celles-ci en avaient un ayant une masse entre $10 M_{jup}$ et $80 M_{jup}$, qui représente la masse limite inférieure et supérieure acceptées pour les naines brunes. Par ailleurs, ils font remarquer que, comparativement aux objets ayant une masse plus faible, les objets plus massifs que $10 M_{jup}$ sont justement plus faciles à détecter. Il ne s'agit donc pas d'un effet de sélection observationnel.

Deux années plus tard, les mêmes auteurs (2000, [57]) allaient inventer l'expression « désert de naine brune » pour qualifier ce manque de naines brunes autour d'étoiles proches. Marcy et Butler conclurent selon leurs données qu'un faible pourcentage (< 1%) d'étoiles de la séquence principale auraient un compagnon ayant une masse entre $5 M_{jup}$ et $80 M_{jup}$ à l'intérieur de 3 UA. Une étude récente de Grether et Lineweaver (2006, [33]) a une fois de plus démontré l'existence du « désert de naine brune » et en arrive au même résultat que Marcy et Butler. Pour expliquer ce phénomène, les auteurs préconisent l'explication d'Armitage et Bonnell (2002, [3]), qui interprètent le « désert de naine brune » par le fait qu'après la formation d'un système « naine brune-étoile principale », l'évolution du disque protoplanétaire mènerait à une migration vers le centre du système, entraînant ainsi la destruction de la naine brune par fusion avec l'étoile principale. Les planètes massives éviteraient ce phénomène, se créant plus tard lors de la dispersion du disque. Ce modèle explique le « désert de naine brune » pour des étoiles ayant environ 1 masse solaire. On pourrait donc trouver des naines brunes dans d'autres types de systèmes binaires : près d'une étoile de faible masse, d'une autre naine brune ou d'une étoile de type solaire en formation (avant que ne survienne la fusion de la naine brune avec celle-ci).

Quelques recherches récemment effectuées ont tenté d'éclaircir le mystère du « désert de naine brune ». D'abord, une étude de Gizis et al. (2003, [29]) démontre que $15 \pm 5\%$ des naines M et L ont un compagnon naine brune entre 1.6 UA et 16 UA, ce qui vient appuyer la théorie de la migration de Armitage et Bonnell (2002, [3]). Ensuite, il est possible que le « désert de naine brune » soit présent à courte distance (≤ 3 UA)

d'une étoile mais disparaisse à plus grande séparation, tel que mentionné par Gizis et al. (2001, [27]). Ces derniers ont découvert qu'il y a environ 10 fois plus de naines brunes à grande séparation qu'à courte séparation. Cependant, McCarthy et Zuckerman (2004, [61]) ont observé 280 étoiles de type G, K et M et n'ont trouvé qu'une seule naine brune entre 75 et 1200 UA.

Puis, un étudiant d'ici, Loïc Albert (2006,[1]), a effectué sa thèse sur la recherche de naines brunes (des naines T dans ce cas) autour d'étoiles du voisinage solaire. Grâce à cette recherche effectuée sur 62 étoiles de la séquence principale (composées en majorité d'étoiles M, de quelques étoiles K et de quelques étoiles plus massives que ces deux types spectraux), il en arrive à la conclusion que le taux de binarité pour les naines brunes plus massives qu'environ $30 M_{jup}$ à une séparation de 200-1400 UA est de $f_{nb} = 0.8^{+5.1}_{-0.8}\%$. Ce résultat démontre que le « désert de naine brune » s'étend à grande séparation et appuie donc les résultats obtenus par McCarthy et Zuckerman (2004, [61]). Des simulations numériques de formations d'étoiles faites par Bate et al. (2003, [5]) suggèrent un certain nombre de naines brunes comme compagnons à grande séparation mais seulement dans des systèmes plus massifs que les étoiles M (d'étoiles G ou K), ce qui explique les résultats obtenus par Gizis et al. (2001, [27]), ceux-ci ayant concentrés leurs recherches sur des étoiles G. Il semble donc que le « désert de naine brune » à faible séparation soit présent pour toutes les étoiles de la séquence principale et qu'il soit présent à grande séparation seulement pour les étoiles les moins massives. Les naines brunes restent donc beaucoup plus nombreuses dans le champ qu'à proximité d'étoiles du voisinage solaire.

À la lumière de ceci, afin de découvrir et d'aider à compléter le catalogue de naines brunes dans le voisinage solaire, le groupe d'infrarouge de l'Université de Montréal a décidé de construire sa propre caméra proche-infrarouge à grand champ, CPAPIR, ayant pour but principal de découvrir de nouvelles naines brunes, particulièrement de nouvelles naines T précoces.

Ce nouveau relevé, à la recherche de tels objets, se base sur les points suivants :

- Observer dans la partie proche-infrarouge du spectre électromagnétique, où la majeure partie de la radiation des naines L et T est émise.

- Observer partout dans le champ (Reid et al. 1999, [73]) ou dans des amas ouverts (Bouvier et al. 1998, [8]; Martín et al. 1998, [59]) et non seulement à proximité d'étoiles de la séquence principale situées dans le voisinage solaire. Utiliser une caméra à grand champ augmente l'efficacité d'un tel relevé.

- Utiliser un moyen efficace afin d'éliminer l'ambiguïté des couleurs proche-infrarouges similaires des naines M et des naines T précoces.

Une fois les candidates découvertes, l'équipe a également besoin d'un autre instrument proche-infrarouge, nommé SIMON, afin de déterminer le type spectral de ces objets à l'aide des caractéristiques spectrales énoncées à la section 1.1.

Ainsi, ce mémoire présente et discute d'abord des méthodes de détection de candidates de naines brunes utilisées lors de ce projet de recherche. Deux méthodes de détection ont été utilisées : la première est principalement basée sur la couleur $H - CH_4$, ce qui permet de distinguer les naines brunes des autres objets du champ, et la seconde est basée sur le mouvement propre élevé des naines brunes, celles-ci se situant dans le voisinage solaire. Ces méthodes seront présentées à la section 2. Ensuite, deux méthodes de classification de candidates seront présentées à la section 3. La première utilise la photométrie en bande I , J , H et K afin de déterminer les couleurs des candidates identifiées auparavant. La seconde consiste à obtenir un spectre de nos candidates pour par la suite le comparer visuellement et à l'aide d'indices spectraux à d'autres spectres déjà connus. Les résultats des méthodes de classification sont présentés à la section 4. Nous allons finalement conclure à la section 5.

CHAPITRE 2

MÉTHODES DE DÉTECTION DE NAINES BRUNES

Afin de sonder le ciel à la recherche de nouvelles naines brunes, l'équipe de recherche a dû construire un instrument que nous allons maintenant brièvement décrire.

2.1 L'instrument de détection : CPAPIR, Caméra PANoramique Proche-Infrarouge

CPAPIR est une caméra de relevé élaborée par une équipe composée de six personnes : Étienne Artigau, Daniel Nadeau, René Doyon, Philippe Vallée, Martin Riopel et Simon Thibeault. L'instrument a vu ses premières lumières en novembre 2004 à l'OMM.

Cette caméra a été spécialement conçue pour effectuer des relevés sur de grandes surfaces du ciel, et donc de grands volumes galactiques, grâce à son grand champ de $35' \times 35'$ (2024×2024 pixels, $1.03''/\text{pixel}$) et ce, en lumière proche-infrarouge, c'est-à-dire de $0.8 \mu\text{m}$ à $2.4 \mu\text{m}$. Elle contient deux roues à filtres qui contiennent un total de dix filtres, incluant des filtres à large bande et des filtres à bande étroite. Cet instrument est donc idéal pour la détection de naines brunes à proximité du soleil. Il sert également à rechercher des étoiles Wolf-Rayet galactiques.

En février 2005, CPAPIR a été envoyé au CTIO, situé au Chili, et installé sur le télescope de 1.5 m. Un de ses objectifs était alors d'entreprendre un relevé du ciel afin d'élargir le nombre de naines brunes connues. Ces nouvelles découvertes permettront par la suite d'affiner les modèles de comptage stellaire de la Voie Lactée. Il est également possible que l'équipe découvre des objets rares et méconnus de la communauté scientifique tels des naines brunes binaires, des naines brunes très pauvres en métaux, des naines brunes du halo, etc.

2.1.1 La réduction des données CPAPIR

Les données de CPAPIR, une fois recueillies, transférées et triées, doivent être traitées et analysées. Ceci est accompli en utilisant le langage de programmation IDL¹.

La procédure lors des observations est la suivante : une série d'expositions de champs uniformes prises sur un écran à l'intérieur du dôme (« domeflat ») et d'expositions du courant sombre (« dark ») est prise au début ou à la fin de chaque nuit pour éliminer les mauvais pixels et le bruit de lecture des images. La calibration photométrique et astrométrique est faite par comparaison des étoiles du champ avec le relevé 2MASS en H (ou en J pour la seconde méthode de détection), étant donné qu'en bande large (J , H ou K_s), on retrouve typiquement entre 50 (pôle galactique) et 15 000 (centre galactique) étoiles dans le PSC pour chaque image CPAPIR. Il est donc facile de comparer la position de nos étoiles et leur flux avec les valeurs que l'on retrouve dans le PSC, ce qui permet une calibration rapide et efficace en bande H . La bande CH_4 est calibrée à partir de la bande H et en supposant que la couleur $H - CH_4$ est en moyenne 0 pour les étoiles du champ. Pour effectuer la calibration photométrique, nous nous sommes limités aux étoiles qui ont une magnitude en bande H située entre 11 et 14 dans le PSC afin de s'assurer que le rapport S/B des étoiles soit suffisant pour obtenir un point zéro précis. Nos images sont également traitées pour corriger la distortion qui pourrait fausser l'astrométrie de nos sources.

Finalement, une analyse complète des images réduites est effectuée, grâce aux critères de sélection décrits aux sections 2.2 et 2.3.

2.2 Stratégie par détection de couleur $H - CH_4$

2.2.1 Critère de sélection initial

La stratégie initiale adoptée pour le relevé était basée sur les caractéristiques spectrales proche-infrarouges des naines T. Comme nous l'avons vu à la section 1.1, le spectre des naines T comporte plusieurs structures dans la bande H : un pic centré à

¹ voir <http://www.itvis.com/idl/>

1.57 μm , des extrémités bleues et rouges dominées par l'absorption due à l'eau et une forte absorption due au CH_4 entre 1.6 μm et 1.7 μm . L'équipe a donc décidé d'utiliser un filtre en bande H (de longueur d'onde centrale $\lambda_c = 1.65 \mu\text{m}$ et de largeur $\Delta\lambda = 0.3 \mu\text{m}$) ainsi qu'un filtre à bande étroite appelé CH_4 (avec $\lambda_c = 1.57 \mu\text{m}$ et $\Delta\lambda = 0.05 \mu\text{m}$), bien que celui-ci mesure le continuum du flux en bande H et non l'absorption due au CH_4 dans cette bande. En effet, les naines brunes, ayant une température inférieure à 1800 K, ont une couleur $H - \text{CH}_4$ anormalement élevée comparativement aux étoiles de la séquence principale.

Cependant, au début du projet, peu de spectres proche-infrarouges étaient accessibles. L'équipe a donc été obligée d'utiliser les modèles théoriques construits par Allard et al. (2001,[2]) pour simuler l'atmosphère de ces objets froids et ainsi calculer la couleur $H - \text{CH}_4$ théorique de ceux-ci. Avec l'abondance des spectres proche-infrarouges devenus disponibles depuis quelques temps, nous savons que ces modèles théoriques ne représentent pas tout à fait la réalité. Les valeurs calculées pour la couleur $H - \text{CH}_4$ de ces objets étaient donc inexactes.

Avec plus d'une centaine de spectres proche-infrarouges de naines L et T disponibles, nous sommes présentement en mesure de calculer précisément la couleur $H - \text{CH}_4$ pour les types spectraux M, L et T. Le tableau 2.1 illustre cette couleur mesurée sur des spectres obtenus grâce à diverses sources. Pour chaque spectre, nous avons mesuré la magnitude en bande H , puis la magnitude dans l'intervalle en longueur d'onde du filtre CH_4 de CPAPIR, pour ensuite soustraire ces deux valeurs. Nous avons regroupé les valeurs recueillies par type spectral pour les naines M et L, et par sous-type pour les naines T. Dans chaque cas, nous avons fait la moyenne de la couleur $H - \text{CH}_4$, la moyenne de la magnitude en bande H et nous indiquons le nombre N de spectres différents utilisés pour le calcul. On remarque que pour les types M et L (de même que pour le reste des étoiles de la séquence principale), la couleur $H - \text{CH}_4$ est inférieure à 0.1. Ensuite, elle augmente à 0.18 pour les sous-types spectraux T0-0.5 et augmente progressivement jusqu'à une valeur de 1.23 pour les naines T8. Il faut également remarquer que les naines M sont, dans la bande H , beaucoup plus brillantes en moyenne que les naines L et T.

Ainsi, grâce aux caractéristiques spectrales des objets ayant une faible température,

Type spectral	$H - CH_4$	H	N
M1-M9	0.09 ± 0.03	8.18	25
L1-L9	0.08 ± 0.02	14.94	66
T0-0.5	0.18 ± 0.05	15.00	8
T1-1.5	0.22 ± 0.06	15.81	7
T2-2.5	0.29 ± 0.04	15.67	9
T3-3.5	0.43 ± 0.04	15.79	7
T4-4.5	0.62 ± 0.04	15.37	6
T5-5.5	0.76 ± 0.05	15.98	7
T6-6.5	0.91 ± 0.03	15.43	5
T7-7.5	1.09 ± 0.07	15.61	5
T8	1.23 ± 0.10	15.64	1

Tableau 2.1 – Couleur $H - CH_4$ moyenne selon le type spectral de l'objet. Les données des spectres de ces calculs, ainsi que certaines techniques de calibration et de réduction pour ces spectres, proviennent des articles suivants : Burgasser et al. (2000, [14]; 2003, [11]), Chiu et al. (2006, [17]), Cruz et al. (2003, [18]), Fan et al. (2000, [22]), Geballe et al. (1996, [24]; 2002, [23]; 2004, [26]), Golimowski et al. (1998, [30]; 2000, [32]; 2004, [31]), Henry et al. (1994, [35]), Kirkpatrick et al. (1991, [41]; 1992, [36]; 1995, [42]; 1997, [39]; 1999b, [38]; 2000, [44]), Knapp et al. (2004, [45]), Leggett et al. (1999, [54]; 2000, [50]; 2001, [48]; 2002a, [52]; 2002b, [53]; 2003, [51]; 2004, [49]), Liu et al. (2006, [55]), Martín et al. (1999, [60]), McLean et al. (2003, [62]), Noll et al. (1997, [67]; 2000, [66]), Oppenheimer et al. (1998, [69]), Rayner et al. (2003, [70]), Reid et al. (2000, [72]; 2001, [71]), Ruiz et al. (1997, [74]), Schultz et al. (1998, [75]), Strauss et al. (1999, [77]), Tinney et al. (1998, [79]), Tsvetanov et al. (2000, [83]).

l'équipe a décidé d'utiliser le critère de la couleur $H - CH_4$ afin de différencier les objets recherchés du reste des étoiles du champ. Ceci élimine donc le problème associé aux couleurs proche-infrarouges des naines M et des naines T précoces, étant donné que l'on peut reconnaître les naines T par leur couleur $H - CH_4$ élevée. Il fallait donc prendre des images dans ces deux bandes différentes à chaque endroit du ciel que l'on observait. Un objet était retenu comme candidat si sa couleur $H - CH_4 \geq 0.2$. En vérifiant les valeurs de la couleur $H - CH_4$ pour les naines T, on peut dire qu'une incertitude au-delà de 0.1 sur cette couleur ne permet plus de distinguer les naines T précoces, qui sont les objets qui nous intéressent le plus. Mentionnons que ce critère a été défini à l'aide de la couleur $H - CH_4$ calculée à partir des modèles théoriques, et que le calcul effectué dans ce mémoire sur les spectres proche-infrarouges nous démontrent qu'un critère de

couleur $H - CH_4 \geq 0.15$ serait plus juste car il incluerait les naines T0 et T0.5.

Nous avons également décidé d'opter pour un relevé moins profond mais couvrant une plus grande surface du ciel, étant donné que le volume sondé croît moins rapidement si l'on sonde plus profondément (croît en $t^{3/4}$) que si l'on sonde une surface plus grande mais moins profonde (croît en t). Il est donc plus efficace de sonder une plus grande surface qu'une plus grande profondeur. Ainsi, la magnitude limite visée du relevé en bande H est de 16.4 et de 15.4 en bande CH_4 . Il a été estimé lors du projet qu'un temps d'intégration de 24 et 60 secondes respectivement serait suffisant pour obtenir un rapport S/B raisonnable pour nos observations.

Le relevé a été divisé en carrés de 4×4 champs CPAPIR (nommés MBDS#****, où chaque carré est numéroté). Ainsi, un carré MBDS de 4×4 champs CPAPIR (5.44 degrés carrés) prend environ 30 minutes à observer, en incluant le temps mort entre deux poses et le temps de déplacement. Ces champs ont été choisis dans des régions du ciel pouvant être observées également à partir de l'OMM. Ceci nous permet donc d'effectuer le suivi photométrique ou spectroscopique des candidates grâce à SIMON, en parallèle avec les observations de CPAPIR au CTIO. Les champs choisis évitent le plan galactique pour minimiser la contamination due à un trop grand nombre d'étoiles par image.

2.2.2 Critères de sélection complémentaires

Dans le but d'éliminer le plus grand nombre possible de faux-positifs, l'équipe a ajouté deux critères de sélection : la couleur $H - K_s \leq 0.6$, caractéristique des naines T (et également des naines M), ainsi que la détection d'un déplacement de l'objet (μ_{tot}), qui devait être $\geq 1''$ entre les images CPAPIR et 2MASS.

En effet, nous savons que les naines L et les naines T sont détectables aisément si elles se situent à l'intérieur d'un rayon d'environ 100 pc (Vrba et al. 2004,[84]) et nous savons également que les objets à proximité du soleil ont un mouvement propre plus élevé que les objets plus distants.

Ce dernier principe découle du fait que le mouvement propre (μ , en seconde d'arc par année) d'un objet est directement proportionnel à sa vitesse tangentielle (V_{tan} , en kilomètres par seconde) et inversement proportionnel à sa distance (d , en parsecs), tel

qu'exprimé par l'expression 2.1, tirée de Mihalas & Binney (1981,[63]) :

$$\mu = \frac{V_{tan}}{4.74 \times d} \quad (2.1)$$

On sait que le voisinage solaire est composé à forte majorité d'étoiles du disque. Chacune de ces étoiles, partageant une même vitesse de rotation autour du centre galactique, a un mouvement spatial caractéristique qui est dû à la dispersion des vitesses (composante aléatoire). Cette composante fait en sorte que les étoiles à proximité du soleil ont un mouvement propre mesurable, étant donné qu'elle est de l'ordre de 60 km/s pour les naines M, les étoiles les plus communes de la Galaxie. Grâce à l'équation 2.1 et si on impose une limite inférieure de 0.2"/an pour nos objets (ce qui correspond à un déplacement total d'environ 1" entre nos images et celles de 2MASS), on calcule qu'une telle technique permet de détecter les naines M jusqu'à une distance de 65 pc, ce qui correspond également à la limite de détectabilité de 2MASS.

Vrba et al. (2004,[84]) ont calculé la vitesse tangentielle médiane des naines L et T ayant une parallaxe connue et ont trouvé les valeurs respectives de 25 et 39 km/s. Ceci signifie que presque toutes les naines T peuvent être détectées à l'intérieur de 25 pc et environ la moitié des naines L à l'intérieur d'un rayon de 50 pc.

De plus, on peut négliger l'effet dû à la rotation différentielle de la Galaxie. En effet, selon Mihalas & Binney (1981,[63]), l'expression reliant le mouvement propre à la longitude galactique ℓ d'un objet observé est la suivante :

$$\mu_{\ell} = \frac{A \cos 2\ell + B}{4.74} \quad (2.2)$$

où A et B sont des constantes. En 1964, l'UAI a adopté les valeurs de $A = 0.015 \text{ km s}^{-1} \text{ pc}^{-1}$ et de $B = -0.010 \text{ km s}^{-1} \text{ pc}^{-1}$, obtenues par Blaauw & Schmidt (1965,[7]). La valeur de μ_{ℓ} n'est donc jamais plus grande que 0.005"/an, ce qui est négligeable face à un critère de 0.2"/an.

Enfin, on sait que les étoiles dans la Galaxie ont une vitesse limite de déplacement au-delà de laquelle les étoiles sont éjectées de la Galaxie. Celle-ci est estimée à $\sim 400 \text{ km/s}$ (Mihalas & Binney 1981,[63]). Alors, comme V_{tan} est limitée par cette vitesse limite,

il existe une certaine distance au-delà de laquelle il devient plus difficile de mesurer le mouvement propre, qui est d'environ 1000 pc. La valeur typique du mouvement propre est de quelques centièmes de seconde d'arc par année. L'étoile ayant le plus grand mouvement propre connu est l'étoile de Barnard ($10.3''/\text{an}$) située à 1.83 pc ($V_{tan}=90$ km/s), ce qui en fait la cinquième étoile la plus proche de la Terre, après le Soleil et les trois étoiles du système d'Alpha du Centaure.

Ainsi, statistiquement, les étoiles dans le voisinage solaire ont un mouvement propre plus élevé que les étoiles situées plus loin dans la Galaxie, ce qui n'empêche pas la possibilité qu'une étoile éloignée ait un mouvement propre plus élevé qu'une étoile plus proche.

Afin de pouvoir utiliser les critères de sélection du mouvement propre et de la couleur $H - K_s$, l'équipe a besoin des observations du relevé 2MASS. Celui-ci possède une composante « faint extension » qui contient des objets pouvant être jusqu'à 1 magnitude plus faibles que la limite de détectabilité du relevé. Ceci nous donne accès à des images J , H , et K_s de l'ensemble du ciel et qui ont été prises au plus tard en 2001, ce qui nous permet de calculer aisément le déplacement des objets détectés par CPAPIR en comparant leur position aux images de 2MASS prises quelques années auparavant. La couleur $H - K_s$ de nos objets peut aussi être déterminée grâce aux données 2MASS.

Finalement, nous vérifions chaque candidate par inspection visuelle afin de déceler toute trace d'irrégularité qui aurait pu produire un faux-positif. Cela nous permet du même coup de vérifier qu'aucune contrepartie visible (en bande I) n'est présente à proximité de la candidate. Nous nous servons du catalogue d'images DSS pour obtenir les images visibles. Nous utilisons également la base de données astronomiques Simbad afin de vérifier si l'objet est catalogué dans cette base de données. Donc, bien que nous ayons nommé cette technique « détection de couleur $H - CH_4$ », il est important de mentionner que la sélection n'est pas basée uniquement sur cette couleur mais aussi sur d'autres critères de sélection.

2.2.3 Estimation de l'incertitude sur les magnitudes

On peut estimer, à partir d'images CPAPIR prises en bande H , l'incertitude sur des objets observés pour différentes magnitudes. Comme les objets que l'on recherche sont généralement faibles, on ne peut supposer que l'incertitude sur nos mesures soit dominée par le bruit de photons de la source. Il faut donc utiliser également le bruit du ciel pour calculer le rapport S/B d'une source et estimer l'incertitude sur cette mesure. En effet, l'écart-type du ciel autour d'une source mesure le bruit interne total pour chaque pixel. Cependant, la mesure de l'écart-type du ciel reste une approximation car elle ajoute également dans le calcul du bruit des objets très faibles éparpillés dans le champ qui ne sont pas mesurables et qui peuvent contaminer l'écart-type. Ainsi, cette mesure surestime légèrement le bruit interne total qui est de nature aléatoire. Pour calculer le rapport S/B , on utilise l'équation dérivée par Newberry (1991,[65]) :

$$S/B \sim \frac{C_0^{1/2}}{[1 + n\sigma_{bg}^2 C_0^{-1} (1 + \frac{1}{p})]^{1/2}} \quad (2.3)$$

où C_0 est le nombre d'électrons attribuables à l'objet observé, n est le nombre de pixels sur le détecteur utilisés pour calculer le flux de l'objet, σ_{bg} est l'écart-type du ciel autour de l'objet (en électrons) et p est le nombre de pixels utilisés pour calculer l'écart-type du ciel autour de l'objet.

Avec le rapport S/B de cette source, on peut ensuite mesurer l'incertitude sur la magnitude en bande H :

$$\sigma(m) = 2.5 \log \left(\frac{S+B}{S} \right) = 2.5 \log \left(1 + \frac{B}{S} \right) \quad (2.4)$$

Pour estimer le rapport S/B , et donc l'incertitude sur la magnitude, nous avons sélectionné quatre étoiles de magnitudes différentes (en bande H , selon le PSC de 2MASS) dans un champ CPAPIR pris au hasard. L'étalement (« seeing ») de ce champ représente bien ce que l'on obtient typiquement avec CPAPIR au CTIO, avec une pleine largeur à mi-hauteur de 1.95 pixel en moyenne. La première étoile a une magnitude de 12.94 et est située à 23h31m02.2s et +07d22m21.7s. La deuxième étoile a une magnitude de

14.02 et est située à 23h31m04.8s et +07d24m18.4s. La troisième étoile a une magnitude de 15.07 et est située à 23h31m06.2s et +07d20m25.1s. La dernière étoile a une magnitude de 15.92 et est située à 23h31m09.7s et +07d16m50.2s. Pour chaque cas, les coordonnées sont données à l'époque J2000.0. Nous avons calculé le flux de ces étoiles pour trois situations différentes : un cercle centré sur l'étoile, de rayon 1.25 pixel (avec une ouverture sur le ciel dans un anneau de rayon situé entre 3 et 6 pixels), un cercle centré sur l'étoile, de rayon 2 pixels (avec une ouverture sur le ciel dans un anneau de rayon situé entre 4 et 8 pixels) et un cercle centré sur l'étoile, de rayon 3 pixels (avec une ouverture sur le ciel dans un anneau de rayon situé entre 5 et 10 pixels). Nous avons pris soin de soustraire le ciel sur les pixels sommés pour calculer le flux des étoiles.

Les résultats de nos calculs sont présentés à la figure 2.1, où l'on présente le rapport S/B des quatre étoiles pour les trois ouvertures, et à la figure 2.2, où l'on présente l'incertitude sur la magnitude des étoiles pour les trois ouvertures.

D'après les résultats des figures 2.1 et 2.2, on remarque que pour calculer la photométrie de toutes les étoiles du champ, l'ouverture de 1.25 pixel est celle qui optimise le rapport S/B, et donc minimise l'incertitude statistique calculée sur la magnitude. De plus, on remarque que plus la magnitude est faible, plus les différences entre les ouvertures semblent importantes. Il faut aussi ajouter qu'à la magnitude 16, en supposant que l'incertitude en bande CH_4 est approximativement la même qu'en H , l'incertitude statistique fait en sorte que l'on ne peut plus se fier à la couleur $H - CH_4$ pour identifier le sous-type des naines T et que les naines T précoces seront difficiles à cibler.

Lors de l'analyse photométrique des images CPAPIR, l'équipe a décidé de calculer la magnitude des étoiles du champ à partir de l'ouverture 1.25 pixel seulement, afin de minimiser l'incertitude statistique sur la magnitude.

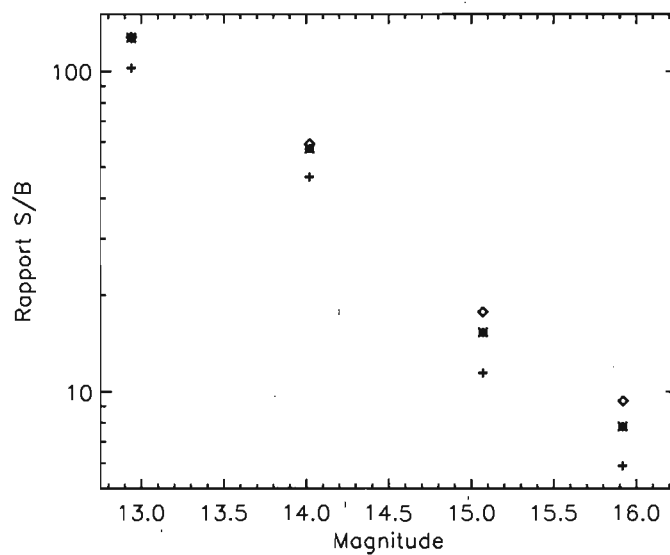


Figure 2.1 – Rapport S/B des quatre étoiles (en échelle logarithmique) en fonction de la magnitude en bande H . Le symbole $[\diamond]$ désigne l'ouverture de 1.25 pixel, le symbole $[*]$ l'ouverture de 2 pixels et le symbole $[+]$ l'ouverture de 3 pixels.

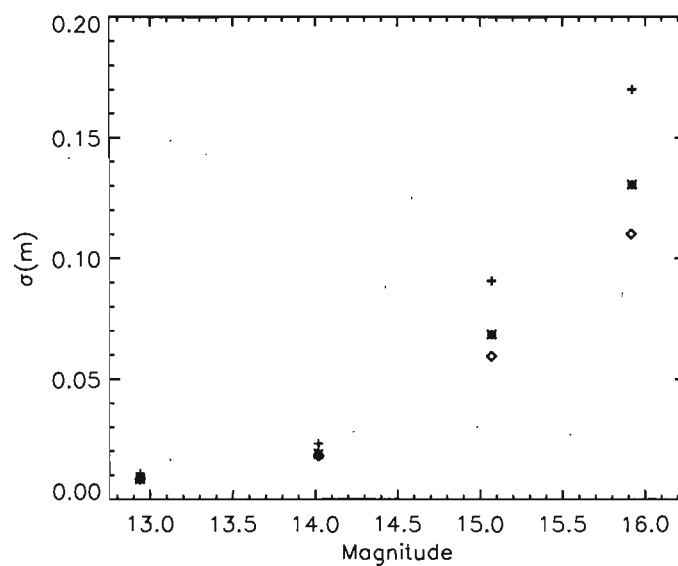


Figure 2.2 – Incertitude sur la magnitude des quatre étoiles en fonction de la magnitude en bande H . Le symbole $[\diamond]$ désigne l'ouverture de 1.25 pixel, le symbole $[*]$ l'ouverture de 2 pixels et le symbole $[+]$ l'ouverture de 3 pixels.

2.2.4 Résultats

En 2005, CPAPIR a été utilisé pour ce relevé durant 94 nuits, pour un total de 248 carrés MBDS observés, soit 1350 degrés carrés (un peu plus de 3% de la surface du ciel).

Des 248 carrés MBDS observés, 136 ont pu être traités jusqu'à l'étape de l'analyse pour détecter les candidates. Ceci représente une surface de 740 degrés carrés (un peu moins de 2% du ciel). Certains champs n'ont pu être analysés pour diverses raisons : certaines images étaient corrompues dans l'une ou l'autre des deux bandes, certains champs ne pouvaient être reliés au champ 2MASS correspondant (ce qui nous empêchait d'obtenir la photométrie et l'astrométrie du champ), etc.

Les résultats de l'analyse du carré MBDS où l'on a découvert la candidate C053116-032405 sont présentés dans les figures 2.3, 2.4 et 2.5. Cette candidate est représentée dans les figures par $[\diamond]$. Dans ce carré, on retrouve 16721 sources (représentées par $[\cdot]$) dont la magnitude moyenne en bande H est de 14.30. On y a également ajouté les valeurs théoriques pour des naines T précoces connues (représentées par $[+]$) et pour des naines T tardives connues (représentées par $[*]$). Les critères de sélection de nos candidates sont délimités par les lignes continues.

En observant la figure 2.3, qui représente la couleur $H - CH_4$ en fonction de H , on remarque que plusieurs sources (1658 au total, soit près de 10% du nombre total de sources) ont une couleur $H - CH_4 \geq 0.2$. En effet, l'incertitude sur la couleur $H - CH_4$ au-delà de la magnitude 15 en bande H fait en sorte que plusieurs étoiles faibles du champ ont une couleur $H - CH_4$ caractéristique des naines T. Ceci justifie l'utilisation de critères de sélection additionnels.

Une autre remarque que l'on peut faire est que la moyenne de la couleur $H - CH_4$ de l'ensemble des étoiles du champ est de 0.02. Ceci provient du fait que nous avons posé, lors de notre calibration photométrique de la bande CH_4 , que le sous-ensemble des étoiles 2MASS associées aux sources CPAPIR, qui servaient à calibrer le point zéro de la magnitude, avaient une couleur $H - CH_4$ nulle en moyenne. Or, le tableau 2.1 nous indique que ceci est incorrect, car la valeur moyenne calculée à partir de 25 spectres d'étoiles M, qui dominent la population des étoiles du champ, démontre qu'elles ont une

couleur $H - CH_4$ de 0.09 ± 0.03 . Ainsi, les valeurs de la couleur $H - CH_4$ calculées sont systématiquement ~ 0.07 plus basses qu'elles ne devraient l'être. Cependant, en corrigeant les valeurs de la couleur $H - CH_4$ par cette erreur systématique, on augmente du même coup le nombre de sources ayant une couleur $H - CH_4 > 0.2$, et donc les chances de détecter des faux-positifs s'en trouvent affectées. Sauf indication contraire, nous n'incluons pas cette correction lorsque l'on présente la couleur $H - CH_4$ des candidates. Ceci pose donc un problème car les candidates les plus intéressantes que l'on désire découvrir sont les T précoces qui ont une couleur $H - CH_4$ qui se situe entre 0.18 et 0.62.

La figure 2.4 montre le diagramme de la couleur $H - CH_4$ en fonction du déplacement total entre nos observations et celles de 2MASS. La moyenne pour l'ensemble des étoiles du champ est de $0.29''$, ce qui représente un mouvement propre d'environ $0.06''/\text{an}$. On remarque également que deux naines T précoces sont exclues par notre critère de sélection. Ceci démontre qu'il est possible que ce critère de sélection rejette des candidates. Les naines T précoces sont plus aptes à subir ce rejet parce qu'elles sont plus brillantes, et donc visibles à des distances plus éloignées que les naines T tardives. Des objets proches qui auraient par hasard un mouvement propre petit seraient également rejetés par ce critère. Cependant, ce critère reste celui qui élimine le plus grand nombre de sources du champ.

Finalement, la figure 2.5, représente le diagramme $H - CH_4$ en fonction de $H - K_s$, et nous démontre que le critère de sélection $H - K_s$ n'élimine pas beaucoup de sources (436 sources) étant donné que la couleur $H - K_s$ moyenne des étoiles du champ est de 0.20. Ce critère nous permet d'éliminer les naines L, celles-ci ayant une couleur $H - K_s$ plus rouge que les naines T, et de sélectionner uniquement les naines T qui, elles, sont assurément des naines brunes et qui sont plus difficiles à détecter.

Dans ce carré MBDS, une seule candidate est retenue par nos critères de sélection. Cette technique a été appliquée sur les 136 carrés MBDS analysés, ce qui nous a permis d'obtenir une liste de 40 candidates. De ces 40 candidates, le tableau 2.2 présente les cinq candidates qui ont été observées à des fins de classification. Nous avons également ajouté une naine T connue qui a été redétectée par notre relevé. Dans ce tableau, on y

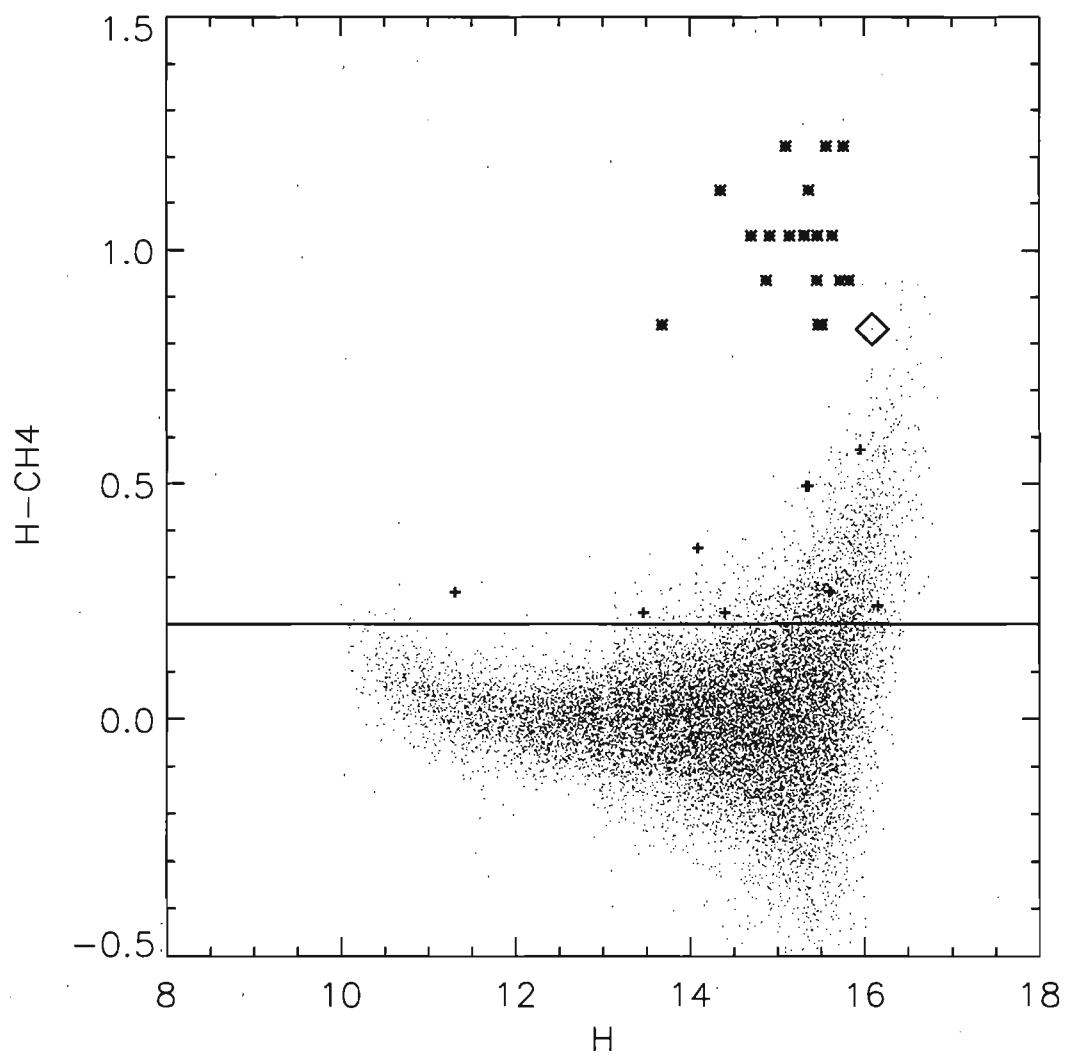


Figure 2.3 – Diagramme couleur $H - CH_4$ en fonction de la magnitude en bande H .

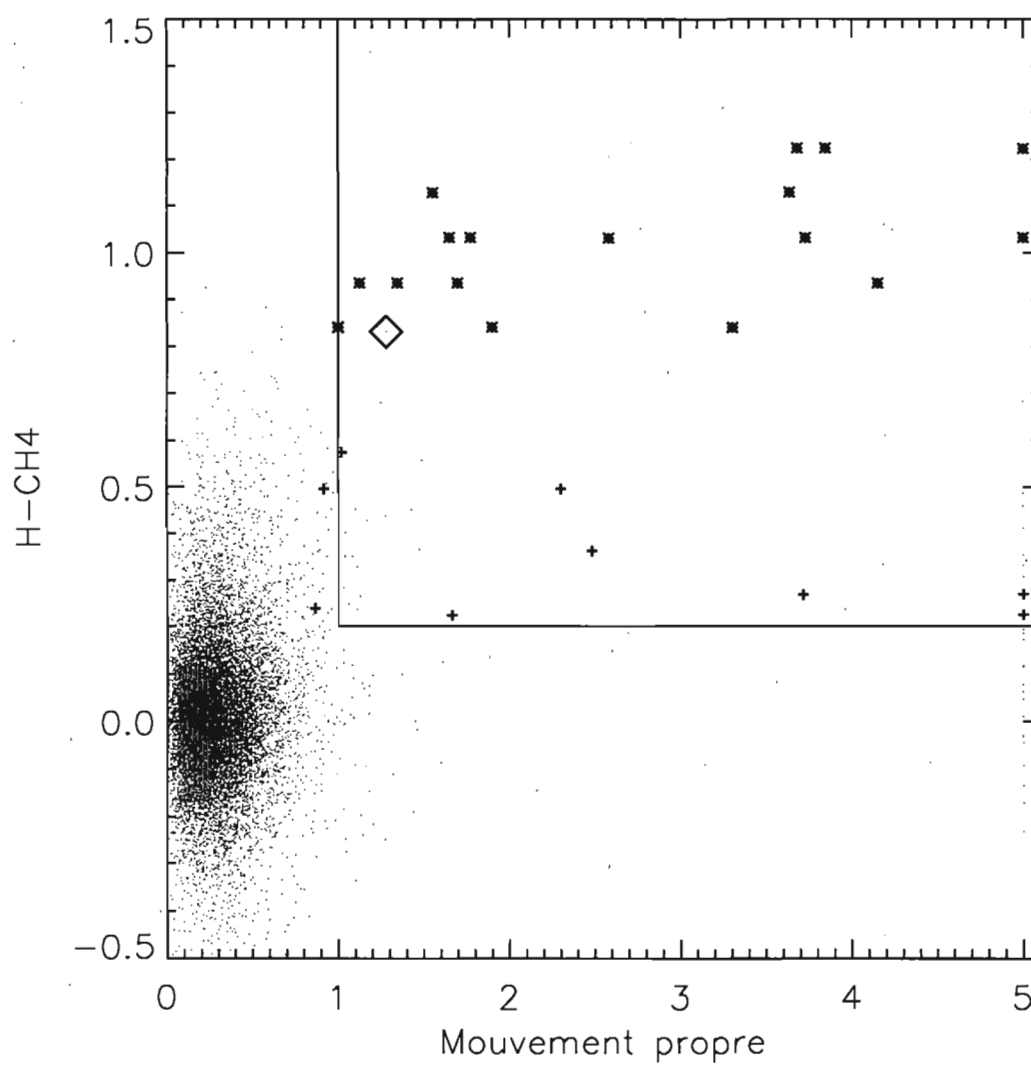


Figure 2.4 – Diagramme couleur $H - CH_4$ en fonction du mouvement propre total en seconde d'arc entre l'époque CPAPIR (2005.805) et 2MASS (1998.795).

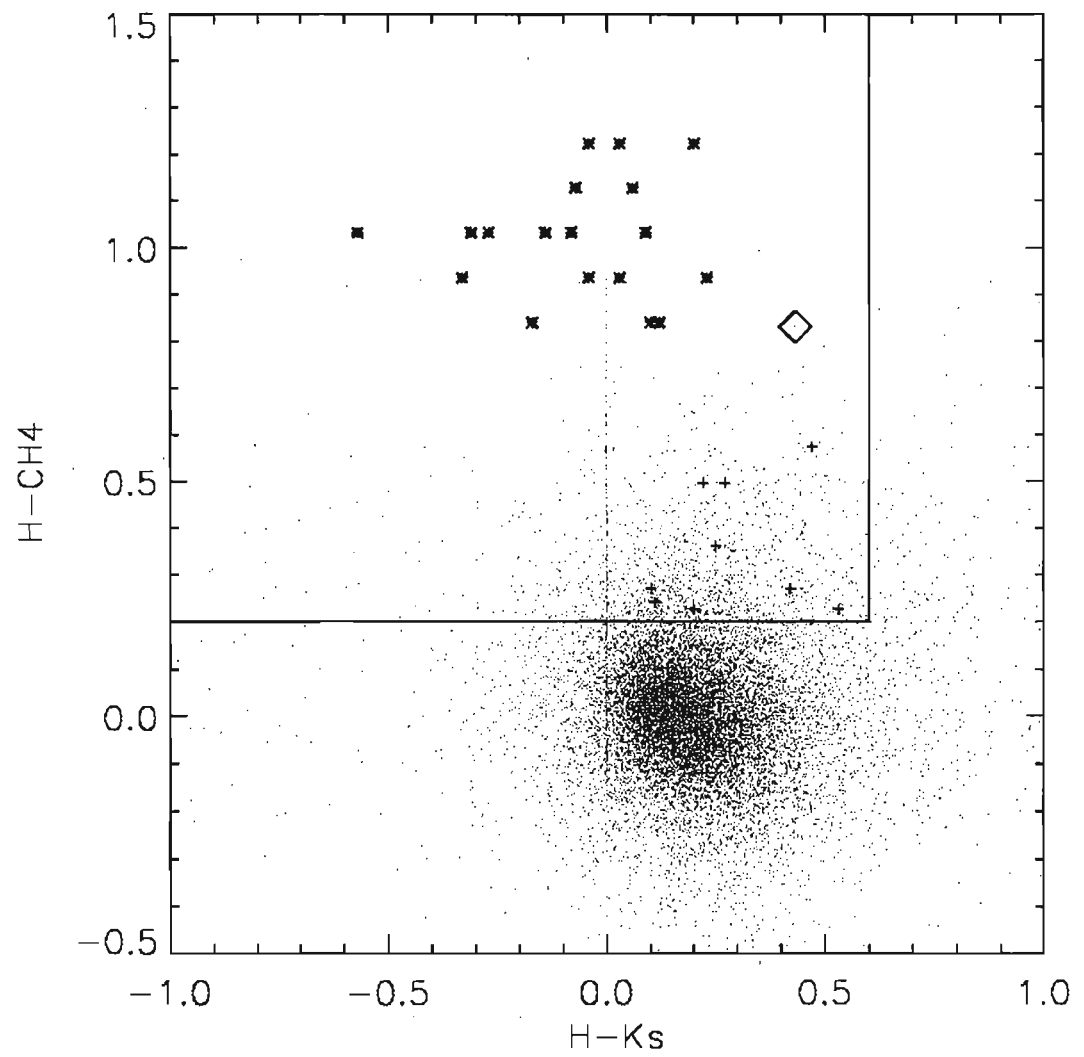


Figure 2.5 – Diagramme couleur $H - CH_4$ en fonction de la couleur $H - K_s$.

retrouve en ordre, à partir de la première colonne, le nom des candidates², la magnitude en bande H mesurée avec CPAPIR, la couleur $H - CH_4$ mesurée avec CPAPIR, la couleur $H - K_s$ mesurée avec 2MASS et le mouvement propre total en seconde d'arc entre nos observations et celles de 2MASS.

Nom de l'objet	H_{cpp}	$(H - CH_4)_{cpp}$	$(H - K_s)_{2m}$	μ_{tot}
2MASSI J1217110-031113	16.49	0.96	-0.14	6.74''
C015426+104002	15.62	0.46	0.41	1.14''
C015729+044726	16.42	0.28	0.52	8.85''
C053116-032405	16.09	0.83	0.43	1.28''
C114451+104831	16.40	0.35	0.01	2.33''
C235507+095656	16.38	0.22	-0.34	1.09''

Tableau 2.2 – Liste de quelques candidates découvertes par détection de couleur $H - CH_4$.

On remarque que nous avons analysé un champ contenant une naine T déjà connue : 2MASS1217110-031113 (T7.5). Nous avons réussi à détecter celle-ci dans un champ observé, et avons mesuré une magnitude en bande H de 16.49 (valeur réelle de 15.75), une couleur $H - CH_4$ de 0.96 (en ajustant avec la correction, on obtient 1.03 et sa valeur théorique est de 1.09), et un mouvement propre de 6.74'' (valeur réelle de 6.38''). Cette redécouverte est intéressante mais on remarque une différence de 0.75 magnitude entre notre mesure en bande H et celle mesurée par 2MASS. Cette différence majeure, qui représente une erreur importante remettant en cause cette méthode de détection, sera discutée à la section 2.2.5

²Les sources ont été nommées Chhmmss+ddmmss où C désigne l'abréviation de « Candidate » et hhhmmss+ddmmss représente la position de l'objet en ascension droite et en déclinaison en coordonnées J2000.0. Une fois qu'un objet a été présenté, nous le désignons par la suite en abréviation en ne gardant que les quatres premiers chiffres de sa position en ascension droite (hhmm) et en déclinaison (ddmm) en coordonnées J2000.0.

2.2.5 Discussion des résultats

Nous avons vu à la section 2.2 qu'une précision d'environ 0.1 magnitude sur la couleur $H - CH_4$ serait suffisante pour différencier les naines T précoces des étoiles du champ. Ainsi, la figure 2.2 nous montre qu'une telle précision est possible jusqu'à une magnitude un peu plus faible que 15 en bande H avec l'ouverture 1.25 de pixel.

Cependant, en observant les résultats obtenus par l'analyse des données CPAPIR, on remarque dans certains cas une grande différence entre notre photométrie et celle de 2MASS. Nous avons cherché à déterminer l'origine de cette différence.

La technique initiale utilisée lors de l'analyse photométrique des données a été d'utiliser systématiquement l'ouverture de 1.25 pixel avec un anneau de ciel entre 3 et 6 pixels. En théorie, ceci est un choix juste, comme nous l'avons vu à la section 2.2.3, car il optimise le rapport S/B et minimise donc l'incertitude sur les magnitudes calculées. Ceci est valide si l'on suppose que les profils des PSF des étoiles ne varient pas. Cependant, nous avons découvert dans le cours de l'analyse que cette supposition n'est pas valide. Ainsi, en choisissant l'ouverture de 1.25 pixel, on se trouvait à couper une partie importante de la PSF pour certaines sources, et ainsi à couper du flux lors du calcul de la magnitude. Les sources avaient ainsi une magnitude plus faible qu'en réalité.

Nous pouvons bien observer ce phénomène aux figures 2.6, 2.7 et 2.8. On y voit, dans un champ CPAPIR, la différence en magnitude entre la photométrie en bande H de 2MASS et celle de CPAPIR (δ_m) en fonction de la magnitude en bande H de 2MASS, et ce, pour les ouvertures de 1.25, 2 et 3 pixels respectivement. Dans ces trois figures, la ligne horizontale représente la moyenne de l'ensemble des points. Le tableau 2.3 résume les données sur la moyenne et l'écart-type des trois figures présentées, et ce, pour deux domaines de magnitude différents, soit entre 10 et 14 et entre 10 et 16.

D'abord, on observe que la valeur moyenne de l'ensemble des points (Moyenne_{10-16}), pour chacune des ouvertures, est négative, mais que plus l'ouverture est grande, plus la moyenne se rapproche de zéro. La moyenne pour l'ouverture de 1.25 pixel est de -0.079 et elle est de -0.018 pour l'ouverture de 3 pixels. Ceci concorde bien avec l'hypothèse qu'une partie du flux n'est pas incluse dans le calcul de la photométrie pour l'ouver-

ture de 1.25 pixel. En effet, comme la moyenne est négative, cela signifie que certaines étoiles dans 2MASS ont des magnitudes plus basses que dans CPAPIR. Le fait que la moyenne se rapproche de zéro pour les ouvertures plus grandes signifie qu'une plus grande fraction du flux est incluse dans le calcul de la photométrie des sources CPAPIR.

De plus, en regardant les trois figures, on remarque que les valeurs de δ_m semblent plus éparpillées pour l'ouverture de 1.25 pixel que pour les autres ouvertures, spécifiquement pour les sources de magnitude située entre 10 et 14. Ceci peut être mesuré en calculant l'écart-type des sources, que l'on retrouve au tableau tableau 2.3. Ainsi, on constate que pour les sources de magnitude située entre 10 et 14, l'écart-type s'améliore d'un facteur deux entre l'ouverture de 1.25 pixel et celle de 3 pixels, passant de 0.139 à 0.066. Ceci signifie que pour ces sources, les incertitudes sont moins importantes pour de plus grandes ouvertures.

À noter que c'est l'ouverture de 2 pixels qui optimise l'écart-type lorsqu'il est question de l'ensemble des sources (de magnitude 10 à 16), et que dans ce cas, l'écart-type pour l'ouverture de 3 pixels est plus grand que celui pour l'ouverture de 1.25 pixel, même si la différence est minime. Ceci s'explique par le fait qu'à des magnitudes plus élevées, l'incertitude statistique est d'autant plus grande pour l'ouverture de 3 pixels, le rapport S/B étant plus faible, comme le montre la figure 2.2.

Il est facile de voir à partir des trois figures que, peu importe l'ouverture, l'erreur systématique fait en sorte qu'il y a un effet de sélection lorsque l'on choisit nos candidates. En effet, les étoiles ayant de grandes incertitudes sont favorisées à cause de notre critère de sélection $H - CH_4 \geq 0.2$. Ceci explique pourquoi, à la figure 2.3, près de 10% du nombre total de sources ont une couleur $H - CH_4 \geq 0.2$.

	1.25 pixel	2 pixels	3 pixels
Moyenne ₁₀₋₁₆	-0.079	-0.027	-0.018
Moyenne ₁₀₋₁₄	-0.050	-0.008	-0.005
Écart-type ₁₀₋₁₆	0.187	0.167	0.189
Écart-type ₁₀₋₁₄	0.139	0.087	0.066

Tableau 2.3 – Moyenne et écart-type pour deux différents domaines de magnitude aux trois ouvertures utilisées.

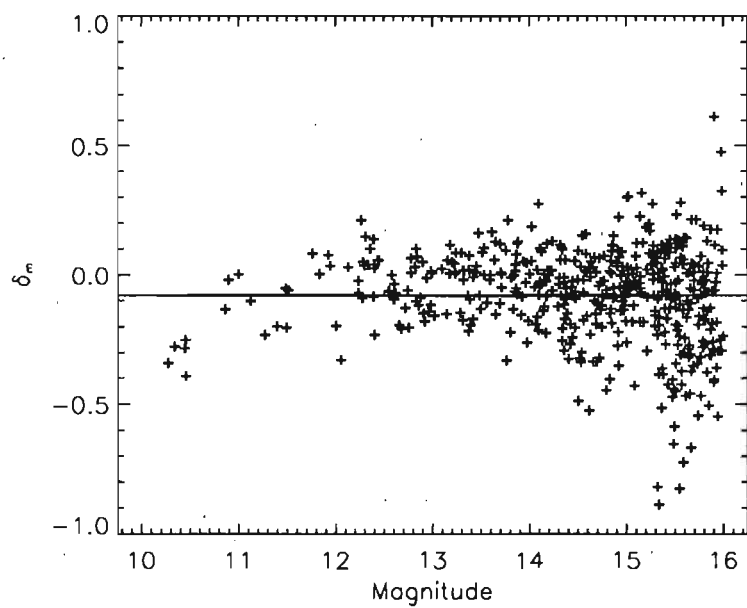


Figure 2.6 – Différence des magnitudes CPAPIR et 2MASS en fonction de la magnitude en bande H de 2MASS pour l'ouverture 1.25 pixel.

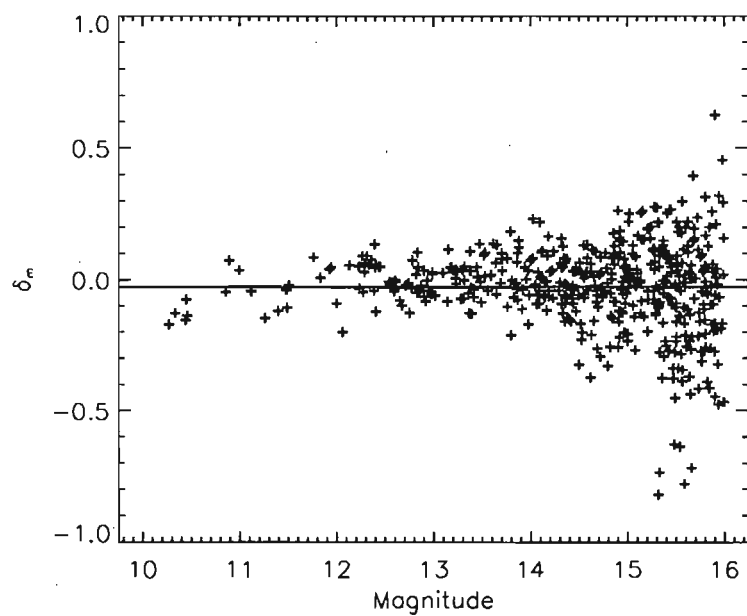


Figure 2.7 – Différence des magnitudes CPAPIR et 2MASS en fonction de la magnitude en bande H de 2MASS pour l'ouverture 2 pixels.

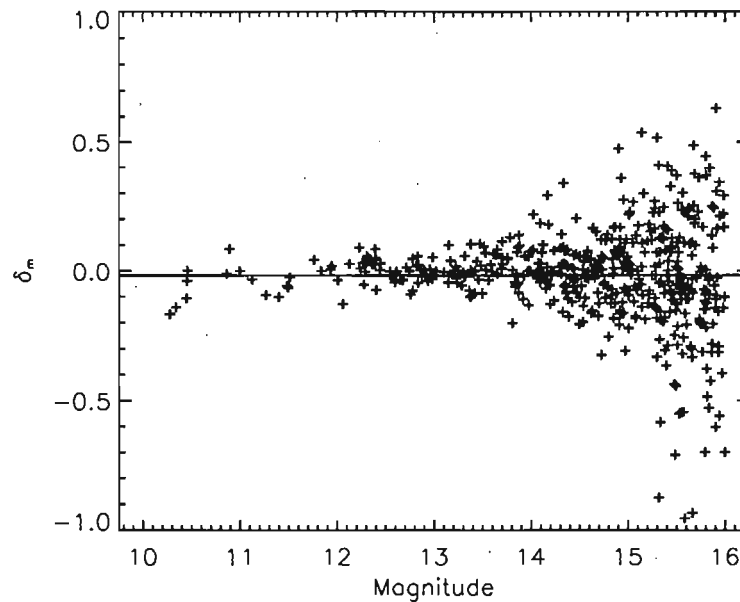


Figure 2.8 – Différence des magnitudes CPAPIR et 2MASS en fonction de la magnitude en bande H de 2MASS pour l'ouverture 3 pixels.

Nous avons dénombré pour les trois ouvertures les sources qui ont une couleur $H - CH_4 \geq 0.2$ dans l'image utilisée pour construire les figures 2.6, 2.7 et 2.8. Ainsi, nous avons détecté 64 sources avec l'ouverture de 1.25 pixel. Cependant, avec les ouvertures de 2 pixels et 3 pixels, nous avons détecté 31 sources pour chacune d'elles. Toutefois, il faut mentionner que même si nous avons détecté le même nombre de sources ayant une couleur $H - CH_4 \geq 0.2$ pour les ouvertures de 2 et de 3 pixels, certaines de ces sources n'étaient pas communes aux deux ouvertures.

Le fait qu'il y ait plus du double de sources pour l'ouverture de 1.25 pixel comparativement aux autres ouvertures nous indique qu'il y a un problème avec cette plus petite ouverture. Il devrait y en avoir approximativement autant pour les trois ouvertures différentes. Ceci confirme une fois de plus que la photométrie calculée par l'ouverture de 1.25 pixel n'est pas adéquate.

De plus, en vérifiant les sources ayant une couleur $H - CH_4 \geq 0.2$ et qui sont communes aux trois ouvertures, on remarque qu'il y a dans certains cas de grosses diffé-

rences de couleur entre les trois ouvertures. C'est ce que nous indique le tableau 2.4. On remarque que seulement 15 sources sont communes aux trois ouvertures. On constate que pour 9 des 15 sources la couleur $H - CH_4$ varie de plus de 0.10 entre l'une ou l'autre des ouvertures. Dans le cas des étoiles plus brillantes (celles de magnitude entre 9 et 11), ceci provient indéniablement du fait qu'une partie du flux est coupée lorsque l'on utilise l'ouverture de 1.25 pixel, venant ainsi influencer la couleur $H - CH_4$.

Il est facile de voir maintenant l'effet de sélection produit par notre méthode de détection de naines brunes. En utilisant l'ouverture de 1.25 pixel, plusieurs sources semblent à avoir une couleur $H - CH_4 \geq 0.2$, alors qu'il n'en est rien en réalité. Certaines de ces sources se trouvent également à avoir un mouvement propre $\geq 1''$ entre les images CPA-PIR et 2MASS et une couleur $H - K_s \leq 0.6$. Ainsi, si l'on tient compte du fait que la couleur $H - CH_4$ peut être erronée, les naines M ont des caractéristiques qui tombent dans nos critères de sélection. On se trouve donc à sélectionner des naines M plus souvent qu'autrement. C'est pour cette raison que nous n'avons pas inclus au tableau 2.2 toutes les candidates trouvées par cette méthode de détection.

Comme le montrent la figure 2.8 et le tableau 2.3, l'utilisation de l'ouverture de 3 pixels reste néanmoins un choix beaucoup plus judicieux dans le calcul des magnitudes, même si l'incertitude statistique se trouve à augmenter à partir des sources de magnitude 15. Malheureusement, avec le temps d'intégration utilisé et l'ouverture de 3 pixels, les sources de magnitude plus faible que 15 deviennent inutilisables car l'incertitude sur la couleur $H - CH_4$ devient plus grande que 0.1, comme on peut le constater à la figure 2.2.

Pour garder la même méthode de détection de naines brunes, la solution aurait été de prendre des poses plus longues sur chacun de nos champs afin d'augmenter le rapport S/B. Afin d'utiliser l'ouverture de 3 pixels et d'avoir un rapport S/B suffisant pour avoir une incertitude d'environ 0.1 magnitude sur la couleur $H - CH_4$ pour les sources allant jusqu'à la magnitude 16, il nous aurait fallu intégrer environ 2.5 fois plus de temps dans les deux bandes, soit 60 secondes en bande H et 150 secondes en bande CH_4 . Cependant, il est évident que nous aurions perdu beaucoup d'efficacité en procédant ainsi, ce qui n'aurait pas été avantageux.

Lors des observations à des fins de classification des cinq candidates provenant de

cette méthode de détection, cette erreur systématique qui affectait notre liste de candidates n'avait pas été identifiée. Cependant, comme nous le verrons à la section 4.2.2, aucune des cinq candidates observées à des fins de classification ne s'étant révélée être une naine T, l'équipe a aussitôt réagi, non pas en intégrant plus longtemps sur les champs, mais en développant une nouvelle stratégie de détection de naines brunes n'utilisant pas la couleur $H - CH_4$.

Coordonnées	H_{2m}	$(H - CH_4)_{1.25}$	$(H - CH_4)_2$	$(H - CH_4)_3$
23h30m23.8s +7d12m48.6s	15.90	0.40	0.41	0.48
23h30m28.1s +7d17m54.9s	15.03	0.30	0.20	0.25
23h30m38.2s +7d14m08.4s	9.85	0.74	0.44	0.21
23h30m46.6s +7d14m28.5s	15.38	0.44	0.34	0.27
23h30m54.2s +7d21m01.6s	9.81	0.79	0.41	0.24
23h30m54.2s +7d36m29.1s	15.91	0.39	0.38	0.24
23h30m58.1s +7d15m21.9s	10.01	0.76	0.43	0.28
23h31m14.9s +7d20m36.1s	15.93	0.37	0.43	0.39
23h31m21.8s +7d09m39.5s	15.71	0.51	0.37	0.32
23h31m30.5s +7d11m37.1s	14.80	0.28	0.25	0.23
23h31m31.2s +7d21m17.1s	15.57	0.31	0.36	0.66
23h31m46.8s +7d18m36.6s	15.58	0.35	0.29	0.32
23h32m07.0s +7d09m11.7s	15.79	0.42	0.24	0.29
23h32m10.3s +7d13m21.5s	15.93	0.55	0.51	0.40
23h32m20.6s +7d09m53.9s	15.08	0.32	0.23	0.25
Moyenne	14.42	0.46	0.35	0.32

Tableau 2.4 – Liste de sources communes aux trois ouvertures ayant une couleur $(H - CH_4) \geq 0.2$.

2.3 Stratégie par détection de mouvement propre

Nous avons vu que la stratégie par détection de couleur $H - CH_4$ pose quelques problèmes. En 2006, l'équipe a décidé de modifier sa stratégie de détection pour que celle-ci soit basée principalement sur le critère du mouvement propre.

La stratégie précédente utilisait la supposition que les naines T s'étaient déplacées d'au moins $1''$ entre les observations CPAPIR et celles de 2MASS et il a été démontré à la figure 2.4 que ce critère permet d'éliminer efficacement un grand nombre de sources du champ. Or, cette limite inférieure imposée pour le déplacement des sources exclut la détection de certaines naines T précoces ayant un mouvement propre plus faible. De plus, le critère de couleur $H - CH_4$ empêche la découverte de naines L, dont les types plus tardifs peuvent être également des naines brunes.

Une utilisation plus juste du critère du mouvement propre nous permet d'identifier des objets ne présentant pas la signature spectrale du CH_4 (comme les naines L et même les naines M). De plus, si l'on connaît précisément le mouvement propre d'un objet, nous pouvons prédire sa position à n'importe quelle époque, et ainsi nous servir de relevés dans le visible (comme DSS par exemple) pour poser des contraintes précises sur la magnitude I de l'objet (et donc sur la couleur $I - J$). Une valeur de $I - J \geq 3.5$ permet à elle seule de différencier les naines T des naines M. De plus, les naines L sont différenciables des naines M parce qu'elles ont une couleur $J - H$ plus rouge que ces dernières.

Il est inutile de continuer à observer dans la bande CH_4 si notre critère principal de détection de candidates est le mouvement propre. Notre relevé deviendrait donc beaucoup plus efficace si l'on n'avait plus à observer dans la bande CH_4 , ce qui permettrait, à chaque nuit, de couvrir une plus grande région du ciel, sans même affecter le nombre de candidates trouvées. D'autant plus que nous avons vu à la section 2.2.5 qu'il faudrait intégrer 2.5 fois plus de temps dans les deux bandes si l'on veut obtenir un rapport S/B suffisant pour identifier des candidates de magnitude 16 en bande H . Nous avons donc décidé de continuer le relevé en bande J seulement. Cette bande de CPAPIR a une longueur d'onde centrale $\lambda_c = 1.25 \mu m$ et une largeur $\Delta\lambda = 0.16 \mu m$. Il faut noter qu'elle

est significativement plus étroite que la bande J de 2MASS (largeur $\Delta\lambda = 0.25 \mu m$) afin d'éviter plus efficacement les bandes d'absorption tellurique due au H_2O . La bande J a été choisie plutôt que la bande H (ou K_s) puisque la bande J a un fond de ciel moins important que les autres bandes (ce qui améliore du même coup le rapport S/B) et que les naines T ont des couleurs $J - H$ et $H - K_s$ relativement bleues. Nous avons opté pour un temps d'intégration de 24 secondes pour cette bande.

La méthode utilisée afin d'identifier les candidates est la suivante. D'abord, une procédure automatique est utilisée pour trouver les sources CPAPIR qui n'ont pas de contrepartie à l'intérieur d'un rayon de $0.7''$ dans le PSC (ce qui permet de détecter des mouvements propres aussi petits que $0.08''/an$). Pour ces sources, on cherche dans le PSC à l'intérieur d'un rayon de $15''$ la source la plus proche de la position de la source CPAPIR et qui n'a pas encore été associée avec une autre source. La procédure vérifie ensuite la photométrie J de la source 2MASS avec la valeur de J de la source CPAPIR associée pour vérifier si les deux sources sont consistantes (jusqu'à une différence de 0.5 magnitude). Si elles le sont, le mouvement propre de la source est déterminé et la procédure extrapole sa position dans le relevé DSS (et SDSS lorsque disponible), ce qui permet de contraindre sa magnitude en bande I à cette position exacte (à l'intérieur d'un rayon de $1''$). Les couleurs $I - J$, $J - H$ et $H - K_s$ sont ensuite calculées grâce aux données du PSC et une image JPEG est créée, contenant toutes ses informations.

Évidemment, cette procédure élargit le nombre de sources détectées comparative-ment à la stratégie par détection de couleur $H - CH_4$. La sélection de candidates se poursuit par une inspection visuelle qui est effectuée manuellement ce qui permet de déterminer les sources qui sont des candidates naines L et naines T. Les sources qui se révèlent être des naines M sont rejetées, de même que les faux-positifs détectés par cette méthode d'analyse.

On peut remarquer que pour cette technique de détection, de même que pour la première technique de détection utilisée, nos résultats sont entièrement dépendants du PSC de 2MASS car le mouvement propre et les couleurs de nos sources sont calculés à partir de celui-ci. En effet, si on détecte une source dans CPAPIR mais que celle-ci n'est pas dans le PSC, elle sera tout simplement rejetée, même s'il est possible qu'elle soit une vé-

ritable source, trop faible pour être détectée par 2MASS (quoique le PSC *faint extension* contienne des sources jusqu'à des magnitudes semblables à celles observées par CPAPIR). Ceci reste donc une faiblesse de notre méthode d'analyse, mais il faut mentionner que si nous voulons utiliser le critère de mouvement propre, nous avons besoin d'une deuxième époque d'observations et 2MASS est utile pour ceci. Effectuer nous-mêmes une observation à une deuxième époque serait inefficace car il faudrait attendre quelques années avant d'entreprendre l'analyse de nos données.

Finalement, nous avons également redéfini le format de nos champs MBDS. Au lieu de subdiviser le relevé en carrés de 4×4 champs CPAPIR, nous avons décidé de faire de longs rubans de 42 degrés de long en déclinaison (72 champs CPAPIR de long, soit 24.5 degrés carrés), ce qui minimise les déplacements en ascension droite, qui demandent plus de temps que les déplacements en déclinaison. Ces nouveaux rubans ont été nommés MBDS2_*** et nous nous sommes assurés que ceux-ci ne chevauchent pas une partie du ciel déjà sondée par notre première stratégie de détection. Nous avons nommé cette nouvelle méthode d'analyse SIMP (Sondage Infrarouge de Mouvement Propre).

Ainsi, nous avons observé durant 19 nuits au total, entre le 3 mars et le 30 avril 2006, et avons réussi, grâce à cette nouvelle technique, à compléter 51 bandes MBDS2 (~ 1250 degrés carrés), soit presque l'équivalent de tout ce qui avait été observé en 94 nuits durant l'année 2005 (~ 1350 degrés carrés). Même si l'on ne peut comparer directement ces deux résultats, il reste évident que la nouvelle technique est beaucoup plus efficace que l'ancienne.

2.3.1 Résultats

L'inspection un à un des objets identifiés par leur mouvement propre est une étape très importante dans la sélection des candidates. Pour faciliter cette tâche, l'équipe a décidé pour cette nouvelle méthode d'analyse de créer une image JPEG pour chaque objet découvert. Un exemple d'une telle image est présenté à la figure 2.9. On y voit la meilleure candidate découverte grâce à cette nouvelle méthode d'analyse, C013656+093347. Dans la partie du haut de l'image, on illustre la candidate dans différentes bandes : la bande *H* de CPAPIR, la bande *J* de 2MASS, la bande *I* de DSS, la bande *R* de DSS et

la bande B de DSS. Le reste de l'image est divisé en trois parties, chaque partie étant la combinaison de 3 images différentes. Celle de gauche est composée d'images des 3 bandes de 2MASS. Celle du milieu comprend l'image R de DSS (en bleu), l'image I de DSS (en vert) et l'image J de 2MASS. L'image de droite est composée de l'image I de DSS (en bleu), de l'image J de 2MASS (en vert) et de l'image H de CPAPIR (en rouge). C'est sur cette dernière image que l'on peut voir aisément le mouvement propre de l'objet qui, dans ce cas, est très important ($\sim 1.3''/\text{an}$) et donc très visible. Différentes mesures sont finalement inscrites en bas à gauche de l'image et un sous-type est également attribué à l'aide des couleurs proche-infrarouges mesurées par 2MASS. Remarquons que la magnitude I est calculée selon la position extrapolée de la source dans l'image DSS et qu'elle représente parfois la limite inférieure de la magnitude de l'objet dans cette bande.

Ainsi, la création d'une image JPEG par objet à grand mouvement propre et contenant toutes les informations nécessaires à l'analyse facilite grandement la sélection des candidates. En quelques minutes, on peut réviser des dizaines de candidates, éliminer les faux-positifs, déterminer les plus intéressantes par leurs couleurs et leur mouvement propre, les trier et les classer.

Une fois entamée, cette méthode nous a permis de redétecter des naines L et T déjà connues et d'obtenir des dizaines de candidates (naines M, L et T) plausibles en quelques jours seulement. En effet, toutes les images qui avaient été obtenues jusqu'à ce moment, de même que les nouvelles images obtenues grâce à la nouvelle stratégie de détection, ont pu être réanalysées grâce à cette technique. Ainsi, une nouvelle liste de candidates a été construite grâce à l'ensemble des données CPAPIR obtenues jusqu'au 30 avril 2006.

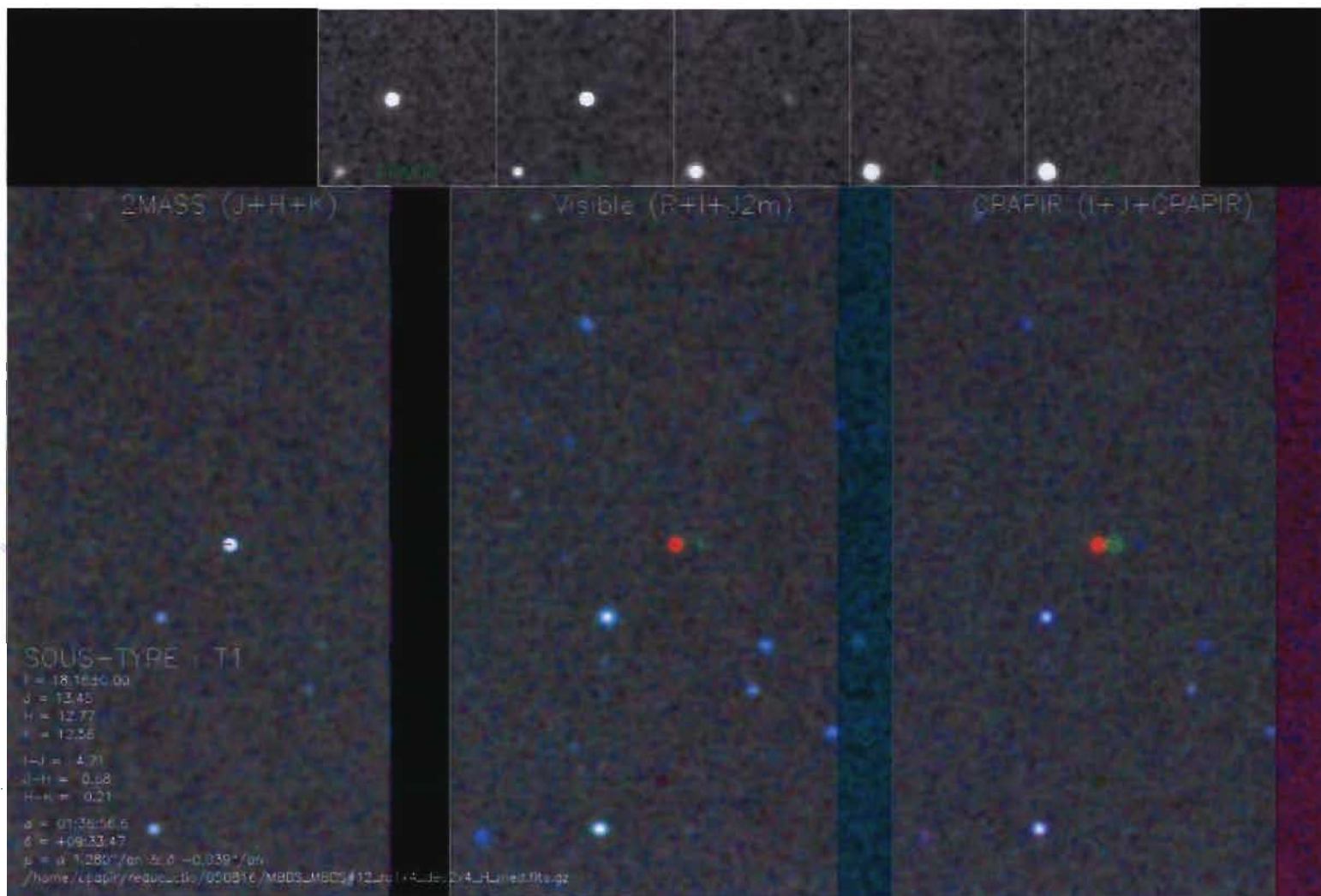


Figure 2.9 – Image JPEG pour l’analyse de la candidate C013656+093347. On y retrouve des images à différentes bandes spectrales, ainsi que des images créées à partir de plusieurs composantes. Les informations de l’objet sont également inscrites.

Au tableau 2.5, on présente 6 naines L et T qui ont été redécelées grâce à cette méthode d'analyse. À noter que, sauf pour Gliese 570D, dont le champ observé avait été préselectionné pour être à proximité de l'étoile Gliese 570, les naines L et T découvertes l'ont été dans des carrés MBDS ou des bandes MBDS2 prises au hasard. Nous avons donc été capables de redéceler une L0 (DENIS0909-0658), une L2 (2MASS0928-1603), une L3 (2MASS0856+2235), une L6 (2MASS0850+1057), une T0 (SDSS1511+0607) et une T7.5 (Gliese 570D), ce qui prouve qu'un éventail complet de naines L et T peut être retrouvé par cette stratégie.

Nom de l'objet	J_{2m}	μ ("/>		
2MASSs J0850359+105716	16.47	0.137	1.24	0.75
2MASSI J0856479+223518	15.68	0.237	1.10	0.63
DENIS-P J0909.9-0658	13.89	0.198	0.80	0.55
2MASSW J0928397-160312	15.32	0.158	1.03	0.68
Gliese 570D	15.32	2.01	0.06	0.03
SDSS J151114.66+060742.9	16.02	0.370	1.06	0.41

Tableau 2.5 – Liste des naines L et T connues décelées par leur mouvement propre.

Cette stratégie nous a également permis de découvrir plusieurs nouvelles candidates. C'est ce qui est présenté au tableau 2.6. Proportionnellement, on peut dire que cette nouvelle technique permet la découverte d'autant de candidates que l'ancienne : 77 candidates naines L et T pour une surface observée qui a environ doublé.

Nom de l'objet	J_{2m}	μ ("/>		
C000414+082804	16.89	0.229	1.07	0.92
C000444+080336	16.38	0.211	0.51	0.35
C000812+080644	16.59	0.325	1.05	0.39
C000852+100036	16.90	0.399	1.08	0.22
C001321+084101	16.52	0.241	0.81	0.51
C002751+051142	17.04	0.170	0.96	0.61
C003009+042822	16.55	0.149	0.96	0.30
C003041+104353	16.73	0.163	0.82	0.34

Tableau 2.6 – suite à la page suivante

Nom de l'objet	J_{2m}	μ ("/ an)	$(J - H)_{2m}$	$(H - K_s)_{2m}$
C003713+100522	15.19	0.143	0.90	0.45
C004853+061441	15.53	0.839	0.95	0.50
C004928+044058	15.85	0.345	1.18	0.50
C005145+060834	16.39	0.148	0.89	0.54
C010201+035541	16.74	0.309	1.08	0.58
C010907+062558	14.61	0.282	0.82	0.43
C011007+092754	17.04	0.167	1.04	0.42
C012051+070105	16.50	0.246	0.87	0.63
C013243+055232	16.72	0.173	1.31	0.76
C013402+050813	16.19	0.193	1.03	0.53
C013656+093347	13.45	1.281	0.68	0.21
C015503+095000	14.82	0.374	1.06	0.62
C020054+054053	16.57	0.146	1.00	0.10
C024920+045544	16.84	0.161	0.96	0.16
C025928+073846	16.68	0.126	0.38	0.65
C030337+081456	16.81	0.120	0.64	0.33
C031740+061305	16.36	0.126	0.76	0.69
C032039+051929	17.08	0.176	1.00	-0.08
C032928+110150	16.32	0.147	0.92	0.53
C033916+064332	16.76	0.174	1.14	0.14
C034117+100624	16.18	0.197	0.97	0.30
C035304+041819	16.47	0.162	1.34	0.55
C035842+103940	15.81	0.145	1.09	0.67
C041614+040221	16.36	0.158	1.14	0.61
C055223+021059	16.85	0.133	0.98	0.14
C055551+011507	16.86	0.136	1.04	0.24
C085035+105716	16.47	0.161	1.24	0.75
C085119+104347	16.79	0.174	1.01	0.69

Tableau 2.6 – suite à la page suivante

Nom de l'objet	J_{2m}	μ ("/ an)	$(J - H)_{2m}$	$(H - K_s)_{2m}$
C085142+091852	16.08	0.181	0.60	0.49
C085647+223518	15.68	0.196	1.10	0.63
C085805+221458	15.23	0.108	0.81	0.58
C090501+072200	16.89	0.153	1.14	0.41
C091157-044220	15.91	0.146	0.77	0.19
C092142+084203	15.79	0.191	0.89	0.56
C093907-070619	16.74	0.260	1.01	0.31
C095608-144707	16.28	0.167	1.22	0.84
C100354-144153	15.15	0.207	0.84	0.38
C101736+101115	16.23	0.197	0.38	0.49
C102258+202854	16.00	0.180	0.71	0.57
C104448-121132	16.05	0.222	0.74	0.21
C104757-113044	16.98	0.182	1.13	-0.16
C110318-124349	15.65	0.134	1.05	0.58
C111808+031840	16.95	0.113	1.21	0.02
C112505+055642	15.53	0.181	0.68	0.36
C113014+085736	16.51	0.163	0.97	0.16
C114539+161726	16.37	0.196	0.84	-0.02
C121305+080615	16.51	0.142	0.97	0.43
C130831+081852	15.13	0.162	0.77	0.51
C131003-205854	15.65	0.170	0.25	0.48
C142257+082754	15.10	0.595	0.89	0.56
C145301-274647	16.76	0.127	1.02	0.23
C145346-274428	16.05	0.214	0.87	0.49
C150147-183127	16.02	0.158	0.87	0.39
C153719-080034	16.44	0.294	1.08	0.61
C162708+054630	16.66	0.237	0.95	0.22
C162806+051703	15.81	0.164	0.72	0.46

Tableau 2.6 – suite à la page suivante

Nom de l'objet	J_{2m}	μ ("/>		
C221002+093607	16.61	0.146	1.05	0.60
C223143+093434	16.83	0.362	0.81	0.32
C223510-141809	17.14	0.117	1.05	0.31
C223638+102911	16.48	0.198	1.28	0.31
C223902+064359	16.25	0.160	0.76	0.14
C225224+100547	17.00	0.168	1.21	0.10
C225931+104323	17.07	0.253	1.03	0.22
C230945+100312	14.93	0.160	0.82	0.40
C233021+100600	16.36	0.189	1.05	0.67
C233131+204127	16.06	0.095	0.96	0.68
C234442+090902	14.90	0.306	0.94	0.52
C234551+092342	16.82	0.231	0.97	0.20
C235223+105156	16.33	0.235	0.76	0.46

Tableau 2.6 – Liste des candidates naines L et T découvertes par détection de mouvement propre.

2.3.2 Discussion des résultats

A priori, on serait porté à dire que cette nouvelle stratégie de détection n'est pas plus efficace pour détecter des candidates que celle qui utilisait la couleur $H - CH_4$, étant donné que le nombre de candidates découvertes est à peu près égal. Cependant, il ne faut pas oublier que cette technique produit moins de faux-positifs étant donné que l'on rejette les objets qui ont une différence trop grande entre la magnitude J de CPAPIR et celle de 2MASS. D'autant plus qu'à la section 2.2.5 nous avons découvert un effet de sélection pour la stratégie par détection de couleur $H - CH_4$ qui faisait en sorte que plusieurs sources ayant un δ_m élevé étaient perçues comme des candidates. Cette nouvelle stratégie par détection de mouvement propre est beaucoup plus précise,

ne faisant pas appel à une couleur.

Un autre aspect qui a amélioré notre efficacité est l'inspection visuelle qui, grâce aux images JPEG créées pour chaque objet identifié par son mouvement propre, est rapide et efficace. En effet cette méthode permet de déterminer facilement si un objet s'est réellement déplacé et s'il s'agit du même objet associé dans les deux images, et, du fait même, d'éliminer beaucoup de faux-positifs.

Un autre avantage de cette stratégie d'analyse est que nos candidates sont en moyenne 0.72 magnitude plus brillantes en bande H (une moyenne de $H = 15.31$ pour cette stratégie contre $H = 16.03$ pour la stratégie par détection de couleur $H - CH_4$). Le fait que l'on découvre des candidates qui sont en moyenne plus brillantes va faciliter leur classification.

Cette liste nous a permis de découvrir plusieurs candidates intéressantes. Cependant, la plupart des candidates trouvées ont des couleurs proche-infrarouges caractéristiques des naines L (une couleur $J - H$ très rouge), celles-ci étant plus brillantes intrinsèquement que les naines T. Les naines L restent néanmoins très intéressantes à découvrir, et n'auraient pu l'être avec la première stratégie de détection de candidates.

On remarque tout de même dans cette liste qu'une dizaine de candidates ont des couleurs qui ne représentent aucun des types d'objets recherchés. Par exemple, C104757-113044 a une couleur $J - H$ rouge (1.13) et une couleur $H - K_s$ bleue (-0.16). Il est possible que les couleurs étranges de ces objets soient dues à un mauvais calcul de la magnitude dans l'une de ces bandes, quoique les incertitudes sur la photométrie de 2MASS laissent présager que ce n'est pas le cas. L'analyse nous révèle donc des cas étranges d'objets qui pourraient être intéressants à étudier subséquemment.

CHAPITRE 3

MÉTHODES DE CLASSIFICATION DES NAINES L ET T

Une fois les candidates trouvées grâce à CPAPIR, un autre instrument est nécessaire pour permettre de confirmer la nature de ces objets. Nous utilisons donc le spectromètre imageur proche-infrarouge SIMON, construit pour l'OMM et mis en service en 2003.

3.1 L'instrument de classification : SIMON, Spectromètre Infrarouge de MONT-réal

SIMON est à la fois un imageur, un spectromètre et un polarimètre. Tout comme CPAPIR, il utilise un détecteur de HgCdTe comprenant 1024×1024 pixels sensibles dans le proche-infrarouge, plus précisément entre $0.8 \mu\text{m}$ et $2.5 \mu\text{m}$ (bien que l'optique ne soit achromatique qu'entre $1.1 \mu\text{m}$ et $2.4 \mu\text{m}$). Au télescope de 1.6 m de l'OMM, le champ de SIMON est de $7.9' \times 7.9'$ au foyer $f/8$, imposant un échantillonnage de $0.46''/\text{pixel}$.

Sa réalisation est le fruit du travail d'une équipe composée de six membres : Daniel Nadeau, René Doyon, Philippe Vallée, Loïc Albert, Martin Riopel et Guillaume Provencher.

Il existe trois éléments disperseurs différents que l'on peut utiliser dans SIMON et qui sont situés dans la roue à GRISM : le prisme d'Amici de basse résolution ($R \approx 20 - 50$, $0.8 \mu\text{m}$ à $2.5 \mu\text{m}$), le GRISM en verre de silice de moyenne résolution ($R \approx 500$, $1.2 \mu\text{m}$ à $2.3 \mu\text{m}$) et le GRISM en KRS-5 de haute résolution ($R \approx 1500$, $1.18 \mu\text{m}$ à $1.33 \mu\text{m}$, $1.49 \mu\text{m}$ à $1.7 \mu\text{m}$ et $1.99 \mu\text{m}$ à $2.31 \mu\text{m}$). La roue à filtres comprend plusieurs filtres différents, ceux que nous avons utilisés étant les suivants : *I*, *J*, *H*, *K_s* et SPAmici (qui couvre l'intervalle de longueurs d'onde situé entre $0.88 \mu\text{m}$ et $2.35 \mu\text{m}$ et est utilisé avec le prisme d'Amici).

SIMON est composé de deux parties (les cryostats), chacune indépendamment refroidie à l'azote liquide. Le cryostat principal de SIMON, qui se situe dans la partie du bas de celui-ci, contient tout ce qu'il faut pour faire fonctionner SIMON en mode ima-

gerie : la roue à filtres, la roue à GRISM, la roue à masques de Lyot, tout le banc optique et le détecteur infrarouge.

Ceci permet de faire fonctionner SIMON en mode imagerie sans avoir à refroidir la partie du haut de SIMON, soit le cryostat secondaire, qui comprend la roue à masques contenant les fentes permettant de prendre les spectres voulus. Ainsi, si un problème survient dans cette partie de SIMON, ce dernier reste utilisable en mode imagerie, sans même que l'on ait à refroidir le cryostat secondaire. Cette caractéristique nous a permis durant quelques nuits d'observations de vérifier par photométrie la nature de nos candidates.

3.1.1 Réduction des données spectroscopiques de SIMON

Afin de faciliter la soustraction des composantes additives du signal, les observations ont été obtenues grâce à une série d'expositions séparées par des déplacements de $10''$ le long de la fente (d'orientation Nord-Sud) et ce, sur cinq positions différentes.

Une étoile standard de type spectral A était observée avant ou après chaque candidate afin de corriger l'absorption due à l'atmosphère terrestre. L'étoile standard était choisie en fonction de sa proximité angulaire de la candidate à vérifier (afin que les deux objets soient observés à travers des masses d'air aussi similaires que possible) et également par sa luminosité, afin de prendre un spectre le plus efficacement possible et d'obtenir un bon rapport S/B rapidement. Une lampe à spectre continu était également utilisée après la prise du spectre de chaque objet pour effectuer la calibration en longueur d'onde. La longueur d'onde de la lumière reçue au détecteur est déterminée par deux filtres (Brackett γ et Paschen β) dont la bande passante est plus étroite qu'un élément de résolution des spectres obtenus avec le prisme d'Amici.

Finalement, une série d'expositions de champs uniformes prises sur un écran à l'intérieur du dôme (« domeflat ») et d'expositions du courant sombre (« dark ») était prise au début ou à la fin de chaque nuit pour uniformiser les images.

La procédure de réduction des données spectroscopiques de SIMON est la suivante. D'abord, les images obtenues à différentes positions le long de la fente sont soustraites deux à deux afin d'éliminer le ciel dans chacune des images et d'extraire la trace du

spectre. Puis, l'image est corrigée pour la nonlinéarité. La médiane de cet ensemble de paires soustraites est obtenue afin d'augmenter le rapport S/B. Cette image est divisée par une série d'expositions de champs uniformes prises sur un écran à l'intérieur du dôme (« domeflat ») qui ont été combinées et normalisées. Les expositions du courant sombre sont également soustraites de l'image du champ uniforme. Le spectre extrait a ensuite été calibré en longueur d'onde et le spectre de la standard a finalement été utilisé pour corriger l'absorption tellurique et pour calibrer le flux. Pour cela, le spectre de la standard a été divisé par le spectre d'un corps noir ayant la même température que la standard. Puis, en divisant le spectre normalisé de notre objet par le spectre corrigé et normalisé de la standard, on obtient le spectre de l'objet corrigé pour l'absorption tellurique. Finalement, tous les spectres ont été normalisés en prenant la moyenne du flux entre 1.235 et 1.305 μm (cet intervalle est utilisé par Testi et al. (2001,[78])).

La réduction et l'analyse des images photométriques de SIMON sont sensiblement les mêmes que celles décrites pour CPAPIR à la section 2.1.1.

3.2 Classification par photométrie

Les premières vérifications de nos candidates ont dû être faites par mesures photométriques des magnitudes en bande I , J , H et K_s en utilisant le mode imagerie de SIMON, le mode spectroscopique n'étant pas disponible.

Grâce à cette vérification photométrique, il est possible d'obtenir précisément les couleurs proche-infrarouges ($I - J$, $J - H$ et $H - K_s$) de nos objets. La couleur $I - J$ nous intéresse particulièrement puisqu'elle nous permet de différencier les naines M des naines T précoces, tel que mentionné à la section 1.1 (voir la figure 1.2). Cette technique nous permet donc d'identifier le type spectral de nos candidates sans toutefois nous permettre d'identifier précisément le sous-type de celles-ci. Le but de cette analyse était donc de réobserver en mode spectroscopique (une fois celui-ci opérationnel) les objets dont les couleurs étaient les plus intéressantes.

Les résultats seront présentés à la section 4.2.

3.3 Classification par spectroscopie

En 2006, le mode spectroscopique de SIMON est redevenu opérationnel et une analyse spectroscopique de nos candidates était donc possible. La nouvelle stratégie de détection venait également tout juste d'être implantée. Comme nous l'avons vu à la section 2.3.2, le nombre de candidates intéressantes (les naines T) était limité. La plupart des objets prioritaires n'étaient pas à des coordonnées observables à cette période de l'année. Notre choix de candidates était donc presque entièrement composé de naines L.

L'analyse spectroscopique est beaucoup plus utile que l'analyse photométrique pour déterminer le sous-type des objets à classifier. Il existe deux façons d'utiliser les spectres pour identifier les candidates. D'abord, on peut comparer visuellement les spectres des candidates avec des spectres de standards déjà classifiées et disponibles à la communauté scientifique. On peut également utiliser des indices spectraux définis dans la littérature et qui nous permettent de classifier les naines L et les naines T.

L'aspect de la comparaison visuelle à des fins de classification est, selon Burgasser et al. (2006,[9]) le plus important aspect dans la définition d'un schéma de classification, parce que les standards spectroscopiques fournissent la structure de base pour la classification d'une classe spectrale. La comparaison d'un spectre à classifier à un spectre d'un standard est, selon eux, le moyen de classification le plus précis et le plus consistant. En effet, la comparaison permet de vérifier des particularités qui pourraient être présentes dans les spectres des objets à classifier.

Il existe une séquence de standards spectraux pour les naines T (définie par Burgasser et al. 2006,[9]) dans le proche-infrarouge, mais il n'en existe cependant pas pour les naines L (une séquence existe néanmoins dans le visible). Il faut donc être prudent et ne pas assumer que des naines L classifiées par la spectroscopie optique auront la même morphologie si elles se font classifier dans le proche-infrarouge, car ces deux domaines de longueurs d'onde distincts échantillonnent des environnements physiques différents dans l'atmosphère de l'objet. Cependant, plusieurs études (Reid et al. 2001,[71] ; Testi et al. 2001,[78] ; McLean et al. 2003,[62]) ont démontré que généralement, la séquence de types spectraux des naines L définie en optique représente bien la même séquence dans

le proche-infrarouge.

Nous allons ainsi, à la section 4.1.1, comparer visuellement nos spectres à des spectres de naines M et L disponibles et dont le sous-type a déjà été bien établi (en visible pour la plupart de ces naines M et L).

Cependant, la comparaison visuelle n'est pas l'unique moyen de déterminer le type spectral d'une candidate. Burgasser et al. (2006,[9]) énoncent que lorsque l'on doit classifier un large échantillon d'objets, les indices spectraux peuvent nous aider à trouver le type spectral des objets en question de façon efficace. Ceci est particulièrement intéressant pour les naines L.

En effet, comme il a été mentionné, il n'existe pas pour les naines L de standards dans le proche-infrarouge. Les méthodes existantes pour classifier celles-ci utilisent des indices spectraux proche-infrarouges reliés à des types spectraux déterminés en optique ou utilisent des indices pour des types spectraux idéaux sans toutefois définir des standards solides (voir Kirkpatrick et al. 2005,[37]).

Ainsi, Geballe et al. (2002,[23]) nous indiquent qu'il est généralement reconnu que la classification spectrale des naines L plus tardives que L5 et des naines T devrait être faite dans le proche-infrarouge à l'aide d'indices appropriés permettant de classifier précisément ces objets. Cependant, pour les naines L plus précoces que L5, les indices optiques restent beaucoup plus importants que les indices proche-infrarouges proposés pour classifier ce genre d'objet.

Toutefois, tel que mentionné dans Testi et al. (2001,[78]), afin de classifier une naine L par spectroscopie optique (à l'aide de l'affaiblissement des bandes TiO et VO) on a besoin d'environ une heure de temps d'intégration avec un spectrographe capable de $R \approx 1000$ sur un grand télescope (10 m), dépendamment bien sûr de la magnitude et du type spectral de la candidate. Ceci est dû au fait que peu de naines L sont plus brillantes que $I = 19$. Les auteurs indiquent également que pour pouvoir classifier une naine L à $R \approx 500-1000$ dans le proche-infrarouge, on a tout de même besoin d'une à quatre heures de temps d'intégration avec un télescope de 4 m. Bien qu'il soit nécessaire d'étudier ces objets à ces résolutions afin de mieux comprendre leurs propriétés photosphériques, ces auteurs nous font remarquer qu'il est inutile d'observer à de telles résolutions

pour des fins de classification seulement. Ces auteurs proposent donc six indices proche-infrarouges qui peuvent servir à classifier les naines L à très basse résolution ($R \approx 100$). Ceci permet une classification beaucoup plus efficace qu'en moyenne ou haute résolution (en proche-infrarouge ou en visible).

Comme nous n'avions accès qu'à l'OMM (téléscope de 1.6 m) pour classifier nos candidates, il était difficile d'obtenir des spectres à une résolution plus élevée que ~ 50 , étant donné la magnitude assez faible de nos candidates ($J = 15.23$ et $J = 15.82$). En effet, nous avons essayé les trois différents éléments disperseurs de SIMON et nous avons réalisé que seul le prisme d'Amici (de basse résolution) nous permet d'obtenir assez de flux pour avoir un rapport S/B raisonnable. Celui-ci a également l'avantage de pouvoir obtenir d'un seul coup un spectre dans l'intervalle de longueur d'onde situé entre $0.8 \mu\text{m}$ et $2.4 \mu\text{m}$. Le prisme a été utilisé avec une fente de $1.''1$ de large (2.4 pixels), ce qui nous permet d'obtenir des spectres à $R \approx 35-50$. Les résultats des types spectraux identifiés par les indices spectraux seront présentés à la section 4.1.2.

La section 3.3.1 décrit les indices qui pourraient nous servir à classifier nos deux candidates. Il est évident qu'à la résolution à laquelle ont été pris nos spectres, ces indices ne nous seront pas tous utiles. Afin de déterminer lesquels sont les mieux adaptés à notre situation, nous avons obtenu cinq spectres de naines L connues.

3.3.1 Définition des indices spectraux

Nous utilisons, afin de classifier les objets observés en spectroscopie, des indices spectraux définis dans le proche-infrarouge. Nous allons décrire ces différents indices.

D'abord, Reid et al. (2001,[71]) ont proposé un ensemble d'indices proche-infrarouges servant à classifier les types spectraux allant de M8 à L8. Il faut cependant préciser que les auteurs relient leurs indices au système de classification déjà établi par Kirkpatrick et al. (1999,[43]) qui lui, est basé sur des spectres optiques (entre 0.6 et $1.0 \mu\text{m}$).

Les auteurs définissent quatre indices nommés H_2O^A , H_2O^B , H_2O^C et H_2O^D , qui mesurent la profondeur des bandes d'absorption de l' H_2O situées à $1.4 \mu\text{m}$ et $1.85 \mu\text{m}$. Ils utilisent également deux indices déjà définis par Tokunaga & Kobayashi (1999,[80]), K1 et K2, qui mesurent respectivement la partie rouge de la bande de H_2O située à 1.85

μm et la présence de l'absorption H_2 . De ces six indices, Reid et al. ont défini, grâce aux indices K1 , $\text{H}_2\text{O}^{\text{A}}$ et $\text{H}_2\text{O}^{\text{B}}$ trois relations reliant ces indices aux types spectraux (déjà établis dans l'optique) allant de M8 à L8. Il faut cependant noter que l'indice K1 n'est valide que pour des types spectraux plus précoces que L6. Nous présentons au tableau 3.1 la définition de ces indices ainsi que les relations reliant les indices et les types spectraux. Pour les indices, $\langle F_{\lambda_i - \lambda_j} \rangle$ désigne le flux moyen dans l'intervalle $\lambda_i - \lambda_j$. Le type spectral M8 a une valeur Sp de -2 et le type spectral L8 a une valeur de 8, avec une séparation de 1 entre chaque sous-type. Il est à noter que ces indices ont été développés grâce à des spectres à $R \approx 500$. Nous utilisons le terme « indices de Reid » lorsque nous voulons nous référer à ces trois indices.

Indice	Définition	Relation avec le type spectral
K1	$\frac{\langle F_{2.10-2.18} \rangle - \langle F_{1.96-2.04} \rangle}{0.5(\langle F_{2.10-2.18} \rangle + \langle F_{1.96-2.04} \rangle)}$	$\text{Sp} = (21.8 \pm 2.8)\text{K1} - (2.8 \pm 0.60)$
$\text{H}_2\text{O}^{\text{A}}$	$\frac{\langle F_{1.33-1.35} \rangle}{\langle F_{1.28-1.30} \rangle}$	$\text{Sp} = -(32.1 \pm 4.2)\text{H}_2\text{O}^{\text{A}} + (23.4 \pm 2.7)$
$\text{H}_2\text{O}^{\text{B}}$	$\frac{\langle F_{1.47-1.49} \rangle}{\langle F_{1.59-1.61} \rangle}$	$\text{Sp} = -(24.9 \pm 2.2)\text{H}_2\text{O}^{\text{B}} + (20.7 \pm 1.6)$

Tableau 3.1 – Indices spectraux de Reid.

Testi et al. (2001,[78]) ont également défini des indices spectraux proche-infrarouges pour les naines L afin d'augmenter l'efficacité de classification de celles-ci. En effet, ces auteurs ont obtenu des spectres à basse résolution ($R \approx 100$) de 26 naines L qui avaient déjà été solidement classifiées grâce à des spectres optiques. Tel que discuté à la section 3.3, les auteurs ont proposé ces indices dans le but d'éviter d'avoir besoin d'un grand télescope et de beaucoup de temps d'observation lorsque l'objectif de la recherche est de classifier de nouvelles candidates naines L. À noter que les moyens que nous utilisons pour classifier nos candidates sont similaires à ceux utilisés dans cette étude.

Ces auteurs ont défini des indices spectraux proche-infrarouges obtenus à basse résolution qui concordent avec les types spectraux définis en optique. Nous présentons donc au tableau 3.2 les « indices de Testi », terme que nous utilisons dans ce mémoire.

Les types spectraux Sp dans les relations sont définis de la sorte : L0 \equiv 1.0, L8 \equiv 1.8, et chaque sous-type entre ceux-ci représente une séparation de 0.1 de la valeur de Sp. Testi et al. nous avertissent que l'indice sH₂O^J, qui mesure la force de l'absorption du H₂O à 1.1 μ m, devrait être utilisé avec précaution parce qu'il pourrait être affecté par une mauvaise correction de l'absorption tellurique. Les indices sH₂O^{H2} et sH₂O^K sont également sujets à de plus grandes variations étant donné que le coefficient se trouvant dans la relation reliant l'indice au type spectral est plus grand que pour les autres indices. Il faudra donc faire attention en utilisant ces 3 indices.

Indice	Définition	Relation avec le type spectral
sHJ	$\frac{\langle F_{1.265-1.305} \rangle - \langle F_{1.60-1.70} \rangle}{0.5(\langle F_{1.265-1.305} \rangle + \langle F_{1.60-1.70} \rangle)}$	Sp = -1.87sHJ + 1.67
sKJ	$\frac{\langle F_{1.265-1.305} \rangle - \langle F_{2.12-2.16} \rangle}{0.5(\langle F_{1.265-1.305} \rangle + \langle F_{2.12-2.16} \rangle)}$	Sp = -1.20sKJ + 2.01
sH ₂ O ^J	$\frac{\langle F_{1.265-1.305} \rangle - \langle F_{1.09-1.13} \rangle}{0.5(\langle F_{1.265-1.305} \rangle + \langle F_{1.09-1.13} \rangle)}$	Sp = 1.54sH ₂ O ^J + 0.98
sH ₂ O ^{H1}	$\frac{\langle F_{1.60-1.70} \rangle - \langle F_{1.45-1.48} \rangle}{0.5(\langle F_{1.60-1.70} \rangle + \langle F_{1.45-1.48} \rangle)}$	Sp = 1.27sH ₂ O ^{H1} + 0.76
sH ₂ O ^{H2}	$\frac{\langle F_{1.60-1.70} \rangle - \langle F_{1.77-1.81} \rangle}{0.5(\langle F_{1.60-1.70} \rangle + \langle F_{1.77-1.81} \rangle)}$	Sp = 2.11sH ₂ O ^{H2} + 0.29
sH ₂ O ^K	$\frac{\langle F_{2.12-2.16} \rangle - \langle F_{1.96-1.99} \rangle}{0.5(\langle F_{2.12-2.16} \rangle + \langle F_{1.96-1.99} \rangle)}$	Sp = 2.36sH ₂ O ^K + 0.60

Tableau 3.2 – Indices spectraux de Testi.

Finalement, Geballe et al. (2002,[23]) ont défini des indices à la fois dans le visible et dans le proche-infrarouge afin de pouvoir identifier une large étendue de types spectraux allant de L0 à T8. Ces indices sont des rapports de flux ressemblant aux indices H₂O de Reid. Des quatre indices qui permettent d'identifier les naines L, deux se situent dans le visible (et sont donc inutiles pour nous) et deux sont situés dans le proche-infrarouge : H₂O 1.5 μ m et CH₄ 2.2 μ m. Le premier mesure la pente de la bande d'eau à 1.5 μ m et diffère légèrement de la définition de l'indice de Reid : l'intervalle de la longueur d'onde plus courte est plus près de 1.4 μ m (étant cependant toujours visible à partir du sol) et

l'intervalle de la longueur d'onde plus longue est plus près de l'endroit où apparaît le maximum du continuum des naines T. Le second indice mesure une étroite bande de méthane à 2.2 μm qui apparaît en premier dans la bande K, même si cette apparition ne devient pas très évidente avant la transition des naines L aux naines T. Elle est cependant suffisamment prononcée pour être utilisée aussi tôt que le type spectral L3. Le tableau 3.3 indique la définition des « indices de Geballe ».

Indice	Définition
H ₂ O 1.5 μm	$\frac{\langle F_{1.57-1.59} \rangle}{\langle F_{1.46-1.48} \rangle}$
CH ₄ 2.2 μm	$\frac{\langle F_{2.08-2.12} \rangle}{\langle F_{2.215-2.255} \rangle}$

Tableau 3.3 – Indices spectraux de Geballe.

On remarque qu'il n'y a pas de relations qui relient les indices à un type spectral spécifique. Geballe et al. définissent plutôt des intervalles de valeurs pour chaque indice et qui représentent un certain type spectral. Ces intervalles sont donnés au tableau 3.4. On remarque que, tel que mentionné, l'indice CH₄ 2.2 μm débute au type spectral L3. Ces indices peuvent être utiles pour classifier les naines L, mais il faut préciser qu'ils demandent une transparence atmosphérique raisonnable et un télescope de dimension intermédiaire, étant donné qu'ils mesurent des caractéristiques qui demandent des résolutions assez importantes ($R \approx 500$). Même si nous n'avons pas accès à de tels moyens, nous avons tout de même calculé ces indices.

D'autres indices spectraux proche-infrarouges ont été définis par McLean et al. (2003,[62]), et ceux-ci se basent sur ceux développés par Reid et al. (2001,[71]), et se nomment ainsi H₂OA, H₂OB, H₂OC et H₂OD. Cependant, les spectres obtenus par cette équipe étaient à haute résolution ($R \approx 2000$). En effet, les intervalles de longueurs d'onde utilisés (0.004 μm) pour définir leurs indices sont tellement petits que, dans la majorité de nos spectres, aucun point ne se situait dans cet intervalle, empêchant tout calcul de ces indices. Nous n'avons donc pas utilisé ceux-ci dans notre analyse.

Il existe également des indices spectraux proche-infrarouges pour les naines T, dont les plus récents sont ceux de Burgasser et al. (2006[9]). Comme nous n'avons pas eu la

Type spectral	H ₂ O 1.5 μ m	CH ₄ 2.2 μ m
L0	1.20-1.27	–
L1	1.27-1.35	–
L2	1.35-1.43	–
L3	1.43-1.50	0.91-0.94
L4	1.50-1.55	0.94-0.98
L5	1.55-1.60	0.98-1.025
L6	1.60-1.65	1.025-1.075
L7	1.65-1.70	1.075-1.125
L8	1.70-1.80	1.125-1.175
L9	1.80-1.59	1.175-1.25

Tableau 3.4 – Intervalles de valeurs des indices de Geballe les reliant au type spectral correspondant.

chance d'observer des candidates naines T, nous ne nous attardons pas sur ceux-ci.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS DE LA CLASSIFICATION DE CANDIDATES

Les sections 2.2 et 2.3 nous ont permis d'expliquer l'analyse des images CPAPIR grâce à deux stratégies différentes. Ces stratégies nous ont permis de détecter des objets intéressants du champ, qui par la suite pouvaient être observés à des fins de classification. Avant chaque mission de classification à l'OMM, il fallait donc construire une liste de candidates prioritaires qui dépendait de plusieurs critères. D'abord, la position des objets était considérée, étant donné qu'aucun des objets observés à l'aide de CPAPIR n'est circumpolaire à l'OMM. Il fallait donc d'abord éliminer les objets qui ne sont pas visibles à l'époque de l'année à laquelle la mission s'effectue. Une fois cette liste plus restreinte construite, nous classions les objets selon leurs couleurs proche-infrarouges, en priorisant les objets dont les couleurs sont les plus intéressantes. La magnitude en bande H des objets était également vérifiée pour que les objets ayant une magnitude plus faible soient faits durant les nuits les plus transparentes.

Nous avons donc construit une liste de candidates découvertes grâce à la stratégie par détection de mouvement propre. Le tableau 4.1 introduit les deux candidates observées à l'OMM à l'aide de SIMON en mode spectroscopique. On y retrouve par colonne le nom des candidates, et par ligne la date à laquelle elles ont été observées à l'aide de CPAPIR, leur position en coordonnées J2000.0, le mouvement propre par direction et par année entre nos observations et celles de 2MASS (milliseconde d'arc par année), les magnitudes en bande J , H et K_s , tel que trouvées par 2MASS ainsi que les couleurs, $I - J$ (la bande I provenant de DSS), $J - H$ et $H - K_s$.

Nous avons également réussi à observer à l'OMM à l'aide de SIMON en mode photométrique cinq candidates qui sont présentées au tableau 4.2. On y retrouve par colonne le nom des candidates, et par ligne les paramètres de celles-ci : en premier la date à laquelle elles ont été observées à l'aide de CPAPIR, leur position en coordonnées J2000.0, le mouvement propre (μ) par année entre nos observations et celles de 2MASS (en milliseconde d'arc par année), les magnitudes en bande H tel que trouvées par CPAPIR ainsi

	C085805 +221458	C162806 +051703
Date	10-04-06	24-05-05
$\alpha_{2000.0}$	08 ^h 58 ^m 05 ^s .5	16 ^h 28 ^m 06 ^s .9
$\delta_{2000.0}$	+22°14'58''	+05°17'03''
$\mu_{\alpha} \cos \delta$	-59±8 mas/an	-125±11 mas/an
μ_{δ}	-90±11 mas/an	-106±12 mas/an
J_{2m}	15.231±0.046	15.807±0.074
H_{2m}	14.420±0.049	15.088±0.078
$(K_s)_{2m}$	13.836±0.047	14.63±0.11
$I_{dss} - J_{2m}$	3.18±0.19	> 3.24
$(J - H)_{2m}$	0.811±0.067	0.72±0.11
$(H - K_s)_{2m}$	0.584±0.068	0.46±0.13

Tableau 4.1 – Liste des candidates par détection de mouvement propre observées en spectroscopie avec SIMON.

que la couleur $H - CH_4$.

En regardant les candidates de ce tableau, C0531-0324 semble particulièrement intéressante car sa couleur $H - CH_4$ est la plus élevée (0.831), bien qu'elle ait le mouvement propre par année le plus faible (183 mas/an), en excluant C0157+0447, dont le mouvement propre a été recalculé ultérieurement.

Nous avons identifié chaque candidate par une carte d'identification du champ que nous retrouvons à la figure 4.1. Les images proviennent de 2MASS en bande J et ont été extraites grâce au logiciel *Aladin sky atlas*¹. Chaque carte représente un champ de $3.0' \times 3.0'$ et le nord est vers le haut. Une flèche rouge désigne l'emplacement de notre candidate. Les deux images du haut représentent les deux candidates observées en spectroscopie et les cinq du bas, celles observées en photométrie.

Ainsi, trois missions différentes étalées sur six mois ont permis de suivre cinq candidates en photométrie et deux en spectroscopie. Pour cette dernière méthode de classification, nous avons utilisé deux méthodes d'analyse différentes afin de déterminer le type spectral des candidates : une méthode par comparaison visuelle des candidates avec des spectres de standards spectroscopiques et une méthode en utilisant des indices spectraux définis dans le proche-infrarouge.

¹Disponible au <http://aladin.u-strasbg.fr/>

	C015426 +104002	C015729 +044726	C053116 -032405	C114451 +104831	C235507 +095656
Date	18-08-05	16-10-05	21-10-05	04-03-05	25-09-05
$\alpha_{2000.0}$	01 ^h 54 ^m 26 ^s .0	01 ^h 57 ^m 29 ^s .4	05 ^h 31 ^m 16 ^s .0	11 ^h 44 ^m 51 ^s .8	23 ^h 55 ^m 07 ^s .8
$\delta_{2000.0}$	+10°40'02".5	+04°47'26".0	-03°24'05".7	+10°48'31".1	+09°56'56".2
μ	233±11 mas/an	10±18 mas/an ¹	183±17 mas/an	467±22 mas/an	217±20 mas/an
H_{cpp}	15.617±0.075	16.42±0.15	16.09±0.14	16.40±0.12	16.384±0.087
$(H - CH_4)_{cpp}$	0.47±0.14	0.28±0.25	0.83±0.23	0.35±0.22	0.22±0.15

¹ La candidate C015729+044726 a été incluse dans la liste parce que, tout en étant visible dans l'image 2MASS, elle est absente du PSC et, initialement, son mouvement propre avait été surestimé suite à une confusion avec autre source.

Tableau 4.2 – Liste des candidates par détection de couleur $H - CH_4$ observées en photométrie avec SIMON.

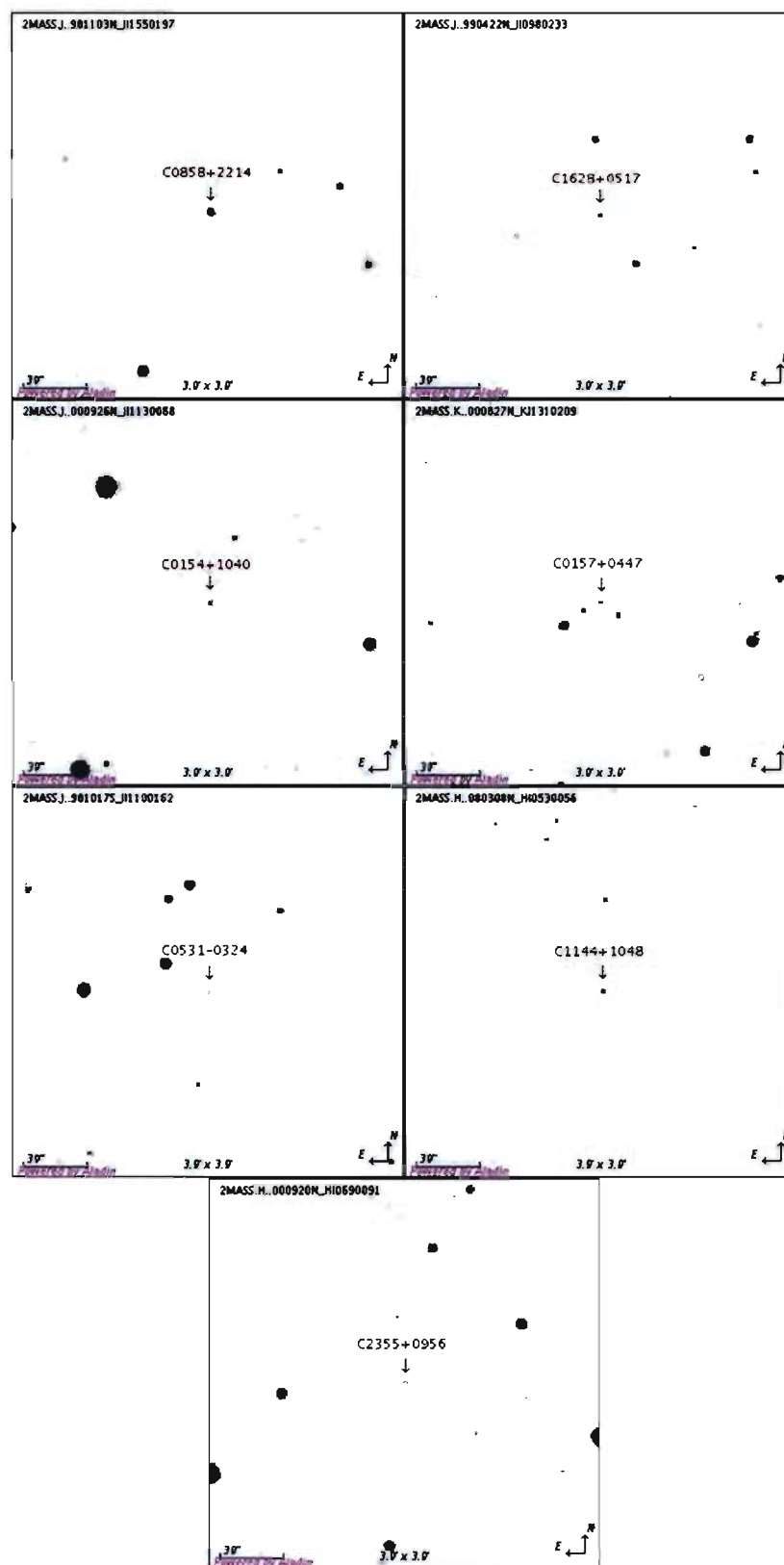


Figure 4.1 – Carte d'identification des candidates.

4.1 Classification par analyse spectroscopique

L'analyse spectroscopique est une technique permettant de classifier les candidates de façon beaucoup plus précise que l'analyse photométrique, mais qui demande également beaucoup plus de temps à élaborer. Nous avons réussi à observer plusieurs cibles à l'OMM durant le mois d'avril 2006. Le tableau 4.3 décrit les caractéristiques des données spectroscopiques des différents objets qui ont été observés. La partie du haut introduit cinq naines L déjà connues que nous avons observées afin de pouvoir déterminer l'efficacité de notre méthode d'analyse. La partie du bas du tableau indique les candidates que nous avons observées à des fins de classification. Dans ce tableau, la première colonne indique le nom de l'objet observé, la deuxième donne la date de l'observation avec SIMON, la troisième colonne indique le nombre de fichiers recueillis (N) ainsi que le temps d'intégration total (T_{exp}) pour chaque fichier (en seconde), la quatrième colonne indique la masse d'air moyenne (MA) de l'observation et finalement la dernière colonne représente l'étoile standard de calibration utilisée pour chaque objet ainsi que son type spectral. Tous les spectres ont été pris en basse résolution avec le prisme d'Amici.

Nom de l'objet	Date	$N \times T_{exp}$	MA	Standard
2MASS11040127+1959217	19-04-06	18×120	1.19	HD99120, A1V
2MASS11533966+5032092	18-04-06	36×90	1.20	HD128078, A1V
2MASS12212770+0257198	20-04-06	18×120	1.48	HD111744, A0V
2MASS14392836+1929149	20-04-06	18×120	1.11	BD+202952, A5V
2MASS15065441+1321060	20-04-06	27×120	1.20	BD+202952, A5V
C0858+2214	19-04-06	27×120	1.20	HD74721, A0V
C1628+0517	19-04-06	45×120	1.34	V* RV OPH, A3V

Tableau 4.3 – Liste des naines L connues et des candidates suivies en spectroscopie par SIMON.

Les deux méthodes d'analyse de spectres seront présentées aux sections 4.1.1 et 4.1.2.

4.1.1 Analyse par comparaison visuelle des spectres

4.1.1.1 Standards spectroscopiques

Avant d'entreprendre la comparaison visuelle afin de classer les spectres qui ont été observés, on doit présenter les spectres de naines M et de naines L qui serviront de standards spectroscopiques pour notre analyse.

Nous avons déjà mentionné qu'il n'existe pas de standards spectroscopiques pour les naines L dans le proche-infrarouge. Nous avons donc opté pour une comparaison avec des objets dont le sous-type spectral a déjà été déterminé par divers moyens, notamment par des spectres en optique. Ceci a le désavantage de ne pas être conforme à un procédé universel, mais nous ne pouvons faire autrement étant donné cette déficience dans la littérature. Des spectres disponibles à la communauté ont donc été utilisés et nous nous sommes efforcés de vérifier si les objets n'étaient pas une binaire connue ou n'avaient pas une autre caractéristique qui pourrait fausser la comparaison visuelle. Malgré tout, le nombre de spectres disponibles est très limité et un des spectres utilisés semble malheureusement particulier.

La figure 4.2 présente tous les spectres des naines M et L utilisées comme standards à des fins de classification par comparaison visuelle. La majorité des types spectraux ont été identifiés en utilisant de la spectroscopie en optique, sauf quelques objets qui ont été faits en proche-infrarouge. Les objets utilisés sont les suivants : LHS 429 (M7 ; Kirkpatrick et al. 1995, [42] ; Leggett et al. 2001, [48]), VB 10 (M8 ; McLean et al. 2003, [62]), DENIS-P J1048147-395606 (M9 ; Rayner et al. 2003, [70]), 2MASP J0345432+254023 (L0 ; Kirkpatrick et al. 1997, [39] ; Leggett et al. 2001, [48] ; McLean et al. 2003, [62]), 2MASSW J1439284+192915 (L1 ; Leggett et al. 2002a, [52] ; Knapp et al. 2004, [45]), 2MASSW J0015447+351603 (L2 ; McLean et al. 2003, [62]), DENIS-P J1058.7-1548 (L3 ; Tinney et al. 1998, [79] ; Leggett et al. 2001, [48]), 2MASSW J0036159+182110 (L4 (proche-infrarouge) ; Reid et al. 2001, [71] ; Leggett et al. 2002a, [52]), SDSS J053951.99-005902.0 (L5 ; Fan et al. 2000, [22] ; Geballe et al. 2002, [23] ; Leggett et al. 2002a, [52]), SDSS J163359.23-064056.5 (L6 (proche-infrarouge) ; Chiu et al. 2006, [17]), SDSS J112118.57+433246.5 (L7.5 (proche-infrarouge) ; Chiu et al. 2006, [17])

et Gl 584C (L8 ; Kirkpatrick et al. 2000, [44] ; Geballe et al. 2002, [23] ; Leggett et al. 2002a, [52]).

Afin d'effectuer les comparaisons visuelles à des fins de classification, il est important de bien qualifier les caractéristiques spectrales de ces objets qui évoluent au fur et à mesure que l'on se déplace des naines M tardives vers les naines L tardives. Les trois bandes présentes dans cet intervalle de longueurs d'onde, soit les bandes *J*, *H* et *K*, seront examinées.

D'abord, pour la bande *J*, on remarque que le gradient de la pente (entre $1.18 \mu\text{m}$ et $1.32 \mu\text{m}$) est faible pour toutes les naines M et qu'il devient de plus en plus prononcé pour les naines L. Aucune autre caractéristique particulière ne semble distinguer les naines M des naines L. Il est donc difficile d'utiliser la bande *J* pour différencier les sous-types de naines L, mais il peut toutefois servir à différencier les naines M des naines L par son gradient.

Ensuite, la bande *H* comporte quelques caractéristiques intéressantes pour la classification des naines L. D'abord, on remarque que la courbure de cette bande devient de plus en plus prononcée au fur et à mesure que l'on se déplace de la naine M7 vers les naines L8. Cela a également pour effet de hausser le niveau de cette bande comparativement à la bande *J*, jusqu'au point où la bande *H* atteint presque le niveau de la bande *J* pour la L8.

De plus, un creux, qui est à peine visible pour les naines M, commence à apparaître entre les naines L0 et L5. Ce creux, situé au centre de la bande *H* (à environ $1.60 \mu\text{m}$), semble atteindre son maximum pour les naines L2 et L3 et est dû à de l'absorption par du FeH. À l'aide de ces deux caractéristiques, la bande *H* semble être très utile pour classer les naines L.

Finalement, la bande *K* comprend également une caractéristique utile pour la classification. Celle-ci permet de différencier catégoriquement les naines M des naines L. En effet, on remarque que les naines M ont une courbure de la bande *K* presque nulle et beaucoup moins prononcée que les naines L. Une courbure dans la bande *K* signifie donc que le spectre appartient à coup sûr à une naine L.

De plus, cette courbure devient de plus en plus prononcée lorsque l'on se déplace

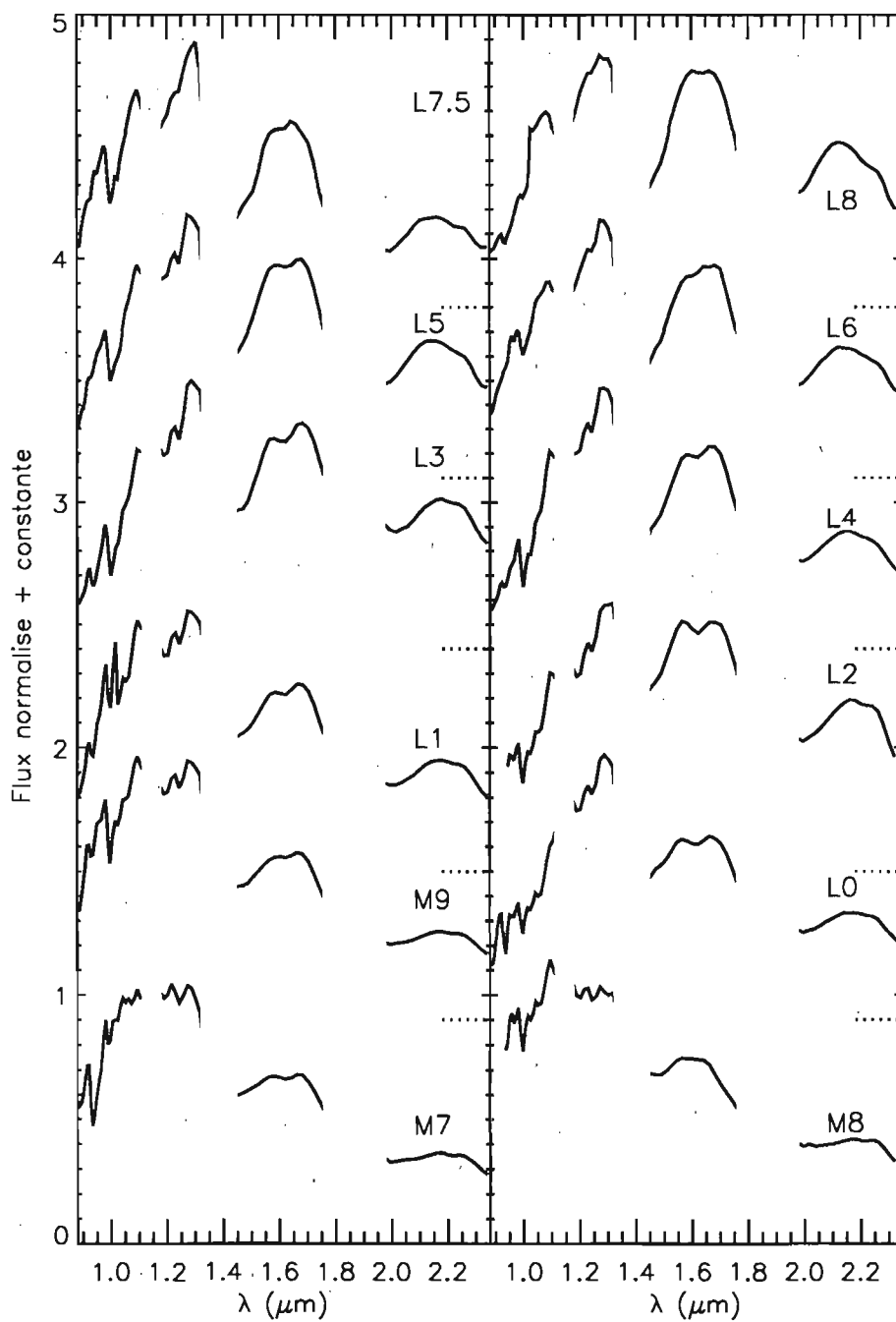


Figure 4.2 – Spectres de naines M et L utilisées comme standards.

vers les naines L tardives. Elle peut donc aider à différencier le sous-type des naines L.

L'aspect général du spectre des naines M et L dans les trois bandes, qui nous aide à différencier les différents sous-types spectraux, est une conséquence de la forme du spectre d'un corps noir et s'explique approximativement par la loi de Wien, qui donne le pic d'émissivité d'un corps noir :

$$\lambda_{pic} = \frac{2.898 \times 10^{-3}}{T} \quad (4.1)$$

où λ_{pic} est en mètre et T est la température en kelvin.

En effet, pour les naines M ($T > 2500$ K), le pic d'émissivité se situe en deçà de $1.1 \mu\text{m}$, ce qui se situe environ au centre de la bande J . Il n'est donc pas étonnant de constater que le gradient de la pente de cette bande est relativement plat et que le flux diminue pour les bandes H et K .

Pour les naines L ($2500 > T > 1300$ K), le pic d'émissivité se situe entre $1.1 \mu\text{m}$ et $2.2 \mu\text{m}$, ce qui se situe environ entre le centre de la bande J et le centre de la bande K . Le déplacement de ce pic d'émission fait donc en sorte que le niveau de la bande H et K augmente progressivement avec les sous-types des naines L. Bien entendu, ceci n'est qu'approximatif car d'autres phénomènes viennent modifier l'aspect du spectre de ces objets.

En effet, le spectre proche-infrarouge des naines M et L est dominé par des bandes d'absorption du H_2O , présentes dans la bande J (entre $1.09 \mu\text{m}$ et $1.20 \mu\text{m}$), dans la bande H (entre $1.30 \mu\text{m}$ et $1.51 \mu\text{m}$) et dans la bande K (entre $1.75 \mu\text{m}$ et $2.05 \mu\text{m}$). On peut également observer la présence de bandes d'absorption du FeH dans la bande J (à $1.01 \mu\text{m}$) et du CO dans la bande K (entre $2.29 \mu\text{m}$ et $2.41 \mu\text{m}$). D'autres raies d'absorption du Na , Fe , K , Al et Ca sont présentes mais il est cependant impossible de distinguer ses raies sur nos spectres à cause de la résolution utilisée pour nos observations.

En observant l'ensemble des naines M et L de la figure 4.2, on remarque que deux spectres, ceux de 2MASS0015+3516 (L2) et SDSS1121+4332 (L7.5), ne semblent pas cadrer avec le reste des spectres. En effet, le spectre de la naine L2 a des niveaux de flux beaucoup plus élevés pour les bandes H et K comparativement à la naine L1 et la naine

L3. Pour la naine L7.5, les niveaux des flux en bande *H* et *K* sont beaucoup plus faibles que pour la naine L6 et L8.

Chiu et al. (2006,[17]) explique que SDSS1121+4332 fait partie d'une petite population spéciale de naines L qui ont des couleurs proche-infrarouges anormalement bleues. Les auteurs soulignent que ce phénomène pourrait être dû à une métallicité sous-solaire et/ou à des couches plus minces de nuages condensés dans l'atmosphère de l'objet. Ceci explique la forme du spectre de cette naine L7.5 qui ne correspond pas aux autres naines L de sous-types semblables.

On ne peut expliquer si aisément l'aspect du spectre de la naine L2. Comme l'article qui traite de sa découverte (Kirkpatrick 2000,[44]) utilise des spectres en optique et non en proche-infrarouge, il est possible que cette naine L ait des caractéristiques qui modifient son spectre proche-infrarouge et non son spectre en optique. Ceci ne reste qu'une supposition et une étude plus poussée serait nécessaire pour expliquer cette différence. Ce spectre était le seul de type L2 auquel nous avons accès.

4.1.1.2 Résultats des types spectraux des naines L connues

Nous avons, lors de la mission d'avril 2006 à l'OMM, obtenu cinq spectres de naines L connues. Nous allons utiliser le spectre de ces naines L afin de vérifier notre capacité à déterminer le type spectral d'une source en le comparant visuellement aux spectres des standards présentés à la section 4.1.1.1. Afin de clarifier la comparaison, le spectre de l'objet à identifier est placé vis-à-vis du type spectral de la standard ayant le plus de similitude avec l'objet. Les spectres de comparaison ont été décalés par une constante et des lignes pointillées représentant le niveau de flux zéro de chaque spectre comparatif ont été ajoutées à droite de l'image. Étant donné que les spectres de comparaison ont été obtenus à une résolution plus élevée que le spectre obtenu par SIMON, nous avons réduit leur résolution pour correspondre à celle de nos observations. Ceci a été fait en utilisant le même intervalle en longueur d'onde que nos observations et en prenant la moyenne de la valeur du flux entre deux points consécutifs comme valeur à chaque point.

Nous avons utilisé un intervalle de sous-types spectraux assez vaste afin de pouvoir mieux distinguer les différences entre le spectre de notre objet et les différents sous-

types spectraux. Ainsi, nous avons sélectionné les sous-types spectraux ayant une plus forte ressemblance avec le spectre obtenu et avons ajouté quelques spectres plus éloignés dans la séquence spectrale. Nous avons également supprimé dans tous les spectres les régions où l'absorption tellurique du H₂O est plus forte (les intervalles 1.11-1.18 μm , 1.32-1.45 μm et 1.76-1.98 μm).

2MASS1104+1959 (L4).- Identifié par Cruz et al. (2003,[18]), cet objet a été classifié en optique comme étant une L4 (en comparant son spectre optique avec 9 standards allant de L0 à L8).

La figure 4.3 illustre la comparaison visuelle des spectres. L'inspection du spectre montre que ses caractéristiques sont semblables à celui de la L4. En effet, on remarque la présence d'un gradient important pour la bande *J*, signe que le spectre est bien celui d'un naine L. Ensuite, la courbure de la bande *H* est très similaire à celle de la naine L4, bien que le creux, qui est présent, soit un peu moins bien défini pour le spectre de l'objet que pour le spectre de la L4 de comparaison. Ce creux ressemble en effet plus à celui que l'on retrouve pour la naine L5. Finalement, la courbure de la bande *K* est presque identique à celle de la naine L4. L'analyse visuelle concorde donc bien avec un type spectral de $L4 \pm 1$.

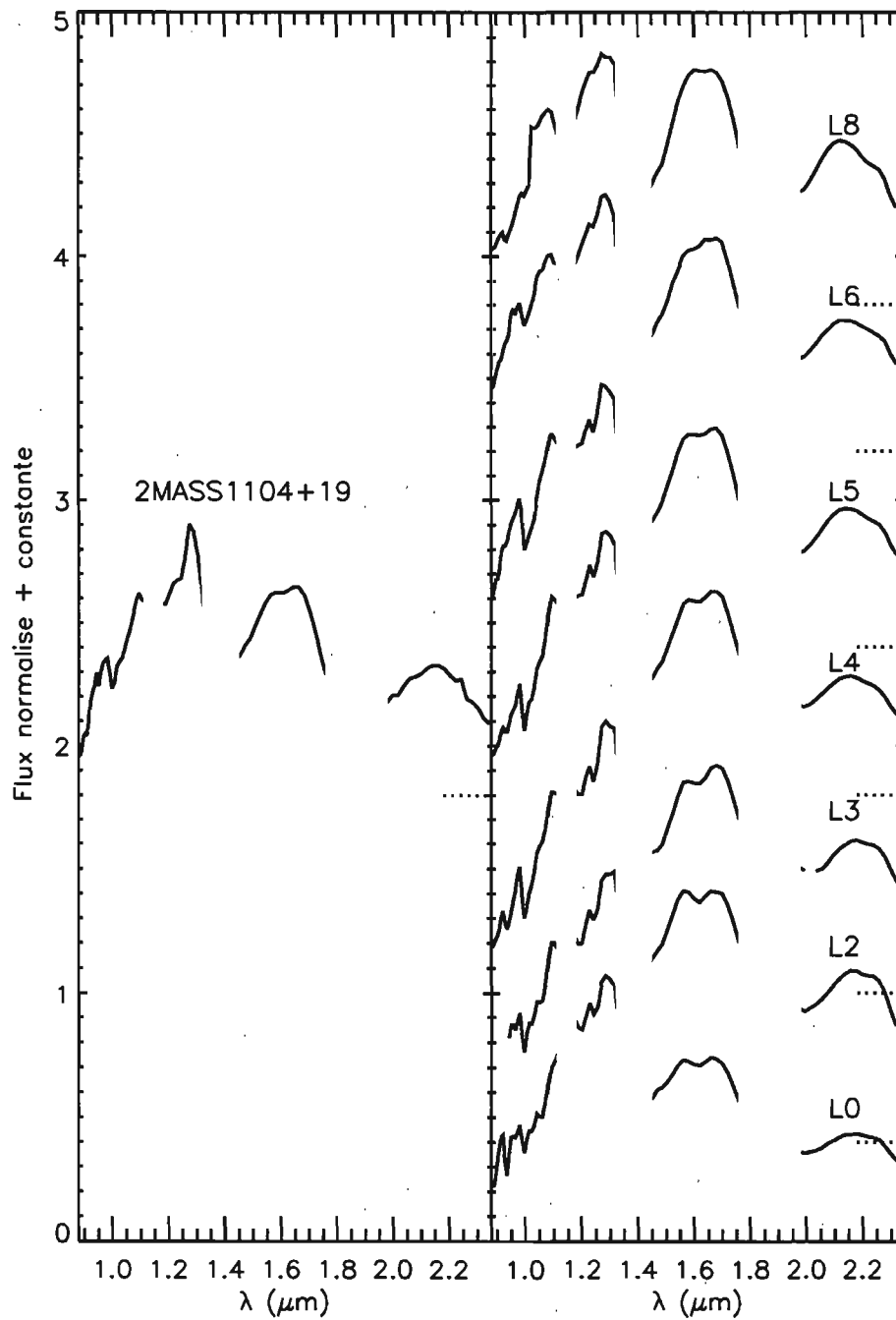


Figure 4.3 – Spectre de 2MASS1104+1959 (L4) avec les spectres de naines M et L connus.

2MASS1153+5032 (L1).- Identifié par Reid et al. (en préparation)², cet objet a un type spectral de L1.

Le spectre de *2MASS1153+5032* a un rapport S/B semblable à celui de *2MASS1104+1959* (médiane ≈ 28 contre médiane ≈ 29). La comparaison du spectre de cet objet avec celui des autres naines L et M est présenté à la figure 4.4. Nous avons placé le spectre vis-à-vis de celui de la naine L1 malgré le fait qu'il y ait de petites différences entre les deux spectres au niveau des bande *H* et *K*.

D'abord, le gradient dans la bande *J* est presque identique à celui que l'on retrouve pour la naine L1 de comparaison. Cette bande confirme donc bien que cet objet est une naine L. La bande *H* est cependant légèrement différente et se situe plutôt entre ce que l'on observe pour la naine L0 et la naine L1, aussi bien pour la courbure que pour le creux. On peut en arriver à la même conclusion en observant la bande *K* : la courbure a une forme qui se situe entre celle de la naine L1 et celle de la naine L0.

À cause des légères différences entre le spectre de cet objet et celui de la naine L1, nous pouvons donc, à la vue de cette comparaison, classifier *2MASS1153+5032* comme ayant un type spectral de $L0.5 \pm 1$. Les indices spectraux pourront nous aider à confirmer le sous-type spectral de cet objet.

²les données proviennent du site <http://dwarfarchives.org>

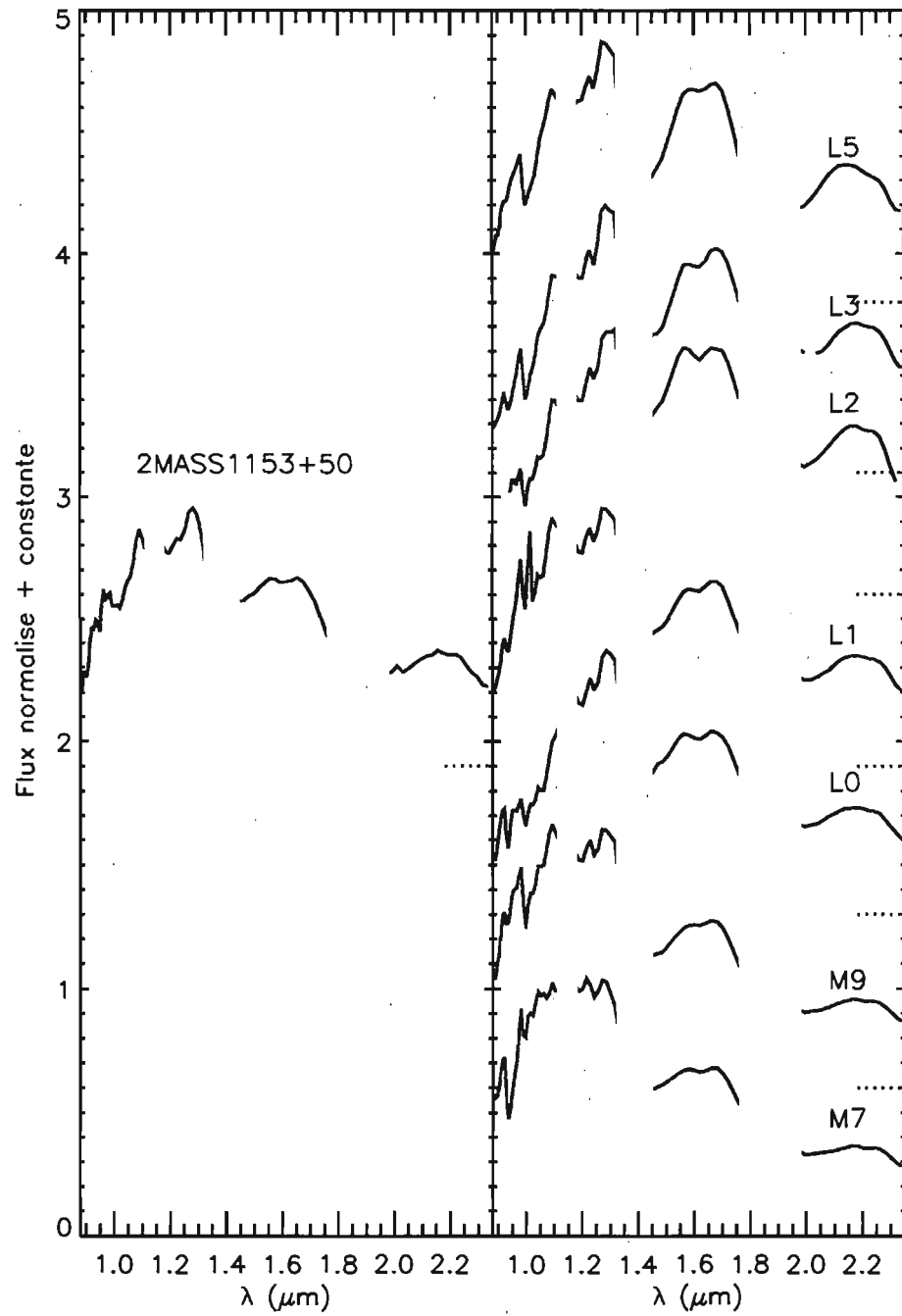


Figure 4.4 – Spectre de 2MASS1153+5032 (L1) avec les spectres de naines M et L connues.

2MASS1221+0257 (L0).- Également identifié par Reid et al. (en préparation)³, cet objet a un type spectral de L0. Le rapport S/B est bon (médiane ≈ 56). Cette naine L, qui se situe à la limite des naines M et des naines L, pourrait être plus difficile à classifier.

La figure 4.5 présente la comparaison avec les spectres de naines M et L connues. Le spectre a été placé vis-à-vis de celui de la L0 à cause de la bande *K*. En effet, la courbure de cette dernière, qui est plus prononcée que les naines M, permet d'identifier la nature de cet objet. Le gradient de la pente dans la bande *J* est également plus prononcé que ceux que l'on retrouve dans les naines M, mais semble néanmoins moins important que le spectre de la L0 de comparaison. L'aspect du spectre en deçà de $1.1 \mu\text{m}$ est également différent de ce que l'on observe sur celui de la L0. La bande *H* est également particulière : elle ressemble davantage à la M9 qu'à la L0, particulièrement à cause du flux qui reste plat entre 1.45 et $1.5 \mu\text{m}$. Le creux semble cependant très légèrement plus prononcé que celui dans le spectre de la M9.

Malgré les différences qu'il existe dans la bande *H*, nous allons classier cet objet avec un type spectral de $L0\pm 1$ à cause du flux présent dans la bande *K* et de la forme de la bande *J*. Les indices spectraux pourront nous aider à clarifier la situation.

³les données proviennent du site <http://dwarfarchives.org>

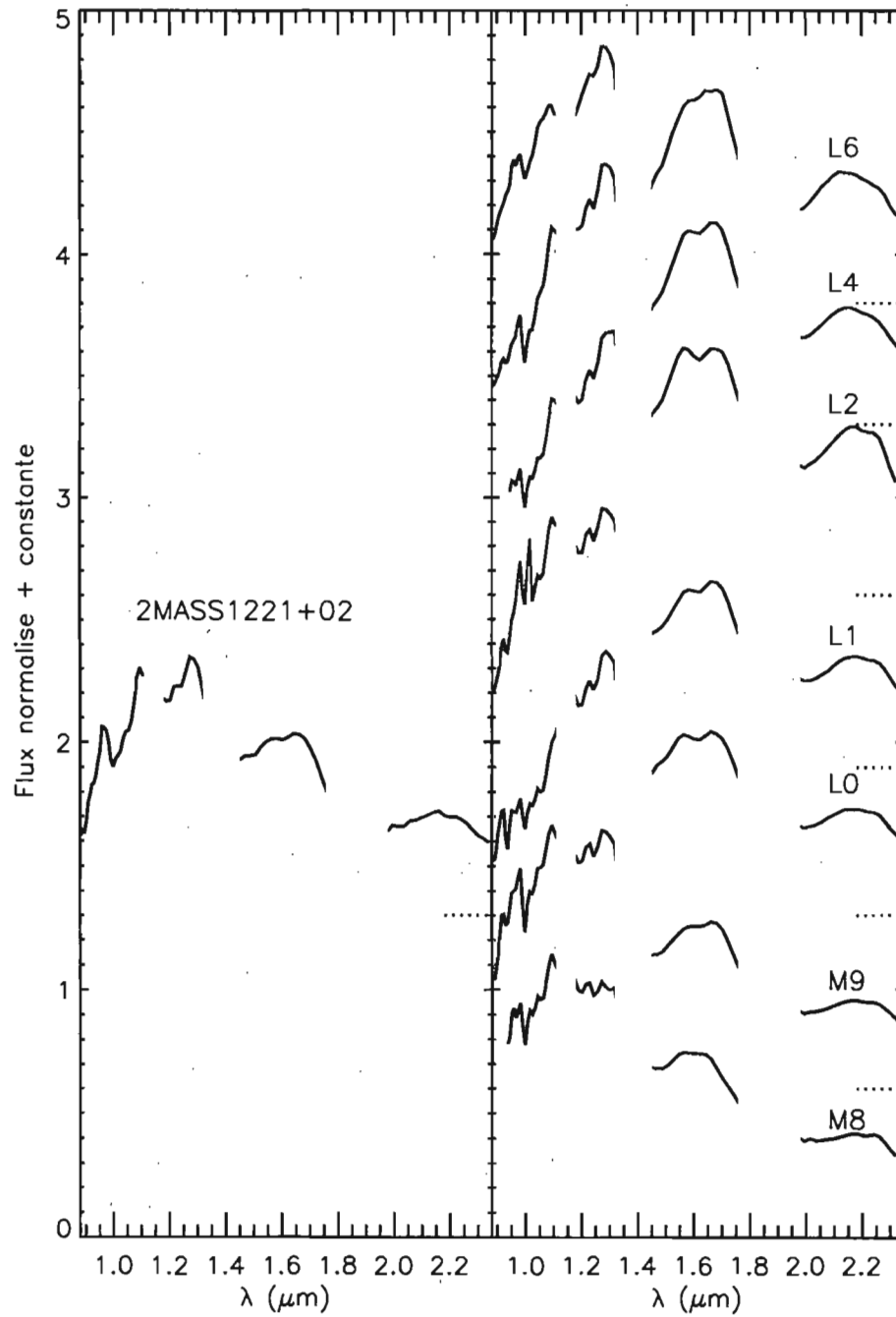


Figure 4.5 – Spectre de 2MASS1221+0257 (L0) avec les spectres de naines M et L connues.

2MASS1439+1929 (L1).- Identifié par Kirkpatrick et al. (1999,[43]), cet objet a été classifié en optique comme étant une L1. Les différents sous-types spectraux ont d'ailleurs été définis en optique dans ce même article. Cette candidate étant très brillante ($J = 12.76$), le rapport S/B est très bon (médiane ≈ 56). D'ailleurs, même les intervalles situés près des régions à forte absorption tellurique ont un rapport S/B raisonnable.

La figure 4.6 présente le spectre de *2MASS1439+1929* comparé à ceux de naines L et M connues. Le spectre a été placé vis-à-vis du spectre de la naine L1 à cause des ressemblances qu'il y a entre les deux. On remarque d'abord le gradient de la pente en bande J , qui ressemble davantage à la naine L2. Cependant ce gradient est définitivement plus élevé que celui des naines M. La bande H est légèrement différente de ce que l'on observe pour la naine L1 parce que le creux est beaucoup moins prononcé et ressemble plus à ce que l'on observe pour la naine M9. La courbure de cette bande est également légèrement inférieure à celle que l'on observe pour la naine L1, si on la compare au niveau de la bande J . Cependant, cette courbure est plus importante que ce que l'on observe pour les naines M ou la naine L0. Malheureusement, on ne peut comparer la courbure de la bande H avec celle de la L2 car celle-ci ne semble pas représentative d'une naine L2 typique. La courbure de la bande K est moins prononcée pour l'objet que pour la L1, et ressemble plus à celle d'une L0.

On peut donc affirmer que le meilleur rapport S/B n'a pas aidé à classifier visuellement cet objet. Malgré cela, l'allure générale du spectre et les quelques petites différences nous permettent de le classifier comme étant une $L0.5 \pm 1$. Les indices spectraux pourront donc nous aider à confirmer le sous-type spectral de cet objet.

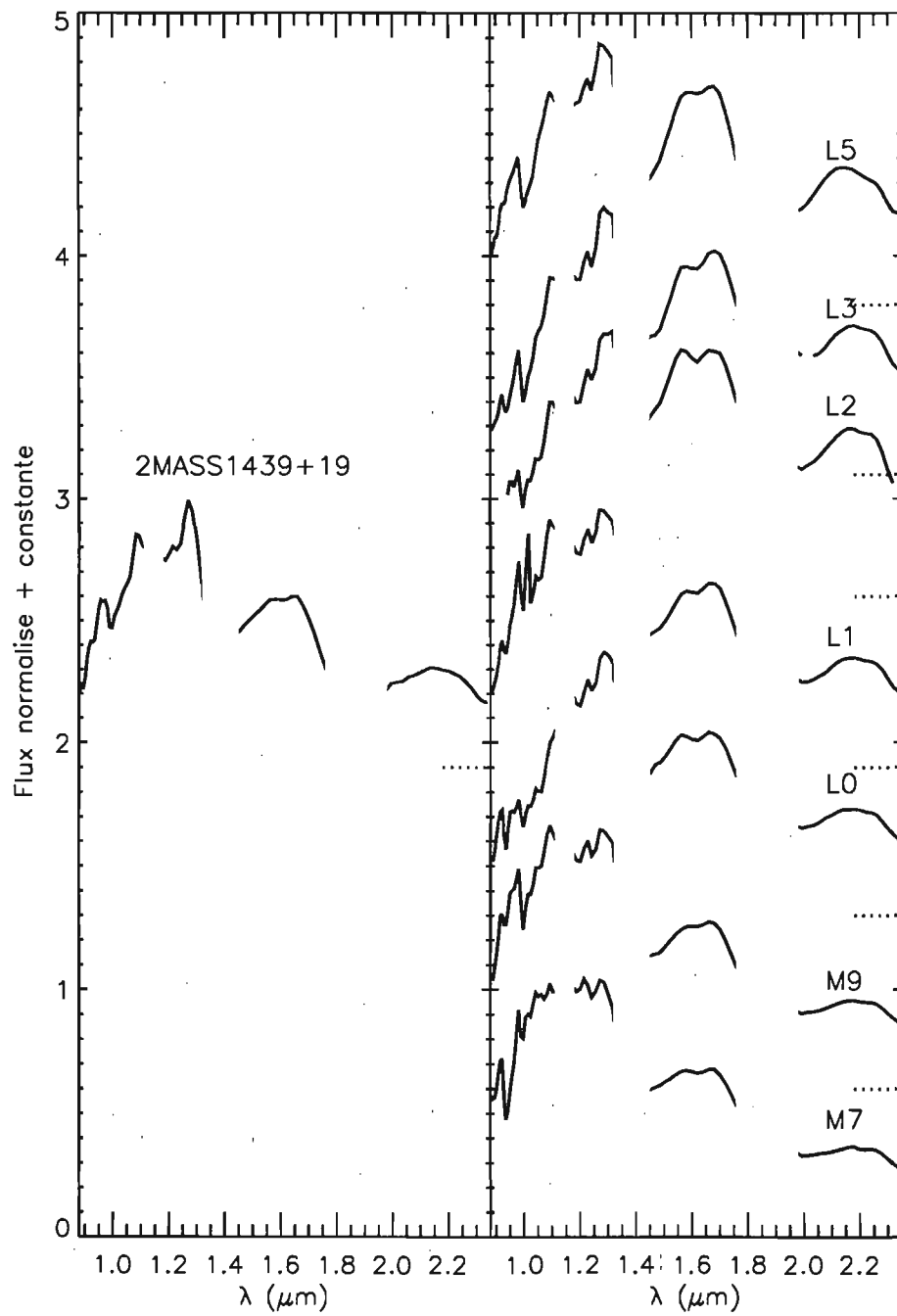


Figure 4.6 – Spectre de 2MASS1439+1929 (L1) avec les spectres de naines M et L connues.

2MASS1506+1321 (L3).- Identifié par Gizis et al. (2000,[28]), cet objet a été classifié en optique comme étant une L3. Le rapport S/B obtenu pour cette naine L est excellent (médiane ≈ 62). Les caractéristiques du spectre semblent également très bien définies.

La figure 4.7 démontre qu'en comparant le spectre de notre objet avec les autres spectres de naines M et L connues, celui-ci ressemble définitivement plus à celui de la naine L3 qu'aux autres. Le gradient de la pente dans la bande *J* est identique à la L3 et démontre clairement que cet objet appartient à la classe des naines L. La courbure de la bande *H* est également très prononcée et se compare à celle de la naine L3. Cependant, comme pour les autres naines L étudiées jusqu'à maintenant, le creux ne ressemble pas à celui que l'on voit dans le spectre de la naine L3, mais ressemble plutôt à ce que l'on observe sur la L4. La courbure de la bande *K* est également comparable à celle de la L3. On observe même le petit renflement situé à $2.25 \mu\text{m}$ dans le spectre des deux objets, même s'il s'agit d'une région à faible rapport S/B.

Nous pouvons donc affirmer que cet objet est une $L3\pm 1$ en accord avec le type spectral défini par Gizis et al. (2000,[28]).

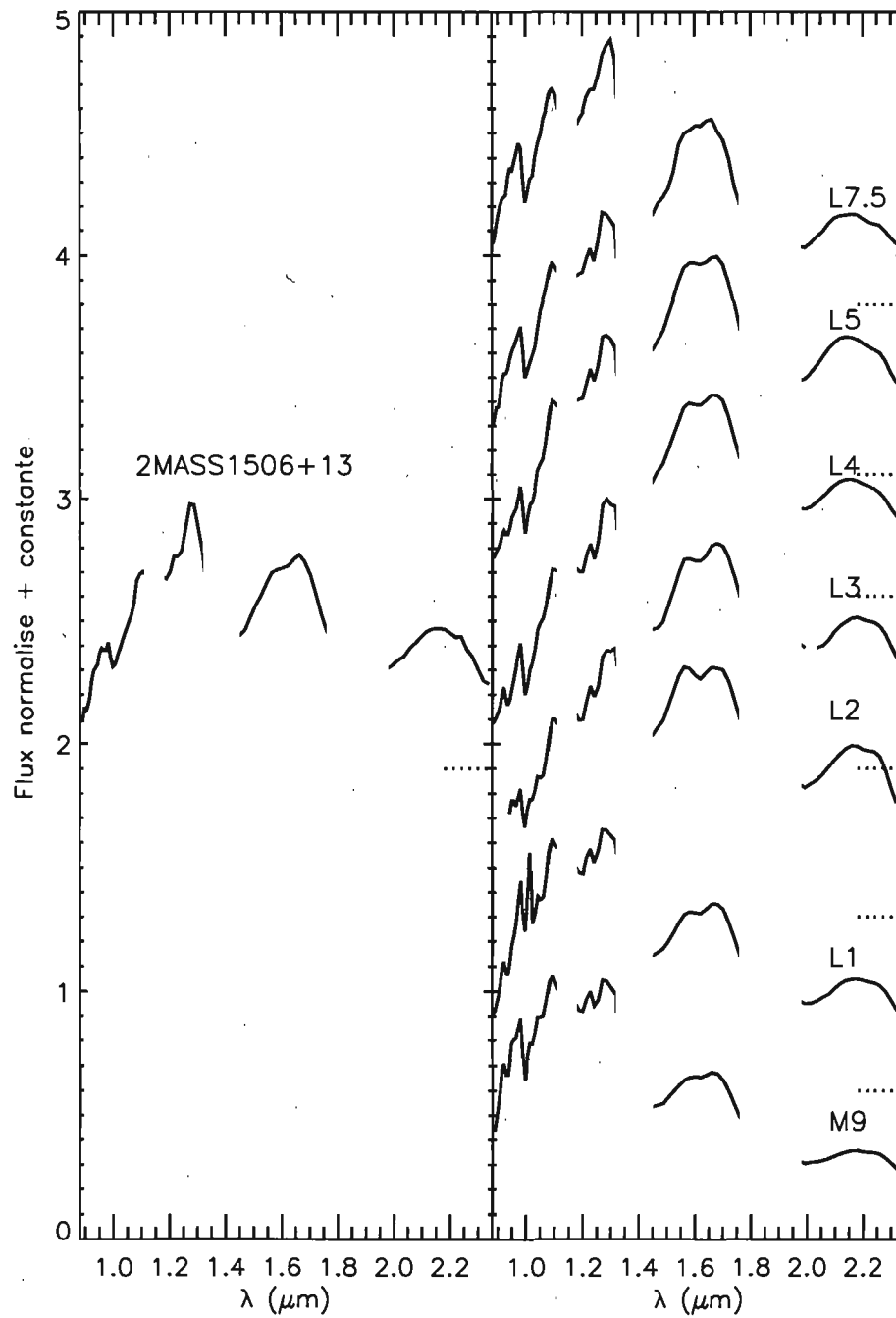


Figure 4.7 – Spectre de 2MASS1506+1321 (L3) avec les spectres de naines M et L connus.

4.1.1.3 Résultats des candidates

Jusqu'à maintenant, nous avons été en mesure de reclassifier, à un sous-type près, les naines L connues que nous avons observées. Nous avons découvert cependant que l'on ne peut se fier au creux situé au centre de la bande H . En effet, tel que mentionné par Chiu et al. (2006,[17]), les raies d'absorption dues au FeH (et au H_2O) peuvent être affectées par de la métallicité sous-solaire et/ou par des couches plus minces de nuages condensés, comme c'est possiblement le cas pour SDSS1121+4332. Ces phénomènes sont cependant encore de nos jours mal compris.

Pour déterminer le type spectral de l'objet, il faut donc plutôt regarder l'ensemble des caractéristiques dans les trois bandes. Nous allons appliquer, pour les candidates à classifier, cette même méthode d'analyse.

C0858+2214.- D'après les couleurs de cet objet (voir les figures 1.3 et 1.4 ainsi que le tableau 4.1), celui-ci est probablement une L précoce. Le rapport S/B est semblable à ce que l'on a observé pour les autres objets que nous avons étudiés jusqu'à présent (médiane ≈ 29).

Pour la comparaison visuelle du spectre de *C0858+2214* avec les spectres de naines M et L connues, nous avons décidé de placer le spectre de notre candidate vis-à-vis du spectre d'une L1 (2MASSW J1439284+192915). En regardant les courbures des bandes *H* et *K*, on remarque que leurs niveaux sont légèrement plus élevés que pour la naine L1. Cependant nous n'avons pas comparé ce spectre à celui que nous avons pour la L2. En effet, celle-ci a un spectre particulier, comme il a été mentionné à la section 4.1.1.1.

Nous avons donc comparé notre spectre avec celui d'une L1, et on remarque, en observant le gradient de la pente dans la bande *J*, que celui-ci est légèrement supérieur à ce que l'on observe pour la naine L1. Les courbures des bandes *H* et *K* présentent les mêmes caractéristiques, comme nous l'avons mentionné auparavant. Seul le petit creux au centre de la bande *H* correspond environ à ce que l'on observe pour la naine L1. Mais nous avons mentionné que l'on ne peut se fier au creux comme indicateur seul pour classer une candidate. Ainsi, étant donné l'aspect général du spectre, nous pouvons affirmer que *C0858+2214* est une $L2 \pm 1$.

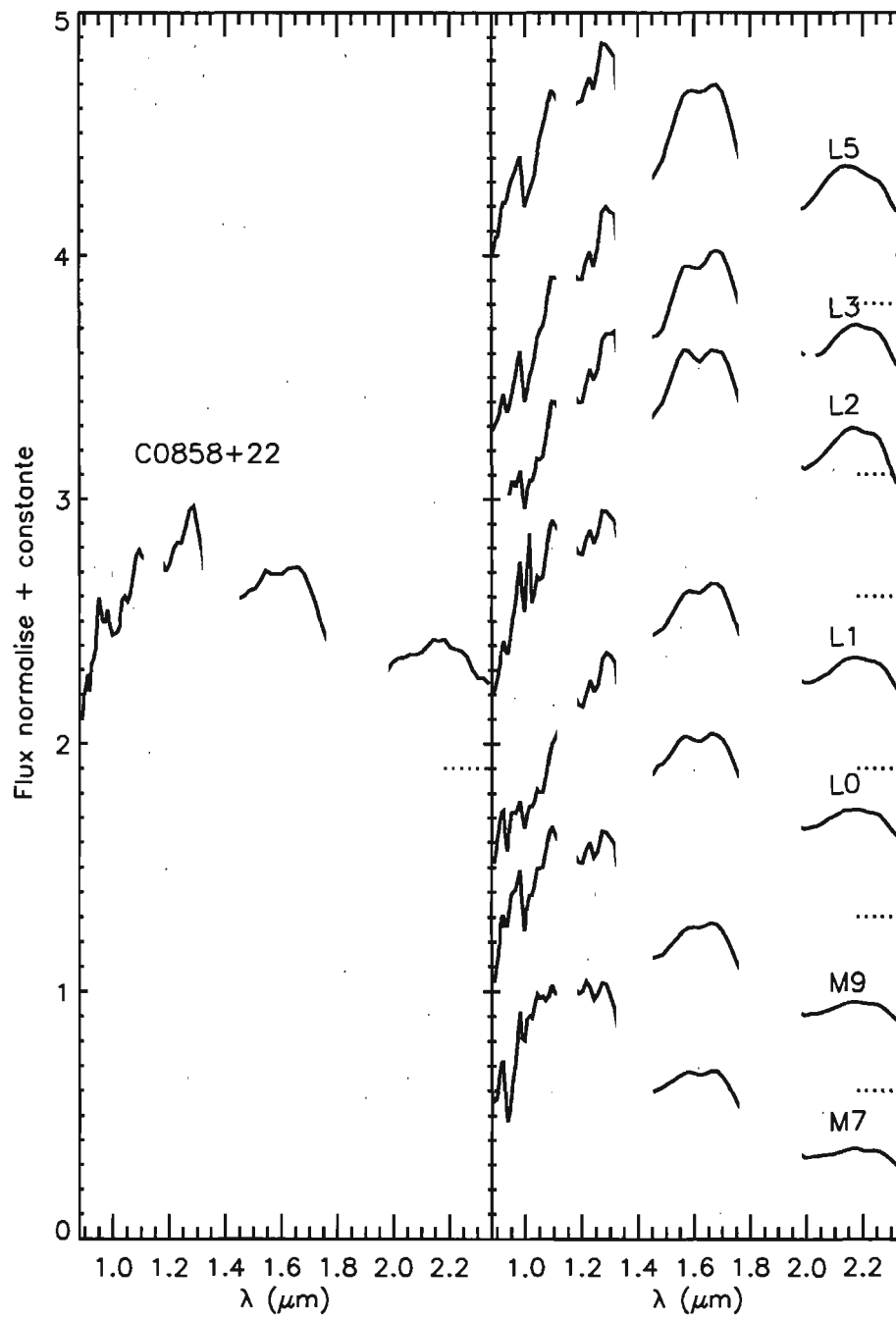


Figure 4.8 – Spectre de C0858+2214 avec les spectres de naines M et L connues.

C1628+0517.- En comparant les couleurs proche-infrarouges du tableau 4.1 aux figures 1.3 et 1.4, on remarque que cet objet se situe à la limite des L précoces ou à la limite des naines L tardives.

On remarque que le rapport S/B est faible pour cette candidate, particulièrement dans la bande *J*. En effet, on calcule une médiane ≈ 6 , avec une valeur maximale de 19. Ceci s'explique d'abord par le fait que cet objet est le plus faible que nous ayons observé ($J = 15.8$). Malgré le fait que nous ayons obtenu le plus grand nombre d'images comparativement aux autres objets (45 au total), certaines étaient inutilisables parce que nous avons eu des problèmes de guidage du télescope à un certain moment et il y a également eu présence de nuages durant l'observation de quelques images. Malgré le rapport S/B très faible, on remarque que la forme du spectre ne ressemble pas aux spectres de naines L que nous avons vus jusqu'à maintenant. Il ressemble plutôt à celui d'une naine M, et nous l'avons donc placé vis-à-vis du spectre de la naine M7.

En regardant la bande *J*, on remarque aussitôt que le gradient de la pente n'est pas prononcé et reste relativement plat, comme celui des naines M. La courbure de la bande *H* est moins prononcée que celui de la M9 et ressemble à ce que l'on observe pour la naine M7. Il est inutile d'essayer d'observer le creux situé dans la bande *H* pour cet objet, le rapport S/B étant trop faible. Un autre aspect du spectre qui vient confirmer que cet objet est une naine M est la courbure qui est absente de la bande *K*.

La comparaison visuelle de cet objet nous semble donc indiquer que cette candidate est une naine $M7 \pm 2$. L'incertitude que nous avons estimée ici est de deux sous-types étant donné le rapport S/B très faible de l'objet.

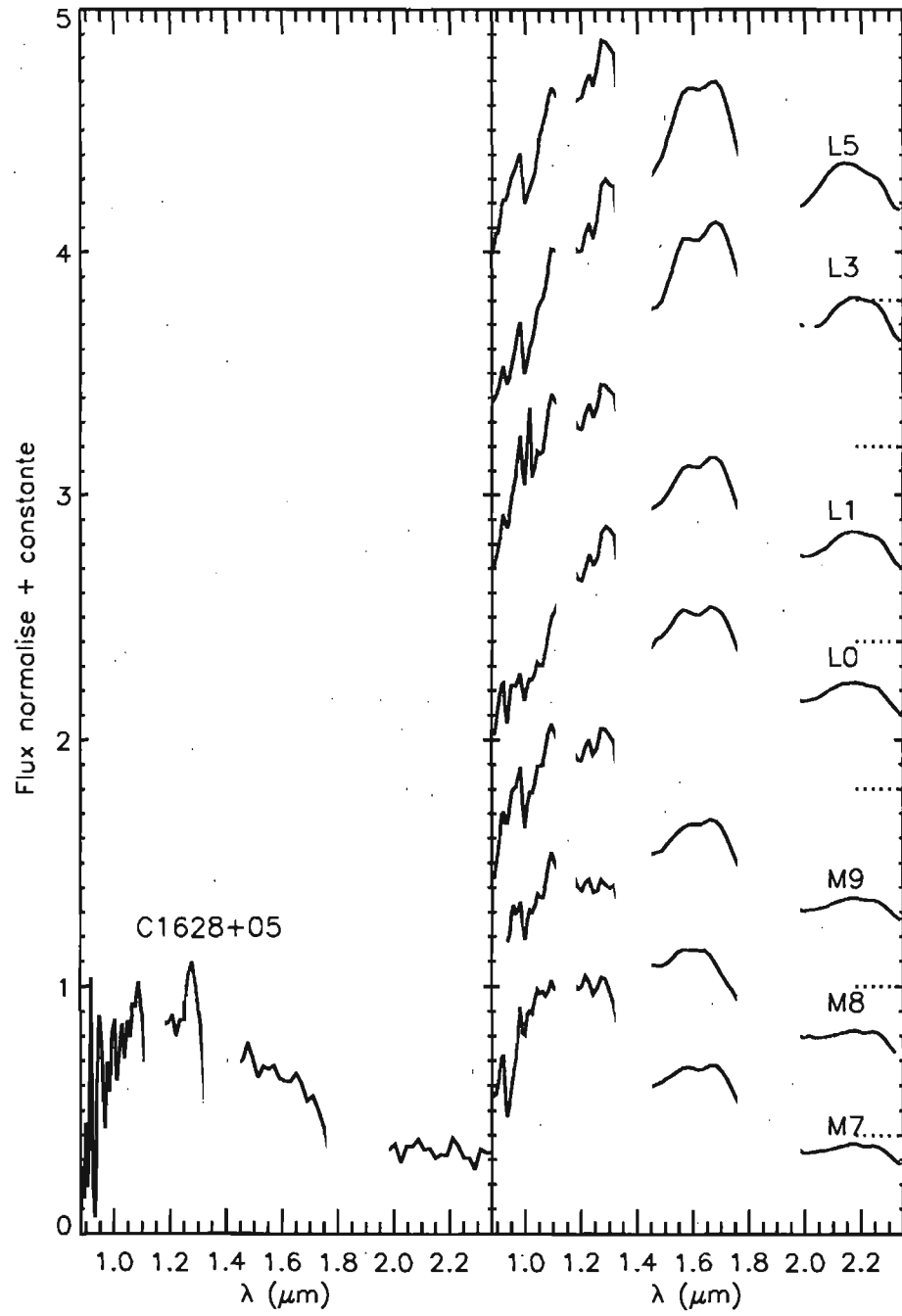


Figure 4.9 – Spectre de C1628+0517 avec les spectres de naines M et L connues.

4.1.2 Analyse à l'aide des indices spectraux

Nous avons vu avec l'analyse par comparaison visuelle que certaines caractéristiques des spectres des objets observés ne correspondent pas entièrement avec ce que l'on observe dans les spectres de comparaison. Certaines caractéristiques spectrales placent l'objet dans un sous-type, et d'autres caractéristiques dans d'autres sous-types. Les indices spectraux seront donc très utiles pour confirmer le type spectral de nos candidates. Nous allons vérifier sur les naines L connues si l'ensemble des indices spectraux présentés à la section 3.3.1 nous sont utiles à des fins de classification.

Pour cela, nous incluons pour chaque objet trois graphiques du spectre qui indiquent les incertitudes sur le flux mesuré et les régions où sont mesurés les indices pour les trois différents ensembles (ceux de Reid, Testi et Geballe). Ceci nous permettra de déterminer si certains indices se situent à des endroits où l'absorption du H_2O de l'atmosphère terrestre est trop importante et nous empêche de calculer leur valeur correctement. Nous allons ensuite présenter la valeur de tous les indices spectraux calculés pour l'objet en indiquant ceux qui se retrouvent en dehors des domaines utilisés pour définir les types spectraux des objets.

4.1.2.1 Résultats des types spectraux des naines L connues

2MASS1104+1959 (L4).- Cet objet a été classifié visuellement par notre analyse comme étant une naine L4. La figure 4.10 nous présente le spectre de l'objet avec les différents intervalles des indices.

On remarque que certains indices se situent à proximité de régions à forte absorption tellurique due au H_2O et où le rapport S/B est plus faible (1.33-1.35 μm de Reid (pour l'indice H_2O^A), 1.09-1.13 μm et 1.77-1.81 μm de Testi (pour les indices sH_2O^J et sH_2O^{H2} respectivement) et 2.215-2.255 de Geballe (pour l'indice CH_4 2.2 μm), ce qui pourrait affecter la qualité des indices définis par ces régions.

D'autres indices, particulièrement ceux entre 1.33-1.35 μm , 1.28-1.30 μm , 1.69-1.71 μm et 1.79-1.81 μm de Reid ainsi que ceux entre 1.57-1.59 μm et 1.46-1.48 μm de Geballe, couvrent un très petit intervalle en longueur d'onde, et sont moins précis à la résolution à laquelle nous observons. Il faut donc utiliser ces indices avec précaution. Comme mentionné à la section 3.3.1, les indices de ces auteurs ont été définis en tenant compte du fait que les spectres ont été observés à $R \approx 500$.

Les valeurs des indices sont présentées au tableau 4.4. En faisant la moyenne des indices pour Reid, on obtient un type spectral pour notre objet de L2.5, l'indice H_2O^A étant celui le plus près du type spectral connu et retrouvé par la comparaison visuelle. Pour Testi, on obtient une moyenne de L3.5, les indices sH_2O^J et sH_2O^K ayant une valeur de L4. Ceci est contraire à ce que l'on aurait pu croire étant donné que ces deux indices font partie de ceux qui sont plus susceptibles d'erreur, tel que vu à la section 3.3.1. Pour Geballe, on obtient une moyenne de type spectral de 3. Les indices spectraux de Testi et al. sont donc plus près de ce que l'on obtient avec la comparaison visuelle. Ceci est normal étant donné que ceux-ci ont été définis dans le but d'utiliser des spectres de basse résolution ($R \sim 100$).

Le type spectral serait donc, selon les indices spectraux de Testi, $L3.5 \pm 1$. Ceci concorde très bien avec la classification faite par Cruz et al. (2003,[18]), qui est de type spectral L4 et également avec la comparaison que nous avons faite avec les spectres connus.

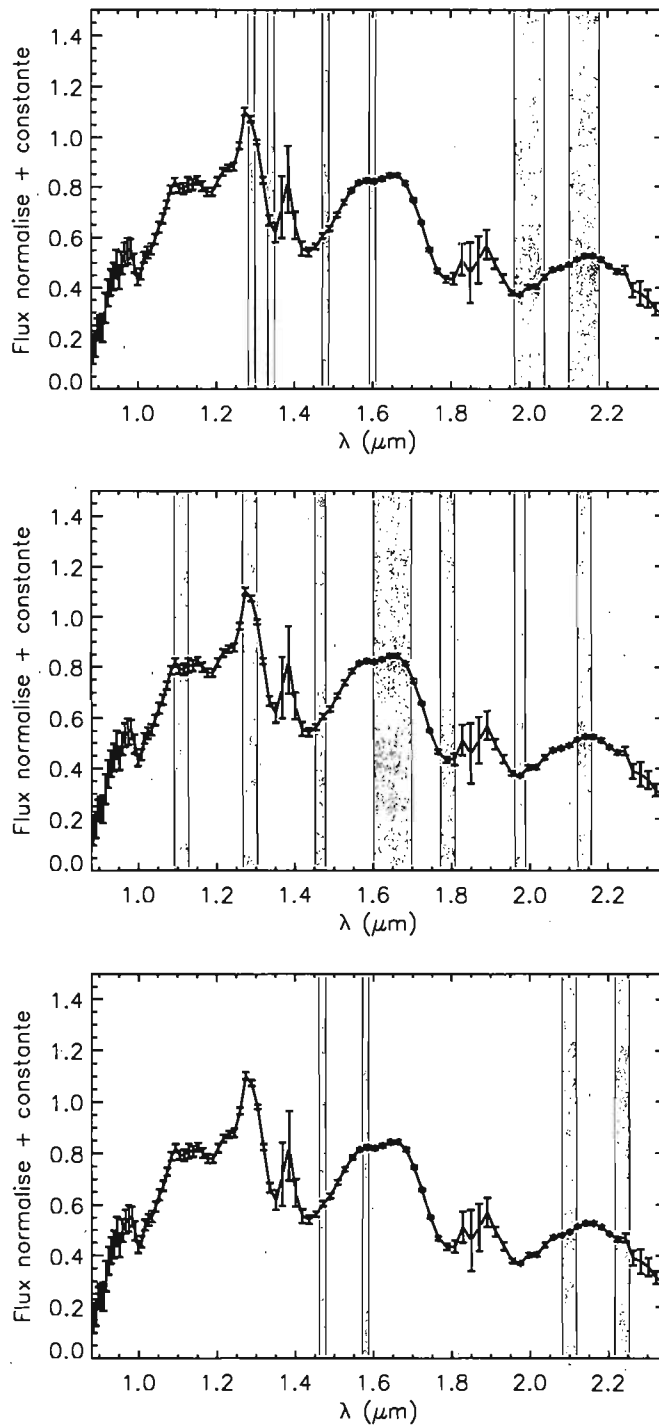


Figure 4.10 – Spectre de 2MASS1104+1959 avec les intervalles des différents indices spectraux. Le graphique du haut indique les indices spectraux de Reid, celui du milieu les indices spectraux de Testi et le graphique du bas les indices spectraux de Geballe.

Indices	Valeur	Type Spectral
Reid		
K1	0.2367 ± 0.0045	L2.5
H ₂ O ^A	0.621 ± 0.023	L3.5
H ₂ O ^B	0.7560 ± 0.0098	L2
Testi		
sHJ	0.2349 ± 0.0074	L2.5
sKJ	0.6751 ± 0.0077	L2
sH ₂ O ^J	0.269 ± 0.012	L4
sH ₂ O ^{H1}	0.3473 ± 0.0082	L2
sH ₂ O ^{H2}	0.625 ± 0.013	L6
sH ₂ O ^K	0.3354 ± 0.0057	L4
Geballe		
H ₂ O 1.5 μm	1.36 ± 0.04	L2
CH ₄ 2.2 μm	0.98 ± 0.02	L4

Tableau 4.4 – Liste des indices spectraux de 2MASS1104+1959.

2MASS1153+5032 (L1).- La comparaison visuelle de cet objet a donné un type spectral de naine L0.5.

La figure 4.11 montre que le spectre de *2MASS1153+5032* a un rapport S/B un peu plus faible que les spectres des autres objets (médiane ≈ 28). Comme pour *2MASS1104+1929*, certains intervalles se situent dans des régions où le rapport S/B est plus faible, le pire étant l'intervalle 1.09-1.13 μm , qui affecte l'indice $s\text{H}_2\text{O}^J$.

Nous présentons les indices spectraux de cet objet au tableau 4.5. Comme ce fut le cas pour *2MASS1104+1929*, le rapport S/B plus faible ne signifie pas ici que les indices spectraux sont plus dispersés. Les indices de Reid confèrent à cet objet un type spectral moyen de L1.5. L'indice H_2O^B n'entre pas dans le domaine de types spectraux définis par Reid, mais serait, si le domaine était plus large, à un sous-type inférieur à M8. Pour Geballe, l'indice CH_4 2.2 μm n'est pas fiable car il mesure la présence du CH_4 qui n'est pas présent pour les types spectraux inférieurs à L3 et l'indice H_2O 1.5 μm donnerait un type spectral inférieur à L0, si le domaine de définition de l'indice était plus large.

Cette fois-ci, un seul indice ($s\text{H}_2\text{O}^{H1}$) de Testi est inutilisable, car il sort du domaine défini par Testi. Cette indice indique tout de même que cet objet aurait un type spectral inférieur à L0. Mentionnons que cet indice a un intervalle qui se situe à un endroit où le rapport S/B est plus faible, soit 1.45-1.48 μm . Le reste des indices permettent de déterminer le type spectral de *2MASS1153+5032* en faisant la moyenne de ceux-ci : $L1 \pm 1$. Ce type spectral concorde parfaitement avec celui donné par Reid et al. (en préparation) et concorde bien avec notre comparaison visuelle du spectre.

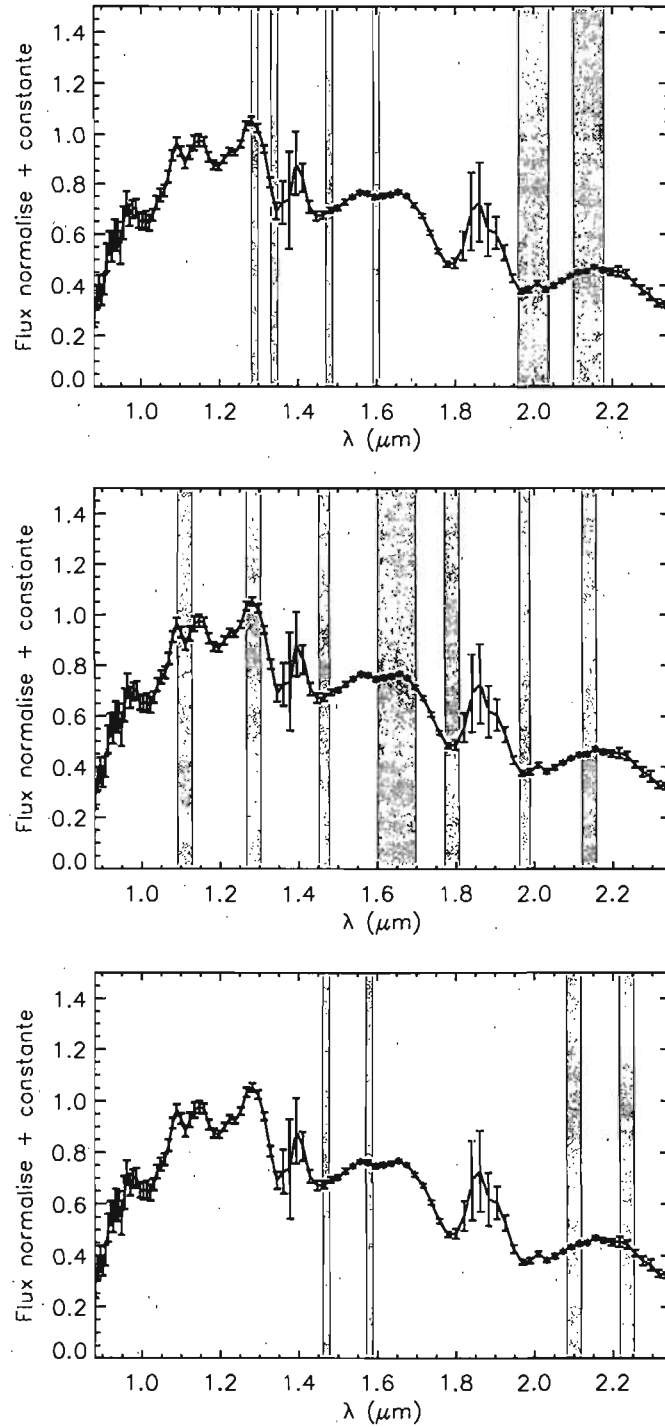


Figure 4.11 – Spectre de 2MASS1153+5032 avec les intervalles des différents indices spectraux. Le graphique du haut indique les indices spectraux de Reid, celui du milieu les indices spectraux de Testi et le graphique du bas les indices spectraux de Geballe.

Indices	Valeur	Type Spectral
Reid		
K1	0.1673 ± 0.0057	L1
H ₂ O ^A	0.666 ± 0.035	L2
H ₂ O ^B	0.929 ± 0.013	-
Testi		
sHJ	0.323 ± 0.010	L0.5
sKJ	0.771 ± 0.011	L1
sH ₂ O ^J	0.113 ± 0.015	L1.5
sH ₂ O ^{H1}	0.104 ± 0.015	-
sH ₂ O ^{H2}	0.427 ± 0.011	L2
sH ₂ O ^K	0.1954 ± 0.0088	L0.5
Geballe		
H ₂ O 1.5 μm	1.13 ± 0.04	-
CH ₄ 2.2 μm	0.97 ± 0.02	L4

Tableau 4.5 – Liste des indices spectraux de 2MASS1153+5032.

2MASS1221+0257 (L0).- Cet objet a été classifié par la comparaison visuelle comme étant une naine L0. La figure 4.12 montre le spectre de cet objet avec les différents intervalles. Aucun intervalle ne semble affecté par un rapport S/B très mauvais. Il faut rappeler que le rapport S/B est très bon (médiane ≈ 56)

Le tableau 4.5 énonce les différents indices spectraux calculés à partir du spectre de cet objet.

D'abord, en regardant les indices de Reid, on remarque que deux indices sont à la limite du domaine établi pour les types spectraux. Ceci fait en sorte que la moyenne des indices attribue à cet objet un type spectral de M9. Pour Geballe, on retrouve la même situation que pour *2MASS1153+5032* : l'indice CH_4 2.2 μm n'est pas fiable et l'indice H_2O 1.5 μm donnerait un type spectral inférieur à L0, si le domaine de définition de l'indice était plus large.

On remarque en observant les indices spectraux de Testi que deux indices sont inutilisables pour le domaine de types spectraux établis : sKJ et $\text{sH}_2\text{O}^{\text{H}1}$. Pour ce dernier, un de ses intervalles utilisé est situé entre 1.45 μm et 1.48 μm et nous avons mentionné lors de la comparaison visuelle que le spectre de notre objet est différent de celui de la L0 connue à cet endroit et ressemble davantage à une naine M. Les deux indices nous donnent des valeurs qui placeraient l'objet dans le type spectral M. Malheureusement, aucune relation n'est donnée pour déterminer les sous-types spectraux M avec ces indices.

Les indices de Testi utilisables ne sont pas trop dispersés. Le calcul de la moyenne de ceux-ci confère à cet objet un type spectral de $\text{L}0.5 \pm 1$, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par la comparaison de son spectre. Soulignons que si le domaine de types spectraux couvrait également les naines M, les indices sKJ et $\text{sH}_2\text{O}^{\text{H}1}$ feraient probablement en sorte que la moyenne des indices placerait cet objet dans le sous-type L0.

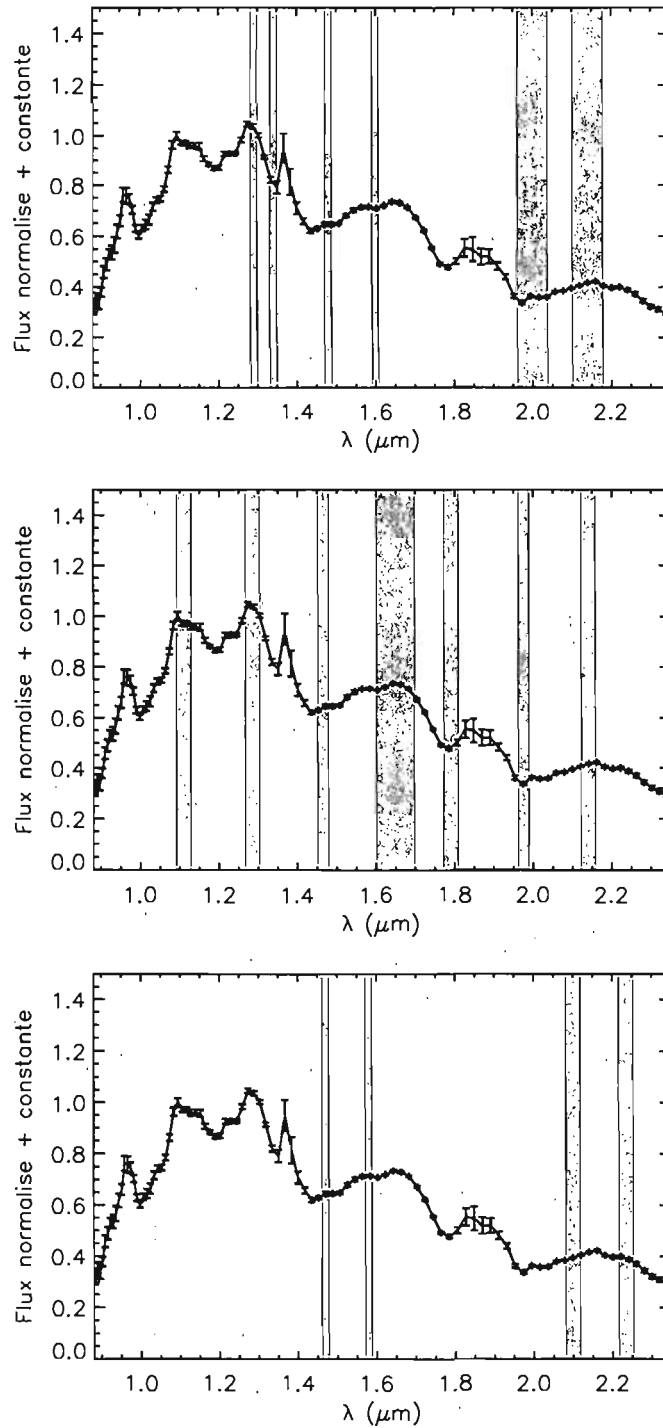


Figure 4.12 – Spectre de 2MASS1221+0257 avec les intervalles des différents indices spectraux. Le graphique du haut indique les indices spectraux de Reid, celui du milieu les indices spectraux de Testi et le graphique du bas les indices spectraux de Geballe.

Indices	Valeur	Type Spectral
Reid		
K1	0.1572 ± 0.0029	L0.5
H ₂ O ^A	0.790 ± 0.015	M8
H ₂ O ^B	0.9103 ± 0.0058	M8
Testi		
sHJ	0.3506 ± 0.0054	L0
sKJ	0.8590 ± 0.0055	-
sH ₂ O ^J	0.0520 ± 0.0076	L0.5
sH ₂ O ^{H1}	0.1235 ± 0.0051	-
sH ₂ O ^{H2}	0.3830 ± 0.0070	L1
sH ₂ O ^K	0.1979 ± 0.0056	L0.5
Geballe		
H ₂ O 1.5 μm	1.11 ± 0.02	-
CH ₄ 2.2 μm	0.98 ± 0.01	L4

Tableau 4.6 – Liste des indices spectraux de 2MASS1221+0257.

2MASS1439+1929 (L1).- Nous avons classifié cet objet par comparaison visuelle comme étant une naine L0.5 car il y avait quelques différences entre son spectre et celui de la naine L1. La figure 4.13 nous montre le spectre de cet objet avec les différents intervalles des indices spectraux. Rappelons que cet objet a un excellent rapport S/B.

Les différents indices calculés à partir du spectre sont présentés au tableau 4.7. Comme pour la comparaison visuelle, le rapport S/B plus élevé ne rend pas les indices spectraux plus uniformes. Au contraire, trois indices sont même inutilisables : sHJ et sKJ de Testi et H₂O 1.5 μm de Geballe, qui donneraient tous un type spectral légèrement inférieur à L0. De plus, trois indices donnent un type spectral beaucoup plus tardif que celui obtenu par la comparaison visuelle : H₂O^A de Reid, sH₂O^{H2} de Testi et CH₄ 2.2 μm de Geballe. Mentionnons que ce dernier s'applique à des naines L plus tardives que L3, et est inutile dans ce cas-ci.

Pour expliquer la différence que l'on obtient avec les indices H₂O^A et sH₂O^{H2}, on doit spécifier que ces indices utilisent des intervalles qui sont situés près de régions à forte absorption tellurique (1.33 μm à 1.35 μm et 1.77 μm à 1.81 μm respectivement). Lors de l'analyse par comparaison visuelle, nous avons supprimé ces régions afin de faciliter la comparaison des spectres. Cependant, ces régions sont présentes sur la figure 4.13 et si l'on compare celle-ci à la figure 4.11 (2MASS1153+5032, une L1), on remarque que le flux dans ces intervalles descend beaucoup plus bas pour 2MASS1439+1929, d'où le type spectral tardif déterminé par ces deux indices.

Deux causes peuvent expliquer cette différence que l'on obtient pour ces indices. La première est que l'absorption tellurique a influencé l'aspect du spectre et a affecté ces deux indices qui sont plus sensibles à celle-ci.

La seconde est que cet objet a des caractéristiques particulières qui affectent le spectre en proche-infrarouge mais non celui en visible, comme c'est le cas pour la naine L7.5 de comparaison, SDSS1121+4332.

En vérifiant le type spectral déterminé par les autres indices, on remarque que ceux-ci se situent tous autour de L1. Nous pouvons donc accorder à cet objet un type spectral de $L1 \pm 1$, ce qui est accord avec le type spectral donné dans la littérature et également avec celui déterminé par la comparaison visuelle de son spectre.

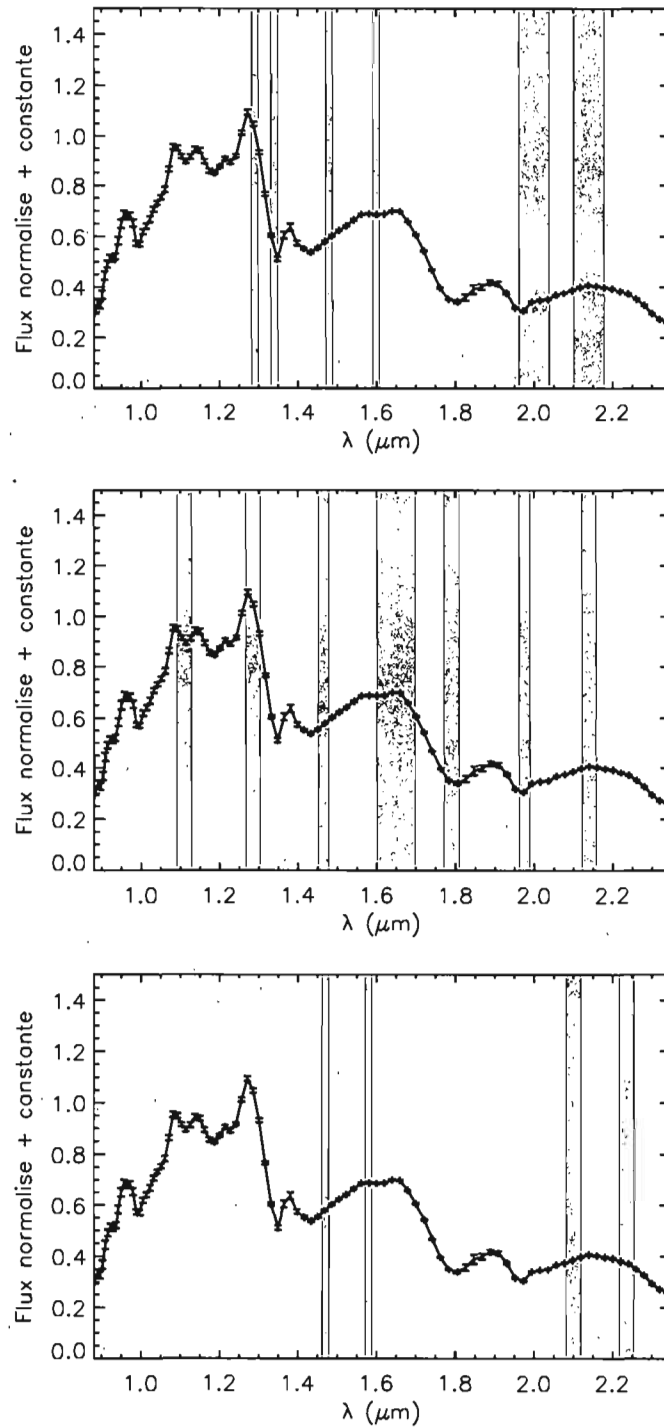


Figure 4.13 – Spectre de 2MASS1439+1929 avec les intervalles des différents indices spectraux. Le graphique du haut indique les indices spectraux de Reid, celui du milieu les indices spectraux de Testi et le graphique du bas les indices spectraux de Geballe.

Indices	Valeur	Type Spectral
Reid		
K1	0.1782 ± 0.0020	L1
H ₂ O ^A	0.532 ± 0.010	L6.5
H ₂ O ^B	0.8777 ± 0.0037	M9
Testi		
sHJ	0.3946 ± 0.0052	-
sKJ	0.8634 ± 0.0055	-
sH ₂ O ^J	0.1093 ± 0.0068	L1.5
sH ₂ O ^{H1}	0.1905 ± 0.0027	L0
sH ₂ O ^{H2}	0.6585 ± 0.0029	L7
sH ₂ O ^K	0.2812 ± 0.0039	L2.5
Geballe		
H ₂ O 1.5 μ m	1.19 ± 0.01	-
CH ₄ 2.2 μ m	1.00 ± 0.01	L6

Tableau 4.7 – Liste des indices spectraux de 2MASS1439+1929.

2MASS1506+1321 (L3).- Cet objet a été identifié comme étant une naine L3 par la comparaison visuelle. La figure 4.14 nous montre le spectre de cet objet avec les intervalles des différents indices spectraux. Cet objet a le meilleur rapport S/B de tous les objets observés (médiane ≈ 62).

Les indices spectraux de cette naine L sont présentés au tableau 4.8. Cette fois-ci, tous les indices sont beaucoup plus consistants entre eux que ceux des autres naines L étudiées jusqu'à maintenant. En effet, la moyenne des indices de Testi donne un type spectral L3.5 (les indices sH_2O^J et sH_2O^K étant cette fois-ci les plus éloignés de la valeur désignée du type spectral par comparaison visuelle), celle des indices de Reid donne un type spectral L3 et celle des indices de Geballe un type spectral de L4. L'ensemble des indices sont relativement bons pour cet objet et seul un indice (CH_4 2.2 μm de Geballe) s'éloigne de deux sous-types de la valeur déterminée par la comparaison visuelle et par Gizis et al. (2000,[28]). Les indices sont donc en accord avec notre analyse visuelle et on accorde à cet objet un type spectral de $L3.5 \pm 1$ selon ces indices.

Indices	Valeur	Type Spectral
Reid		
K1	0.2737 ± 0.0028	L3
H_2O^A	0.614 ± 0.012	L3.5
H_2O^B	0.7526 ± 0.0056	L2
Testi		
sHJ	0.2148 ± 0.0039	L2.5
sKJ	0.5896 ± 0.0049	L3
sH_2O^J	0.2799 ± 0.0058	L4
sH_2O^{H1}	0.4131 ± 0.0034	L3
sH_2O^{H2}	0.5046 ± 0.0059	L3.5
sH_2O^K	0.3407 ± 0.0059	L4.0
Geballe		
H_2O 1.5 μm	1.44 ± 0.02	L3
CH_4 2.2 μm	0.99 ± 0.01	L5

Tableau 4.8 – Liste des indices spectraux de *2MASS1506+1321*.

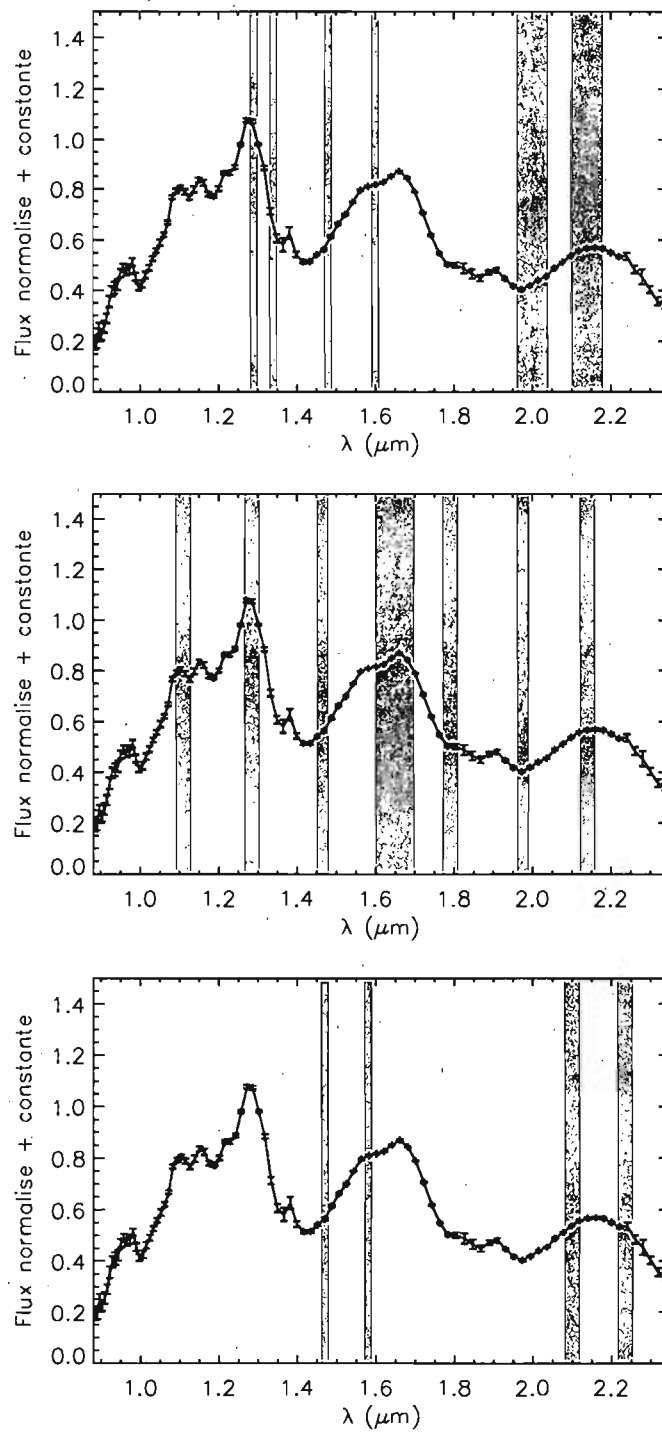


Figure 4.14 – Spectre de 2MASS1506+1321 avec les intervalles des différents indices spectraux. Le graphique du haut indique les indices spectraux de Reid, celui du milieu les indices spectraux de Testi et le graphique du bas les indices spectraux de Geballe.

4.1.2.2 Résultats des candidates

Nous continuons notre analyse avec les deux candidates. Nous allons appliquer pour celles-ci la même méthode d'analyse utilisant les indices spectraux.

C0858+2214.- Cette candidate a été classifiée par l'analyse par comparaison visuelle comme étant une naine L2. Le spectre de cet objet ainsi que les différents intervalles pour les indices spectraux sont présentés à la figure 4.15.

Comme pour 2MASS1153+5032, certains intervalles se situent dans des régions où le rapport S/B est plus faible. Les intervalles 1.09-1.13 μm , 1.45-1.48 μm et 1.77-1.81 μm sont ceux dont le rapport S/B risque d'affecter le plus fortement les indices suivants : sH_2O^J , sH_2O^{H1} et sH_2O^{H2} .

Les différents indices calculés à partir de notre spectre sont présentés au tableau 4.9. Comme avec les naines L connues que nous avons analysées, les indices spectraux sont très utiles pour cette candidate. Seulement un indice de Testi et un indice de Geballe n'a pas donné de résultat utile : sH_2O^{H1} et H_2O 1.5 μm . Ces deux indices donneraient un type spectral inférieur à L0 si le domaine de classification s'étendait jusque là. Tel que mentionné, cela est dû au rapport S/B plus faible dans l'intervalle 1.45-1.48 μm , qui affecte ces deux indices. Les indices sH_2O^J et sH_2O^{H2} de Testi, qui auraient pu être affectés par le rapport S/B plus faible dans les intervalles 1.09-1.13 μm et 1.77-1.81 μm , ne semblent pas l'être étant donné qu'ils donnent tous deux un type spectral semblable aux autres indices. Les indices de Testi donnent donc en moyenne un type spectral de L2 pour cet objet. Ceci concorde parfaitement avec la comparaison visuelle qui donnait à cette candidate un type spectral de L2. De plus, cette fois-ci, si l'on exclut l'indice spectral H_2O^B de Reid, dont un des intervalles (1.47-1.49 μm) se situe dans une zone où le rapport S/B est moins élevé, on obtient un type spectral de L2. Encore une fois, l'indice de Geballe CH_4 2.2 μm n'est pas utilisable dans ce cas. Nous pouvons donc affirmer que *C0858+2214* est une $\text{L2}\pm 1$.

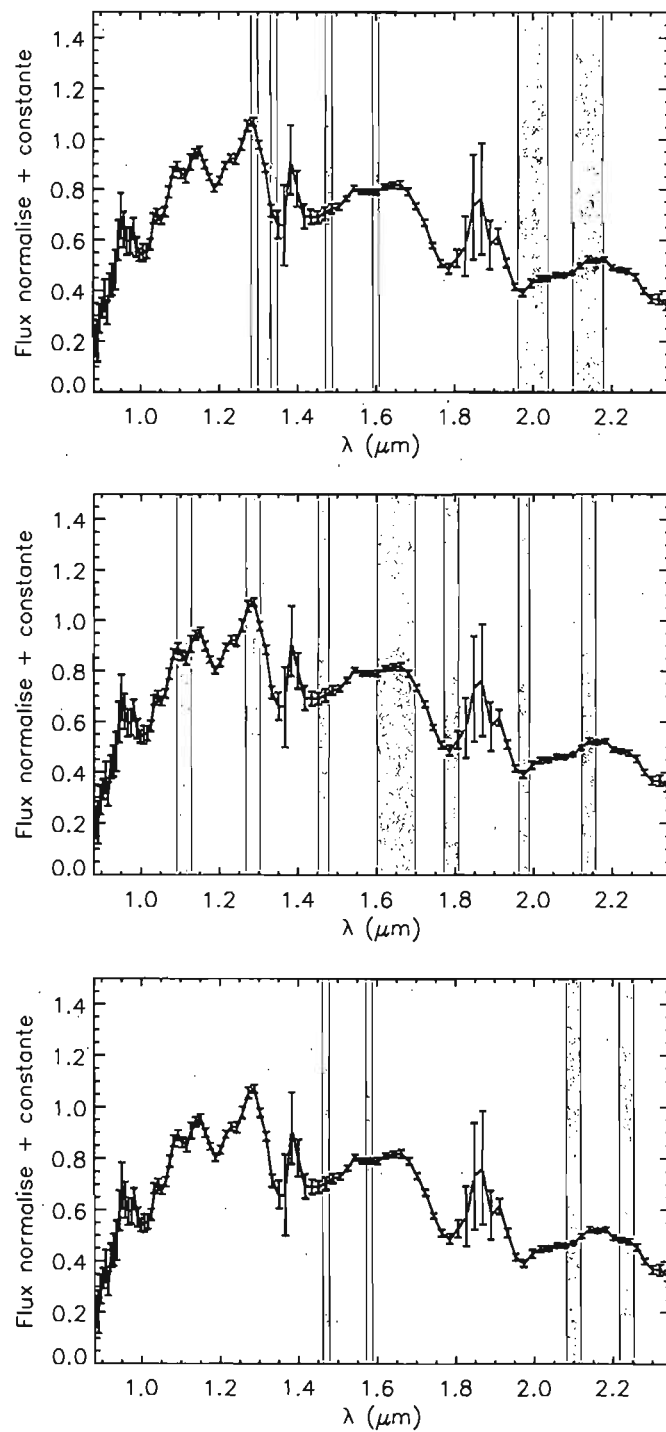


Figure 4.15 – Spectre de C0858+2214 avec les intervalles des différents indices spectraux. Le graphique du haut indique les indices spectraux de Reid, celui du milieu les indices spectraux de Testi et le graphique du bas les indices spectraux de Geballe.

Indices	Valeur	Type Spectral
Reid		
K1	0.1773 ± 0.0083	L1
H ₂ O ^A	0.642 ± 0.032	L3
H ₂ O ^B	0.902 ± 0.019	M8
Testi		
sHJ	0.248 ± 0.012	L2
sKJ	0.655 ± 0.016	L2
sH ₂ O ^J	0.163 ± 0.016	L2.5
sH ₂ O ^{H1}	0.144 ± 0.018	-
sH ₂ O ^{H2}	0.453 ± 0.020	L2.5
sH ₂ O ^K	0.288 ± 0.018	L3
Geballe		
H ₂ O 1.5 μm	1.12 ± 0.06	-
CH ₄ 2.2 μm	0.96 ± 0.02	L4

Tableau 4.9 – Liste des indices spectraux de C0858+2214.

C1628+0517.- Cette candidate a été classifiée comme étant une naine M7. Étant donné le très faible rapport S/B et le peu d'indices qui peuvent servir à identifier les naines M, il est fort probable que cette candidate ne puisse pas être classifiée par cette méthode d'analyse. La figure 4.16 présente le spectre de cette candidate.

Nous présentons les indices spectraux au tableau 4.10. Comme prévu, les indices spectraux de *C1628+0517* nous indiquent que ceux-ci ne peuvent nous aider à classifier cette candidate. En effet, quatre des indices de Testi sont inutilisables, soit sHJ, sKJ, sH₂O^{H1} et sH₂O^K. Les deux indices restants ne concordent pas entre eux (L4 et L7), ni avec l'analyse par comparaison visuelle que nous avons effectuée. Ceci est dû au fait que cet objet n'est pas une naine L. Même les indices de Reid, qui peuvent identifier des objets jusqu'à la classe M8, et qui auraient donc pu nous aider, sont inutilisables à cause du rapport S/B trop faible. Seule la comparaison visuelle avec la naine M7 peut donc nous permettre d'établir le type spectral de cet objet, que nous avons établi à M7±2.

Indices	Valeur	Type Spectral
Reid		
K1	-0.007±0.030	-
H ₂ O ^A	0.21±0.13	-
H ₂ O ^B	1.227±0.087	-
Testi		
sHJ	0.534±0.073	-
sKJ	1.045±0.075	-
sH ₂ O ^J	0.275±0.094	L4
sH ₂ O ^{H1}	-0.195±0.049	-
sH ₂ O ^{H2}	0.675±0.045	L7
sH ₂ O ^K	-0.030±0.044	-
Geballe		
H ₂ O 1.5 μm	0.88±0.23	-
CH ₄ 2.2 μm	1.08±0.09	L4

Tableau 4.10 – Liste des indices spectraux de *C1628+0517*.

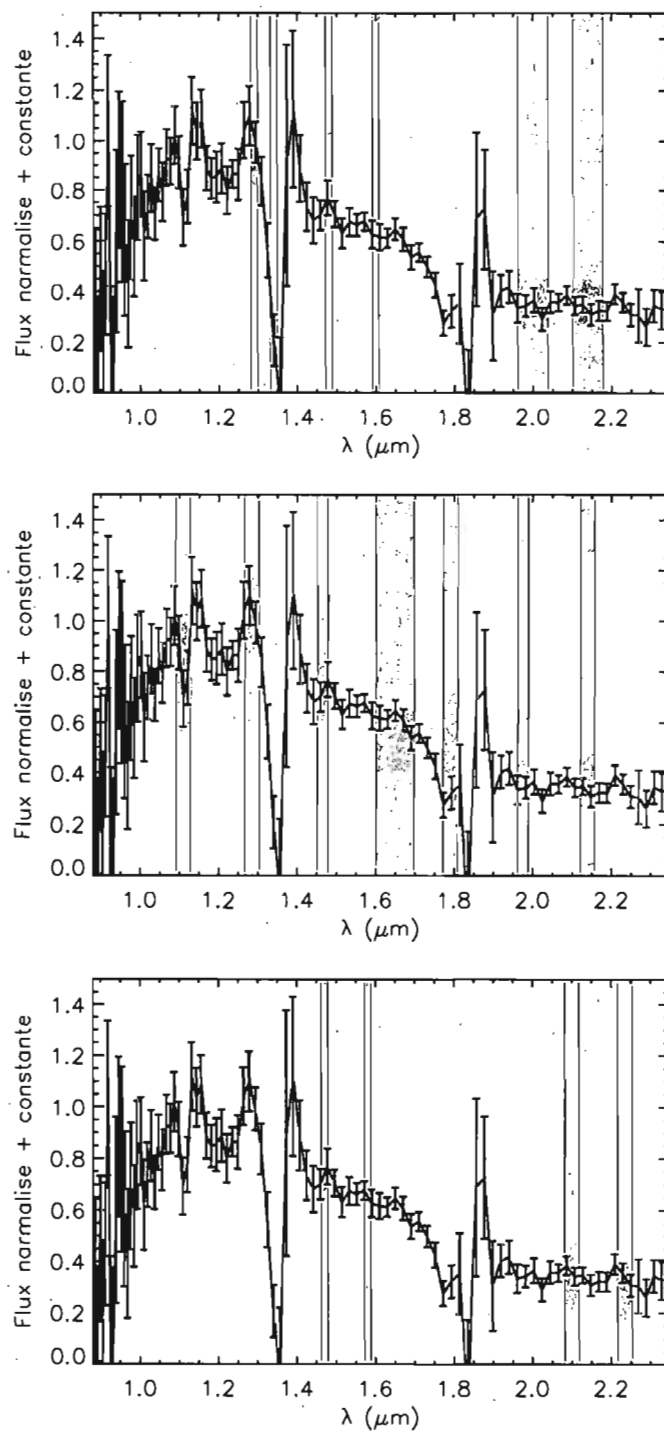


Figure 4.16 – Spectre de C1628+0517 avec les intervalles des différents indices spectraux. Le graphique du haut indique les indices spectraux de Reid, celui du milieu les indices spectraux de Testi et le graphique du bas les indices spectraux de Geballe.

4.1.3 Discussion des résultats

Deux méthodes différentes ont été utilisées pour identifier les objets à l'aide de leur spectre.

D'abord, l'analyse par comparaison visuelle nous a permis de découvrir que certaines caractéristiques du spectre (en particulier le creux au centre de la bande H) ne sont pas entièrement fiables pour la classification des objets. En effet, la forme du spectre dépend non seulement de la forme du spectre d'un corps noir à une température donnée, mais également à des multitudes de bandes d'absorption présentes dans le spectre à différentes longueurs d'onde (qui sont dues à la présence de H_2O , de FeH et de CO).

Étant donné qu'il n'existe aucun standard spectroscopique pour les naines L dans le proche-infrarouge, on ne peut se fier entièrement aux spectres des naines L utilisés, que nous avons choisis selon la disponibilité des spectres. Ainsi, pour déterminer le type spectral des objets observés, l'ensemble des caractéristiques du spectre était examiné.

Puis, nous avons également utilisé des indices spectraux pour assigner un type spectral à nos objets. Avec l'analyse des objets que l'on a effectuée, on peut affirmer que le calcul de la moyenne des indices de Testi reste un moyen efficace pour estimer de façon assez précise le sous-type d'un objet, à condition de pondérer les indices situés dans des régions où le rapport S/B est plus faible. Des particularités propres à chaque objet peuvent aussi venir modifier l'aspect du spectre en proche-infrarouge, comme c'est probablement le cas pour 2MASS1439+1929. Nous avons découvert que l'on ne peut exclure définitivement de notre analyse aucun indice de Testi car même ceux plus aptes à fausser la valeur du type spectral de notre objet (sH_2O^J , sH_2O^{H2} et sH_2O^K) sont parfois ceux donnant le type spectral le plus proche de celui donné dans la littérature, comme c'est le cas pour 2MASS1104+1959.

Les indices de Reid peuvent aussi servir à confirmer le type spectral mais semblent un peu moins fiables que les indices de Testi. Mentionnons qu'il n'y a que trois indices de Reid comparativement aux six indices de Testi, ce qui est désavantageux surtout lorsqu'un des indices est inutilisable.

Les indices de Geballe sont les moins fiables pour les cas que nous avons observés.

Un de ces deux indices, CH_4 2.2 μm , est seulement utile pour les naines plus tardives que L3. L'autre indice, H_2O 1.5 μm , qui aurait pu servir à classifier les naines L que nous avons observées, n'a été valide que pour deux cas sur sept. Il faut rappeler que les indices de Reid et de Geballe sont utilisables pour des spectres pris en haute résolution, ce qui n'est pas le cas pour les objets que nous avons observés.

Nous avons également découvert qu'un rapport S/B plus élevé ne signifie pas nécessairement que les différents indices spectraux seront plus précis. Cependant, il peut aider à mieux comparer le spectre de l'objet à analyser aux spectres de naines L et M connues. Un rapport S/B d'environ 30 semble suffisant pour classifier les objets observés. Il serait également intéressant de vérifier quel rôle jouent les conditions météorologiques dans l'aspect des spectres et comment cela affecte le rapport S/B. Ceci nous aiderait à comprendre le spectre que l'on a obtenu pour C1628+0517. Cette analyse dépasse cependant le cadre de ce mémoire.

Les résultats de ces deux méthodes sont présentés au tableau 4.11. Le tableau est divisé en deux parties : celle du haut représente les naines L déjà connues et celle du bas les deux candidates. Les colonnes indiquent le nom de l'objet observé ainsi que quatre valeurs différentes pour le type spectral : d'abord, on indique la valeur du type spectral pour les objets déjà connus, puis, le type spectral obtenu par l'analyse par comparaison visuelle des spectres, suivi par celui obtenu par l'analyse grâce aux indices spectraux. Finalement, on indique le type spectral que nous assignons pour les objets observés. Celui-ci a été déterminé en considérant l'ensemble des caractéristiques des objets. On remarque que l'analyse par comparaison visuelle et l'analyse à l'aide des indices spectraux s'harmonisent bien car aucune différence de plus de un sous-type entre les deux méthodes n'est présente.

Nom de l'objet	Type spectral			
	Connu	Comparaison visuelle	Indices	Final
2MASS11040127+1959217	L4	L4	L3.5	L4±1
2MASS11533966+5032092	L1	L0.5	L1	L1±1
2MASS12212770+0257198	L0	L0	L0.5	L0±1
2MASS14392836+1929149	L1	L0.5	L1	L1±1
2MASS15065441+1321060	L3	L3	L3.5	L3±1
C0858055+221458	–	L2	L2	L2±1
C1628069+051703	–	M7	–	M7±2

Tableau 4.11 – Liste des types spectraux découverts par notre analyse spectroscopique.

4.2 Classification par analyse photométrique

Afin de vérifier notre capacité à mesurer les différentes bandes proche-infrarouges de nos objets, nous avons observé deux naines T connues. Ceci nous permet de vérifier, grâce au PSC, à quel point notre mesure de la magnitude en bandes J , H et K_s est précise. Comme il est plus difficile d'obtenir la magnitude I pour ces objets, nous avons pour cela comparé notre mesure dans cette bande avec celle que l'on retrouve dans le catalogue USNO-B1.0 pour des étoiles de nos champs.

Le tableau 4.12 présente les caractéristiques des données photométriques prises par SIMON afin de déterminer la nature des candidates énoncées au tableau 2.2. La partie du haut du tableau introduit les deux naines T connues qui ont été observées et la partie du bas expose nos candidates. Nous y présentons les bandes dans lesquelles les images ont été prises ainsi que la date d'observation à l'OMM et la masse d'air moyenne (désignée MA) des observations. Le temps d'intégration par image était de 120 secondes et 9 images étaient prises par bande. Si l'on voyait que l'une des images était mauvaise, comme ce fut le cas pour la bande J de C0157+0447 et C0531-0324, nous prenions une dixième image pour compenser celle perdue.

Nom de l'objet	Mode	Date	MA
2MASS0727182+171001	I, J, H, K_s	14-12-05	1.14
2MASS2254188+312349	I, H, K_s	12-11-05	1.03
C0154+1040	I, J, H	12-11-05	1.22
C0157+0447	I, J, H, K_s	15-12-05	1.35
C0531-0324	I, J, H, K_s	14-12-05	1.53
C1144+1048	I, J, H, K_s	14-12-05	1.43
C2355+0956	I, J, H, K_s	14-12-05	1.23

Tableau 4.12 – Liste des candidates suivies en photométrie par SIMON.

Des conditions atmosphériques défavorables nous ont empêché d'obtenir des images convenables pour mesurer la magnitude en bande J de 2MASS2254+3123 et la magnitude en bande K_s de C0154+1040. Le manque de temps nous a également empêché de réobserver ces objets. Cependant, ceci n'affecte pas notre travail de classification étant donné que la bande I , qui est la bande la plus importante pour identifier nos objets, a été

observée dans les deux cas.

4.2.1 Résultats des naines T connues et des étoiles de référence

Comme il a été expliqué à la section 3.2, une simple analyse photométrique peut nous permettre d'identifier le type spectral auquel appartiennent nos candidates, sans toutefois pouvoir indiquer le sous-type de celles-ci.

Les résultats de notre analyse des naines T connues sont présentés au tableau 4.13.

Nom de l'objet	I	J	H	K_s
2MASS0727+1710 SIMON	19.65 ± 0.10	15.23 ± 0.03	15.54 ± 0.06	15.44 ± 0.07
2MASS0727+1710 2MASS	–	15.60 ± 0.06	15.76 ± 0.17	15.56 ± 0.19
2MASS2254+3123 SIMON	18.36 ± 0.15	–	15.03 ± 0.05	15.15 ± 0.09
2MASS2254+3123 2MASS	–	15.26 ± 0.05	15.02 ± 0.08	14.90 ± 0.15

Tableau 4.13 – Photométrie en bande I , J , H et K_s des naines T connues.

2MASS0727+1710 (T7).- Seule la bande J présente un écart plus grand que les incertitudes entre nos résultats et ceux de 2MASS. Les bandes H et K_s sont toutes les deux en accord avec nos données, étant à l'intérieur des incertitudes.

2MASS2254+3123 (T4).- Étant donné que nous n'avons pu obtenir une valeur de la magnitude en bande J , on ne peut la comparer aux données 2MASS. La magnitude en bande H est très similaire à ce que nous avons obtenu avec SIMON. La bande K_s est en accord également en tenant compte du chevauchement des incertitudes.

Pour la bande I , nous avons utilisé trois étoiles de référence prises au hasard dans les champs de nos objets. Nous présentons ces étoiles au tableau 4.14. On remarque que pour la première étoile, la magnitude en bande I mesurée par SIMON est légèrement inférieure (0.14 de différence) à celle mesurée par le catalogue USNO-B1.0. Mentionnons cependant que les incertitudes sur les données de ce catalogue ne sont pas disponibles, ce qui nous empêche d'affirmer si notre valeur se situe dans les limites des incertitudes du catalogue USNO-B1.0. Les deux autres étoiles ont une magnitude en accord avec celle provenant du catalogue. Notre méthode d'analyse semble donc être en mesure de

déterminer précisément la magnitude dans les bandes I , J , H et K_s de nos candidates.

Coordonnées	I
$01^h57^m30^s.5 +04^\circ47'15''.4$ SIMON	15.19 ± 0.10
$01^h57^m30^s.5 +04^\circ47'15''.4$ USNO-B1.0	15.33
$05^h31^m17^s.3 -03^\circ23'51''.4$ SIMON	14.95 ± 0.13
$05^h31^m17^s.3 -03^\circ23'51''.4$ USNO-B1.0	15.07
$22^h54^m17^s.8 +31^\circ24'44''.2$ SIMON	13.80 ± 0.09
$22^h54^m17^s.8 +31^\circ24'44''.2$ USNO-B1.0	13.80

Tableau 4.14 – Photométrie en bande I d'étoiles de référence dans notre champ.

4.2.2 Résultats des candidates

Nous devrions être capable, à l'aide des couleurs obtenues grâce à l'analyse photométrique de nos candidates, de confirmer leur type spectral.

Le tableau 4.15 nous indique les magnitudes I , J , H , K_s trouvées pour les candidates vérifiées par photométrie.

Nom de l'objet	I	J	H	K_s
C0154+1040	17.75 ± 0.11	16.07 ± 0.05	15.41 ± 0.05	–
C0157+0447	18.24 ± 0.15	16.97 ± 0.08	16.40 ± 0.07	15.92 ± 0.08
C0531-0324	18.41 ± 0.13	16.96 ± 0.11	16.13 ± 0.09	15.78 ± 0.06
C1144+1048	18.14 ± 0.11	16.97 ± 0.09	16.20 ± 0.07	15.85 ± 0.08
C2355+0956	18.40 ± 0.13	17.27 ± 0.13	16.41 ± 0.10	16.15 ± 0.09

Tableau 4.15 – Photométrie en bande I , J , H et K_s des candidates obtenue par SIMON.

Il est plus facile de se prononcer sur la nature de ces objets en observant leurs couleurs proches-infrarouges. Elles sont présentées au tableau 4.16. En observant les résultats présentés à ce tableau, on peut affirmer qu'aucune candidate que nous avons observée en photométrie ne se révèle être une naine T, ni même une naine L. En effet, elles ont toutes des caractéristiques propres aux étoiles de faible masse de type M, c'est-à-dire une couleur $I - J < 2$, une couleur $J - H < 0.9$ et une couleur $H - K_s < 0.5$. Notre

liste de candidates détectées par détection de couleur $H - CH_4$ était donc entièrement composée de faux-positifs. La couleur $I - J$ doit être ≥ 3.0 , ce qui représente environ la valeur minimale de la couleur $I - J$ des naines L. Étant donné les grandes incertitudes sur la couleur $H - CH_4$ calculée lors de l'analyse des données CPAPIR pour ces objets et la dispersion de cette couleur à des magnitudes en $H > 16$, il est fort probable que ces objets soient des naines M du champ non-découvertes jusqu'à maintenant.

Nom de l'objet	$I - J$	$J - H$	$H - K_s$
C0154+1040	1.68 ± 0.12	0.66 ± 0.07	-
C0157+0447	1.27 ± 0.17	0.57 ± 0.11	0.48 ± 0.11
C0531-0324	1.45 ± 0.17	0.83 ± 0.14	0.35 ± 0.11
C1144+1048	1.17 ± 0.14	0.77 ± 0.11	0.35 ± 0.11
C2355+0956	1.13 ± 0.18	0.86 ± 0.16	0.26 ± 0.13

Tableau 4.16 – Couleurs des candidates obtenues par SIMON.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Ce mémoire vise à présenter deux méthodes de détection ainsi que deux méthodes de classification de naines brunes. La motivation principale de cette recherche est la découverte de nouvelles naines brunes dans le voisinage solaire.

La première méthode de détection, la stratégie par détection de couleur $H - CH_4$, utilise le principe que les naines brunes, et plus précisément les naines T, présentent une forte absorption entre $1.6 \mu\text{m}$ et $1.7 \mu\text{m}$ (soit dans la bande H) due au CH_4 . Cette absorption est mesurable photométriquement. L'équipe a donc utilisé l'instrument CPAPIR pour entreprendre un relevé du ciel servant à mesurer la photométrie en bande H (entre $1.5 \mu\text{m}$ et $1.8 \mu\text{m}$) et en bande CH_4 (entre $1.545 \mu\text{m}$ et $1.595 \mu\text{m}$). Ainsi, un objet était retenu s'il avait une couleur $H - CH_4 \geq 0.2$. De plus, des critères de sélection ont été ajoutés afin de limiter le nombre de faux-positifs. Ainsi, les sources devaient également avoir un déplacement total plus grand que $1''$ entre nos images et celles de 2MASS et devaient avoir une couleur $H - K_s \leq 0.6$. Ces critères de sélection nous ont permis d'obtenir une liste de 40 candidates.

Cependant, nous avons remarqué que plusieurs sources montrent une différence importante entre la photométrie CPAPIR et celle de 2MASS. Cette différence provient du fait que nous avons utilisé une ouverture de 1.25 pixel pour mesurer les sources des images CPAPIR. Étant donné que les PSF dans les images CPAPIR ne sont pas toujours constantes, le flux de certaines sources était coupé par cette ouverture trop étroite, donnant ainsi une couleur $H - CH_4$ très incertaine pour ces sources. Cet effet faisait en sorte qu'environ 10% des sources d'un champ avaient une couleur $H - CH_4 \geq 0.2$. Parmi celles-ci, les étoiles qui avaient en plus une couleur $H - K_s \leq 0.6$ et un déplacement total plus grand que $1''$, comme c'est le cas pour plusieurs naines M, devenaient des candidates, créant ainsi beaucoup de faux-positifs.

Pour remédier à ce problème, une solution aurait été d'utiliser une ouverture de 3 pixels pour la photométrie. Cependant, le fait d'utiliser une plus grande ouverture

augmente l'incertitude statistique sur nos mesures, ce qui entraîne à son tour des faux-positifs pour les sources plus faibles. L'augmentation de l'ouverture produit un effet plus important sur les sources à faible rapport S/B. Pour utiliser l'ouverture de 3 pixels, il aurait donc fallu intégrer environ 2.5 fois plus de temps afin d'augmenter le rapport S/B à un niveau qui nous permettrait d'obtenir une incertitude sur la couleur $H - CH_4$ plus petite que 0.1 magnitude sur des sources de magnitude 16.

Face aux résultats obtenus par cette méthode de détection, l'équipe a décidé de développer la stratégie par détection de mouvement propre. Cette méthode est beaucoup plus fiable car elle ne fait pas appel à la couleur des sources dans le champ. Elle sélectionne plutôt les sources à faible distance du Soleil et se fie aux couleurs de 2MASS. Les images de CPAPIR ont été prises en bande J plutôt qu'en bande H afin d'augmenter le rapport S/B des sources.

Les deux critères de sélection de cette méthode sont les suivants : d'abord, on associe les sources CPAPIR avec les sources 2MASS et on détermine celles qui sont distantes l'une de l'autre par plus de $0.7''$. On vérifie ensuite que notre photométrie en bande J concorde avec celle de 2MASS (jusqu'à une différence de 0.5 magnitude). Ceci permet de s'assurer que les sources associées sont bien les mêmes. Toutes les sources qui correspondent à ces critères sont sélectionnées. On obtient ensuite, par l'entremise du PSC et du relevé DSS, les couleurs $I - J$, $J - H$ et $H - K_s$. Puis, les valeurs de couleurs et de mouvement propre sont examinées pour chaque source, ce qui permet de distinguer les vraies candidates parmi la liste des objets à grand mouvement propre.

Cette technique nous a permis de découvrir plusieurs objets intéressants. Même si le nombre de candidates est le même qu'avec l'ancienne méthode de détection en proportion de la surface observée (77 candidates naines L et T pour une surface observée qui a environ doublé), nous devons mentionner que la nouvelle méthode élimine beaucoup plus de faux-positifs étant donné que l'on rejette les objets qui ont une différence trop grande entre la magnitude J de CPAPIR et celle de 2MASS. La plupart des 77 candidates ont les caractéristiques des naines L. Ces objets sont moins prioritaires à découvrir que les naines T, mais sont tout de même intéressants à étudier.

Suite à la découverte de candidates, nous avons utilisé l'instrument SIMON à l'OMM

pour vérifier la nature exacte de celles-ci. Encore une fois, deux méthodes ont été utilisées pour parvenir à cette fin.

La première méthode de classification utilise une analyse spectroscopique des candidates. Celles-ci ont toutes été découvertes par la stratégie par détection de mouvement propre. À l'aide des spectres des objets, deux méthodes d'analyse différentes ont été utilisées pour classifier ces objets. La première analyse consiste à effectuer une comparaison visuelle entre le spectre de l'objet et des spectres de naines M et L connues et disponibles à la communauté. Nous avons découvert qu'étant donné qu'aucun standard spectroscopique dans le proche-infrarouge n'est disponible pour les nains L, on doit, pour classifier les objets, regarder l'aspect général du spectre dans les bandes J , H et K , sans s'attarder sur une caractéristique particulière.

Des indices spectraux ont ensuite été vérifiés afin de classifier les objets indépendamment de la classification effectuée auparavant par comparaison visuelle. Ceci nous a permis de découvrir que les indices de Testi sont un moyen efficace pour déterminer le sous-type des objets observés. Les indices de Reid peuvent également aider à compléter les indices de Testi, et les indices de Geballe ont été inutiles cinq fois sur sept, du moins, pour le type d'objet qui a été observé.

Le tableau 5.1 résume les résultats découverts par cette méthode de classification. Sauf pour C1628+0517, les incertitudes sur le type spectral sont de 1 sous-type. Le tableau est divisé en deux parties : celle du haut représente les naines L déjà connues et celle du bas nos deux candidates qui se sont révélées être une naine L2 et une M7. Remarquons que pour C0858+2214, nous avons changé son préfixe « C » par « SIMP », étant donné que cet objet a été confirmé spectroscopiquement comme étant une naine L. Il faut noter que nous n'avons pas attribué ce sigle à C1628+0517 étant donné l'incertitude qui plane sur son type spectral à cause du très faible rapport S/B de son spectre.

La seconde méthode de classification a été d'utiliser le mode imagerie de SIMON pour vérifier précisément les couleurs $I - J$, $J - H$ et $H - K_s$ de nos objets, ce qui nous permet d'identifier leur type spectral, sans toutefois permettre de déterminer rigoureusement le sous-type spectral de ces objets. Une série d'expositions en bande I , J , H et K_s a donc été prise pour certaines candidates accessibles durant cette période de l'année.

Nom de l'objet	Type spectral connu	Type spectral désigné
2MASS11040127+1959217	L4	L4
2MASS11533966+5032092	L1	L1
2MASS12212770+0257198	L0	L0
2MASS14392836+1929149	L1	L1
2MASS15065441+1321060	L3	L3
SIMP0858055+221458	–	L2
C1628069+051703	–	M7±2

Tableau 5.1 – Liste des types spectraux découverts par notre analyse spectroscopique.

En vérifiant ainsi cinq candidates trouvées à l'aide de la stratégie par détection de couleur $H - CH_4$, nous avons découvert qu'aucune de celles-ci n'est une naine brune, elles seraient plutôt des naines M. Ceci s'explique par les grandes incertitudes qui affectaient nos mesures de la couleur $H - CH_4$. La sélection de valeurs élevées de la couleur $H - CH_4$ favorisait les candidates affectées par de larges erreurs et non les véritables naines T.

Ainsi, ce mémoire nous a permis de vérifier différentes méthodes de détection et de classification de naines brunes. Nous avons découvert que la stratégie par détection de couleur $H - CH_4$ n'est pas utile si elle est utilisée comme elle l'a été initialement. Il faudrait, pour l'utiliser convenablement, intégrer environ 2.5 fois plus de temps, ce qui rend cette méthode inefficace.

Par contre, la stratégie par détection de mouvement propre a permis de découvrir plusieurs candidates, dont une s'est avérée être une naine L2. Il faut mentionner qu'il est toutefois possible que cette naine L ne soit pas une naine brune. En effet, nous savons que les naines L précoces regroupent à la fois des étoiles de faible masse et des naines brunes. Néanmoins, ceci nous a permis de vérifier la méthode de classification par analyse spectroscopique, qui pourra par la suite être utilisée sur les autres candidates découvertes lors de ce relevé.

Il est cependant difficile de classifier nos objets à une précision meilleure que 1 sous-type spectral. Ceci est dû au fait qu'il y a un manque de standards spectroscopiques dans le proche-infrarouge pour les naines L. Des standards spectroscopiques seraient grandement utiles à des fins de classification par comparaison visuelle. En effet, les spectres

que nous avons choisis pour comparer à celui de nos objets l'ont été par hasard, bien que nous nous soyons efforcés de vérifier si les naines L de comparaison n'étaient pas une binaire connue ou une autre particularité pouvant affecter le spectre en proche-infrarouge. C'est pour cette raison que les standards spectroscopiques sont toujours choisis de façon à ce que leur spectre représente l'ensemble des autres objets ayant le même sous-type que ce standard.

Tant que des standards définitifs de naines L en proche-infrarouge ne seront pas définis (comme c'est présentement le cas pour les naines T), il sera difficile de classifier précisément et aisément les nouvelles candidates naines L grâce à des spectres proche-infrarouges pris à basse résolution. Nous avons tout de même démontré que, même avec des conditions limitées, nous sommes en mesure d'effectuer la classification de naines L et ce, avec une précision de 1 sous-type lorsque le rapport S/B est suffisant. À noter que nous n'avons classifié que des L précoces ($< L_4$) et il se pourrait que la classification des naines L plus tardives (mais avant l'apparition du CH_4 en bande H qui caractérise le début de la classe T) demande une approche différente de ce que nous avons fait.

Depuis que ces observations ont été faites, les observations avec CPAPIR se sont poursuivies au sommet du Cerro Tololo et d'autres candidates très intéressantes ont pu être observées à des fins de classification. Une de ces candidates (C0136+0933, présentée à la figure 2.9) s'est avérée être la naine T la plus brillante de l'hémisphère nord (Artigau et al. 2006, [4]). D'autres naines L et naines T ont également été trouvées et des spectres ont déjà été pris très récemment. La classification des naines T est beaucoup plus facile que celle des naines L à cause du CH_4 qui leur confère des caractéristiques spectrales très particulières et facilement observables, même à très basse résolution.

Les extrapolations de la fonction de masse des naines T et L laissent entrevoir qu'il pourrait y avoir autant de ces objets que d'étoiles dans le voisinage solaire, même si cette supposition dépend de la masse limite inférieure permettant aux naines brunes de se former. La recherche des naines brunes est donc loin d'être terminée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. Albert. *La recherche de naines brunes autour d'étoiles du voisinage solaire et le spectrographe multi-objets SIMON*. Thèse de doctorat, Université de Montréal, 2006.
- [2] F. Allard, P. H. Hauschildt, D. R. Alexander, A. Tamanai et A. Schweitzer. The Limiting Effects of Dust in Brown Dwarf Model Atmospheres. *ApJ*, 556:357–372, juillet 2001.
- [3] P. J. Armitage et I. A. Bonnell. The brown dwarf desert as a consequence of orbital migration. *MNRAS*, 330:L11–L14, février 2002.
- [4] É. Artigau, R. Doyon, D. Lafrenière, D. Nadeau, J. Robert et L. Albert. Discovery of the Brightest T Dwarf in the Northern Hemisphere. *ApJ*, 651:L57–L60, novembre 2006.
- [5] M. R. Bate, I. A. Bonnell et V. Bromm. The formation of a star cluster : predicting the properties of stars and brown dwarfs. *MNRAS*, 339:577–599, mars 2003.
- [6] E. E. Becklin et B. Zuckerman. A low-temperature companion to a white dwarf star. *Nature*, 336:656–658, décembre 1988.
- [7] A. Blaauw et M. Schmidt, éditeurs. *Galactic structure*, janvier 1965.
- [8] J. Bouvier, J. R. Stauffer, E. L. Martín, D. Barrado y Navascues, B. Wallace et V. J. S. Bejar. Brown dwarfs and very low-mass stars in the Pleiades cluster : a deep wide-field imaging survey. *A&A*, 336:490–502, août 1998.
- [9] A. J. Burgasser, T. R. Geballe, S. K. Leggett, J. D. Kirkpatrick et D. A. Golimowski. A Unified Near-Infrared Spectral Classification Scheme for T Dwarfs. *ApJ*, 637:1067–1093, février 2006.
- [10] A. J. Burgasser, J. D. Kirkpatrick, M. E. Brown, I. N. Reid, J. E. Gizis, C. C. Dahn, D. G. Monet, C. A. Beichman, J. Liebert, R. M. Cutri et M. F. Skrutskie. Discovery

- of Four Field Methane (T-Type) Dwarfs with the Two Micron All-Sky Survey. *ApJ*, 522:L65–L68, septembre 1999.
- [11] A. J. Burgasser, J. D. Kirkpatrick, J. Liebert et A. Burrows. The Spectra of T Dwarfs. II. Red Optical Data. *ApJ*, 594:510–524, septembre 2003.
- [12] A. J. Burgasser, M. S. Marley, A. S. Ackerman, D. Saumon, K. Lodders, C. C. Dahn, H. C. Harris et J. D. Kirkpatrick. Evidence of Cloud Disruption in the L/T Dwarf Transition. *ApJ*, 571:L151–L154, juin 2002b.
- [13] A. J. Burgasser, M. W. McElwain, J. D. Kirkpatrick, K. L. Cruz, C. G. Tinney et I. N. Reid. The 2MASS Wide-Field T Dwarf Search. III. Seven New T Dwarfs and Other Cool Dwarf Discoveries. *AJ*, 127:2856–2870, mai 2004.
- [14] A. J. Burgasser, J. C. Wilson, J. D. Kirkpatrick, M. F. Skrutskie, M. R. Colonna, A. T. Enos, J. D. Smith, C. P. Henderson, J. E. Gizis, M. E. Brown et J. R. Houck. Discovery of a Bright Field Methane (T-Type) Brown Dwarf by 2MASS. *AJ*, 120: 1100–1105, août 2000.
- [15] A. Burrows, M. S. Marley et C. M. Sharp. The Near-Infrared and Optical Spectra of Methane Dwarfs and Brown Dwarfs. *ApJ*, 531:438–446, mars 2000.
- [16] A. Burrows, D. Sudarsky et J. I. Lunine. Beyond the T Dwarfs : Theoretical Spectra, Colors, and Detectability of the Coolest Brown Dwarfs. *ApJ*, 596:587–596, octobre 2003.
- [17] K. Chiu, X. Fan, S. K. Leggett, D. A. Golimowski, W. Zheng, T. R. Geballe, D. P. Schneider et J. Brinkmann. Seventy-One New L and T Dwarfs from the Sloan Digital Sky Survey. *AJ*, 131:2722–2736, juin 2006.
- [18] K. L. Cruz, I. N. Reid, J. Liebert, J. D. Kirkpatrick et P. J. Lowrance. Meeting the Cool Neighbors. V. A 2MASS-Selected Sample of Ultracool Dwarfs. *AJ*, 126: 2421–2448, novembre 2003.

- [19] J. G. Cuby, P. Saracco, A. F. M. Moorwood, S. D'Odorico, C. Lidman, F. Comerón et J. Spyromilio. Discovery of a faint field methane brown dwarf from ESO NTT and VLT observations. *A&A*, 349:L41–L44, septembre 1999.
- [20] C. C. Dahn, H. C. Harris, F. J. Vrba, H. H. Guetter, B. Canzian, A. A. Henden, S. E. Levine, C. B. Luginbuhl, A. K. B. Monet, D. G. Monet, J. R. Pier, R. C. Stone, R. L. Walker, A. J. Burgasser, J. E. Gizis, J. D. Kirkpatrick, J. Liebert et I. N. Reid. Astrometry and Photometry for Cool Dwarfs and Brown Dwarfs. *AJ*, 124:1170–1189, août 2002.
- [21] N. Epchtein, B. de Batz, L. Capoani, L. Chevallier, E. Copet, P. Fouque, F. Lacombe, T. Le Bertre, S. Pau, D. Rouan, S. Ruphy, G. Simon, D. Tiphene, W. B. Burton, E. Bertin, E. Deul, H. Habing, J. Borsenberger, M. Dennefeld, F. Guglielmo, C. Loup, G. Mamon, Y. Ng, A. Omont, L. Provost, J.-C. Renault, F. Tanguy, S. Kimeswenger, C. Kienel, F. Garzon, P. Persi, M. Ferrari-Toniolo, A. Robin, G. Paturel, I. Vauglin, T. Forveille, X. Delfosse, J. Hron, M. Schultheis, I. Appenzeller, S. Wagner, L. Balazs, A. Holl, J. Lepine, P. Boscolo, E. Picazzio, P.-A. Duc et M.-O. Mennessier. The Deep Near-Infrared Southern Sky Survey (DENIS). *The Messenger*, 87:27–34, 1997.
- [22] X. Fan, G. R. Knapp, M. A. Strauss, J. E. Gunn, R. H. Lupton, Ž. Ivezić, C. M. Rockosi, B. Yanny, S. Kent, D. P. Schneider, J. D. Kirkpatrick, J. Annis, S. Bastian, E. Berman, J. Brinkmann, I. Csabai, G. R. Federwitz, M. Fukugita, V. K. Gurbani, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, T. Ichikawa, D. Q. Lamb, C. Lindenmeyer, P. M. Mantsch, T. A. McKay, J. A. Munn, T. Nash, S. Okamura, A. G. Pauls, J. R. Pier, R. Rechenmacher, C. H. Rivetta, G. Sergey, C. Stoughton, A. S. Szalay, G. P. Szokoly, D. L. Tucker, D. G. York et The SDSS Collaboration. L Dwarfs Found in Sloan Digital Sky Survey Commissioning Imaging Data. *AJ*, 119:928–935, février 2000.
- [23] T. R. Geballe, G. R. Knapp, S. K. Leggett, X. Fan, D. A. Golimowski, S. Anderson, J. Brinkmann, I. Csabai, J. E. Gunn, S. L. Hawley, G. Hennessy, T. J. Henry, G. J.

- Hill, R. B. Hindsley, Ž. Ivezić, R. H. Lupton, A. McDaniel, J. A. Munn, V. K. Narayanan, E. Peng, J. R. Pier, C. M. Rockosi, D. P. Schneider, J. A. Smith, M. A. Strauss, Z. I. Tsvetanov, A. Uomoto, D. G. York et W. Zheng. Toward Spectral Classification of L and T Dwarfs : Infrared and Optical Spectroscopy and Analysis. *ApJ*, 564:466–481, janvier 2002.
- [24] T. R. Geballe, S. R. Kulkarni, C. E. Woodward et G. C. Sloan. The Near-Infrared Spectrum of the Brown Dwarf Gliese 229B. *ApJ*, 467:L101–L104, août 1996.
- [25] T. R. Geballe, K. S. Noll, S. K. Leggett, G. R. Knapp, X. Fan et D. Golimowski. Infrared Spectroscopy of Brown Dwarfs : the Onset of CH₄ Absorption in L Dwarfs and the L/T Transition. Dans H. R. A. Jones et I. A. Steele, éditeurs, *Ultracool Dwarfs : New Spectral Types L and T*, pages 83–91, 2001.
- [26] T. R. Geballe, F. Rigaut, J.-R. Roy et B. T. Draine. A Bow Shock of Heated Dust Surrounding Galactic Center Source IRS 8. *ApJ*, 602:770–775, février 2004.
- [27] J. E. Gizis, J. D. Kirkpatrick, A. Burgasser, I. N. Reid, D. G. Monet, J. Liebert et J. C. Wilson. Substellar Companions to Main-Sequence Stars : No Brown Dwarf Desert at Wide Separations. *ApJ*, 551:L163–L166, avril 2001.
- [28] J. E. Gizis, D. G. Monet, I. N. Reid, J. D. Kirkpatrick, J. Liebert et R. J. Williams. New Neighbors from 2MASS : Activity and Kinematics at the Bottom of the Main Sequence. *AJ*, 120:1085–1099, août 2000.
- [29] J. E. Gizis, I. N. Reid, G. R. Knapp, J. Liebert, J. D. Kirkpatrick, D. W. Koerner et A. J. Burgasser. Hubble Space Telescope Observations of Binary Very Low Mass Stars and Brown Dwarfs. *AJ*, 125:3302–3310, juin 2003.
- [30] D. A. Golimowski, C. J. Burrows, S. R. Kulkarni, B. R. Oppenheimer et R. A. Brukardt. Wide Field Planetary Camera 2 Observations of the Brown Dwarf Gliese 229B : Optical Colors and Orbital Motion. *AJ*, 115:2579–2586, juin 1998.

- [31] D. A. Golimowski, S. K. Leggett, M. S. Marley, X. Fan, T. R. Geballe, G. R. Knapp, F. J. Vrba, A. A. Henden, C. B. Luginbuhl, H. H. Guetter, J. A. Munn, B. Canzian, W. Zheng, Z. I. Tsvetanov, K. Chiu, K. Glazebrook, E. A. Hoversten, D. P. Schneider et J. Brinkmann. L' and M' Photometry of Ultracool Dwarfs. *AJ*, 127: 3516–3536, juin 2004.
- [32] D. A. Golimowski et SDSS Collaboration. L and T Dwarfs : Our Ultracool Solar Neighbors. Dans *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 1442, décembre 2000.
- [33] D. Grether et C. H. Lineweaver. How Dry is the Brown Dwarf Desert ? Quantifying the Relative Number of Planets, Brown Dwarfs, and Stellar Companions around Nearby Sun-like Stars. *ApJ*, 640:1051–1062, avril 2006.
- [34] C. Hayashi et T. Nakano. Evolution of Stars of Small Masses in the Pre-Main-Sequence Stages. *Progress of Theoretical Physics*, 30:460–474, octobre 1963.
- [35] T. J. Henry, J. D. Kirkpatrick et D. A. Simons. The solar neighborhood, 1 : Standard spectral types (K5-M8) for northern dwarfs within eight parsecs. *AJ*, 108:1437–1444, octobre 1994.
- [36] J. D. Kirkpatrick. *Spectroscopic and photometric studies of main sequence M stars and a search for late-type dwarfs in the solar vicinity*. Thèse de doctorat, AA(Arizona Univ., Tucson.), 1992.
- [37] J. D. Kirkpatrick. New Spectral Types L and T. *ARA&A*, 43:195–245, septembre 2005.
- [38] J. D. Kirkpatrick, F. Allard, T. Bida, B. Zuckerman, E. E. Becklin, G. Chabrier et I. Baraffe. An Improved Optical Spectrum and New Model FITS of the Likely Brown Dwarf GD 165B. *ApJ*, 519:834–843, juillet 1999b.
- [39] J. D. Kirkpatrick, C. A. Beichman et M. F. Skrutskie. The Coolest Isolated M Dwarf and Other 2MASS Discoveries. *ApJ*, 476:311–318, février 1997.

- [40] J. D. Kirkpatrick, T. J. Henry et J. Liebert. The unique spectrum of the brown dwarf candidate GD 165B and comparison to the spectra of other low-luminosity objects. *ApJ*, 406:701–707, avril 1993.
- [41] J. D. Kirkpatrick, T. J. Henry et D. W. McCarthy, Jr. A standard stellar spectral sequence in the red/near-infrared - Classes K5 to M9. *ApJS*, 77:417–440, novembre 1991.
- [42] J. D. Kirkpatrick, T. J. Henry et D. A. Simons. The solar neighborhood. 2 : The first list of dwarfs with spectral types of M7 and cooler. *AJ*, 109:797–807, février 1995.
- [43] J. D. Kirkpatrick, I. N. Reid, J. Liebert, R. M. Cutri, B. Nelson, C. A. Beichman, C. C. Dahn, D. G. Monet, J. E. Gizis et M. F. Skrutskie. Dwarfs Cooler than “M” : The Definition of Spectral Type “L” Using Discoveries from the 2 Micron All-Sky Survey (2MASS). *ApJ*, 519:802–833, juillet 1999a.
- [44] J. D. Kirkpatrick, I. N. Reid, J. Liebert, J. E. Gizis, A. J. Burgasser, D. G. Monet, C. C. Dahn, B. Nelson et R. J. Williams. 67 Additional L Dwarfs Discovered by the Two Micron All Sky Survey. *AJ*, 120:447–472, juillet 2000.
- [45] G. R. Knapp, S. K. Leggett, X. Fan, M. S. Marley, T. R. Geballe, D. A. Golimowski, D. Finkbeiner, J. E. Gunn, J. Hennawi, Z. Ivezić, R. H. Lupton, D. J. Schlegel, M. A. Strauss, Z. I. Tsvetanov, K. Chiu, E. A. Hoversten, K. Glazebrook, W. Zheng, M. Hendrickson, C. C. Williams, A. Uomoto, F. J. Vrba, A. A. Henden, C. B. Luginbuhl, H. H. Guetter, J. A. Munn, B. Canzian, D. P. Schneider et J. Brinkmann. Near-Infrared Photometry and Spectroscopy of L and T Dwarfs : The Effects of Temperature, Clouds, and Gravity. *AJ*, 127:3553–3578, juin 2004.
- [46] S. S. Kumar. The Structure of Stars of Very Low Mass. *ApJ*, 137:1121–1125, mai 1963a.
- [47] S. S. Kumar. The Helmholtz-Kelvin Time Scale for Stars of Very Low Mass. *ApJ*, 137:1126–1128, mai 1963b.

- [48] S. K. Leggett, F. Allard, T. R. Geballe, P. H. Hauschildt et A. Schweitzer. Infrared Spectra and Spectral Energy Distributions of Late M and L Dwarfs. *ApJ*, 548: 908–918, février 2001.
- [49] S. K. Leggett, X. Fan, K. Chiu, T. R. Geballe, D. A. Golimowski et Sloan Digital Sky Survey. Continued Followup of SDSS Brown Dwarfs. Dans *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 1352, décembre 2004.
- [50] S. K. Leggett, T. R. Geballe, X. Fan, D. P. Schneider, J. E. Gunn, R. H. Lupton, G. R. Knapp, M. A. Strauss, A. McDaniel, D. A. Golimowski, T. J. Henry, E. Peng, Z. I. Tsvetanov, A. Uomoto, W. Zheng, G. J. Hill, L. W. Ramsey, S. F. Anderson, J. A. Annis, N. A. Bahcall, J. Brinkmann, B. Chen, I. Csabai, M. Fukugita, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, Ž. Ivezić, D. Q. Lamb, J. A. Munn, J. R. Pier, D. J. Schlegel, J. A. Smith, C. Stoughton, A. R. Thakar et D. G. York. The Missing Link : Early Methane (“T”) Dwarfs in the Sloan Digital Sky Survey. *ApJ*, 536: L35–L38, juin 2000.
- [51] S. K. Leggett, D. A. Golimowski, X. Fan, T. R. Geballe et G. R. Knapp. Infrared Colors of L and T Dwarfs. Dans A. Brown, G. M. Harper et T. R. Ayres, éditeurs, *The Future of Cool-Star Astrophysics : 12th Cambridge Workshop on Cool Stars , Stellar Systems, and the Sun (2001 July 30 - August 3)*, eds. A. Brown, G.M. Harper, and T.R. Ayres, (University of Colorado), 2003, p. 120-127., pages 120–127, octobre 2003.
- [52] S. K. Leggett, D. A. Golimowski, X. Fan, T. R. Geballe, G. R. Knapp, J. Brinkmann, I. Csabai, J. E. Gunn, S. L. Hawley, T. J. Henry, R. Hindsley, Ž. Ivezić, R. H. Lupton, J. R. Pier, D. P. Schneider, J. A. Smith, M. A. Strauss, A. Uomoto et D. G. York. Infrared Photometry of Late-M, L, and T Dwarfs. *ApJ*, 564:452–465, janvier 2002a.
- [53] S. K. Leggett, P. H. Hauschildt, F. Allard, T. R. Geballe et E. Baron. Atmospheric analysis of the M/L and M/T dwarf binary systems LHS 102 and Gliese 229. *MNRAS*, 332:78–90, mai 2002b.

- [54] S. K. Leggett, D. W. Toomey, T. R. Geballe et R. H. Brown. Revised Fluxes for Gliese 229B. *ApJ*, 517:L139–L142, juin 1999.
- [55] M. C. Liu, S. K. Leggett, D. A. Golimowski, K. Chiu, X. Fan, T. R. Geballe, D. P. Schneider et J. Brinkmann. SDSS J1534+1615AB : A Novel T Dwarf Binary Found with Keck Laser Guide Star Adaptive Optics and the Potential Role of Binarity in the L/T Transition. *ApJ*, 647:1393–1404, août 2006.
- [56] G. W. Marcy et R. P. Butler. Detection of Extrasolar Giant Planets. *ARA&A*, 36: 57–98, 1998.
- [57] G. W. Marcy et R. P. Butler. Planets Orbiting Other Suns. *PASP*, 112:137–140, février 2000.
- [58] E. L. Martín, G. Basri, X. Delfosse et T. Forveille. Keck HIRES spectra of the brown dwarf DENIS-P J1228.2-1547. *A&A*, 327:L29–L32, novembre 1997.
- [59] E. L. Martín, G. Basri, J. E. Gallegos, R. Rebolo, M. R. Zapatero-Osorio et V. J. S. Bejar. A New Pleiades Member at the Lithium Substellar Boundary. *ApJ*, 499: L61–L64, mai 1998.
- [60] E. L. Martín, X. Delfosse, G. Basri, B. Goldman, T. Forveille et M. R. Zapatero Osorio. Spectroscopic Classification of Late-M and L Field Dwarfs. *AJ*, 118: 2466–2482, novembre 1999.
- [61] C. McCarthy et B. Zuckerman. The Brown Dwarf Desert at 75-1200 AU. *AJ*, 127: 2871–2884, mai 2004.
- [62] I. S. McLean, M. R. McGovern, A. J. Burgasser, J. D. Kirkpatrick, L. Prato et S. S. Kim. The NIRSPEC Brown Dwarf Spectroscopic Survey. I. Low-Resolution Near-Infrared Spectra. *ApJ*, 596:561–586, octobre 2003.
- [63] D. Mihalas et J. Binney. *Galactic astronomy : Structure and kinematics /2nd edition/*. San Francisco, CA, W. H. Freeman and Co., 1981. 608 p., 1981.

- [64] T. Nakajima, B. R. Oppenheimer, S. R. Kulkarni, D. A. Golimowski, K. Matthews et S. T. Durrance. Discovery of a Cool Brown Dwarf. *Nature*, 378:463–465, novembre 1995.
- [65] M. V. Newberry. Signal-to-noise considerations for sky-subtracted CCD data. *PASP*, 103:122–130, janvier 1991.
- [66] K. S. Noll, T. R. Geballe, S. K. Leggett et M. S. Marley. The Onset of Methane in L Dwarfs. *ApJ*, 541:L75–L78, octobre 2000.
- [67] K. S. Noll, T. R. Geballe et M. S. Marley. Detection of Abundant Carbon Monoxide in the Brown Dwarf Gliese 229B. *ApJ*, 489:L87–L90, novembre 1997.
- [68] B. R. Oppenheimer, S. R. Kulkarni, K. Matthews et T. Nakajima. Infrared Spectrum of the Cool Brown Dwarf GL :229B. *Science*, 270:1478–1479, décembre 1995.
- [69] B. R. Oppenheimer, S. R. Kulkarni, K. Matthews et M. H. van Kerkwijk. The Spectrum of the Brown Dwarf Gliese 229B. *ApJ*, 502:932–943, août 1998.
- [70] J. T. Rayner, D. W. Toomey, P. M. Onaka, A. J. Denault, W. E. Stahlberger, W. D. Vacca, M. C. Cushing et S. Wang. SpeX : A Medium-Resolution 0.8-5.5 Micron Spectrograph and Imager for the NASA Infrared Telescope Facility. *PASP*, 115:362–382, mars 2003.
- [71] I. N. Reid, A. J. Burgasser, K. L. Cruz, J. D. Kirkpatrick et J. E. Gizis. Near-Infrared Spectral Classification of Late M and L Dwarfs. *AJ*, 121:1710–1721, mars 2001.
- [72] I. N. Reid, J. D. Kirkpatrick, J. E. Gizis, C. C. Dahn, D. G. Monet, R. J. Williams, J. Liebert et A. J. Burgasser. Four Nearby L Dwarfs. *AJ*, 119:369–377, janvier 2000.
- [73] I. N. Reid, J. D. Kirkpatrick, J. Liebert, A. Burrows, J. E. Gizis, A. Burgasser, C. C. Dahn, D. Monet, R. Cutri, C. A. Beichman et M. Skrutskie. L Dwarfs and the Substellar Mass Function. *ApJ*, 521:613–629, août 1999.

- [74] M. T. Ruiz, S. K. Leggett et F. Allard. Kelu-1 : A Free-floating Brown Dwarf in the Solar Neighborhood. *ApJ*, 491:L107–L110, décembre 1997.
- [75] A. B. Schultz, F. Allard, M. Clampin, M. McGrath, F. C. Bruhweiler, J. A. Valenti, P. Plait, S. Hulbert, S. Baum, B. E. Woodgate, C. W. Bowers, R. A. Kimble, S. P. Maran, H. W. Moos et F. Roesler. First Results from the Space Telescope Imaging Spectrograph : Optical Spectra of Gliese 229B. *ApJ*, 492:L181–L184, janvier 1998.
- [76] M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, J. Huchra, J. Liebert, C. Lonsdale, D. G. Monet, S. Price, P. Seitzer, T. Jarrett, J. D. Kirkpatrick, J. E. Gizis, E. Howard, T. Evans, J. Fowler, L. Fullmer, R. Hurt, R. Light, E. L. Kopan, K. A. Marsh, H. L. McCallon, R. Tam, S. Van Dyk et S. Wheelock. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *AJ*, 131:1163–1183, février 2006.
- [77] M. A. Strauss, X. Fan, J. E. Gunn, S. K. Leggett, T. R. Geballe, J. R. Pier, R. H. Lupton, G. R. Knapp, J. Annis, J. Brinkmann, J. H. Crocker, I. Csabai, M. Fukugita, D. A. Golimowski, F. H. Harris, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, Ž. Ivezić, S. Kent, D. Q. Lamb, J. A. Munn, H. J. Newberg, R. Rechenmacher, D. P. Schneider, J. A. Smith, C. Stoughton, D. L. Tucker, P. Waddell et D. G. York. The Discovery of a Field Methane Dwarf from Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. *ApJ*, 522:L61–L64, septembre 1999.
- [78] L. Testi, F. D’Antona, F. Ghinassi, J. Licandro, A. Magazzù, R. Maiolino, F. Mannucci, A. Marconi, N. Nagar, A. Natta et E. Oliva. NICS-TNG Low-Resolution 0.85-2.45 micron Spectra of L Dwarfs : A Near-Infrared Spectral Classification Scheme for Faint Dwarfs. *ApJ*, 552:L147–L150, mai 2001.
- [79] C. G. Tinney, X. Delfosse, T. Forveille et F. Allard. Optical spectroscopy of DENIS mini-survey brown dwarf candidates. *A&A*, 338:1066–1072, octobre 1998.
- [80] A. T. Tokunaga et N. Kobayashi. K-Band Spectra and Narrowband Photometry of DENIS Field Brown Dwarfs. *AJ*, 117:1010–1013, février 1999.

- [81] T. Tsuji et T. Nakajima. Transition from L to T Dwarfs on the Color-Magnitude Diagram. *ApJ*, 585:L151–L154, mars 2003.
- [82] T. Tsuji, K. Ohnaka et W. Aoki. Warm Dust in the Cool Brown Dwarf Gliese 229B and Spectroscopic Diagnosis of Dusty Photospheres. *ApJ*, 520:L119–L122, août 1999.
- [83] Z. I. Tsvetanov, D. A. Golimowski, W. Zheng, T. R. Geballe, S. K. Leggett, H. C. Ford, A. F. Davidsen, A. Uomoto, X. Fan, G. R. Knapp, M. A. Strauss, J. Brinkmann, D. Q. Lamb, H. J. Newberg, R. Rechenmacher, D. P. Schneider, D. G. York, R. H. Lupton, J. R. Pier, J. Annis, I. Csabai, R. B. Hindsley, Ž. Ivezić, J. A. Munn, A. R. Thakar et P. Waddell. The Discovery of a Second Field Methane Brown Dwarf from Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. *ApJ*, 531:L61–L65, mars 2000.
- [84] F. J. Vrba, A. A. Henden, C. B. Luginbuhl, H. H. Guetter, J. A. Munn, B. Canzian, A. J. Burgasser, J. D. Kirkpatrick, X. Fan, T. R. Geballe, D. A. Golimowski, G. R. Knapp, S. K. Leggett, D. P. Schneider et J. Brinkmann. Preliminary Parallaxes of 40 L and T Dwarfs from the US Naval Observatory Infrared Astrometry Program. *AJ*, 127:2948–2968, mai 2004.
- [85] D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr., S. F. Anderson, J. Annis, N. A. Bahcall, J. A. Bakken, R. Barkhouser, S. Bastian, E. Berman, W. N. Boroski, S. Bracker, C. Briegel, J. W. Briggs, J. Brinkmann, R. Brunner, S. Burles, L. Carey, M. A. Carr, F. J. Castander, B. Chen, P. L. Colestock, A. J. Connolly, J. H. Crocker, I. Csabai, P. C. Czarapata, J. E. Davis, M. Doi, T. Dombeck, D. Eisenstein, N. Ellman, B. R. Elms, M. L. Evans, X. Fan, G. R. Federwitz, L. Fiscelli, S. Friedman, J. A. Frieman, M. Fukugita, B. Gillespie, J. E. Gunn, V. K. Gurbani, E. de Haas, M. Haldeman, F. H. Harris, J. Hayes, T. M. Heckman, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, S. Holm, D. J. Holmgren, C.-h. Huang, C. Hull, D. Husby, S.-I. Ichikawa, T. Ichikawa, Ž. Ivezić, S. Kent, R. S. J. Kim, E. Kinney, M. Klaene, A. N. Kleinman, S. Kleinman, G. R. Knapp, J. Korienek, R. G. Kron, P. Z. Kunszt, D. Q.

Lamb, B. Lee, R. F. Leger, S. Limmongkol, C. Lindenmeyer, D. C. Long, C. Loomis, J. Loveday, R. Lucinio, R. H. Lupton, B. MacKinnon, E. J. Mannery, P. M. Mantsch, B. Margon, P. McGehee, T. A. McKay, A. Meiksin, A. Merelli, D. G. Monet, J. A. Munn, V. K. Narayanan, T. Nash, E. Neilsen, R. Neswold, H. J. Newberg, R. C. Nichol, T. Nicinski, M. Nonino, N. Okada, S. Okamura, J. P. Ostriker, R. Owen, A. G. Pauls, J. Peoples, R. L. Peterson, D. Petravick, J. R. Pier, A. Pope, R. Pordes, A. Prosapio, R. Rechenmacher, T. R. Quinn, G. T. Richards, M. W. Richmond, C. H. Rivetta, C. M. Rockosi, K. Ruthmansdorfer, D. Sandford, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, M. Sekiguchi, G. Sergey, K. Shimasaku, W. A. Siegmund, S. Smee, J. A. Smith, S. Snedden, R. Stone, C. Stoughton, M. A. Strauss, C. Stubbs, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, G. P. Szokoly, A. R. Thakar, C. Tremonti, D. L. Tucker, A. Uomoto, D. Vanden Berk, M. S. Vogeley, P. Waddell, S.-i. Wang, M. Watanabe, D. H. Weinberg, B. Yanny et N. Yasuda. The Sloan Digital Sky Survey : Technical Summary. *AJ*, 120:1579–1587, septembre 2000.