

Université de Montréal

Étude photométrique des étoiles naines blanches dans le domaine infrarouge

par

Pier-Emmanuel Tremblay

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

Avril, 2007



dc
3
U54
2007
V.009



AVIS

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

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
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

Étude photométrique des étoiles naines blanches dans le domaine infrarouge

présenté par:

Pier-Emmanuel Tremblay

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

Gilles Fontaine,	président-rapporteur
Pierre Bergeron,	directeur de recherche
François Wesemael,	membre du jury

Mémoire accepté le: _____

Sommaire

Il existe maintenant plusieurs ensembles de données dans le domaine infrarouge pour des étoiles naines blanches dont nous présentons une analyse globale. Nous vérifions la fiabilité des observations *JHK* dans le système *CIT*, de la base de données du *Two Micron All Sky Survey* (2MASS) et de la photométrie dans l'infrarouge moyen du *Spitzer Space Telescope*. Notre méthode d'analyse est la méthode photométrique qui consiste à comparer les flux infrarouges observés, intégrés sur des bandes passantes, aux flux théoriques déterminés avec nos modèles d'atmosphère. On utilise d'abord cette méthode avec l'échantillon de 2MASS pour identifier systématiquement les naines blanches binaires avec un compagnon froid de la séquence principale. D'autre part, avec un échantillon d'étoiles froides de 2MASS, on détermine le ratio du nombre d'étoiles de types non-DA et DA en fonction de la température effective. Cela constitue l'étude avec le plus grand échantillon et la plus grande précision à ce jour. La variation de ce ratio suggère que le mélange convectif de la couche superficielle d'hydrogène est responsable de la transition d'une faible fraction ($\sim 15\%$) d'étoiles DA vers des non-DA à basse température effective ($T_{\text{eff}} \sim 9000$ K). Finalement, l'analyse de l'évolution spectrale à très basse température effective ($T_{\text{eff}} < 5000$ K) montre que notre connaissance est limitée par l'absence d'un modèle adéquat de l'opacité de l'absorption induite par collisions à hautes densités.

Mots clefs:

étoiles : binaires – étoiles : mélange convectif – étoiles : modèles d'atmosphère – étoiles : paramètres fondamentaux – naines blanches – techniques : photométriques

Abstract

We present a global analysis of the many infrared photometric data sets available for white dwarfs. We evaluate the reliability of the *JHK* observations in the *CIT* system, the *Two Micron All Sky Survey* (2MASS) database, and the mid-infrared photometry from the *Spitzer Space Telescope*. Our analysis uses the photometric method, which compares the observed infrared fluxes, integrated over bandpasses, to the theoretical fluxes from state-of-the-art model atmospheres. We use this method with the 2MASS data set to identify systematically binary white dwarfs with a cool main sequence companion. Secondly, with a 2MASS sample of cool white dwarfs, we determine the ratio of non-DA to DA stars as a function of effective temperature. This study achieves a higher accuracy and uses a larger sample of white dwarfs than any previous analysis. The variation of this ratio suggests that convective mixing of the hydrogen layer is responsible for the transition of a small fraction of DA ($\sim 15\%$) to non-DA stars at low effective temperatures ($T_{\text{eff}} \sim 9000$ K). Finally, an analysis of the spectral evolution at lower effective temperatures ($T_{\text{eff}} < 5000$ K) shows that our knowledge is limited by the lack of accurate opacity calculations of collision induced absorptions (CIA) at high densities.

Subject headings:

stars : binaries – stars : convective mixing – stars : fundamental parameters – stars : model atmospheres : – techniques : photometric – white dwarfs

Table des matières

Sommaire	i
Abstract	ii
Table des matières	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
1 Introduction	1
2 Grille de modèles d'atmosphère	3
2.1 Équation d'état	3
2.2 Opacités	5
2.3 Présentation de la grille	6
3 WHITE DWARFS FROM 2MASS AND THE SPITZER TELESCOPE	8
3.1 ABSTRACT	9
3.2 INTRODUCTION	9
3.3 COMPARISON OF CIT AND 2MASS PHOTOMETRY	12
3.4 WHITE DWARFS AND LOW MASS MAIN SEQUENCE BINARIES FROM 2MASS	16
3.4.1 The Wachter et al. Analysis	16
3.4.2 The Wellhouse et al. Analysis	18

3.4.3	The Synthetic Flux Method	19
3.5	INFRARED PHOTOMETRY FROM SPITZER	22
3.6	CANDIDATE WHITE DWARFS WITH CIRCUMSTELLAR DISKS	25
3.7	CONCLUSION	28
3.8	REFERENCES	30
3.9	TABLES	33
3.10	FIGURES	41
4	Étude du mélange convectif	50
4.1	Définition de l'échantillon de 2MASS	54
4.2	Détermination des paramètres atmosphériques	56
4.3	Détermination des incertitudes	59
4.4	Résultats sur le mélange convectif	63
4.5	Incertitudes systématiques	69
4.6	Évolution spectrale entre DA et non-DA	71
4.7	Naines blanches binaires	71
5	Naines blanches absorbant dans l'infrarouge	73
5.1	Observations	74
5.2	Connaissances actuelles	76
5.2.1	Contraintes	77
5.2.2	Pistes de solutions	77
6	Conclusion	81
	Bibliographie	83
	Remerciements	88
	Annexe A	89
A	Précisions sur l'équation d'état	89
A.1	Ionisation par pression	89

TABLE DES MATIÈRES	v
A.2 Quantités thermodynamiques	90
A.3 Illustration de l'équation d'état	90
Annexe B	93
B Échantillon de 2MASS	93
Annexe C	104
C Cas Particuliers de l'Échantillon de 2MASS	104

Liste des figures

2.1	Grille de spectres théoriques.	7
3.1	Differences in magnitudes between the infrared CIT and 2MASS photometric systems for 160 cool white dwarfs.	41
3.2	$(J - H)$ vs. $(H - K/K_S)$ two-color diagrams for our sample.	42
3.3	Fits to the optical $BVRI$ and infrared JHK CIT photometric energy distributions for selected objects.	43
3.4	Same as Figure 3.2 but with the four regions defined by Wellhouse et al. (2005).	44
3.5	Observed and predicted 2MASS fluxes for several binary and tentative binary candidates from Wachter et al. (2003).	45
3.6	Fits to the energy distribution of white dwarfs from the sample of Kilic et al. (2006b).	46
3.7	The ratio of observed to predicted <i>Spitzer</i> fluxes for 12 objects from the sample of Kilic et al. (2006b).	47
3.8	Same as Fig. 3.5 but for the six white dwarfs discussed in § 5.	48
3.9	Differences between the 2MASS observed and predicted $(J - H)$ and $(J - K_S)$ color indices for our sample of massive white dwarfs.	49
4.1	La zone convective en terme de la fraction de la masse d'hydrogène en fonction de T_{eff}	53
4.2	L'échantillon de Sion (1984).	54
4.3	La magnitude V pour laquelle $H_{2MASS} = 16.5$ en fonction de T_{eff}	56

4.4	La différence de la couleur ($V - J$) pour des valeurs de $\log g$ de 8.5 et 7.5 en fonction de T_{eff}	58
4.5	Minimisation de la distribution d'énergie $VJHK_S$ pour huit naines blanches brillantes.	60
4.6	La variation de la température effective pour une variation de ($V - J$) de 0.08 magnitude en fonction de T_{eff}	61
4.7	Différences entre les températures de notre échantillon et celles déterminées par BRL97 et BLR01.	62
4.8	Différences entre les températures de notre échantillon et celles déterminées de façon spectroscopique.	64
4.9	Histogramme de la distribution des naines blanches de l'échantillon de 2MASS.	65
4.10	Le rapport des volumes sondés pour des naines blanches riches en hélium et en hydrogène dans un relevé limité en magnitude.	66
4.11	Le rapport du nombre d'étoiles riches en hydrogène et riches en hélium en fonction de T_{eff}	67
4.12	La température effective à laquelle il y aura une mélange convectif pour une fraction de masse d'hydrogène donnée.	68
4.13	Histogrammes du nombre d'étoiles DA et non-DA avec des mesures de leurs mouvements propres.	70
5.1	Minimisation photométrique de LHS 3250.	76
5.2	Modèles avec une équation d'état non-idéale.	78
5.3	Section efficace ad-hoc.	79
A.1	Équation d'état dans le plan $\log P - \log \rho$	91
A.2	Équation d'état dans le plan $\log P - \log \rho$ (suite).	91
A.3	Équation d'état dans le plan $\log P - U$	92

Liste des tableaux

2.1	Espèces chimiques dans l'équation d'état	4
2.2	Types d'opacités	6
3.1	Sample of Cool White Dwarfs with Near-Infrared Photometry	33
3.2	Statistical Comparison of CIT and 2MASS Magnitudes	36
3.3	Sample of White Dwarfs with Predicted NIR Photometry	37
3.4	Sample of Massive White Dwarfs	39
4.1	Comparaison entre températures photométriques et spectroscopiques	59
5.1	Observations de naines blanches absorbant dans l'infrarouge	75
B.1	Échantillon de naines blanches de 2MASS riches en hydrogène	93
B.2	Échantillon de naines blanches de 2MASS riches en hélium	100
B.3	Échantillon de naines blanches binaires riches en hydrogène	102
B.4	Échantillon de naines blanches binaires riches en hélium	103

Chapitre 1

Introduction

Notre compréhension des étoiles naines blanches est contrainte par la seule partie qui est directement observable, soit la couche atmosphérique d'où émerge le flux. La méthode photométrique, qui consiste à comparer les flux théoriques aux flux observés intégrés sur des bandes spectrales, représente un outil d'analyse puissant. Historiquement, l'observation de couleurs (par ex. $B - V$) a été une ressource importante pour identifier systématiquement les candidats de naines blanches dans des relevés (par ex. PG; Green et al. 1986) et pour estimer leur température effective. Plus récemment, la minimisation photométrique en $BVRIJHK$, avec des données spectroscopiques pour contraindre la composition et des mesures de la parallaxe pour contraindre la gravité, s'est avérée être la méthode la plus précise pour déterminer les paramètres atmosphériques (température, gravité, composition) des naines blanches froides (Bergeron et al. 1997, 2001). La détermination de ces paramètres dans l'échantillon local de naines blanches permet d'analyser l'évolution chimique des naines blanches froides (Sion 1984; Dufour 2006) ou d'étudier la fonction de luminosité et par conséquent l'âge de la composante locale du disque (Bergeron et al. 1997). En analysant les paramètres des naines blanches les plus froides et leurs données cinématiques, on peut également contraindre la densité locale de la composante du halo (Bergeron et al. 2005).

Pour les étoiles plus chaudes ($T_{\text{eff}} \gtrsim 10000$ K), la méthode spectroscopique, qui compare les profils théoriques et observés des raies spectrales, s'avère plus efficace pour la détermination des paramètres atmosphériques (Bergeron et al. 1992). Cependant, la méthode photométrique

demeure un outil important. Le fait que l'on sonde le flux du continu sur une large plage de fréquences implique que la méthode photométrique n'est pas sensible aux mêmes processus physiques que la méthode spectroscopique. En particulier, la minimisation photométrique n'est affectée que faiblement par la gravité et on appelle souvent la solution photométrique un *indice de température*, ce qui apporte une contrainte importante sur la solution spectroscopique. De plus, lorsqu'on étudie des naines blanches de différents types spectraux, cette méthode est homogène car elle sonde le continu qui est créé par des processus physiques qui sont bien connus.

On s'intéresse dans cet ouvrage aux ensembles disponibles de photométrie dans le domaine infrarouge de naines blanches. Ceci inclut les données *JHK* dans le système *CIT* (Bergeron et al. 1997, 2001) et celles des bases de données du *Two Micron All Sky Survey* (2MASS) et du *Spitzer Space Telescope*. Ces données sont importantes dans la méthode photométrique puisqu'on augmente la précision en sondant la distribution d'énergie sur une plus grande plage spectrale. De plus, la partie infrarouge du spectre électromagnétique nous permet d'étudier des objets (compagnons froids, disques) ou des phénomènes physiques (absorption infrarouge) qui ne sont pas détectables à plus haute énergie. Cette analyse à grande échelle nécessite des modèles d'atmosphère homogènes pour des naines blanches de températures effectives et compositions arbitraires, ce que nous présentons au chapitre § 2. D'autre part, le chapitre § 3 analyse la fiabilité des données photométriques infrarouge disponibles. Ayant contraint les limites de l'utilisation des modèles et des données, la deuxième partie de cet ouvrage est consacrée à comparer les données photométriques infrarouge à nos modèles selon trois axes principaux. On présente au chapitre § 3 les contraintes de la recherche de naines blanches binaires et de disques avec les données de 2MASS. Au chapitre § 4, on utilise l'échantillon de 2MASS pour étudier le mélange convectif dans les naines blanches froides. Finalement, on discute des naines blanches très froides absorbant dans l'infrarouge (§ 5).

Chapitre 2

Grille de modèles d'atmosphère d'étoiles naines blanches

Notre but est d'analyser la photométrie d'étoiles naines blanches de façon homogène à toutes les températures effectives et pour toutes les compositions. Ainsi, nous avons développé un code de modèles d'atmosphère ETL qui permet de calculer des spectres théoriques pour des températures de 2000 K à 140,000 K, pour un mélange arbitraire d'hélium et d'hydrogène et pour des longueurs d'ondes de 50 à 100000 Å. Nous utilisons comme codes de base celui de Bergeron et al. (1991, 1995, 2001) et références ci-incluses, restreint aux naines blanches froides et le code de Wesemael et al. (1980) restreint aux naines blanches chaudes. Nous avons fait la jonction entre les deux codes en plus de mettre à jour l'équation d'état et les opacités.

2.1 Équation d'état

Notre équation d'état fournit les populations de toutes les espèces présentées au Tableau 2.1 pour les variables indépendantes définies comme la température, la pression et la fraction d'hélium et d'hydrogène. Les populations sont calculées par une procédure d'itérations de Newton-Raphson.

Nous utilisons l'équation d'état non-idéale de Hummer & Mihalas (1988) (dorénavant HM88), où on considère la perturbation statistique de chaque atome par ses voisins neutres

TABLEAU 2.1 – Espèces chimiques dans l'équation d'état

Espèce	Niveaux	χ^I (eV)	Rayon (Å)
H I	16	13.606	$[1.876-0.294\log(T)+(-0.576+0.100\log(T)\rho)]n^2$ ^a
H II	1	–	–
H ⁻	1	0.755	1.15 ^b
H ₂	322	4.478	$[2.226-0.331\log(T)+(-0.975+0.175\log(T)\rho)]\mu(j)$ ^a
H ₂ ⁺	1	2.650	1.32 ^b
H ₃ ⁺	1	8.824	0.65 ^b
He I	13	24.587	0.39 (n=1), 2.12 (n=2-5), 4.8 (n=6-11), 8.5 (n=12), 12.5 (n=13)
He II	6	54.425	0.39n ²
He III	1	–	–
He ₂ ⁺	1	2.365	1.0
HeH ⁺	1	1.961	0.76 ^c
e ⁻	1	–	–

^a Saumon & Chabrier (1991)

^b Lenzuni & Saumon (1992)

^c Saha et al. (1978)

Les rayons de H et H₂ de Saumon & Chabrier (1991) sont valides pour $\log \rho < 0$, $3.46 < \log T < 4.26$ et $\mu(j)$ définit le rayon des niveaux de vibrations/rotations par rapport au niveau fondamental (voir l'équation 2.41 de Saumon 1990). Les nombres de niveaux sont seulement ceux dont les populations sont calculées explicitement et différent de ceux considérés dans les fonctions de partitions. Ces dernières sont calculées explicitement ou à partir de tables pour le H₂⁺ (Stancil 1994), H₃⁺ (Neale & Tennyson 1995), He₂⁺ (Stancil 1994), HeH⁺ (Engel et al. 2005). Nous négligeons le H₂⁻ qui n'est jamais dominant par rapport au H⁻.

et chargés. En bref, chaque niveau atomique lié possède une probabilité $1 - w$ d'être détruit par l'interaction avec son environnement. La probabilité w est définie comme $w = w^n w^c$ où w^n constitue l'interaction avec les particules neutres et w^c l'interaction avec les particules chargées. Pour une espèce liée i dans l'état j donné, ces termes prennent la forme :

$$w_{i,j}^n = \exp\left(-\frac{4\pi}{3} \sum_k n_k (r_{i,j} + r_k)^3\right) \quad (2.1)$$

$$w_{i,j}^c = \exp\left(-\frac{4\pi}{3} 16 \left[\frac{(Z_{i,j} + 1)^{1/2} e^2}{K_{i,j}^{1/2} \chi_{i,j}}\right]^3 \sum_{\alpha \neq e} N_\alpha Z_\alpha^{3/2}\right) \quad (2.2)$$

où k et α sont des sommes sur les états liés et chargés respectivement, r représente le rayon des états définis dans le Tableau 4.2 et les autres termes sont tels que décrits dans HM88. La fonction de partition d'une espèce donnée devient alors :

$$Z_i = \sum_j w_{i,j} \exp\left(-\frac{\epsilon_{i,j}}{kT}\right) \quad (2.3)$$

Dans ce qui suit, nous utilisons un facteur d'atténuation de 0.5 pour le rayon de tous

les états excités, une calibration faite à partir des observations de naines DA froides ($T_{\text{eff}} \sim 8000 - 10,000$ K) montrant que le modèle de HM88 surestime les effets non-idéaux (Bergeron et al. 1991). L'équation d'état résultante du modèle de HM88 est donnée par :

$$\frac{P}{kT} = \sum_{s,j} n_{s,j} + \sum_i n_{i,1} \left(\frac{4\pi}{3} \sum_k n_k (r_k + r_{i,1})^3 \right) + n_e \left(\frac{f_{5/2}(\mu/kT)}{f_{3/2}(\mu/kT)} - 1 \right) + \frac{P_c}{kT} + \frac{a}{3k} T^3 \quad (2.4)$$

où l'indice s représente toutes les espèces (liées ou libres), μ est le potentiel chimique, a est la constante de radiation et f_n sont les intégrales de Fermi-Dirac. Les termes sont, dans l'ordre d'apparition, la pression du gaz idéal, la pression résultante de l'interaction entre particules neutres, la pression de dégénérescence électronique, la pression de Coulomb¹ et la pression de radiation. L'annexe A présente la correction pour permettre l'ionisation par pression, la détermination des quantités thermodynamiques et une illustration des résultats dans l'espace P - ρ .

2.2 Opacités

À partir des populations déterminées précédemment, l'opacité totale est calculée à partir des opacités individuelles identifiées dans le Tableau 2.2. Pour les transitions liés-liés et liés-libres de l'hydrogène et de l'hélium, nous utilisons le formalisme de HM88. La probabilité de transition entre des niveaux liés m et n est multipliée par $B_{i,m,n} = (w_{i,n}/w_{i,m})$ pour tenir compte de la probabilité que les niveaux en question ne soient plus liés². Si le niveau supérieur est dissocié, on peut considérer que ce sera une transition du type lié-libre, dont l'amplitude sera $D_{i,m,n^*} = 1 - (w_{i,n^*}/w_{i,m})$. Le coefficient w_{i,n^*} correspond à la probabilité d'occupation d'un niveau fictif n^* ayant l'énergie du photon.

¹Nous utilisons les relations standards pour un gaz neutre et un gaz complètement dégénéré avec une interpolation entre les deux régimes. Nous négligeons la pression reliée aux interactions des particules chargées (éq. 2.2).

²On néglige le facteur $B_{i,n,m}$ pour les niveaux de vibrations du H_2 dans l'opacité du CIA. Ce facteur vaut moins de 10% dans le proche infrarouge puisque la différence de rayon entre les niveaux concernés (Saumon 1990) est faible.

TABLEAU 2.2 – Types d'opacités

Opacité	Populations	Section efficace
H I lié-lié	$n_{i,m}(\text{H I})B_{i,n,m}$	Lemke (1997)
H I lié-libre	$n_{i,m}(\text{H I})D_{i,n^*,m}$	Mihalas (1978)
H I libre-libre	$n_e n(\text{H II})$	Mihalas (1978)
H ₂ libre-libre	$n_e n(\text{H}_2^+)$	on suppose celle de H I
H ₃ libre-libre	$n_e n(\text{H}_3^+)$	on suppose celle de H I
H ⁻ lié-libre	$n(\text{H}^-)$	John (1988)
H ⁻ libre-libre	$n_e n(\text{H I})$	John (1988)
H ₂ ⁺ libre-libre	$n(\text{H I})n(\text{H II})$	Kurucz (1970)
H ₂ ⁺ lié-libre	$n(\text{H})_2^+$	Kurucz (1970)
H ₂ ⁻ libre-libre	$n_e n(\text{H}_2)$	Bell (1980)
H quasi-moléculaire	$n(\text{H I})$	Allard et al. (1994)
He I lié-lié	$n_{i,m}(\text{He I})B_{i,n,m}$	Beauchamp (1995)
He II lié-lié	$n_{i,m}(\text{He II})B_{i,n,m}$	Beauchamp (1995)
He I lié-libre	$n_{i,m}(\text{He I})D_{i,n^*,m}$	Mihalas (1978)
He II lié-libre	$n_{i,m}(\text{He II})D_{i,n^*,m}$	Mihalas (1978)
He I libre-libre	$n_e n(\text{He II})$	Mihalas (1978)
He II libre-libre	$n_e n(\text{He III})$	Mihalas (1978)
He ⁻ libre-libre	$n_e n(\text{He})$	John (1968) John (1994)
He ₂ ⁺ lié-libre	$n(\text{He}_2^+)$	Stancil (1994)
He ₂ ⁺ libre-libre	$n(\text{He I})n(\text{He II})$	Stancil (1994)
CIA H-H ₂	$n(\text{H I})n(\text{H}_2)(1+2 \times 10^{23} n(\text{H}_2))$	Gustafsson & Frommhold (2003)
CIA H ₂ -H ₂	$n(\text{H}_2)^2(1+1.7056 \times 10^{23} n(\text{H}_2))$	Borysow et al. (2001) ^a
CIA He-H ₂	$n(\text{He I})n(\text{H}_2)(1+1.8608 \times 10^{23} n(\text{He I}))$	Jørgensen et al. (2000) ^a
CIA He-H	$n(\text{He I})n(\text{H I})(1+2 \times 10^{23} n(\text{He I}))$	Gustafsson & Frommhold (2001)
Rayleigh H I	$n(\text{H I})$	Kissel (2000)
Rayleigh H ₂	$n(\text{H}_2)$	Dalgarno & Williams (1962)
Rayleigh He I	$n(\text{He I})$	Kissel (2000)
Rayleigh He II	$n(\text{He II})$	Kissel (2000)
Thompson e	n_e	Mihalas (1978)

^a voir (Lenzuni & Saumon 1992) (et références ci-incluses) quant aux corrections pour les collisions à trois corps. Les coefficients pour H-H₂ et He-H₂ sont une supposition.

Nous négligeons les opacités suivantes qui ne sont jamais importantes pour des naines blanches : H₂ lié-lié, H₃⁺ lié-lié et HeH⁺ lié-lié.

2.3 Présentation de la grille

Le calcul de l'opacité de Rosseland et la résolution numérique des équations de la structure atmosphérique sont tels que décrits dans Bergeron et al. (1995, et références ci-incluses). Une différence importante se situe au niveau du calcul d'atmosphères complètement radiatives où, pour permettre la convergence, on solutionne une version mixte de l'équation d'équilibre radiatif et de l'équation de conservation du flux.

Pour les naines blanches chaudes, les effets hors-ETL deviennent importants et pour en tenir compte dans les prochains chapitres, nous utilisons la grille de DA hors-ETL telle que décrite dans Liebert et al. (2005). En bref, cette grille utilise nos modèles ETL à basses

températures effectives où les effets hors-ETL sont négligeables et effectue un branchement avec des modèles hors-ETL quand l'atmosphère devient complètement radiative en s'assurant qu'au point de jonction les spectres des deux grilles soient en accord ($T_{\text{eff}} = 20,000$ K). La figure 2.1 illustre une partie de notre grille ETL pour des modèles d'atmosphères d'hydrogène et d'hélium.

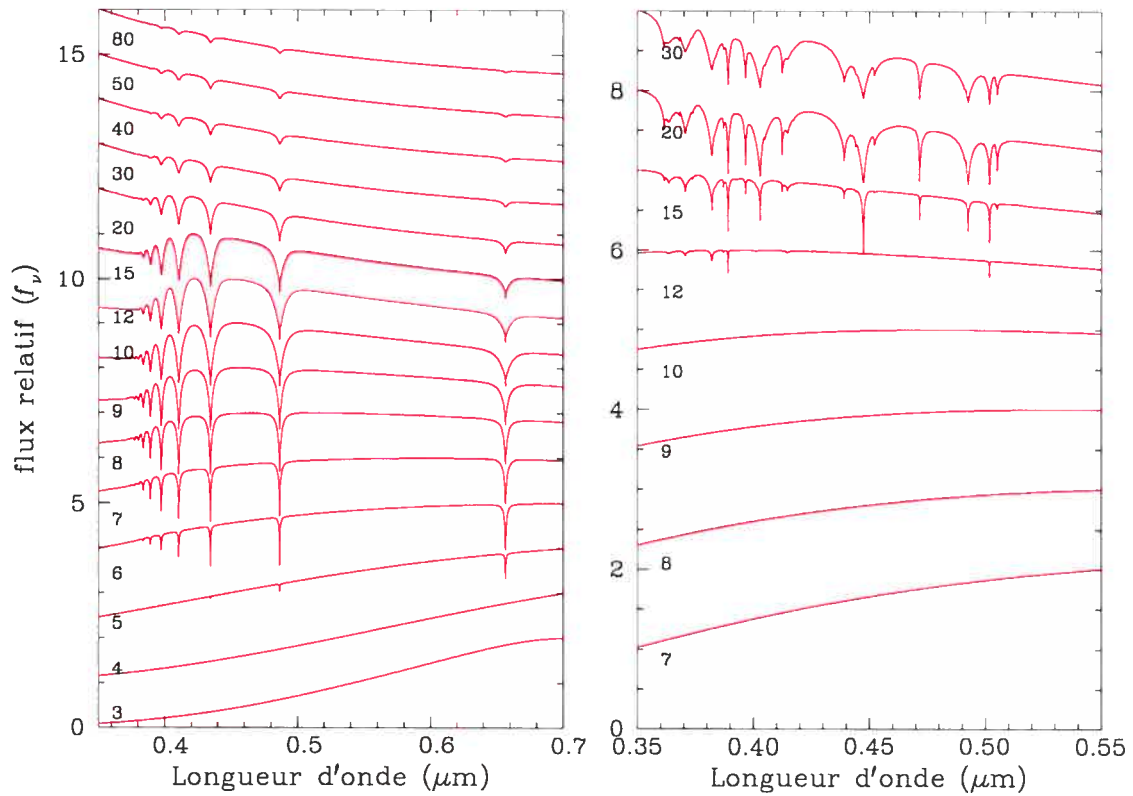


FIGURE 2.1 – *Gauche* : Illustration de notre grille de spectres théoriques hors-ETL pour une composition d'hydrogène. Les températures effectives sont identifiées sur la figure en unités de 10^3 K. L'unité de flux est arbitraire et les spectres sont décalés d'une unité. *Droit* : Même figure mais pour notre grille de spectres avec une composition d'hélium.

Chapitre 3

INFRARED PHOTOMETRIC ANALYSIS OF WHITE DWARFS FROM THE TWO MICRON ALL SKY SURVEY AND THE SPITZER SPACE TELESCOPE

P.-E. Tremblay¹ and P. Bergeron¹

Accepted for publication in the *The Astrophysical Journal*,

November 2006

¹Département de Physique, Université de Montréal, C.P. 6128, Succ. Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada H3C 3J7; tremblay@astro.umontreal.ca, bergeron@astro.umontreal.ca

3.1 ABSTRACT

We review the available near- and mid-infrared photometry for white dwarfs obtained from the Two Micron All-Sky Survey (2MASS) and by the *Spitzer Space Telescope*. Both data sets have recently been used to seek white dwarfs with infrared excesses due to the presence of unresolved companions or circumstellar disks, and also to derive the atmospheric parameters of cool white dwarfs. We first attempt to evaluate the reliability of the 2MASS photometry by comparing it with an independent set of published *JHK* CIT magnitudes for 160 cool white dwarf stars, and also by comparing the data with the predictions of detailed model atmosphere calculations. The possibility of using 2MASS to identify unresolved M dwarf companions or circumstellar disks is then discussed. We also revisit the analysis of 46 binary candidates from Wachter et al. using the synthetic flux method and confirm the large near-infrared excesses in most objects. We perform a similar analysis by fitting *Spitzer* 4.5 and 8 μm photometric observations of white dwarfs with our grid of model atmospheres, and demonstrate the reliability of both the *Spitzer* data and the theoretical calculations up to 8 μm . Finally, we search for massive disks resulting from the merger of two white dwarfs in a 2MASS sample composed of 57 massive degenerates, and show that massive disks are uncommon in such stars.

3.2 INTRODUCTION

With the recent All-Sky Data Release of the Two Micron All-Sky Survey² (2MASS), we are now able to retrieve near-infrared (NIR) *J*, *H*, and *K_S* magnitudes for more than a thousand white dwarfs that fall within the 2MASS detection limit. This database was used in several studies aimed at identifying new cool white dwarfs (e.g., de La Fuente Marcos et al. 2005) or circumstellar disks (Kilic et al. 2006a) and seeking binary candidates (Wachter et al. 2003; Holberg & Magargal 2005; Debes et al. 2005). In the latter case, one of the main interests are the binary systems containing a main sequence star and a white dwarf. These systems might reveal important details about stellar populations and evolution. Different techniques

²See <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/>

have been used to seek these binary candidates. Until recently, most systematic searches were based on surveys of resolved common proper-motion binaries (Silvestri et al. 2002), but new interest has emerged for identifying unresolved binaries. One of the reasons is that accretion from a previously unknown close companion could account for the high metal abundances observed in some white dwarfs. The preferred method for seeking unresolved binary candidates is to perform a photometric analysis. In the case where the companion is an M dwarf, the white dwarf star usually dominates the observed flux in the optical regions. Therefore, it is natural to look for an excess in the NIR, either photometrically or spectroscopically, where the contribution from the M dwarf becomes dominant (see Dobbie et al. 2005, for a review).

Exploiting the 2MASS photometric data, different methods of analysis were used to identify NIR excesses. Wachter et al. (2003) used the second incremental 2MASS data release, which covers about 50% of the sky. The authors took the approach of a $(J - H, H - K_S)$ two-color diagram for 795 white dwarfs recovered from the 2MASS survey. They identified 95 binary candidates, including 47 objects with prior evidence of binarity. They also suggested 15 additional tentative binary candidates. Wellhouse et al. (2005) used a similar two-color diagram approach with a sample of 51 magnetic white dwarfs as candidates for potential pre-cataclysmic variables. While they did not find any binary candidates, they identified 10 objects with peculiar colors associated with very low mass companions or debris. Holberg & Magargal (2005) used the final 2MASS All-Sky Data Release to study the 347 DA stars from the Palomar-Green Survey (Liebert et al. 2005). Their technique relies on the spectroscopic determinations of effective temperature and surface gravity, which combined with the observed V magnitude, can be used to compare magnitudes predicted at J , H , and K_S with those available in the 2MASS Point-Source Catalog (PSC). The same technique had been used before by Zuckerman & Becklin (1992) and Green et al. (2000) but with independent NIR photometric data sets. The disadvantage of this technique is that reliable atmospheric parameters and V magnitudes must be available for each star.

As the low-mass main-sequence companion gets cooler — typical of late-type M or L dwarfs — only a mild NIR excess is observed. The NIR excesses expected from circumstellar dust disks and planets around white dwarfs could be even less significant. Zuckerman & Becklin

(1987) were the first to identify such a system for the $0.7 M_{\odot}$ DAZ star G29-38 (2326+049), also a ZZ Ceti pulsator. More recently, Kilic et al. (2005) and Becklin et al. (2005) went through a detailed analysis of GD 362 (1729+371), a massive DAZ star with unusually high metal abundances, some nearly solar (Gianninas et al. 2004). For both objects, there was a small but significant excess in the NIR that could be detected in the K band. However, it is from the large mid-infrared (MIR) excess (Reach et al. 2005; Becklin et al. 2005) that the disks could be confirmed. NIR spectroscopic observations and 2MASS data have also been used by Kilic et al. (2006a) to identify a third DAZ white dwarf, GD 56, that could harbor a circumstellar disk, although this object has yet to be observed in the MIR. Chary et al. (1999) and Kilic et al. (2005, 2006a) analyzed a dozen other DA and DAZ stars and found no evidence for similar circumstellar disks. Jura (2003) discussed possible scenarios and concluded that not all white dwarfs with heavy elements in their atmospheres possess a dust disk similar to that of G29-38. The current picture is that as much as 14% of the DAZ stars host a circumstellar disk (Kilic et al. 2006a).

According to Livio et al. (2005), disks and planets could also result from the merger of two white dwarfs. Hence, the high-mass tail of the white dwarf mass distribution (see, e.g., Liebert et al. 2005) would represent the most promising candidates to search for such disks or planets. Livio et al. suggest that a typical dust disk would have a mass and radius of $M_d \sim 0.007 M_{\odot}$ and $R_d \sim 1$ AU, respectively. This is much larger and massive than the disk proposed for G29-38 (Jura 2003). Therefore, the predicted flux excess should be easily detected in the NIR (assuming a standard composition and geometry) and the 2MASS survey should provide a useful tool to further constrain the proposed model.

In addition to the 2MASS NIR photometry, there is a developing interest to observe white dwarfs at longer wavelengths in the MIR. The *Spitzer Space Telescope* IRAC³ photometry and IRS infrared spectroscopy have been used in recent surveys of relatively bright, nearby white dwarfs to better constrain the atmospheric parameters of cool white dwarfs (Kilic et al. 2006b) and to seek MIR excesses from disks (Reach et al. 2005; Hansen et al. 2006). Since the contribution of a cold disk becomes dominant only in the MIR, the *Spitzer* data set is more

³See <http://ssc.spitzer.caltech.edu/irac/>

sensitive to search for disks than the NIR 2MASS data set.

Before undertaking a more systematic search of white dwarf stars in binaries or of circumstellar disk systems using 2MASS or *Spitzer* data, it seems appropriate as a first step to evaluate properly the reliability of the infrared photometric data sets and the ability of current model atmospheres to reproduce the observations. We thus present in § 3.3 a comparison of 2MASS photometry with published *JHK* magnitudes on the CIT photometric system for 160 cool white dwarfs, and assess the limitations of the 2MASS survey. We then evaluate in § 3.4 the usefulness of the 2MASS photometric data for identifying binary candidates using various techniques, and discuss the implications of our results on several studies published in the literature. In § 3.5, we perform a similar analysis but using the *Spitzer* IRAC 4.5 and 8 μm photometry presented in Kilic et al. (2006b). Finally in § 3.6, we analyze a sample of 57 white dwarfs with spectroscopic masses above $0.8 M_{\odot}$ together with 2MASS photometry to search for disks around massive white dwarfs, such as those predicted by Livio et al. (2005). Our conclusions follow in § 3.7.

3.3 COMPARISON OF CIT AND 2MASS PHOTOMETRY

Our photometric sample used to compare against the 2MASS data is drawn from the detailed photometric and spectroscopic analyses of Bergeron et al. (1997, hereafter BRL97), Leggett et al. (1998), and Bergeron et al. (2001, hereafter BLR01) who obtained improved atmospheric parameters of cool white dwarfs from a comparison of optical *BVRI* and infrared *JHK* photometry with the predictions of model atmospheres appropriate for these stars. We selected from these studies 183 cool white dwarfs with infrared *JHK* magnitudes measured on the CIT photometric system (with the exception of 0704–508 that has no *K* measurement). This sample covers a range of effective temperatures between $T_{\text{eff}} \sim 4000$ K and 13,000 K, and all objects have been successfully fitted by BRL97 and BLR01 under the assumption of single stars (or double degenerates) with no evidence for any infrared excess that could be due to the presence of an unresolved low-mass main sequence star.

We searched the 2MASS PSC for all white dwarfs in our sample using the GATOR batch file tool and a $20''$ search window centered on a set of improved coordinates measured by

J. B. Holberg (2005, private communication). In most instances, multiple sources were found within the search window and we unambiguously identified each object by comparing the 2MASS atlas with the finding charts available from the online version of the Villanova White Dwarf Catalog⁴. We recovered the 2MASS J , H , and K_S magnitudes for 160 stars from our initial CIT photometric sample of 183 objects. The remaining 23 objects were dropped from our analysis for the following reasons: 9 were too faint for the 2MASS survey, 11 were not properly resolved due to the presence of a nearby star, and 3 could not be unambiguously identified from the comparison of the 2MASS atlas and the published finding charts. Our final sample of 160 cool white dwarfs is presented in Table 1 where we provide the CIT and 2MASS magnitudes for each object. The uncertainties of the CIT magnitudes are 5% except where noted in Table 1, and the 2MASS photometric uncertainties are given in parentheses (magnitudes with null uncertainties represent lower limits).

Since the two data sets rely on completely different photometric systems, we must keep in mind that there could be a possible offset between both systems. For instance, Carpenter (2001) have obtained an empirical color transformation (see their eqs. 12 to 15) based on a comparison of CIT and 2MASS photometry for 41 stars. However, since this transformation has been obtained in a broad general context and not specifically for cool white dwarfs, we first compare directly both photometric data sets without any transformation, and discuss the possible offsets in the present context.

Figure 3.1 shows the differences in magnitudes between the infrared CIT and 2MASS photometric systems for the J , H , and K/K_S filters for the white dwarfs from Table 1. Note that the number of stars in each panel is different (159 in J , 157 in H , and 143 in K_S) since some stars have not been formally detected in one or more bands, and only lower limits are available. The size of the error bars in Figure 3.1 correspond to the combined quadratic uncertainties of both data sets, $\sigma = (\sigma_{2MASS}^2 + \sigma_{CIT}^2)^{1/2}$. For both measurements to be compatible, the error bar must touch the horizontal dashed line in each panel of Figure 3.1, which represents the mean magnitude difference between both data sets, as determined below.

⁴<http://www.astronomy.villanova.edu/WDCatalog/index.html>

We present in Table 2 a statistical comparison of both data sets for all three bands. The first three lines correspond to the full data set while the last three lines are restricted to 2MASS magnitudes that satisfy the level 1 requirements. The second column indicates the number of stars used for the comparison (to be included, the 2MASS magnitude must have a measurement error). The third and fourth columns represent respectively the mean and the standard deviation of the magnitude differences for each band. These mean values thus correspond to the zero point offsets between both photometric systems, and we therefore adopt the following transformation based on the most accurate subsample (level 1): $J_{\text{CIT}} = J_{2\text{MASS}} - 0.0083$, $H_{\text{CIT}} = H_{2\text{MASS}} + 0.0094$ and $K_{\text{CIT}} = K_{S\ 2\text{MASS}} + 0.0133$. We note that the offsets are typically five times smaller than the average 2MASS uncertainties — given in the fifth column of Table 2, $\langle\sigma_{2\text{MASS}}\rangle$ — and these could as well be considered as zero for most practical purposes. We also note that since the effective wavelength of the 2MASS K_S filter (2.169 μm) is slightly shorter than that of the CIT K filter (2.216 μm), the observed flux should be larger at K_S than at K , and a larger *positive* offset is thus expected for this band, as is indeed observed in Table 2.

If the uncertainties of both data sets have been properly evaluated, the average combined quadratic uncertainties, $\langle\sigma\rangle$ (last column of Table 2), should be at least as large as the standard deviations of the magnitude differences (fourth column of Table 2). This is certainly the case for the level 1 subsample, a result that confirms the reliability of the 2MASS level 1 photometry. For the complete sample, however, the $\langle\sigma\rangle$ values are slightly below the standard deviations. If we assume that the CIT photometric uncertainties have been properly estimated, which is supported in BRL97 and BLR01 by the successful fits with white dwarf models, the 2MASS uncertainties might be slightly underestimated in the case of faint cool white dwarfs near the survey limit. Another way of interpreting these results is to note that in Figure 3.1, the magnitudes are not compatible within the 1σ combined uncertainties for 34.6%, 30.6%, and 35.0% of the stars in the complete sample at the J , H and K bands, respectively. These correspond to the objects whose error bars do not cross the horizontal dashed lines. This occurs for level 1 and fainter objects as well. At a 3σ level, these numbers drop to 0.6%, 1.9% and 4.2%, respectively, which suggest that there are infrequent but large discrepancies at K_S .

In Figure 3.2, we compare $(J - H, H - K/K_S)$ two-color diagrams for various data sets. In the upper panels, we compare the two-color diagrams for the 143 stars in common in both the CIT and the 2MASS samples that have been detected by 2MASS in all three bands. The 2MASS colors appear much more scattered than the CIT colors, and this simply reflects the larger uncertainties of the former data set. Indeed, if we restrict the sample to the 49 objects that satisfy the level 1 requirements, the scatter of the 2MASS diagram is greatly reduced, as shown in the bottom panels of Figure 3.2. For this restricted sample, both CIT and 2MASS data appear to have a similar scatter, which is a confirmation of the comparable mean uncertainties. Since the 2MASS photometry has been used to infer the presence of unresolved white dwarf and low mass main sequence binaries, one needs to be cautious when interpreting data sets that include objects below the level 1 requirements.

For instance, we indicated by open circles in Figures 3.1 and 3.2 ten objects whose optical $BVRI$ and infrared JHK photometry on the CIT system has been successfully fitted with single white dwarf models by BRL97 and BLR01. They cover a range in 2MASS J magnitudes from 13.5 to 17. Our best fits for these stars are displayed in Figure 3.3. The fitting technique used here is described at length in BRL97. Briefly, the magnitudes on the CIT system in Table 1 are first transformed onto the Johnson-Glass system using the transformation equations given by Leggett (1992). These magnitudes are then converted into observed fluxes using the method described by Holberg & Bergeron (2006) for photon counting devices but using the transmission functions taken from Bessell (1990) for the $BVRI$ filters on the Johnson-Cousins photometric system, and from Bessell & Brett (1988) for the JHK filters on the Johnson-Glass system. The resulting energy distributions are then compared with those predicted from our model atmosphere calculations, properly averaged over the same filter bandpasses. The hydrogen- and helium-rich model atmospheres used in our analysis are similar to those described in BLR01 and references therein, except that for the hydrogen-rich models we are now making use of the more recent H_2 - H_2 collision-induced opacity calculations of Borysow et al. (2001) and the Hummer-Mihalas occupation probability formalism for all species in the plasma. We find that the differences in the fitted parameters are small compared to those derived by BLR01, however.

The effective temperature T_{eff} , the solid angle $\pi(R/D)^2$ (with R the radius of the star and D its distance from Earth), and the atmospheric composition (H- or He-rich) are obtained through a χ^2 minimization technique, where the χ^2 value is taken as the sum over all bandpasses of the difference between observed and predicted fluxes, properly weighted by observational uncertainties. The trigonometric parallax measurement, when available, is used to constrain the surface gravity through the mass-radius relation for white dwarfs, otherwise a value of $\log g = 8.0$ is assumed. In Figure 3.3, the observed $BVRIJHK$ fluxes are shown as error bars together with the monochromatic model fluxes (for clarity, we do not show the average model fluxes at each bandpass). The derived atmospheric parameters are given in each panel. As can be seen, the energy distributions for all objects can be successfully reproduced by assuming a single star model.

Also reproduced in Figure 3.3 are the 2MASS magnitudes converted into fluxes using the 2MASS zero points of Holberg & Bergeron (2006). We note that for 9 of the 10 objects, at least one of the fluxes at J , H , or K_S is not compatible with the predicted fluxes *within the* 1σ 2MASS uncertainties. One exception is 0029–032, discussed later in § 3.4, for which the model spectrum matches the 2MASS photometry even better than the CIT photometry. We thus conclude this section by stating that while the 2MASS photometry is generally reliable, one should expect occasional discrepancies. In particular, the detailed fits (not shown here) to the energy distributions using the 2MASS photometry are of good quality for most stars in our sample.

3.4 WHITE DWARFS AND LOW MASS MAIN SEQUENCE BINARIES FROM 2MASS

3.4.1 The Wachter et al. Analysis

One of the most immediate applications to a large data set of white dwarf NIR photometry such as 2MASS is to seek infrared excesses due to cooler companions that are otherwise invisible in the optical. Wachter et al. (2003) used a sample of 759 white dwarfs from the catalog of McCook & Sion (1999) and identified as many as 95 binary candidates and 15

tentative binary candidates based on the analysis of a $(J - H, H - K_S)$ two-color diagram built from 2MASS photometry. They extracted JHK_S magnitudes from the 2MASS second incremental data release. Their binary candidates were selected from the color criterion $(J - H) > 0.4$, defined by the dashed horizontal lines in our Figure 3.2, while their 15 tentative binary candidates satisfy the criterion $0.2 < (H - K_S) < 0.5$ and $0.1 < (J - H) < 0.4$, defined by the dotted rectangles in Figure 3.2. In the following, we use the 2MASS final data release to recover more precise and slightly different observed JHK_S magnitudes than those reported by Wachter et al.

Using the same color criteria to study the 2MASS sample of presumably single cool white dwarfs presented in § 3.3, we find in the upper-right panel of Figure 3.2 several binary and tentative binary candidates in both regions defined by Wachter et al. (2003). A comparison with the CIT photometry, however, reveals that this result can be readily explained in terms of the larger uncertainties of the 2MASS photometry since both regions are located $1 - 2\sigma$ away from the region occupied by single white dwarfs near the center of the figure. We find that 3.5% and 8.4% of our sample observed by 2MASS contaminate the binary candidate and tentative binary candidate regions, respectively. By comparison, we find that at least 12.5% of the white dwarfs in the complete sample of 759 objects of Wachter et al. are located in the binary candidate region⁵. This indicates that the color criterion defined to identify companions is certainly appropriate, but also that the contamination from faint objects with large uncertainties near the 2MASS detection threshold may be significant. Furthermore, our large contamination of the tentative binary candidate region suggests that this criterion is not stringent enough, and that the corresponding subsample identified by Wachter et al. (2003, Table 2) is mostly composed of single white dwarfs.

These conclusions are supported by the fact that one of the objects selected in the list of binary candidates (0102+210B) and four objects in the list of tentative binary candidates (0029-032, 0518+333, 0816+387, and 1247+550)⁶ are all part of the single white dwarf sample described in § 3.3 and whose fits are displayed in Figure 3.3. As can be seen, the CIT pho-

⁵The actual percentage may be larger depending on how many faint objects with a partial detection are removed from the sample.

⁶We also found that the 2MASS identification of 0145-174 by Wachter et al. is erroneous; the actual star is much fainter and not recovered in the 2MASS PSC.

tometry for all objects is well reproduced with single star model atmospheres. For 0029–032, our fit is even better using the 2MASS photometry than the CIT data. For the other stars, the 2MASS energy distributions appear flatter than those inferred from the CIT photometry or the model spectra, a result that could be interpreted as a flux excess in the K band.

3.4.2 The Wellhouse et al. Analysis

Using a similar approach but with slightly different criteria, Wellhouse et al. (2005) sought companions to 51 magnetic white dwarfs as candidates for potential pre-cataclysmic variables. They proposed to split the $(J - H, H - K_S)$ two-color diagram into four regions delimiting (I) single white dwarfs, (II) main sequence binary candidates, (III) white dwarfs with very low mass companions, and (IV) objects that may be contaminated by circumstellar material. These representative regions are divided according to previous findings by Wachter et al. (2003) as well as theoretical color simulations. While they did not find any convincing binary candidates (region II), Wellhouse et al. identified six objects with a possible very low mass companion (region III) and four white dwarf candidates with an excess at K_S (region IV), which they interpreted as a signature of undetected planetary nebulae. This represents a total of 28.6% of their sample with formal uncertainties with a possible companion or a disk.

The four regions defined by Wellhouse et al. (2005) are reproduced here in the $(J - H, H - K_S)$ two-color diagram shown in Figure 3.4, together with our common sample of CIT and 2MASS data composed of presumably single white dwarfs. From this figure, we find that 21% of the white dwarfs in the 2MASS data set would be considered possible candidates for a companion or a disk, while the CIT data show little evidence for such infrared excesses. This strongly suggests that the sample of magnetic white dwarfs studied by Wellhouse et al. could be entirely consistent with single stars. In addition, we note that among the six objects located in region III of Figure 1 from Wellhouse et al. are some of the most intrinsically peculiar white dwarfs⁷: LHS 2229 (1008+290) has been reported by Schmidt et al. (1999) and it has the strongest C₂-like features ever observed, LP 790-29 (1036–204) is the strongest magnetic DQ known, and GD 229 (2010+310) shows strong unidentified absorption features in the optical

⁷Also, 2201–228 in that sample is probably not magnetic according to S. Jordan (2005, private communication).

(Wesemael et al. 1993, Fig. 19). Therefore, region III seems to be populated with some of the most peculiar white dwarfs for which there is no reason to expect their NIR colors to overlap with those of normal white dwarfs. Similarly, if we restrict our analysis to the more accurate CIT data, there are three white dwarfs located in region III of our Figure 3.4. Two of these identified in the figure are also peculiar: G240-72 (1748+708) shows a deep yellow sag in the 4400-6300 Å region (Wesemael et al. 1993, Fig. 19), and LP 701-29 (2251-070) is a heavily blanketed DZ star (Wesemael et al. 1993, Fig. 11).

We also note that all four objects in region IV of Wellhouse et al. (2005, Fig. 1) are very faint stars with 2MASS K_S uncertainties in the range 0.16-0.27. As seen in our Figure 3.4, we do expect single white dwarfs with large uncertainties to populate this particular region as well. Hence the location of the four objects identified by Wellhouse et al. in this particular region of the $(J - H, H - K_S)$ two-color diagram is most naturally explained in terms of the low quality of the 2MASS data for these objects rather than the presence of planetary nebulae. We thus conclude that the identification of NIR excesses in the 2MASS PSC database requires more conservative criteria allowing for larger uncertainties in the photometric measurements below the level 1 requirements, or more accurate methods such as that presented in the following section.

3.4.3 The Synthetic Flux Method

Another technique for identifying binary candidates is to compare observed 2MASS fluxes directly with those predicted from model atmospheres (see. e.g., Holberg & Magargal 2005; Holberg & Bergeron 2006). Effective temperatures and surface gravities are first obtained using the spectroscopic method developed by Bergeron et al. (1992) where high signal-to-noise spectroscopic observations of the hydrogen Balmer lines are fitted with synthetic models. The model flux is then normalized to the observed V magnitude to predict the observed fluxes at J , H , and K_S using the 2MASS filter passbands from Cohen et al. (2003) and the zero points from Holberg & Bergeron (2006). Thus, only objects with known atmospheric parameters and V magnitudes can be used with this method. In what follows, we rely on the fitting technique and NLTE model atmospheres for DA stars described in Liebert et al. (2005) and references

therein.

To illustrate the method, we selected all DA stars from Wachter et al. (2003) for which we had an optical spectrum and a published V magnitude. In Table 3, we present our sample that includes 42 binary candidates and 5 tentative binary candidates from Tables 1 and 2 of Wachter et al. (2003), respectively⁸. For each object, we give the atmospheric parameters (T_{eff} and $\log g$), the published V magnitude, and the predicted and observed 2MASS magnitudes at J , H , and K_S . In some cases, the optical spectrum was significantly contaminated by the unresolved companion, and the uncertainties on the derived parameters are correspondingly larger; these are indicated by colons in Table 3.

For most objects, a significant NIR excess is observed, with the 2MASS data being typically ~ 2 magnitudes brighter than the values predicted from the model fits. In Figure 3.5, we present typical results for ten objects selected from Table 3. Here we show the observed 2MASS fluxes together with the predicted monochromatic fluxes calculated at the atmospheric parameters given in each panel. For 0023+388, 0034–211, 0131–163, and 0145–257, the companion can be unambiguously detected since the 2MASS fluxes are about a factor of 10 to 100 larger than the predicted fluxes. For 0145–221, only a mild NIR excess is observed and this object has indeed been identified as a WD+dL6/7 by Farihi et al. (2005) and Dobbie et al. (2005). Two of the tentative binary candidates, 0710+741 and 2257+162, do indeed show a significant excess consistent with a very low mass companion. Farihi et al. (2005) have actually confirmed that 0710+741 is a WD+dM7. However, for 1434+289, 1639+153, and 2336–187, which are tentative binary candidates in Wachter et al. (2003), we do not observe any significant NIR excess and these objects are thus consistent with being single white dwarfs.

With the exception of these last three objects, the infrared excesses observed in Table 3 are consistent with unresolved low-mass main sequence M dwarfs physically associated with the white dwarfs (Farihi et al. 2006). Photometric observations of single M dwarfs by Leggett et al. (1996) show that the $(J - V)$ color index is in the range from ~ 2 to 4, while single cool white dwarfs are expected to be in the range from -1 to 1. This explains why the contribution

⁸Note that the 2MASS identification for 40 Eri B (0413+077) by Wachter et al. is erroneous. With two objects within $2''$, they picked what is probably the M dwarf 40 Eri C instead of 40 Eri B itself. Thus, while this is still technically a WD+dM binary, both objects are barely resolved in 2MASS and we do not include them in our sample.

of the M dwarf can be dominant in the NIR but negligible in the optical. Many of the 44 remaining binary candidates in Table 3 have been discussed in the literature. For instance, Farihi et al. (2005) and Farihi et al. (2006, with *HST*) observed 28 candidates from this list and were able to resolve the red dwarf companion(s) for 17 objects. The NIR excesses were also confirmed by Farihi et al. (2005); Farihi et al. (2006) using *JHK* photometric observations for the 11 remaining unresolved objects. The presence of a companion for 9 additional objects in Table 3 has been discussed at various degrees in the literature, while for the 7 remaining binary candidates (0812+478, 0915+201, 1037+512, 1108+325, 1339+346, 1610+383, and 2257+162), we confirm through the synthetic flux method a strong NIR excess consistent with the presence of low mass main-sequence companions.

We have seen that for a brown dwarf companion, the flux excess is not as important as for M dwarfs. In the case of the dL6/7 dwarf companion to 0145–221, the flux excess at K_S is still significant at the 12σ level, however, according to Table 3. There is only one known example of a companion with a possible later spectral type, the brown dwarf companion to 0137–349, discovered from radial velocity measurements by Maxted et al. (2006), who also report a small excess at K_S from 2MASS PSC data. Burleigh et al. (2006) also present a near-IR spectrum that confirms the slight K -band excess they attribute to a dL8 companion. We analyzed the 2MASS photometry of this object with the method described in this section, and assumed the effective temperature and surface gravity from Maxted et al. (2006). We were able to match very well the predicted and observed 2MASS J magnitude within the uncertainties, and also identified a flux excess at K_S at the 2.49σ level, which is barely significant, but still consistent with the presence of a disk or a companion. Therefore, the 2MASS survey is able to identify hot brown dwarf companions, but it becomes more difficult to confirm their presence for spectral types later than about dL7.

We end this section by asserting that methods based on comparisons of observed and predicted 2MASS fluxes (or magnitudes) represent an efficient way of identifying unresolved white dwarf and low-mass main sequence binaries down to late-type L dwarfs. Our analysis also reveals, however, that $(J - H, H - K_S)$ two-color diagrams based on 2MASS data should be interpreted with caution, and that regions expected to contain unresolved binaries may be

contaminated with single white dwarfs, especially when data below the level 1 requirements are considered.

3.5 INFRARED PHOTOMETRY FROM SPITZER

The *Spitzer Space Telescope* has been used to secure for the first time IRAC 4.5 and 8 μm photometric data for relatively bright, nearby white dwarfs (see, e.g., Hansen et al. 2006). One of the main interests of these surveys is to look for infrared flux excesses due to the presence of circumstellar disks since it is expected that the cool disk would dominate the MIR flux. It is however necessary as a first step to evaluate the reliability of the *Spitzer* data set and the ability of the model atmospheres to reproduce the MIR fluxes. In such an effort, Kilic et al. (2006b) compared the *Spitzer* 4.5 and 8 μm photometric data of 18 cool and bright white dwarfs with the predictions of model atmospheres. They found that the four hydrogen atmosphere white dwarfs with $T_{\text{eff}} \lesssim 6000$ K show a slight flux depression at 8 μm , while one peculiar object, the so-called C₂H star LHS 1126, suffers from a significant flux deficit at both 4.5 and 8 μm . For the warmer objects, the model fluxes seem to reproduce the *Spitzer* data perfectly.

In this section, we reanalyze 14 objects from the sample of Kilic et al. (2006b) for which optical *BVRI* photometry and infrared *JHK* photometry on the CIT system are available (all of these are already part of our cool white dwarf sample discussed in § 3.3). In an approach similar to that described in § 3.3 (see Fig. 3.3), we determine the atmospheric parameters for each star by fitting simultaneously the average fluxes for the nine photometric bands (*BVRI*, *JHK/CIT*, and *Spitzer* 4.5 and 8 μm). The synthetic fluxes in the MIR are obtained by integrating our model grid over the *Spitzer* IRAC spectral response curves while the observed fluxes are taken directly from Table 1 of Kilic et al. (2006b). In contrast with the technique used by Kilic et al., we do not normalize the fluxes at any particular band, but consider instead the solid angle $\pi(R/D)^2$ a free parameter. Since our χ^2 value is taken as the sum over all bands of the difference between observed and model fluxes, properly weighted by the corresponding observational errors, our approach has the advantage of allowing for the full photometric uncertainties in the fitting procedure. Furthermore, instead of assuming $\log g =$

8.0 for all objects, we constrain the $\log g$ value from the trigonometric parallax measurements, as described above.

In Figure 3.6, we present our best fits on a logarithmic scale to the observed *BVRI*, *JHK* (CIT), and *Spitzer* photometry with the model average fluxes described above. We also plot the monochromatic fluxes for clarity; the case of LHS 1126 is discussed separately below. Another peculiar object, G240-72 (1748+708) already discussed near the end of § 3.4.2, shows a deep unidentified absorption in the optical (a yellow sag) and no satisfactory fit can be achieved for this star and it is thus left out of our analysis. For Ross 627 (1121+216), the $8 \mu\text{m}$ flux is not shown in Figure 3.6 since Kilic et al. (2006b) provides only an upper limit due to a possible contamination from a nearby star. Our final sample thus includes 12 stars with 23 *Spitzer* 4.5 and $8 \mu\text{m}$ flux measurements. For all cases shown in Figure 3.6, the *Spitzer* fluxes are well reproduced by the synthetic models. To further strengthen this conclusion, we plot in Figure 3.7 the ratio of the observed to model fluxes at 4.5 and $8 \mu\text{m}$ as a function of the derived effective temperature for the 12 objects. The figure confirms the agreement between the observed *Spitzer* and model fluxes at all temperatures. In particular, we do not observe any significant flux deficit at low effective temperatures as suggested by Kilic et al. (2006b). There are only 2 observations out of 23 for which the flux deficit is significant at the 1σ level, and both are in the $8 \mu\text{m}$ band. It thus seems premature to conclude from these results that there is any discrepancy between the observations and the predictions of model atmospheres with pure hydrogen compositions.

We mention in this context that the second coolest object in Figure 3.7 is the DA star BPM 4729 (0752–676) for which we obtain a perfect fit. This star has been studied extensively by BLR01, and more recently by Kowalski & Saumon (2006) using improved $L\alpha$ profiles that include broadening by molecular hydrogen, and both atmospheric parameter determinations agree at the 1σ level under the assumption of pure hydrogen compositions. Hence for this well studied normal cool DA star, independent model atmospheres yield consistent atmospheric parameters that both match the observational data. In contrast, the two objects — LHS 1038 (0009+501) and G99-47 (0553+053) — with the small $8 \mu\text{m}$ flux discrepancies (bottom panel of Fig. 3.7) are magnetic white dwarfs. Both objects show 1σ discrepancies at *J* and also at *B*

for G99-47. While this suggests that the inclusion of a magnetic field in the model atmosphere calculations could improve the fit, we believe that the discrepancies observed here are only barely significant and not systematic enough to make formal conclusions. Therefore, we argue that the results presented in this section demonstrate the reliability of both the *Spitzer* IRAC photometry and our model atmosphere grid up to $8 \mu\text{m}$ for studying cool white dwarfs. The consistency between models and data is critical for surveys seeking MIR infrared excesses from circumstellar disks. Our results indicate that the comparison of *Spitzer* fluxes with theoretical predictions could identify such MIR excesses with relatively high precision.

In an attempt to identify the nature of the discrepancy between our conclusions and those reached by Kilic et al. (2006b), we have performed the same analysis as above but with the 2MASS JHK_s magnitudes used by Kilic et al. (instead of the CIT magnitudes used in this analysis). We have also tried to normalize our solutions at V , as done by Kilic et al. In all of our experiments, the results differ only slightly from those reported here, and our main conclusions thus remain the same. We are therefore unable to explain the differences between both studies. We can only emphasize that the analysis of *Spitzer* photometric data appears to be sensitive to the details of the fitting procedure.

Another white dwarf analyzed by Kilic et al. (2006b) is LHS 1126 (0038–226) whose energy distribution is characterized by a strong infrared flux deficiency at JHK interpreted by Bergeron et al. (1994) in terms of collision-induced absorption (CIA) by molecular hydrogen due to collisions with helium in a mixed hydrogen and helium atmosphere with $N(\text{H})/N(\text{He}) \sim 0.01$. We do confirm here the results shown in Figure 4 of Kilic et al. (2006b) where the *Spitzer* fluxes are significantly depressed with respect to the predictions of model atmospheres with mixed compositions. The main reason for this discrepancy is that the CIA opacity predicts a *maximum* absorption near the H_2 fundamental vibration frequency at $\sim 2.4 \mu\text{m}$, while the *Spitzer* fluxes are more consistent with a featureless energy distribution from 1 to $8 \mu\text{m}$. This problem is surprisingly similar to that encountered in the so-called ultra-cool white dwarfs, and in particular in the case of LHS 3250 for which the $\text{H}_2\text{-H}_2$ and $\text{H}_2\text{-He}$ CIA opacities predict absorption bands that are simply not observed in spectroscopy (Bergeron & Leggett 2002). These results may indicate that the collision-induced opacity calculations need to be

improved at the high densities encountered in cool white dwarf atmospheres.

3.6 CANDIDATE WHITE DWARFS WITH CIRCUMSTELLAR DISKS

The synthetic flux method based on a comparison of predicted and observed 2MASS fluxes (or magnitudes) was shown to be an efficient technique for detecting NIR excesses from unresolved companions (§ 3.4). However, the NIR excess in the JHK_S bands expected from cool circumstellar disks or planets surrounding white dwarf stars can be extremely small if the flux is dominated by the white dwarf in this particular wavelength range. In this section, we use the results of the ongoing spectroscopic survey of Gianninas et al. (2006) together with the 2MASS PSC to search for massive disks resulting from the merger of two white dwarfs, as predicted by Livio et al. (2005). In addition to the synthetic flux method described above, we also compare the observed and predicted $(J - H)$ and $(J - K_S)$ color indices since this method has the advantage of being independent of the normalization at V , which allows us to consider also objects with no published V magnitudes. Since circumstellar disks are expected to be much brighter at K_S than in the other bands, we expect their color indices to be very different from those of single white dwarfs, and such objects should easily stand out in our analysis.

As discussed in the Introduction, white dwarfs resulting from mergers are expected to be found in the high-mass tail of the mass distribution. We thus selected all DA stars from the survey of Gianninas et al. (2006) with spectroscopic masses above $0.8 M_{\odot}$ that were formally detected by 2MASS in at least two bands (usually the J and H bands), for a total of 57 objects. In Table 4, we provide the effective temperature, the spectroscopic mass, the V magnitude (when available), as well as the predicted and observed 2MASS JHK_S magnitudes for each object in our sample. The atmospheric parameters (T_{eff} and $\log g$) are obtained from fits to the Balmer lines using the NLTE model grid described in § 3.4, and the $\log g$ values are converted into mass using the evolutionary models of Wood (1995) with carbon-core compositions and thick hydrogen layers. The predicted fluxes are obtained from the synthetic flux method and

are thus only given for objects with measured V magnitudes.

Five white dwarfs in Table 4 (0429+176, 0950+139, 1058–129, 1120+439, and 1711+668) show a large NIR flux excess that is not attributable to a circumstellar disk. The predicted spectra for these stars are shown in Figure 3.8 together with the observed 2MASS fluxes. We discuss each object in turn.

HZ 9 (0429+176) – This object is a WD+dM binary (Lanning et al. 1981) in common with the sample discussed in § 3.4.

PG 0950+139 – This star is in common with the sample discussed in § 3.4. The white dwarf is surrounded by a planetary nebulae (Ellis et al. 1984) and its optical spectrum exhibits emission lines (Liebert et al. 1989). According to Fulbright et al. (1993), the low-density gas emission and the infrared excess are best explained by the presence of a low-mass companion.

PG 1058–129, *PG 1120+439* – These two objects show a mild and unexplained infrared excess. In both cases, the only V magnitudes available are multichannel data from the Palomar-Green survey (Green et al. 1986). Since the observed energy slopes measured by color indices are in perfect agreement with those predicted by the models (see below), it is very likely that the V magnitudes for these stars are simply erroneous. We note that Green et al. (2000) also determined a 1-sigma significant excess at J for PG 1120+439.

RE J1711+664 (1711+668) – This white dwarf is a barely resolved visual pair (Finley et al. 1997). The predicted NIR flux from this white dwarf is too low to be detected by 2MASS. Thus only the dM star $\sim 2''$ away from the white dwarf is detected in the PSC.

We exclude from our analysis the three objects with known companions, but we keep PG 1058–129 and PG 1120+439.

We compare in Figure 3.9 the observed and predicted ($J - H$) and ($H - K_S$) color indices as a function of H and K_S , respectively, for the remaining 54 white dwarfs in our sample. An examination of these results indicate that all stars are consistent with the predicted white dwarf colors within 3σ uncertainties, both above and below the level 1 requirements. Two glaring exceptions are G1-7 (0033+016) and CBS 413 (1554+322), which are among the faintest objects in the bottom panel of Figure 3.9 (labeled 1 and 2, respectively). For G1-7, however, the color indices derived from the CIT photometry given in Table 1 are in excellent

agreement with those predicted by the models. Also, CBS 413 has not been detected at H but it is unexpectedly bright at K_S ! Since this object has no published V magnitude, it is not clear whether the J detection is indeed from the white dwarf, and thus whether the color excess at K_S is even real. Therefore, we conclude from the results shown in Figure 3.9 that there is no strong evidence for H or K_S excesses in this sample of massive white dwarfs, and for the presence of massive circumstellar disks around them.

For comparison, we also reproduce in Figure 3.9 the location of three white dwarfs with previously identified circumstellar disks: G29-38 (2326+049), GD 362 (1729+371) and GD 56 (0408–041). The atmospheric parameters for all three stars have been determined using our own spectroscopic observations, and the predicted 2MASS color indices have been estimated from the same method as above. For the metal-rich DAZ star GD 362, we use the more accurate atmospheric parameters of Gianninas et al. (2004) who took into account the presence of heavy elements in their model atmosphere calculations. Only GD 362 in our sample is a massive white dwarf with $M = 1.24 M_{\odot}$, while we obtain $M = 0.70$ and $0.60 M_{\odot}$ for G29-38 and GD 56, respectively. The disk around G29-38 was the first discovered and studied extensively in the MIR (Reach et al. 2005). The object is clearly identifiable in Figure 3.9 with $(J - K_S)_{2\text{MASS}} - (J - K_S)_{\text{pred}} = 0.52 \pm 0.04$, a $\sim 12\sigma$ result. The second object, GD 362, is a massive DAZ star for which Becklin et al. (2005) reported the discovery of an important flux excess at L' ($3.76 \mu\text{m}$) and N' ($11.3 \mu\text{m}$). Kilic et al. (2005) obtained a near infrared spectrum in the $0.8 - 2.5 \mu\text{m}$ range but found only a mild flux excess at K . Both studies concluded that the presence of a dust disk could account for the observations. Given that GD 362 is particularly faint ($V = 16.3$), only lower limits at H and K_S are available in the 2MASS PSC. Instead, we use in Figure 3.9 the JHK_S magnitudes measured by Becklin et al. (2005). With these measurements, GD 362 exhibits a color excess of $(J - K_S)_{\text{obs}} - (J - K_S)_{\text{pred}} = 0.22 \pm 0.04$, a 5σ result. Unfortunately, this photometric accuracy is only achieved in the 2MASS sample for J brighter than ~ 14.1 , and a color excess of the magnitude found in GD 362 cannot be easily uncovered in the majority of white dwarfs detected by 2MASS. For GD 56, Kilic et al. (2006a) reported a NIR excess in both the 2MASS data and in their own infrared spectroscopic observations. Unlike the two previous objects, GD 56 lacks the MIR observations that could

confirm the presence of a disk. We recovered the 2MASS magnitudes from the PSC and determined a color excess of $(J - K_S)_{2\text{MASS}} - (J - K_S)_{\text{pred}} = 0.54 \pm 0.19$, a 2.9σ result, barely significant according to our 3σ criterion.

From the analysis of the three known white dwarfs with circumstellar disks, we conclude that the infrared excess from similar disks around white dwarfs would be significant only for bright level 1 2MASS objects. We argue that while the 2MASS PSC is indeed able to suggest the presence of a disk for fainter stars like GD 56, MIR photometric observations or more accurate NIR data would be required to unambiguously identify circumstellar disks such as those discussed here. Furthermore, according to Livio et al. (2005), a circumstellar disk resulting from the merger of two white dwarfs would presumably have a much larger mass and radius in comparison with the disks currently known. Hence the expected NIR excess should also be large. Obviously, such large infrared excesses have not been detected in our 2MASS sample, and we conclude that massive circumstellar disks are uncommon around massive white dwarfs, in agreement with the conclusions reached by Hansen et al. (2006) based on *Spitzer* data. While our results constrain the scenario proposed by Livio et al. (2005), the fraction of massive degenerates in our sample that are the product of white dwarf mergers is totally unknown. For instance, Dobbie et al. (2006) suggested that GD 50 (0346–011) is associated with the star formation event that created the Pleiades, and this massive white dwarf is most likely a former member of this cluster. Hence the authors find no need to invoke a double white dwarf merger scenario to account for its existence. Thus, massive circumstellar disks may not be expected in all cases studied here.

3.7 CONCLUSION

In order to estimate the reliability of the 2MASS photometry for white dwarf stars, we defined a sample of 160 cool degenerates with *JHK* magnitudes on the CIT photometric system taken from BRL97 and BLR01, and compared these values with those obtained from the 2MASS PSC. Our statistical analysis indicates that, on average, both data sets are consistent within the uncertainties, and thus that the 2MASS photometric data is appropriate for the study of white dwarf stars. The 2MASS data should still be interpreted with caution, howe-

ver, especially for stars near the detection threshold, as significant discrepancies are to be expected.

We also concluded that the search for white dwarf and main-sequence star binaries based on 2MASS two-color diagrams is greatly limited by the 2MASS uncertainties when data below the level 1 requirements are considered. We demonstrated that some color regions identified by Wachter et al. (2003) and Wellhouse et al. (2005) to search for binary candidates are highly contaminated by single stars. We analyzed 47 binary candidates taken from the sample of Wachter et al. (2003) using the synthetic flux method and showed that this technique is a much more efficient tool for confirming binary candidates. We have also shown that the observed MIR photometry from the *Spitzer Space Telescope* agree very well with our model fluxes, a result that confirms the reliability of both the *Spitzer* photometry and our model atmosphere calculations up to $8 \mu\text{m}$.

Finally, we searched for massive and large circumstellar disks, such as those predicted by Livio et al. (2005), around 57 massive white dwarfs ($M > 0.8 M_{\odot}$). We showed that these systems would be clearly distinguishable from single stars in the 2MASS PSC, but such systems have not yet been identified in our analysis. Hence, high-mass circumstellar disks resulting from the merger of two white dwarfs must be uncommon around massive white dwarfs. We also showed that low-mass circumstellar disks such as those associated with G29-38, GD 362 and GD 56 are only barely identifiable except perhaps for the brightest level 1 white dwarfs in the 2MASS PSC.

We would like to thank A. Gianninas for a careful reading of our manuscript and for sharing the results of his ongoing spectroscopic survey. This work was supported in part by the NSERC Canada. P. Bergeron is a Cottrell Scholar of Research Corporation. This publication makes use of data products from the Two Micron All Sky Survey, which is a joint project of the University of Massachusetts and the Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation. This work is based in part on observations made with the *Spitzer Space Telescope*, which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology under a contract with NASA.

3.8 REFERENCES

- Becklin, E. E., Farihi, J., Jura, M., Song, I., Weinberger, A. J., & Zuckerman, B. 2005, *ApJ*, 632, L119
- Bergeron, P., & Leggett S. K. 2002, *ApJ*, 580, 1070
- Bergeron, P., Leggett S. K., & Ruiz, M. T. 2001, *ApJS*, 133, 413 (BLR01)
- Bergeron, P., Ruiz, M. T., & Leggett S. K. 1997, *ApJS*, 108, 339 (BRL97)
- Bergeron, P., Ruiz, M. T., Leggett, S. K., Saumon, D., & Wesemael, F. 1994, *ApJ*, 423, 456
- Bergeron, P., Saffer, R. A., & Liebert, J. 1992, *ApJ*, 394, 228
- Bessell, M. S. 1990, *PASP*, 102, 1181
- Bessell, M. S., & Brett, J. M. 1988, *PASP*, 100, 1134
- Borysow, A., Jorgensen, U. G., & Fu, Y. 2001, *JQSRT*, 68, 235
- Burleigh, M. R., Hogan, E., Dobbie, P. D., Napiwotzki, R., & Maxted, P. F. L. 2006, *MNRAS*, 373, L55
- Carpenter J. M. 2001, *AJ*, 121, 2851
- Chary, R., Zuckerman, B., & Becklin, E. E. 1999, in *The Universe as Seen by ISO*, ed. P. Cox & M. F. Kessler (ESA SP-427; Noordwijk: ESA/ESTEC), p. 289
- Cohen, M., Wheaton, W. A., Megeath, S. T. 2003, *AJ*, 126, 1090
- de La Fuente Marcos, R., & de La Fuente Marcos, C. 2005, *New Astronomy*, 11, 59
- Debes, J. H., Sigurdsson, S., & Woodgate, B. E. 2005, *AJ*, 130, 1221
- Dobbie, P. D., Burleigh, M. R., Levan, A. J., Barstow, M. A., Napiwotzki, R., Holberg, J. B., Hubeny, I., & Howell, S. B. 2005, *MNRAS*, 357, 1049
- Dobbie, P. D., Napiwotzki, R., Lodieu, N., Burleigh, M. R., Barstow, M. A. & Jameson, R. F. 2006, *MNRAS*, 373, L45
- Ellis, G. L., Grayson, E. T., & Bond, H. E. 1984, *PASP*, 96, 283
- Farihi, J., Becklin, E. E., & Zuckerman, B. 2005, *ApJS*, 161, 394
- Farihi, J., Hoard, D. W., & Wachter, S. 2006, *ApJ*, 646, 480

- Finley, D. S., Koester, D., & Basri, G. 1997, *ApJ*, 488, 375
- Fulbright, M. S., & Liebert, J. 1993, *ApJ*, 410, 275
- Gianninas, A., Bergeron, P., & Fontaine, G. 2006, *AJ*, 132, 831
- Gianninas, A., Dufour, P., & Bergeron, P. 2004, *ApJ*, 617, L57
- Green, P. J., Ali, B., & Napiwotzki R. 2000, *ApJ*, 540, 992
- Green, R. F., Schmidt, M., & Liebert, J. 1986, *ApJS*, 61, 305
- Hansen, B. M. S., Kulkarni, S., & Wiktorowicz S. 2006, *AJ*, 131, 1106
- Holberg, J. B., & Bergeron, P. 2006, *AJ*, 132, 1223
- Holberg, J. B., & Margargal, K. 2005, 14th European Workshop on White Dwarfs, ASP Conference Series, Vol. 334, eds. D. Koester & S. Moehler (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), 419
- Jura, M. 2003, *ApJ*, 584, L91
- Kilic, M., von Hippel, T., Leggett, S. K., & Winget, D. E. 2005, *ApJ*, 632, L115
- Kilic, M., von Hippel, T., Leggett, S. K., & Winget, D. E. 2006a, *ApJ*, 646, 47
- Kilic, M., von Hippel, T., Mullally, F., Reach, W. T., Kuchner, M. J., Winget, D. E., & Burrows, A. 2006b, *ApJ*, 642, 1051
- Kowalski, P., & Saumon, D. 2006, *ApJ*, 651, L137
- Lanning H. H., & Pesch P. 1981, *ApJ*, 244, 280
- Leggett, S. K. 1992, *ApJS*, 82, 351
- Leggett, S. K., Allard, F., Berriman, G., Dahn, C. C., & Hauschildt, P. H. 1998, *ApJS*, 104, 117
- Leggett S. K., Ruiz, M. T., & Bergeron, P. 1998, *ApJ*, 497, 294
- Liebert, J., Bergeron, P., & Holberg, J. B. 2005, *ApJS*, 156, 47
- Liebert, J., Green, R., Bond, H. E., Holberg, J. B., Wesemael, F., Fleming, T. A., & Kidder, K. 1989, *ApJ*, 346, 251
- Livio, M., Pringle, J. E., & Wood, K. 2005, *ApJ*, 632, L37

- Maxted, P. F. L., Napiwotzki, R., Dobbie, P. D., & Burleigh, M. R. 2006, *Nature*, 442, 543
- McCook G. P., & Sion E. M. 1999, *ApJS*, 121, 1
- Reach, W. T., Kuchner, M. J., von Hippel, T., Burrows, A., Mullally, F., Kilic, M., & Winget, D. E. 2005, *ApJ*, 635, L161
- Schmidt, G. D., Liebert, J., Harris, H. C., Dahn, C. C., Leggett, S. K. 1999, *ApJ*, 512, 916
- Silvestri, N. M., Oswalt, T. D., & Hawley, S. L. 2002, *AJ*, 124, 1118
- Wachter, S., Hoard, D. W., Hansen, K. H., Wilcox, R. E., Taylor, H. M., & Finkelstein, S. L. 2003, *ApJ*, 586, 1356
- Wellhouse, J. W., Hoard, D. W., Howell, S., B., Wachter, S., & Esin, A. A. 2005, *PASP*, 117, 1378
- Wesemael, F., Greenstein, J. L., Liebert, J., Lamontagne, R., Fontaine, G., Bergeron, P., & Glaspey, J. W. 1993, *PASP*, 105, 761
- Wickramasinghe, D. T. & Ferrario, L. 2000, *PASP*, 112, 873
- Wood, M. A. 1995, in *Proceedings of the 9th European Workshop on White Dwarfs*, eds. D. Koester & K. Werner (Berlin: Springer), 41
- Zuckerman, B., & Becklin, E. E. 1992, *ApJ*, 386, 260
- Zuckerman, B., & Becklin, E. E. 1987, *Nature*, 330, 138

3.9 TABLES

TABLEAU 3.1 – Sample of Cool White Dwarfs with Near-Infrared Photometry

WD	Name	J_{CIT}	H_{CIT}	K_{CIT}	$J_{2\text{MASS}} (\sigma_J)$	$H_{2\text{MASS}} (\sigma_H)$	$K_{S2\text{MASS}} (\sigma_K)$
0000-345	LHS 1008	14.17	14.02	13.87	14.117 (0.024)	14.024 (0.038)	13.919 (0.063)
0007+308	LHS 1028	16.43	16.34	16.33	16.449 (0.128)	16.193 (0.224)	16.614 (null)
0009+501	LHS 1038	13.41	13.26	13.21	13.490 (0.022)	13.249 (0.026)	13.191 (0.030)
0011+000	G31-35	15.21	15.13	15.12	15.148 (0.039)	15.214 (0.094)	15.101 (0.139)
0011-134	LHS 1044	14.85	14.62	14.52	14.813 (0.036)	14.549 (0.057)	14.628 (0.082)
0029-032	LHS 1093	15.56	15.37	15.35	15.635 (0.050)	15.380 (0.091)	15.166 (0.147)
0033+016	G1-7	15.63	15.60	15.63	15.650 (0.057)	15.522 (0.090)	16.119 (0.303)
0038-226	LHS 1126	13.32	13.47	13.71	13.342 (0.028)	13.483 (0.033)	13.738 (0.044)
0038+555	G218-8	13.97:	14.08:	14.13:	14.066 (0.036)	13.981 (null)	13.967 (null)
0046+051	vMa 2	11.69	11.61	11.52	11.688 (0.022)	11.572 (0.024)	11.498 (0.025)
0048-207	LHS 1158	15.76	15.38	15.38	15.748 (0.060)	15.378 (0.090)	15.216 (0.125)
0101+048	G1-45	13.51	13.39	13.38	13.504 (0.024)	13.396 (0.032)	13.418 (0.034)
0102+210A	LHS 5023	16.56:	16.32:	16.21:	16.518 (0.097)	16.504 (0.198)	15.548 (null)
0102+210B	LHS 5024	16.45:	16.12:	16.00:	16.734 (0.110)	16.267 (0.164)	15.589 (0.188)
0112-018	LHS 1219	16.29	16.00	15.97	16.288 (0.089)	15.763 (0.136)	15.974 (0.261)
0115+159	LHS 1227	13.72	13.72	13.74	13.727 (0.025)	13.680 (0.022)	13.726 (0.044)
0117-145	LHS 1233	15.47	15.17	15.08	15.563 (0.056)	15.131 (0.079)	15.192 (0.161)
0121+401	G133-8	15.64	15.43	15.41	15.858 (0.078)	15.507 (0.151)	15.279 (0.170)
0123-262	LHS 1247	14.50	14.36	14.38	14.435 (0.029)	14.313 (0.044)	14.331 (0.072)
0126+101	G2-40	14.05	13.92	13.94	14.032 (0.024)	13.952 (0.038)	13.964 (0.053)
0135-052	L870-2	12.12	11.94	11.92	12.114 (0.024)	11.954 (0.022)	11.969 (0.023)
0142+312	G72-31	14.38	14.33	14.38	14.425 (0.029)	14.320 (0.048)	14.429 (0.065)
0208+396	G74-7	13.80	13.65	13.63	13.832 (0.024)	13.670 (0.034)	13.595 (0.038)
0222+648	LHS 1405	16.35	16.06	15.98	16.357 (0.100)	15.572 (0.125)	15.729 (0.212)
0230-144	LHS 1415	14.43	14.17	14.11	14.489 (0.030)	14.261 (0.048)	14.161 (0.068)
0243-026	LHS 1442	14.71	14.49	14.51	14.679 (0.035)	14.589 (0.044)	14.477 (0.091)
0245+541	LHS 1446	13.89	13.66	13.60	13.870 (0.024)	13.545 (0.040)	13.469 (0.039)
0322-019	G77-50	14.63	14.37	14.28	14.761 (0.042)	14.439 (0.052)	14.378 (0.084)
0326-273	L587-77A	13.27	13.12	13.08	13.216 (0.103)	13.109 (0.090)	13.101 (0.121)
0341+182	Wolf 219	14.56	14.35	14.40	14.590 (0.031)	14.350 (0.049)	14.230 (0.060)
0357+081	LHS 1617	14.59	14.33	14.26	14.562 (0.038)	14.343 (0.056)	14.122 (0.057)
0407+197	LHS 1636	16.26	16.03	15.82	16.130 (0.084)	15.957 (0.161)	15.178 (null)
0423+044	LHS 1670	15.50	15.29	15.26	15.474 (0.068)	15.182 (0.075)	15.168 (0.150)
0423+120	G83-10	14.52	14.34	14.27	14.485 (0.034)	14.347 (0.042)	14.249 (0.065)
0433+270	G39-27	14.61	14.32	14.22	14.598 (0.038)	14.232 (0.058)	14.136 (0.069)
0435-088	L879-14	13.00	12.85	12.79	13.006 (0.030)	12.906 (0.032)	12.763 (0.035)
0437+093	LHS 1693	16.03	15.80	15.81	15.944 (0.075)	15.583 (0.102)	15.583 (0.158)
0440+510	G175-46	15.60	15.50	15.53	15.576 (0.051)	15.504 (0.112)	15.548 (0.141)
0503-174	LHS 1734	14.55	14.33	14.23	14.739 (0.035)	14.408 (0.047)	14.397 (0.086)
0511+079	G84-41	15.01	14.79	14.71	15.107 (0.047)	14.924 (0.064)	14.863 (0.082)
0518+333	G86-B1B	15.52	15.33	15.34	15.374 (0.085)	15.122 (0.207)	14.806 (0.157)
0548-001	G99-37	13.73	13.63	13.63	13.730 (0.029)	13.675 (0.026)	13.705 (0.043)
0551+468	LHS 1801	15.84	15.55	15.53	15.712 (0.057)	15.461 (0.078)	15.511 (0.154)
0552-041	LP 658-2	13.02	12.90	12.82	13.047 (0.027)	12.860 (0.027)	12.777 (0.026)
0553+053	G99-47	12.96	12.77	12.66	12.930 (0.022)	12.720 (0.025)	12.653 (0.024)
0618+067	LHS 1838	15.29	15.05	15.00	15.377 (0.062)	15.017 (0.071)	14.957 (0.139)
0644+025	G108-26	15.00	14.85	14.93	14.868 (0.045)	14.757 (0.069)	14.576 (0.103)
0648+641	LP 58-53	15.46	15.19	15.12	15.533 (0.061)	15.412 (0.098)	15.331 (0.165)
0654+027	G108-42	15.98	15.98	15.98	16.086 (0.088)	15.824 (0.133)	15.399 (0.188)
0657+320	LHS 1889	14.99	14.77	14.69	15.030 (0.039)	14.674 (0.050)	14.665 (0.082)
0659-064	LHS 1892	14.58	14.29	14.24	14.538 (0.028)	14.218 (0.051)	14.355 (0.074)

Tableau 4.1 – Suite

WD	Name	J_{CIT}	H_{CIT}	K_{CIT}	$J_{2\text{MASS}} (\sigma_J)$	$H_{2\text{MASS}} (\sigma_H)$	$K_{S2\text{MASS}} (\sigma_K)$
0704–508	ESO 207-124	16.24::	16.11::	null	16.08 (0.062)	16.093 (0.131)	15.688 (0.196)
0706+377	G87-29	15.00	14.88	14.82	15.064 (0.053)	14.783 (0.052)	14.834 (0.079)
0738–172	L745-46A	12.65	12.61	12.52	12.653 (0.022)	12.611 (0.026)	12.583 (0.036)
0747+073A	LHS 240	14.96	14.73	14.72	14.996 (0.039)	14.719 (0.067)	14.634 (0.099)
0747+073B	LHS 239	15.05	14.90	14.86	15.031 (0.037)	14.898 (0.080)	14.746 (0.107)
0751+578	G193-78	14.94	14.94	14.96	14.966 (0.038)	14.965 (0.063)	14.966 (0.121)
0752–676	BPM 4729	12.79	12.52	12.43	12.726 (0.023)	12.476 (0.026)	12.362 (0.024)
0752+365	G90-28	15.50	15.35	15.35	15.583 (0.064)	15.444 (0.131)	15.877 (0.346)
0802+386	LP 257-28	15.60	15.58	15.64	15.376 (null)	15.663 (0.150)	15.046 (null)
0802+387	LHS 1980	15.26	15.02	14.96	15.336 (0.047)	15.193 (0.079)	14.899 (0.091)
0806–661	L97-3	13.79	13.85	13.92	13.704 (0.023)	13.739 (0.025)	13.781 (0.043)
0813+217	G40-15	16.03	15.74	15.65	15.944 (0.068)	15.842 (0.142)	15.958 (0.240)
0816+387	G111-71	15.87	15.72	15.73	16.070 (0.103)	15.833 (0.194)	15.583 (0.220)
0827+328	LHS 2022	15.01	14.85	14.84	14.985 (0.044)	14.964 (0.076)	14.865 (0.121)
0839–327	L532-81	11.59	11.55	11.55	11.578 (0.030)	11.539 (0.033)	11.547 (0.029)
0856+331	G47-18	15.12	15.09	15.11	15.172 (0.041)	15.156 (0.083)	15.312 (0.163)
0912+536	G195-19	13.22	13.15	13.09	13.308 (0.025)	13.211 (0.026)	13.133 (0.030)
0913+442	G116-16	14.96	14.84	14.87	14.955 (0.050)	14.861 (0.081)	14.906 (0.155)
0930+294	G117-25	15.51	15.40	15.45	15.588 (0.066)	15.399 (0.106)	15.284 (0.150)
0941–068	G161-68	15.35	15.06	15.08	15.373 (0.042)	15.019 (0.069)	14.990 (0.133)
0946+534	G195-42	14.90	14.87	14.88	14.913 (0.049)	14.888 (0.072)	14.916 (0.118)
0955+247	G49-33	14.66	14.59	14.65	14.654 (0.034)	14.659 (0.069)	14.661 (0.076)
1012+083	G43-38	15.20	14.99	14.94	15.246 (0.063)	15.132 (0.110)	14.955 (0.142)
1019+637	LP 62-147	13.83	13.63	13.65	13.874 (0.029)	13.733 (0.047)	13.692 (0.049)
1026+117	LHS 2273	15.93	15.83	15.68	15.902 (0.095)	15.552 (0.127)	15.298 (null)
1039+145	G44-32	15.93	15.86	15.78	15.823 (0.069)	15.749 (0.156)	15.681 (0.205)
1055–072	LHS 2333	13.81	13.71	13.69	13.770 (0.029)	13.680 (0.032)	13.485 (0.038)
1108+207	LHS 2364	15.91	15.69	15.62	15.978 (0.074)	15.532 (0.107)	15.565 (0.161)
1114+067	G45-45	15.82	15.57	15.54	15.701 (0.072)	15.599 (0.124)	15.518 (0.257)
1115–029	LHS 2392	15.23	15.27:	15.29:	15.304 (0.051)	15.246 (0.084)	15.734 (0.241)
1121+216	Ross 627	13.58	13.40	13.40	13.574 (0.024)	13.420 (0.026)	13.399 (0.034)
1124–296	ESO 439-80	14.90	14.88	14.80	14.782 (0.034)	14.710 (0.044)	14.602 (0.091)
1142–645	LHS 43	11.19	11.12	11.09	11.188 (0.024)	11.130 (0.025)	11.104 (0.026)
1146–291	ESO 440-146	16.17	15.89:	15.71:	16.037 (0.092)	15.737 (0.172)	16.462 (null)
1147+255	LP 375-51	15.53	15.49	15.51	15.590 (0.048)	15.568 (0.101)	15.693 (0.183)
1153+135	LHS 2478	16.10	15.83	15.74:	15.889 (0.062)	15.503 (0.095)	15.575 (0.149)
1154+186	LP 434-97	15.15	15.03	15.02	15.098 (0.042)	15.220 (0.099)	15.087 (0.145)
1208+576	LHS 2522	14.64	14.39	14.32	14.679 (0.034)	14.362 (0.052)	14.458 (0.095)
1236–495	LTT 4816	13.92	13.90	13.98	13.806 (0.024)	13.815 (0.036)	13.907 (0.062)
1239+454	LHS 2596	15.47	15.30	15.30	15.599 (0.062)	15.197 (0.101)	15.727 (null)
1244+149	G61-17	15.84	15.86	15.84	15.802 (0.067)	15.627 (0.136)	15.721 (0.217)
1247+550	LP 131-66	15.72	15.67	15.63	15.795 (0.067)	15.659 (0.131)	15.396 (0.212)
1257+037	LHS 2661	14.56	14.33	14.25	14.655 (0.040)	14.316 (0.050)	14.220 (0.089)
1257+278	G149-28	14.99	14.91	14.91:	15.132 (0.046)	14.977 (0.076)	14.986 (0.089)
1300+263	LHS 2673	16.89	16.71	16.70	16.801 (0.142)	16.399 (0.214)	16.436 (null)
1310–472	ER 8	15.21	15.11	15.03	15.135 (0.045)	15.045 (0.080)	14.735 (0.123)
1313–198	LHS 2710	15.87	15.70	15.56	15.875 (0.082)	15.612 (0.097)	15.550 (0.190)
1325+581	G199-71	15.82	15.68	15.65	15.945 (0.092)	15.700 (0.147)	15.716 (0.251)
1328+307	G165-7	15.50	15.36	15.34	15.402 (0.044)	15.282 (0.087)	15.413 (0.135)
1330+015	G62-46	16.38	16.25	16.17:	16.396 (0.119)	16.298 (0.206)	15.802 (null)
1334+039	Wolf 489	13.06	12.80	12.70	13.064 (0.024)	12.819 (0.026)	12.690 (0.021)
1344+106	LHS 2800	14.38	14.20	14.19	14.407 (0.038)	14.139 (0.053)	14.235 (0.080)
1345+238	LP 380-5	13.92	13.67	13.59	13.921 (0.027)	13.669 (0.036)	13.621 (0.040)
1346+121	LHS 2808	16.52	16.43	16.32	16.463 (0.118)	16.193 (0.242)	15.810 (null)
1418–088	G124-26	14.81	14.69	14.69	14.764 (0.037)	14.731 (0.057)	14.756 (0.103)

Tableau 4.1 – Suite

WD	Name	J_{CIT}	H_{CIT}	K_{CIT}	$J_{2\text{MASS}} (\sigma_J)$	$H_{2\text{MASS}} (\sigma_H)$	$K_{S2\text{MASS}} (\sigma_K)$
1444-174	LHS 378	14.94	14.79	14.68	14.948 (0.029)	14.640 (0.047)	14.724 (0.108)
1455+298	LHS 3007	14.86	14.73	14.72	14.972 (0.047)	14.606 (0.075)	14.739 (0.128)
1503-070	GD 175	15.07	14.93	14.91	15.079 (0.052)	14.988 (0.100)	14.847 (0.104)
1602+010	LHS 3151	16.08	15.86	15.67	16.078 (0.081)	15.969 (0.173)	15.526 (0.176)
1606+422	Case 2	13.92	13.92	14.01	13.984 (0.025)	14.026 (0.042)	14.050 (0.073)
1609+135	LHS 3163	14.77	14.76	14.75	14.861 (0.036)	14.779 (0.056)	14.857 (0.109)
1625+093	G138-31	15.34	15.12	15.06	15.250 (0.062)	15.187 (0.103)	15.036 (0.142)
1626+368	Ross 640	13.58	13.57	13.58	13.637 (0.024)	13.652 (0.034)	13.575 (0.042)
1633+433	G180-63	13.95	13.76	13.73	13.991 (0.029)	13.773 (0.035)	13.607 (0.043)
1635+137	G138-47	16.11	15.96	15.98:	15.929 (0.076)	15.673 (0.144)	15.727 (0.211)
1637+335	G180-65	14.56	14.50	14.54	14.551 (0.031)	14.467 (0.045)	14.424 (0.081)
1639+537	GD 356	14.54	14.46	14.42	14.493 (0.027)	14.479 (0.048)	14.369 (0.085)
1655+215	LHS 3254	13.89	13.80	13.85	13.886 (0.026)	13.816 (0.030)	13.863 (0.050)
1705+030	G139-13	14.62	14.50	14.48	14.565 (0.032)	14.499 (0.032)	14.511 (0.078)
1716+020	G19-20	14.68	14.65	14.71:	14.603 (0.056)	14.534 (0.070)	14.562 (0.109)
1733-544	L270-137	14.89	14.55	14.46	14.802 (0.044)	14.677 (0.084)	14.693 (0.105)
1736+052	G140-2	15.62	15.56	15.49	15.682 (0.067)	15.573 (0.122)	15.351 (0.175)
1748+708	G240-72	12.77	12.70	12.50	12.709 (0.021)	12.528 (0.023)	12.507 (0.023)
1811+327A	G206-17	15.71	15.56	15.54	15.716 (0.057)	15.675 (0.126)	15.760 (0.201)
1811+327B	G206-18	16.08	15.94	15.82:	16.214 (0.091)	15.953 (0.172)	15.809 (0.213)
1818+126	G141-2	15.07	14.90	14.87	14.989 (0.040)	14.885 (0.069)	14.876 (0.108)
1820+609	G227-28	13.96	13.73	13.65	14.075 (0.032)	13.810 (0.030)	13.797 (0.052)
1824+040	G21-15	14.07	14.14	14.14	14.107 (0.032)	14.111 (0.045)	14.225 (0.084)
1829+547	G227-35	14.76	14.61	14.50	14.803 (0.045)	14.478 (0.053)	14.505 (0.078)
1831+197	G184-12	15.93	15.82	15.81	15.977 (0.095)	16.043 (0.184)	15.608 (0.198)
1840+042	GD 215	14.53:	14.46:	14.50:	14.443 (0.050)	14.374 (0.075)	14.651 (0.099)
1855+338	G207-9	14.74	14.72	14.77	14.737 (0.034)	14.769 (0.056)	14.799 (0.124)
1917+386	G125-3	13.77	13.69	13.59	13.776 (0.030)	13.669 (0.032)	13.519 (0.025)
1953-011	LHS 3501	13.12	13.02	13.02	13.070 (0.029)	13.029 (0.031)	13.014 (0.040)
2002-110	LHS 483	15.32	15.11	15.09	15.276 (0.055)	14.995 (0.072)	14.746 (0.105)
2011+065	G24-9	14.94	14.79	14.75	15.021 (0.049)	14.878 (null)	15.090 (null)
2048+263	G187-8	14.12	13.83	13.79	14.100 (0.056)	13.908 (0.068)	13.602 (null)
2054-050	vB 11	14.82	14.61	14.54	14.734 (0.081)	14.565 (0.134)	14.327 (0.136)
2059+190	G144-51	15.52	15.36	15.34	15.642 (0.070)	15.559 (0.141)	15.397 (0.159)
2059+247	G187-16	15.45	15.29	15.26	15.522 (0.057)	15.205 (0.082)	15.061 (0.143)
2059+316	G187-15	14.94	14.97	14.98	14.968 (0.053)	14.927 (0.068)	14.980 (0.115)
2105-820	L24-52	13.52	13.53	13.58	13.478 (0.026)	13.451 (0.033)	13.533 (0.039)
2107-216	LHS 3636	15.63	15.45:	15.40:	15.688 (0.055)	15.476 (0.106)	15.695 (0.214)
2111+261	G187-32	14.15	14.08	14.09	14.230 (0.036)	14.116 (0.041)	14.095 (0.057)
2136+229	G126-18	15.04	14.96	15.09	15.106 (0.060)	15.055 (0.087)	14.816 (0.116)
2140+207	LHS 3703	12.95	12.93	12.95	12.981 (0.021)	12.928 (0.035)	12.922 (0.029)
2207+142	G18-34	14.99	14.81	14.84	14.971 (0.040)	14.782 (0.086)	14.772 (0.098)
2246+223	G67-23	14.28	14.31	14.37	14.341 (0.029)	14.317 (0.047)	14.360 (0.090)
2248+293	G128-7	14.24	14.01	13.94	14.316 (0.029)	13.983 (0.038)	13.941 (0.044)
2251-070	LP 701-29	13.86	13.63	13.47	14.013 (0.026)	13.685 (0.036)	13.546 (0.053)
2253-081	G156-64	15.59	15.47	15.36:	15.629 (0.067)	15.279 (0.086)	15.195 (0.168)
2311-068	G157-34	14.98	14.93	14.90	14.951 (0.036)	14.942 (0.071)	14.730 (0.093)
2312-024	LHS 3917	15.70	15.53	15.58	15.488 (0.059)	15.754 (0.170)	14.862 (null)
2316-064	LHS 542	16.38	16.14	16.10	16.306 (0.092)	15.837 (0.139)	15.200 (null)
2323+157	GD 248	15.06	15.08	15.06	15.051 (0.043)	14.938 (0.072)	14.881 (0.138)
2329+267	G128-72	15.13	15.03	15.18	15.184 (0.041)	15.100 (0.087)	15.030 (0.111)
2345-447	ESO 292-43	16.66	16.59	16.33	16.517 (0.142)	16.360 (null)	16.332 (null)
2347+292	LHS 4019	14.59	14.35	14.24	14.571 (0.029)	14.345 (0.044)	14.159 (0.065)

Tableau 4.1 – Suite

WD	Name	J_{CIT}	H_{CIT}	K_{CIT}	$J_{2\text{MASS}} (\sigma_J)$	$H_{2\text{MASS}} (\sigma_H)$	$K_{S2\text{MASS}} (\sigma_K)$
2352+401	G171-27	14.57	14.52	14.50	14.576 (0.038)	14.453 (0.061)	14.508 (0.086)

Table 1 is available in its entirety in the electronic edition of the *Astrophysical Journal*. A portion is shown here for guidance regarding its form and content. CIT uncertainties are 5% except for the data marked “:” or “::”, which indicate 10% and 20% uncertainties, respectively. 2MASS magnitudes with null uncertainties are lower limits.

TABLEAU 3.2 – Statistical Comparison of CIT and 2MASS Magnitudes

Bandpass	No. of Stars	Mean	Standard Deviation	$\langle \sigma_{2\text{MASS}} \rangle$	$\langle \sigma \rangle^a$
$J_{\text{CIT}} - J_{2\text{MASS}}$	159	-0.0046	0.0805	0.0502	0.0745
$H_{\text{CIT}} - H_{2\text{MASS}}$	157	+0.0180	0.1126	0.0807	0.0997
$K_{\text{CIT}} - K_{S2\text{MASS}}$	143	+0.0247	0.1561	0.1096	0.1253
$J_{\text{CIT}} - J_{2\text{MASS}} (S/N > 10)$	130	-0.0083	0.0679	0.0409	0.0662
$H_{\text{CIT}} - H_{2\text{MASS}} (S/N > 10)$	97	+0.0094	0.0675	0.0502	0.0726
$K_{\text{CIT}} - K_{S2\text{MASS}} (S/N > 10)$	49	+0.0133	0.0692	0.0466	0.0697

^a Average value of σ where for a single star, $\sigma = (\sigma_{2\text{MASS}}^2 + \sigma_{\text{CIT}}^2)^{1/2}$.

TABLEAU 3.3 – Sample of White Dwarfs with Predicted NIR Photometry

WD	T_{eff} (K)	$\log g$	V	J_{pred}	H_{pred}	$K_{S \text{ pred}}$	$J_{2\text{MASS}} (\sigma_J)$	$H_{2\text{MASS}} (\sigma_H)$	$K_{S 2\text{MASS}} (\sigma_K)$
0023+388	10785	8.14	15.97	15.988	15.979	16.121	13.810 (0.026)	13.268 (0.030)	12.939 (0.033)
0034-211	17217:	8.04:	14.53	14.934	15.000	15.161	11.454 (0.023)	10.884 (0.021)	10.648 (0.026)
0131-163	49042	7.81	13.96	14.667	14.808	15.000	12.966 (0.027)	12.468 (0.028)	12.215 (0.030)
0145-257	25635	7.97	14.51	15.089	15.200	15.382	12.412 (0.026)	11.830 (0.021)	11.594 (0.023)
0145-221	11549	8.14	14.85	14.965	14.974	15.122	14.923 (0.032)	14.450 (0.045)	14.335 (0.064)
0205+133	58692	7.63	15.30	16.009	16.152	16.342	12.799 (0.022)	12.198 (0.024)	11.961 (0.020)
0303-007	18700	7.97	16.00	16.439	16.517	16.679	13.164 (0.024)	12.627 (0.027)	12.405 (0.026)
0347-137	12621	8.19	14.00	14.205	14.230	14.380	12.080 (0.029)	11.540 (0.029)	11.296 (0.023)
0353+284	31000:	7.90:	11.70	12.350	12.479	12.672	9.843 (0.023)	9.275 (0.024)	9.057 (0.017)
0429+176	13600	8.56	13.93	14.188	14.214	14.372	10.753 (0.021)	10.161 (0.019)	9.913 (0.017)
0430+136	35976	7.90	16.45	17.126	17.263	17.456	13.533 (0.021)	12.877 (0.023)	12.634 (0.026)
0628-020	6912	8.15	15.33	14.509	14.311	14.371	10.729 (0.027)	10.144 (0.026)	9.857 (0.024)
0710+741	10119	8.11	14.97	14.881	14.851	14.986	14.692 (0.033)	14.423 (0.061)	14.148 (0.065)
0812+478	60923	7.58	15.22	15.931	16.074	16.264	14.587 (0.032)	14.165 (0.041)	13.882 (0.047)
0915+201	69970	7.33	16.64	17.354	17.498	17.687	15.721 (0.058)	15.166 (0.078)	14.867 (0.080)
0950+139	94402	9.18	16.03	16.771	16.921	17.117	16.518 (0.097)	15.945 (0.157)	16.099 (0.258)
1001+203	21492	7.97	15.35	15.849	15.944	16.110	12.640 (0.021)	12.028 (0.021)	11.766 (0.020)
1013-050	60265	7.93	14.18	14.893	15.037	15.228	10.607 (0.027)	9.990 (0.025)	9.770 (0.023)
1026+002	17183	7.97	13.60	14.001	14.068	14.228	11.751 (0.024)	11.219 (0.027)	10.943 (0.021)
1037+512	20099	8.03	16.25	16.721	16.809	16.971	13.796 (0.024)	13.261 (0.026)	12.972 (0.026)
1108+325	62950	7.59	16.80	17.512	17.656	17.845	15.802 (0.072)	15.188 (0.079)	15.228 (0.179)
1123+189	51682	7.86	14.16	14.865	15.007	15.198	12.754 (0.023)	12.217 (0.019)	11.990 (0.020)
1210+464	27667	7.85	15.79	16.400	16.520	16.707	12.035 (0.023)	11.396 (0.021)	11.161 (0.020)
1218+497	35656	7.87	16.24	16.915	17.051	17.244	14.588 (0.038)	14.002 (0.036)	13.837 (0.060)
1224+309	28824	7.38	16.10	16.720	16.846	17.034	15.129 (0.048)	14.669 (0.068)	14.393 (0.077)
1339+346	15959	7.82	15.87	16.225	16.287	16.441	14.094 (0.027)	13.700 (0.031)	13.591 (0.036)
1434+289	32795	8.00	15.75	16.413	16.546	16.739	16.514 (0.119)	16.330 (0.203)	15.924 (0.293)
1435+370	15268	7.99	16.00	16.336	16.389	16.543	13.457 (0.024)	12.965 (0.025)	12.746 (0.028)
1443+337	29763	7.83	16.39	17.027	17.154	17.345	14.284 (0.030)	13.725 (0.030)	13.516 (0.040)
1458+171	21945	7.43	16.30	16.800	16.900	17.065	14.701 (0.031)	14.209 (0.045)	13.847 (0.047)
1502+349	21339	7.96	15.78	16.276	16.371	16.535	15.231 (0.045)	14.766 (0.061)	14.314 (0.067)
1504+546	24689	7.86	16.00	16.560	16.668	16.845	13.847 (0.025)	13.260 (0.026)	13.001 (0.027)
1517+501	31100:	7.84:	17.46	18.110	18.240	18.432	15.559 (0.060)	14.746 (0.071)	14.157 (0.072)
1610+383	14450	7.83	16.40	16.701	16.749	16.898	14.437 (0.034)	13.807 (0.036)	13.521 (0.042)
1619+525	18041	7.90	15.81	16.232	16.306	16.467	14.168 (0.032)	13.545 (0.035)	13.425 (0.042)
1619+414	14091	7.93	16.80	17.087	17.129	17.279	13.937 (0.021)	13.311 (0.029)	13.025 (0.027)
1622+323	68277	7.56	16.33	17.045	17.189	17.379	14.633 (0.029)	13.963 (0.031)	13.773 (0.039)

Tableau 4.3 – Suite

WD	T_{eff} (K)	$\log g$	V	J_{pred}	H_{pred}	$K_{S \text{ pred}}$	$J_{2\text{MASS}} (\sigma_J)$	$H_{2\text{MASS}} (\sigma_H)$	$K_{S 2\text{MASS}} (\sigma_K)$
1631+781	44931	7.76	13.38	14.076	14.216	14.408	10.975 (0.021)	10.398 (0.021)	10.164 (0.014)
1639+153	7482	8.42	15.70	15.032	14.869	14.948	15.073 (0.042)	14.979 (0.087)	15.060 (0.128)
1643+143	26849	7.91	15.64	16.239	16.355	16.540	12.732 (0.024)	12.125 (0.031)	11.957 (0.024)
1711+668	53751	8.47	17.00	17.711	17.854	18.048	15.120 (0.043)	14.457 (0.057)	14.211 (0.087)
1717–345	12700:	7.75:	16.38	16.588	16.620	16.762	12.870 (0.039)	12.208 (0.060)	11.940 (0.054)
2151–015	9137	8.21	14.41	14.122	14.049	14.168	12.452 (0.029)	11.778 (0.022)	11.414 (0.027)
2256+249	22151	7.82	13.64	14.150	14.249	14.416	11.675 (0.020)	11.180 (0.025)	10.915 (0.018)
2257+162	27556	8.33	16.14	16.756	16.873	17.061	15.439 (0.054)	15.088 (0.074)	14.736 (0.108)
2317+268	31460	7.70	16.30	16.951	17.082	17.275	14.609 (0.033)	14.074 (0.036)	13.783 (0.050)
2336–187	7882	7.82	15.60	15.035	14.896	14.987	15.057 (0.040)	14.939 (0.063)	14.681 (0.093)

Uncertainties of the atmospheric parameters are 1.2% in T_{eff} and 0.038 dex in $\log g$. The V magnitudes are from various sources in the literature. The objects marked with a colon are contaminated by the companion in the visible and the uncertainties are correspondingly larger.

TABLEAU 3.4 – Sample of Massive White Dwarfs

WD	T_{eff} (K)	M/M_{\odot}	V	J_{pred}	H_{pred}	K_S^{pred}	$J_{2\text{MASS}} (\sigma_J)$	$H_{2\text{MASS}} (\sigma_H)$	$K_{S2\text{MASS}} (\sigma_K)$
0033+016	10984	1.11	15.61	15.638	15.632	15.679	15.650 (0.057)	15.522 (0.090)	16.119 (0.303)
0052+226	9652	1.05	16.16	15.966	15.918	15.947	16.021 (0.077)	16.109 (0.162)	15.522 (0.212)
0052-147	25683	0.80	15.12	15.715	15.832	15.912	15.724 (0.061)	15.532 (0.109)	15.457 (null)
0101+059	14191	0.83	-	-	-	-	16.214 (0.089)	16.387 (0.210)	17.182 (null)
0143+216	9292	0.92	15.05	14.792	14.732	14.755	14.784 (0.036)	14.812 (0.060)	14.676 (0.077)
0213+396	9323	0.96	14.54	14.287	14.227	14.250	14.304 (0.030)	14.223 (0.052)	14.144 (0.049)
0231-054	13552	1.02	14.28	14.545	14.583	14.643	14.540 (0.033)	14.558 (0.052)	14.659 (0.101)
0232+525	16738	0.80	13.75	14.150	14.220	14.283	14.218 (0.031)	14.261 (0.053)	14.497 (0.072)
0346-011	41185	1.27	14.01	14.728	14.867	14.957	14.747 (0.030)	14.863 (0.038)	15.120 (0.138)
0429+176	13600	0.97	13.93	14.192	14.231	14.290	10.753 (0.021)	10.161 (0.019)	9.913 (0.017)
0532-560	11556	0.92	16.00	16.110	16.125	16.176	16.023 (0.085)	15.882 (0.185)	16.348 (null)
0558+165	16199	0.81	15.69	16.071	16.137	16.199	16.004 (0.069)	16.189 (0.161)	15.605 (null)
0644+025	7242	1.00	15.71	14.990	14.820	14.793	14.808 (0.045)	14.757 (0.069)	14.576 (0.103)
0701-587	13696	0.91	14.46	14.731	14.773	14.831	14.844 (0.035)	14.856 (0.074)	15.067 (0.150)
0730+487	14311	0.91	14.96	15.264	15.311	15.370	15.143 (0.045)	15.191 (0.094)	15.395 (0.171)
0743+442	14501	0.84	14.87	15.183	15.234	15.292	15.230 (0.045)	15.403 (0.104)	15.179 (0.131)
0827+328	7508	0.96	15.73	15.077	14.921	14.903	14.985 (0.044)	14.964 (0.076)	14.865 (0.121)
0930+294	8362	0.98	15.98	15.525	15.416	15.420	15.588 (0.066)	15.399 (0.106)	15.284 (0.150)
0947+325	22055	0.82	15.43	15.957	16.060	16.126	16.011 (0.073)	16.127 (0.171)	16.503 (null)
0950+139	94402	1.36	16.03	16.789	16.939	17.029	16.518 (0.097)	15.945 (0.157)	16.099 (0.258)
1038+633	24447	0.86	15.15	15.725	15.836	15.912	15.723 (0.080)	15.748 (0.188)	15.389 (null)
1049-158	18989	0.83	14.36	14.820	14.907	14.970	14.789 (0.047)	14.818 (0.060)	15.116 (0.164)
1052+273	23103	0.86	14.12	14.664	14.771	14.841	14.619 (0.029)	14.674 (0.048)	14.784 (0.076)
1058-129	24311	1.06	15.75	16.328	16.437	16.513	15.520 (0.054)	15.689 (0.118)	15.437 (0.219)
1102+748	19712	0.84	14.97	15.448	15.539	15.601	15.556 (0.059)	15.487 (0.116)	15.552 (0.228)
1120+439	26950	0.85	15.81	16.428	16.549	16.632	16.053 (0.077)	15.977 (0.158)	16.200 (0.362)
1134+300	21276	0.96	12.52	13.036	13.134	13.199	12.993 (0.024)	13.105 (0.031)	13.183 (0.028)
1159-098	9536	1.10	15.90	15.682	15.628	15.654	15.555 (0.056)	15.480 (0.091)	15.384 (0.186)
1236-495	11748	1.10	13.80	13.923	13.935	13.989	13.806 (0.024)	13.815 (0.036)	13.907 (0.062)
1237-028	10236	0.97	15.97	15.888	15.865	15.903	15.971 (0.068)	15.922 (0.138)	15.754 (0.250)
1257+278	8733	0.81	15.41	15.040	14.954	14.966	15.132 (0.046)	14.977 (0.076)	14.986 (0.089)
1304+227	10444	0.87	-	-	-	-	16.413 (0.112)	16.601 (0.288)	16.498 (null)
1310+583	10555	0.80	14.09	14.070	14.063	14.106	14.016 (0.028)	14.004 (0.045)	14.081 (0.073)
1334-160	18667	0.80	15.34	15.792	15.876	15.939	15.532 (0.053)	15.553 (0.103)	15.733 (0.295)
1446+286	22891	0.89	14.54	15.086	15.192	15.261	15.172 (0.044)	15.269 (0.113)	15.537 (0.251)
1452+553	27636	0.82	-	-	-	-	16.642 (0.118)	16.606 (0.235)	16.720 (null)

Tableau 4.4 – Suite

WD	T_{eff} (K)	M/M_{\odot}	V	J_{pred}	H_{pred}	K_S_{pred}	$J_{2\text{MASS}}(\sigma_J)$	$H_{2\text{MASS}}(\sigma_H)$	$K_{S2\text{MASS}}(\sigma_K)$
1459+347	21516	0.92	15.74	16.259	16.359	16.424	16.402 (0.101)	16.327 (0.207)	15.645 (null)
1515+668	10317	0.86	15.33	15.268	15.251	15.291	15.295 (0.053)	15.240 (0.112)	15.180 (0.198)
1525+257	22291	0.80	15.65	16.181	16.286	16.352	16.258 (0.098)	16.101 (0.177)	16.022 (null)
1531-022	18617	0.88	14.00	14.453	14.535	14.600	14.395 (0.040)	14.484 (0.053)	14.618 (0.101)
1554+322	30497	0.85	—	—	—	—	16.561 (0.115)	17.617 (null)	16.016 (0.241)
1609+135	9321	1.01	15.11	14.854	14.793	14.816	14.861 (0.036)	14.779 (0.056)	14.857 (0.109)
1625+093	6870	0.88	16.14	15.318	15.125	15.086	15.250 (0.062)	15.187 (0.103)	15.036 (0.142)
1636+057	8537	1.07	16.46	16.040	15.941	15.948	16.057 (0.081)	15.897 (0.147)	15.919 (null)
1639+153	7482	0.86	15.68	15.021	14.863	14.844	15.073 (0.042)	14.979 (0.087)	15.060 (0.128)
1647+591	12258	0.81	12.23	12.412	12.444	12.497	12.425 (0.021)	12.463 (0.021)	12.522 (0.030)
1711+668	53751	0.96	17.00	17.728	17.872	17.960	15.120 (0.043)	14.457 (0.057)	14.211 (0.087)
1840+042	8925	0.81	14.79	14.461	14.384	14.400	14.443 (0.050)	14.374 (0.075)	14.651 (0.099)
1855+338	11958	0.83	14.64	14.795	14.820	14.874	14.737 (0.034)	14.769 (0.056)	14.799 (0.124)
2039-682	15855	0.89	13.41	13.781	13.842	13.904	13.729 (0.026)	13.806 (0.039)	13.800 (0.050)
2051-208	20512	1.23	15.06	15.570	15.659	15.725	15.590 (0.050)	15.669 (0.112)	15.839 (0.226)
2059+190	6980	0.86	16.38	15.589	15.402	15.366	15.642 (0.070)	15.559 (0.141)	15.397 (0.159)
2124+550	13341	0.82	14.70	14.952	14.993	15.049	14.987 (0.053)	14.957 (0.090)	14.905 (0.162)
2205-139	25263	0.81	15.08	15.668	15.783	15.861	15.648 (0.067)	15.610 (0.114)	15.582 (0.217)
2220+133	22675	0.88	15.60	16.141	16.246	16.315	16.264 (0.112)	16.046 (0.180)	15.367 (null)
2246+223	10647	1.10	14.39	14.368	14.354	14.397	14.341 (0.029)	14.317 (0.047)	14.360 (0.090)
2313+682	8977	0.83	16.18	15.861	15.787	15.804	15.908 (0.098)	15.766 (0.175)	15.387 (0.210)

2MASS magnitudes with null uncertainties are lower limits. Mean uncertainties of effective temperatures and masses are 1.2% and $0.03 M_{\odot}$, respectively.

3.10 FIGURES

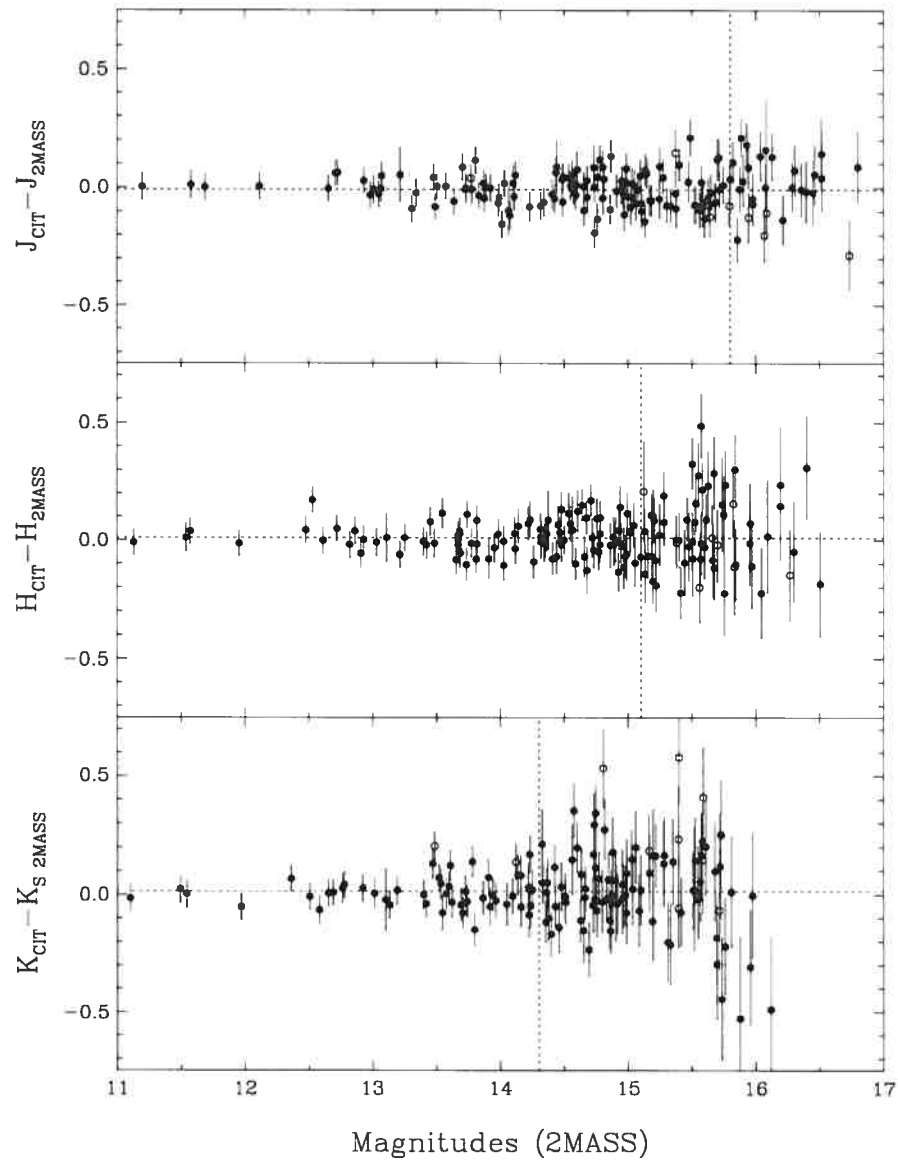


FIGURE 3.1 – Differences in magnitudes between the infrared CIT and 2MASS photometric systems for each individual filter as a function of the 2MASS magnitude for our common sample of 160 cool white dwarfs. The error bars represent the combined quadratic uncertainties of both photometric data sets. The horizontal dotted lines indicate the mean magnitude differences between both data sets. Objects located on the left side of the vertical dotted lines meet the PSC level 1 requirements ($S/N > 10$), which correspond to $J < 15.8$, $H < 15.1$, and $K_S < 14.3$. The ten objects represented by open circles are discussed in the text.

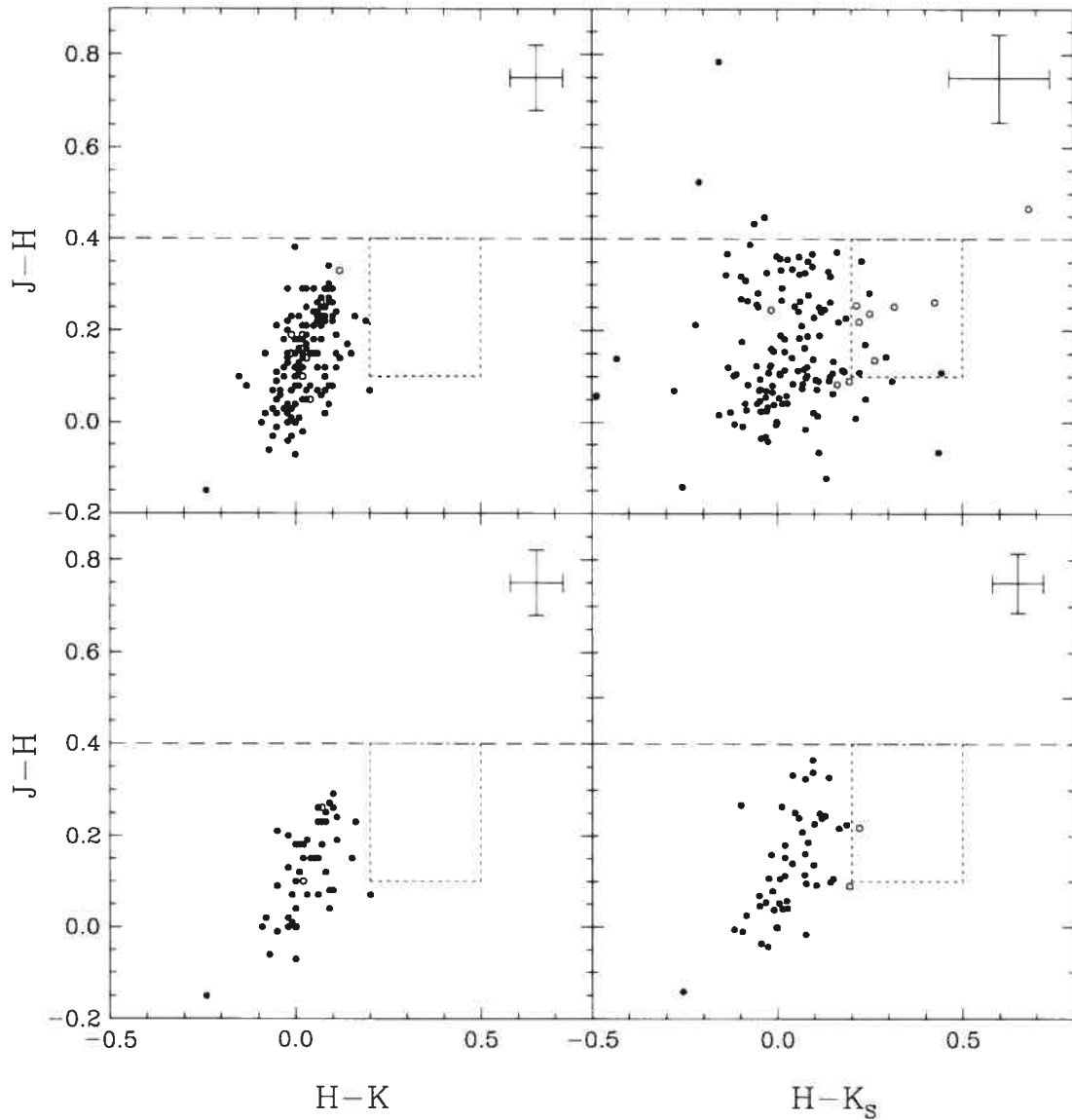


FIGURE 3.2 – *Top*: $(J - H)$ vs. $(H - K/K_s)$ two-color diagrams for 143 cool white dwarfs taken from Table 1 and detected by 2MASS in all three bands. The left and right panels correspond to the CIT and 2MASS magnitudes, respectively. The error bars indicate the mean uncertainties of each data set. *Bottom*: Same as the top panels but for the 49 white dwarfs satisfying the level 1 requirements. The region above the dashed line and that defined by the dotted rectangle correspond to the color criteria defined by Wachter et al. (2003) for selecting binary candidates and tentative binary candidates, respectively. The ten objects shown by open circles are discussed in the text.

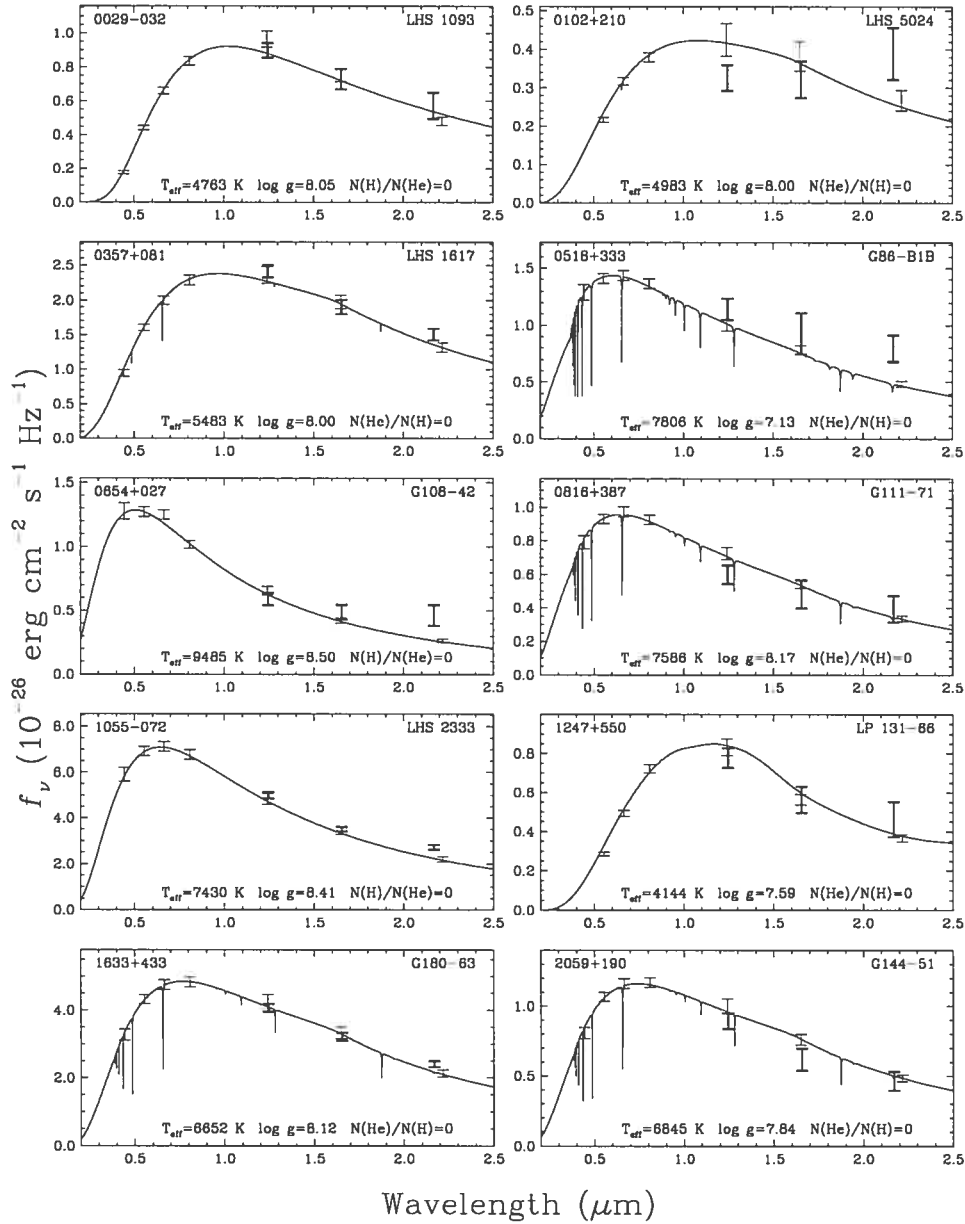


FIGURE 3.3 – Fits to the optical *BVRI* and infrared *JHK* CIT photometric energy distributions (black error bars) for ten objects from our cool white dwarf sample. The atmospheric parameters obtained from a fit to the observed energy distribution are given in each panel and the corresponding monochromatic model fluxes are shown by the solid line. For clarity, we do not plot the model fluxes averaged over the filter bandpasses and used in the fitting procedure as they coincide almost perfectly with the monochromatic fluxes. Also shown by red error bars are the corresponding 2MASS fluxes.

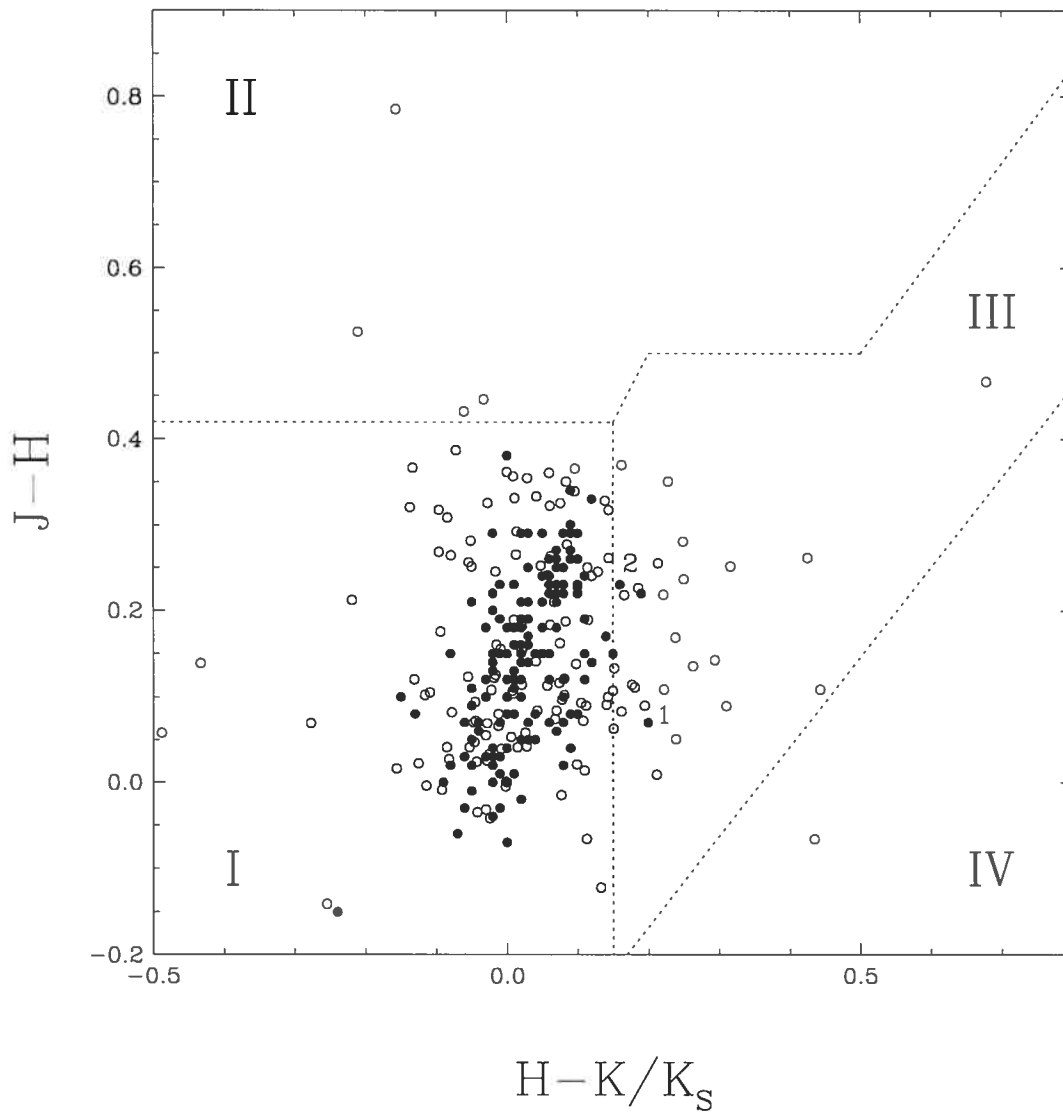


FIGURE 3.4 – Same as Figure 3.2 but with the four regions defined by Wellhouse et al. (2005, see text). The filled and open circles correspond to the CIT and 2MASS colors, respectively. The two objects with CIT data labeled in the figure and discussed in the text are (1) 1748+708 and (2) 2251-070.

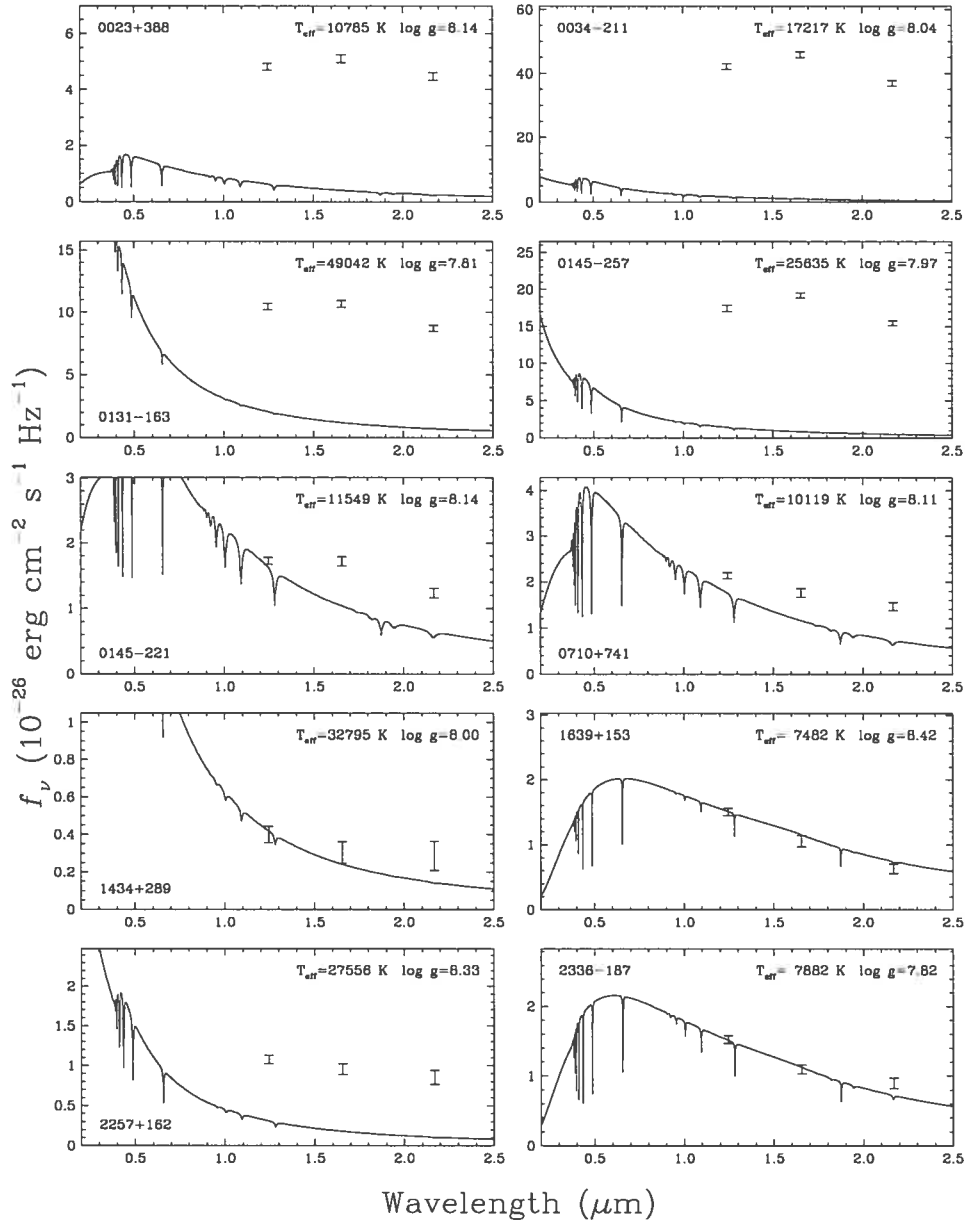


FIGURE 3.5 – Observed 2MASS fluxes (*error bars*) for several binary and tentative binary candidates from Wachter et al. (2003) compared with the predictions of model atmospheres (*solid lines*) normalized at *V*. The atmospheric parameters derived from the spectroscopic method are given in each panel.

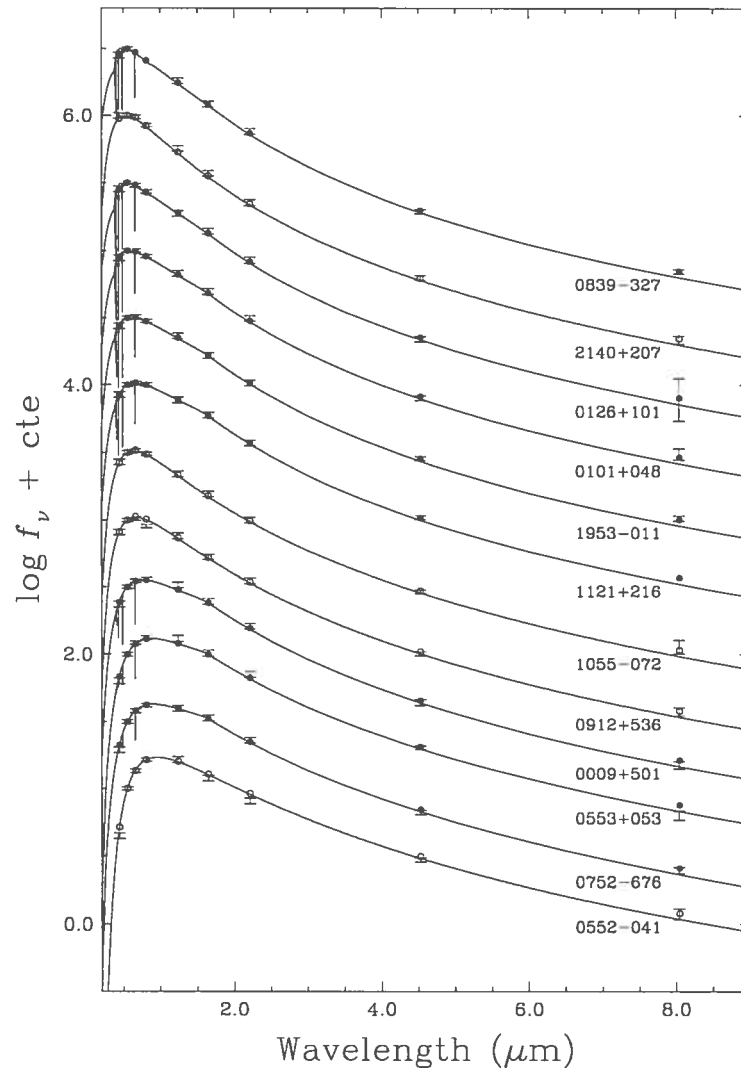


FIGURE 3.6 – Fits to the energy distribution of white dwarfs from the sample of Kilic et al. (2006b). The observed *BVRI* and *JHK* (CIT) fluxes along with the 4.5 and 8 μm *Spitzer* fluxes are shown by error bars. The flux scale is logarithmic and each star is shifted vertically by a constant for clarity. The model monochromatic fluxes are shown by solid lines while the fluxes averaged over the filter bandpasses are indicated by filled and open circles for pure hydrogen and pure helium atmospheric compositions, respectively.

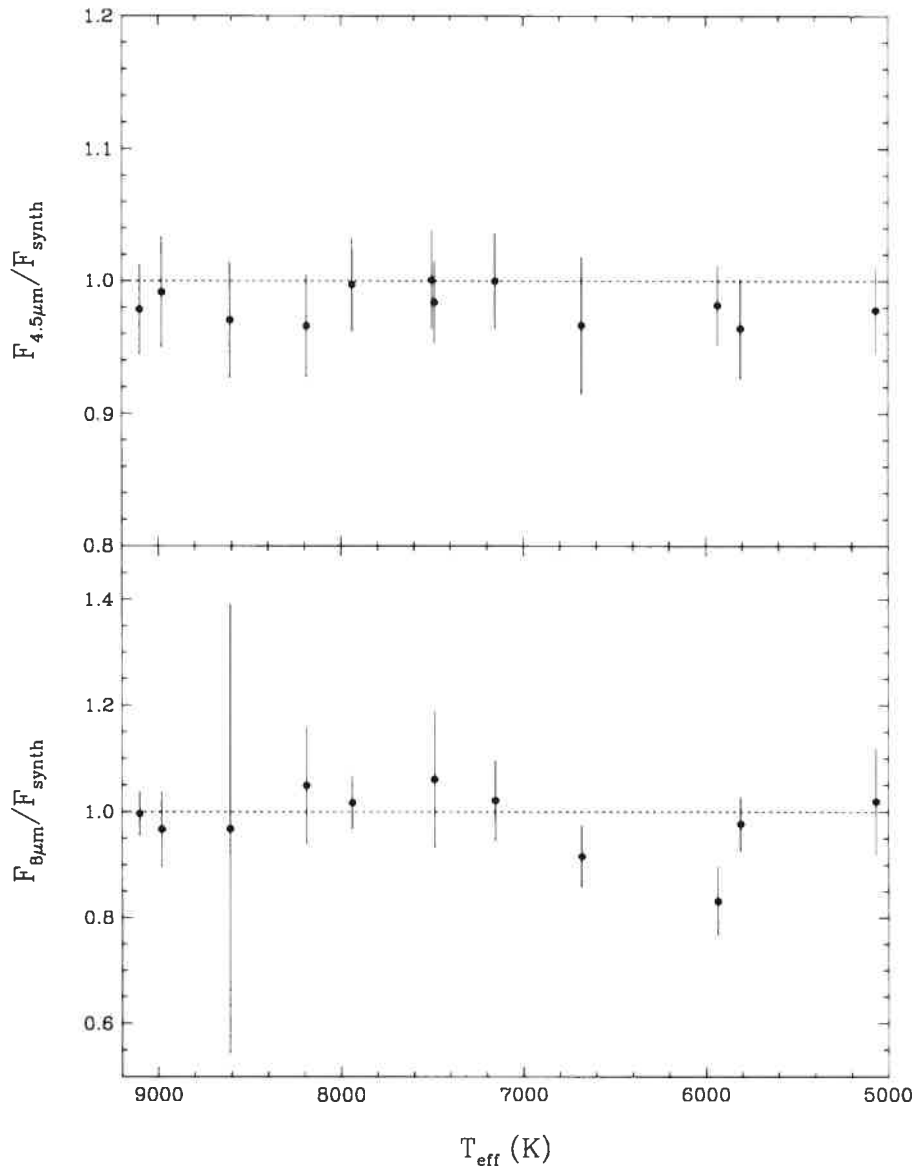


FIGURE 3.7 – The ratio of observed to predicted *Spitzer* fluxes for 12 objects from the sample of Kilic et al. (2006b) as a function of effective temperature. The predicted fluxes and T_{eff} values are obtained from simultaneous fits to the *BVR IJHK* and 4.5 and 8 μm photometric data. For Ross 627 (1121+216), only the *Spitzer* 4.5 μm flux is used since the 8 μm flux is affected by a nearby star.

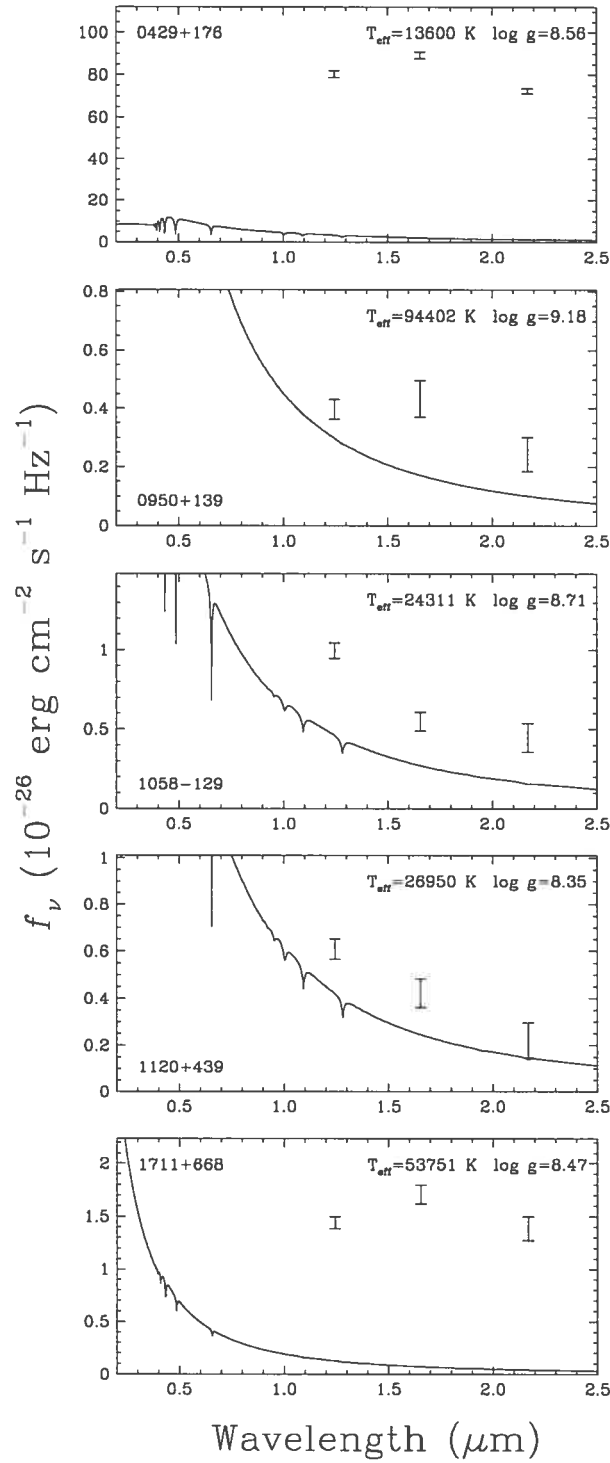


FIGURE 3.8 – Same as Fig. 3.5 but for the six white dwarfs discussed in § 5.

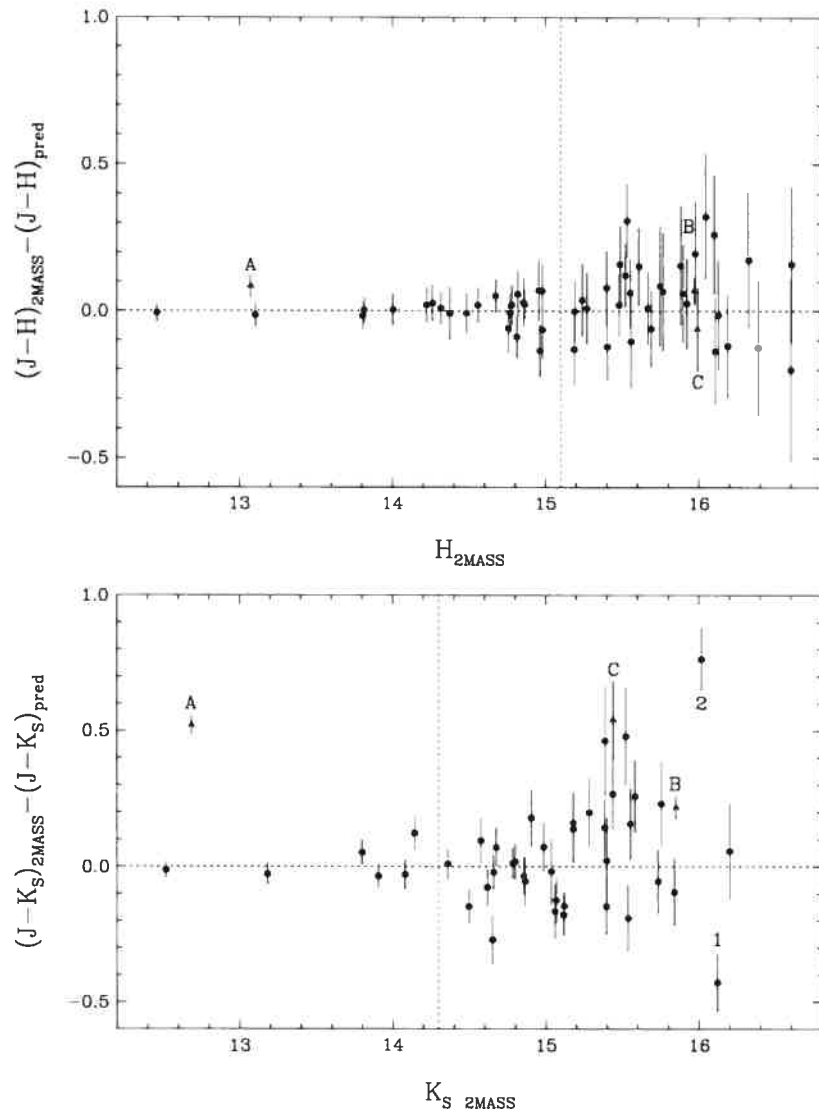


FIGURE 3.9 – Differences between the 2MASS observed and predicted $(J - H)$ and $(J - K_S)$ color indices for our sample of massive white dwarfs (Table 4) as a function of H and K_S , respectively. In the upper panel, 53 objects are detected at both J and H , while in the lower panel 42 objects are detected at both J and K_S . The uncertainties are from the 2MASS PSC. Known white dwarfs (not necessarily massive) with a circumstellar disk are shown by triangles and correspond to (A) G29-38, (B) GD 362 and (C) GD 56; the observed colors for G29-38 and GD 56 are from 2MASS and for GD 362 from Becklin et al. (2005). Also identified in the figure and discussed in the text are (1) G1-7 and (2) CBS 413. Left of the dotted vertical lines are objects for which the 2MASS level-1 requirements are satisfied for the corresponding color index. The horizontal dotted lines represent identical values of observed and theoretical color indices.

Chapitre 4

Étude du mélange convectif : le rapport DA sur non-DA

Le relevé photométrique 2MASS, dont nous avons démontré la fiabilité au Chapitre § 3 est l'un de ceux qui contient de l'information pour le plus de naines blanches ce, dans toutes les régions du ciel et pour tous les types spectraux. En effet, le relevé 2MASS contient les magnitudes JHK_S pour presque tous les points ponctuels du ciel jusqu'aux magnitudes limites de $J \sim 16.8$, $H \sim 16.5$ et $K_S \sim 16.2$. Cela donne un relevé complet de naines blanches limité en magnitude qui permet de tracer un portrait global de la population locale de naines blanches, en admettant que l'on peut identifier quelles étoiles sont des naines blanches. À ce titre, l'échantillon actuel le plus complet est celui du Villanova White Dwarf Catalog¹ (WDC) qui recense plus de 5500 naines blanches discutées dans la littérature.

L'intérêt de ce large échantillon provenant de 2MASS est de pousser une analyse statistique des naines blanches jusqu'à un niveau encore jamais atteint dans le but d'en dégager des nouvelles connaissances globales. À ce titre, on a discuté au Chapitre § 3 qu'un aspect important du domaine était la recherche de la fraction d'étoiles naines blanches binaires (Wachter et al. 2003; Holberg & Magargal 2005). En utilisant le catalogue final de 2MASS et les techniques présentées dans Tremblay & Bergeron (2006), nous pouvons étendre cette recherche à plus d'un millier de naines blanches.

¹<http://www.astronomy.villanova.edu/WDCatalog/index.html>

Un des premiers intérêts dans la recherche sur les naines blanches constitue leur évolution spectrale. Dans cette approche, on tente de prédire la composition et donc les propriétés spectrales de l'atmosphère des naines blanches en fonction de leur évolution sur la courbe de refroidissement. La question de base sur ce sujet est de se demander pourquoi on retrouve des atmosphères autres que d'hydrogène pur, quand on prédit par tri gravitationnel que tous les éléments plus lourds vont chuter au bas de l'atmosphère. Cette question posée depuis plus de vingt ans (Sion 1984) demeure toujours sans réponse claire. En effet, en plus d'une majorité d'étoiles naines blanches de composition d'hydrogène pur montrant des raies de Balmer (type spectral DA), on retrouve près d'un quart d'étoiles avec de l'hélium comme élément dominant. Plusieurs de ces étoiles contiennent également des traces d'éléments lourds. On sait depuis longtemps qu'une liste bien précise de processus physiques tels que la diffusion, l'accrétion, la convection, la pression de radiation, les vents et les champs magnétiques vont définir l'évolution spectrale. Mais on est encore loin d'avoir un portrait global et de caractériser de façon précise quels vont être les processus en jeu et de quelle manière ils vont affecter l'évolution spectrale.

Dans le présent chapitre, on s'intéresse à l'évolution spectrale entre les naines blanches DA et non-DA à basse température ($T_{\text{eff}} \lesssim 30,000$ K). Avant de discuter des processus qui vont affecter cette évolution, il est important d'aborder les contraintes apportées par l'étude des naines blanches chaudes. Tout d'abord, on obtient les fractions de masses canoniques d'éléments légers dans les naines blanches en considérant les masses supérieures permises sans qu'il y ait une destruction par brûlage nucléaire ($M_{\text{He}}/M_{\text{tot}} \sim 10^{-2}$ et $M_{\text{H}}/M_{\text{tot}} \sim 10^{-4}$). Il y aurait cependant une dichotomie dans la fraction de masse d'hydrogène, une classe d'étoiles ayant la fraction canonique de $M_{\text{H}}/M_{\text{tot}} \sim 10^{-4}$ et une classe d'étoiles dites "Born Again" ayant épuisé leur hydrogène par le brûlage nucléaire lors de multiples excursions sur la branche des étoiles AGB. La première classe serait les progéniteurs des étoiles DA, tandis que la deuxième classe serait les progéniteurs des étoiles naines blanches chaudes montrant des raies d'hélium ionisé (DO). On pense que ces objets pourraient survivre jusqu'à une température effective d'environ 45,000 K avant qu'une mince couche d'hydrogène ($M_{\text{H}}/M_{\text{tot}} \sim 10^{-12}$) remonte à la surface (Fontaine & Wesemael 1987, 1991). Ensuite il est admis, en général, que l'évolution se poursuit pour $45,000 \gtrsim T_{\text{eff}} \gtrsim 30,000$ K avec un type spectral

dominant, soit les étoiles DA dans ce qu'on appelle la *brèche des DB*. Lorsque l'atmosphère d'une naine blanche DA se refroidit en deçà d'environ 30,000 K, la couche d'hélium convective, en dessous de la couche d'hydrogène en surface, devient efficace pour induire une dilution (Fontaine & Wesemael 1987). Les auteurs ont affirmé qu'un certain nombre d'étoiles riches en hydrogène avec des couches suffisamment minces ($M_{\text{H}}/M_{\text{tot}} \sim 10^{-15}$; MacDonald & Vennes 1991), possiblement les anciennes DO, se transforment en étoiles riches en hélium, montrant des raies d'hélium neutre (DB).

Pour les naines blanches plus froides, c'est-à-dire le régime de températures d'intérêt de notre analyse, le processus principal qu'on croit responsable de la transformation entre DA et non-DA apparaît autour de $T_{\text{eff}} = 12,000$ K lorsque la couche d'hydrogène en surface devient convective sur une bonne fraction de son épaisseur. La figure 4.1 montre l'étendue de la zone de convection en terme de la fraction de masse d'hydrogène en fonction de la température effective. Lorsque cette zone s'étend à une profondeur qui correspond au bas de la couche d'hydrogène, cela provoquerait un mélange des couches d'hydrogène et d'hélium (Strittmatter & Wickramasinghe 1971; Shipman 1972; Baglin & Vauclair 1973; Koester 1976; Vauclair & Reisse 1977).

Le modèle physique le plus simple est un mélange convectif complet des couches d'hydrogène et d'hélium (M. Forestini 1990, communication privée). Considérant que la valeur canonique de la masse de la couche d'hélium est au moins deux ordres de grandeur supérieure à celle de la couche d'hydrogène, l'étoile se transformerait en une naine blanche riche en hélium de type DB, DC, DQ ou DZ avec une abondance trace d'hydrogène. Si un tel processus a lieu dans les naines blanches froides, on s'attend à ce que la fraction de non-DA augmente à mesure que les DA se refroidissent et se transforment en non-DA lorsque la zone convective atteint le bas de la couche d'hydrogène. Une comparaison entre les modèles de Forestini et le ratio observé du nombre de naines blanches riches en hélium et en hydrogène en fonction de la température effective permettrait ainsi d'estimer l'épaisseur des couches d'hydrogène de certaines naines blanches. Ces déterminations pourront être comparées à des mesures indépendantes effectuées par l'étude astérosismologique des ZZ Ceti, un domaine qui a encore peu de mesures quantitatives (Brassard & Fontaine 2006).

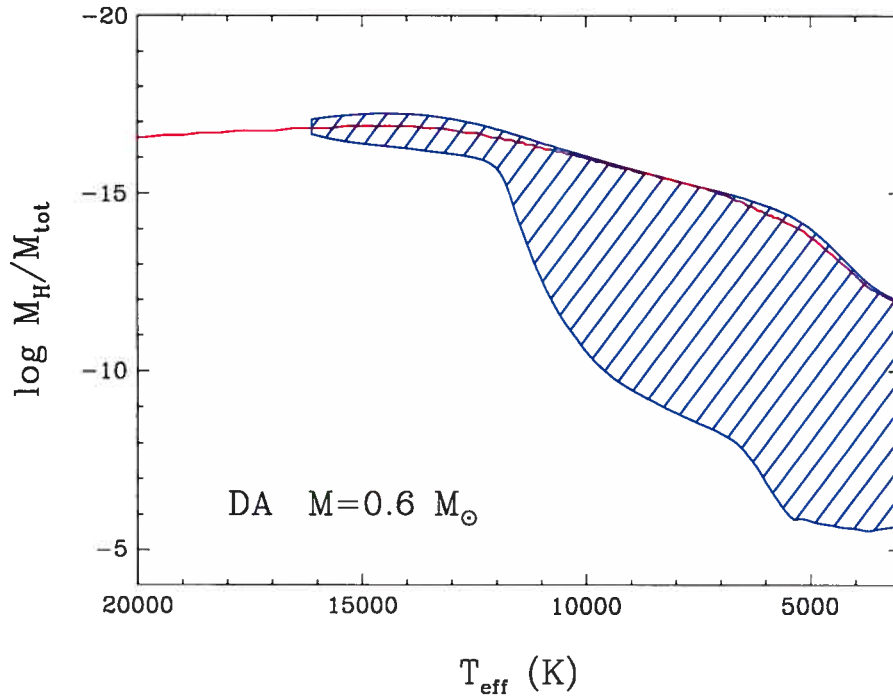


FIGURE 4.1 – La zone convective (hachurée en bleu) en terme de la fraction de la masse d’hydrogène sur la masse totale en fonction de la température effective pour une naine blanche DA de $0.6 M_{\odot}$. La courbe en rouge définit l’endroit où $\tau = 1$.

L’observation du mélange convectif débute par l’analyse statistique d’un grand nombre d’objets dans le but d’y déterminer les compositions et les températures effectives (ou un analogue comme la magnitude absolue). À partir d’un échantillon de mouvement propre de 695 naines blanches, Sion (1984) a été le premier à observer l’évolution du ratio non-DA sur DA pour les naines blanches froides, présenté sur la figure 4.2 en fonction de la magnitude absolue. De façon qualitative, on remarque que la fraction de non-DA augmente pour des magnitudes absolues autour de 11.25 ($T_{\text{eff}} \sim 20000 \text{ K}$) et 12.5 ($T_{\text{eff}} \sim 10000 \text{ K}$). Il a ainsi démontré que l’évolution des étoiles riches en hydrogène et riches en hélium n’est pas indépendante et qu’il y a des processus physiques qui modifient l’espèce dominante de l’atmosphère. Le portrait global n’a pas beaucoup changé depuis l’analyse de Sion (1984), et cela constitue la meilleure preuve de la transformation de certaines étoiles DA en non-DA.

Notre objectif est de faire suite à l’analyse de Sion (1984) avec l’échantillon de photométrie

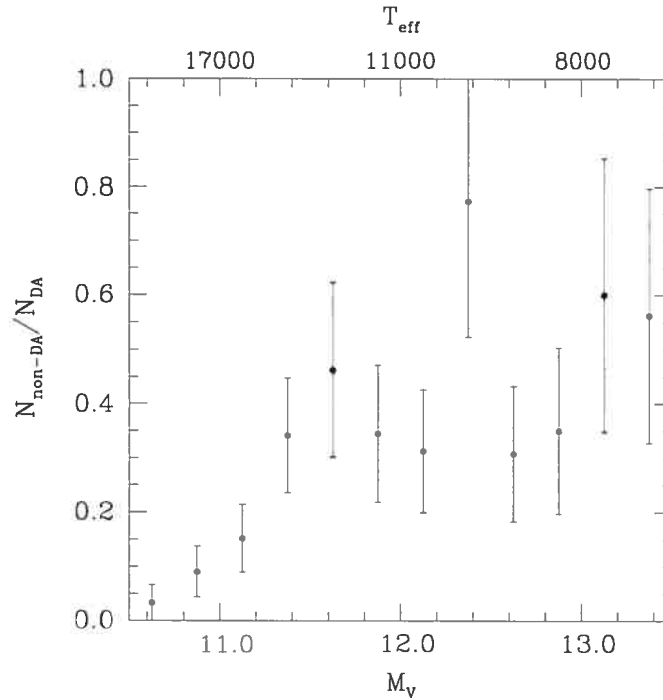


FIGURE 4.2 – Le rapport du nombre d’étoiles riches en hélium sur le nombre d’étoiles riches en hydrogène en fonction de la magnitude absolue pour l’échantillon de Sion (1984). Les barres d’erreurs sont statistiques. L’abscisse au haut de la figure présente une conversion approximative de M_V en température effective avec notre grille de modèle en assumant une composition d’hydrogène et $M = 0.6 M_{\odot}$.

JHK_S de 2MASS couplé avec la base de données du WDC pour identifier les naines blanches. Nous utilisons la température effective comme variable indépendante et nous déterminons ce paramètre avec précision à l’aide de minimisations photométriques $VJHK_S$. Nous présentons d’abord les caractéristiques de l’échantillon (§ 4.1) puis la détermination des paramètres atmosphériques (§ 4.2) en comparant avec des déterminations indépendantes (§ 4.3). Les sections § 4.4 à 4.6 présentent les résultats en terme d’évolution spectrale et la section § 4.7 en termes de la recherche de naines blanches binaires.

4.1 Définition de l’échantillon de 2MASS

Nous avons choisi le *White Dwarf Catalog* (WDC) de Villanova qui recense toutes les naines blanches découvertes dans différents relevés. Nous avons pris les plus récentes mises à jour

(février 2006), ce qui donne un total de 5505 objets. Nous avons fait une première sélection en ne prenant que les objets dont il y a au moins une magnitude visuelle publiée² (1821 objets) et où au moins une détermination est plus brillante que $V = 18.5$ (1441 objets). La figure 4.3 trace pour nos modèles riches en hydrogène et en hélium la magnitude V pour laquelle $H_{2\text{MASS}} = 16.5$ (valeur représentative de la limite de détection de 2MASS dans cette bande) en fonction de la température effective. Cela montre que seules les naines blanches situées en dessous des courbes pourront être détectées dans au moins deux bandes dans 2MASS. Pour des naines blanches avec $T_{\text{eff}} > 5000$ K, le critère $V < 18.5$ est ainsi suffisant pour retrouver le maximum de naines blanches. Puisque notre projet vise à tracer l'évolution spectrale des naines blanches à basse température, nous avons éliminé tous les objets sans classification spectrale ou dont la seule classification spectrale était PG1159, DO ou sous-naine. Il reste alors 1367 étoiles naines blanches dans notre échantillon de départ.

Nous avons ensuite recherché tous les objets de notre échantillon dans le catalogue PSC de 2MASS. Nous avons fait la recherche dans une fenêtre de $20''$ autour des coordonnées précises mesurées par J. B. Holberg (2005, communication privée). Dans la plupart des cas, plusieurs sources ont été trouvées dans la fenêtre et nous avons identifié chaque objet en comparant les cartes de champ de 2MASS avec celles disponibles dans le WDC. Pour plusieurs des objets près de la limite de détection, seulement une ou deux magnitudes sont détectées avec des incertitudes formelles. Nous avons éliminé les objets dont seulement une magnitude est détectée (habituellement J) puisque dans ce cas la minimisation est beaucoup plus incertaine (un seul degré de liberté). Nous avons trouvé 883 naines blanches de l'échantillon initial de 1367 objets. Les objets restants ont été éliminés pour les raisons suivantes: 276 sont trop faibles dans 2MASS pour être détectés dans au moins deux bandes, 26 sont visibles et brillants dans l'atlas mais ne font pas partis du PSC de 2MASS et 9 n'ont pas pu être identifiés sans ambiguïté à partir des cartes de champ existantes.

Les données photométriques pour chaque étoile sont complétées par la magnitude V (ou Strömgen y) disponible dans le WDC, en faisant la moyenne³ s'il y a plus d'une détermination

²Nous avons négligé les magnitudes V dont on mentionne explicitement une source photographique, les données photographiques de Eggen et al. de 1965 à 1972, les magnitudes B et celles notées comme particulièrement incertaines.

³La procédure est automatisée sauf dans les cas où il y a une détermination de V ou y à plus de 0.15

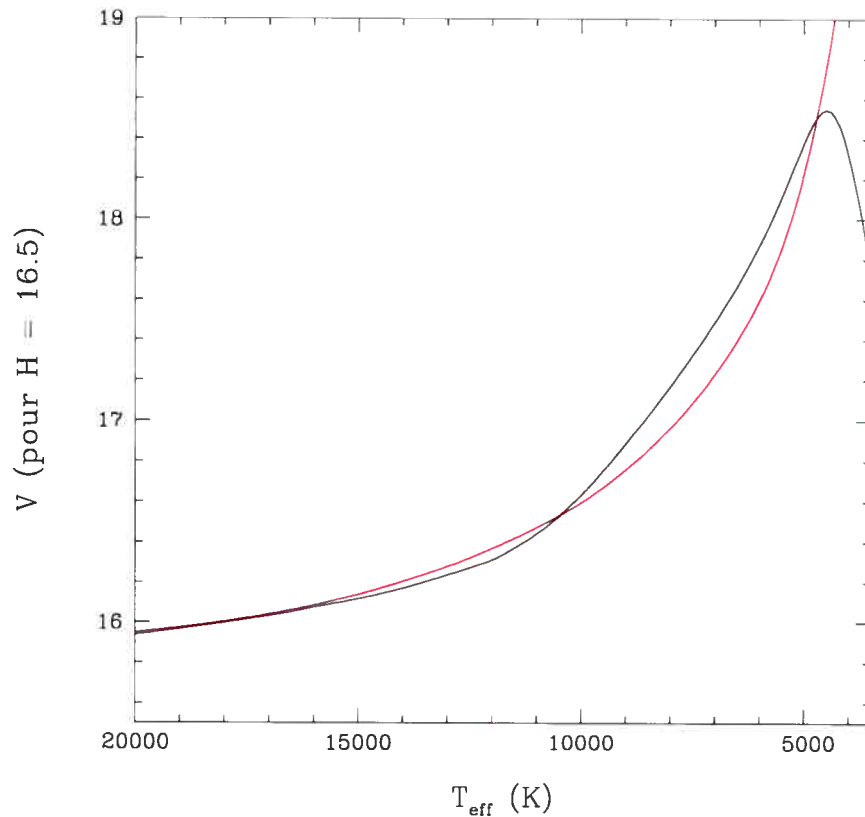


FIGURE 4.3 – Pour nos modèles riches en hydrogène (noir) et en hélium (rouge), avec $\log g = 8$, la magnitude V pour laquelle $H_{2\text{MASS}} = 16.5$ en fonction de la température effective (T_{eff}).

et en supposant une incertitude typique de 0.05 magnitude.

4.2 Détermination des paramètres atmosphériques

Nous avons classé les objets en deux catégories, séparant ceux identifiés comme riches en hydrogène (les étoiles DA incluant les sous-types comme DAB, DAZ) et ceux riches en hélium (DB, DZ, DQ, DC). Dans les cas où la classification était ambiguë, nous avons vérifié dans la littérature pour confirmer la présence de raies d'hydrogène (généralement pour les DC/DA froides). Ensuite, en utilisant la photométrie $VJHK_S$ (VJH) on effectue une minimisation magnitude de la moyenne. Nous avons dans quelques rares cas négligé cette détermination s'il y avait raison de croire qu'elle était moins précise que les autres valeurs.

des flux observés avec des flux théoriques provenant de modèles d’atmosphère. La technique utilisée est similaire à celle décrite dans BRL97 et BLR01. En bref, les magnitudes sont converties en flux avec des points zéro tels que définis dans Holberg & Bergeron (2006) pour des instruments à comptage de photons, mais en utilisant le filtre Bessel (Bessell 1990) pour V , Strömgren (Olsen 1974) pour y^4 et 2MASS (Cohen et al. 2003) pour JHK_S . Les flux résultants sont alors comparés avec ceux prédits par les modèles d’atmosphère, proprement moyennés sur les mêmes bandes passantes. La grille de modèles utilisée est celle décrite dans le Chapitre 2, avec un intervalle de température effective allant de 3000 à 140,000 K pour les DA (hors-ETL) et de 3000 à 30,000 K pour les DB (DC). Ces grilles avec un élément chimique unique négligent l’effet des éléments traces des sous-types spectraux.

La gravité a très peu d’effet sur la couleur ($V - J$) théorique des naines blanches. La figure 4.4 montre qu’une différence de 1 dex en $\log g$ correspond à une différence de couleur en deçà de 0.05 magnitude. Cette faible différence qui est de l’ordre des incertitudes sur les magnitudes observées permet de fixer la gravité à $\log g = 8.0$ pour tous les objets. Puisque la distribution de masse des étoiles riches en hydrogène et en hélium est sensiblement la même (Bergeron et al. 1992; Beauchamp 1995) et qu’il y a autant d’étoiles avec des gravités légèrement plus basses que plus hautes, cela n’affectera pas nos résultats de façon significative. Les températures effectives T_{eff} et l’angle solide $\pi(R/D)^2$ (avec R , le rayon de l’étoile et D sa distance à la Terre) sont obtenus avec une minimisation du χ^2 (équation 4.1), où ce dernier est obtenu à partir de la somme quadratique des différences entre le flux observé (f_o) et prédit (f_s) dans chacune des k bandes observées pondérée par les incertitudes (σ_o).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{f_{oi} - f_{si}}{\sigma_{oi}} \right)^2 \quad (4.1)$$

Dans notre échantillon de départ, il y a une fraction importante d’étoiles binaires dont nous faisons une analyse détaillée à la section §4.7. Pour les compagnons froids de la séquence principale, le flux observé en JHK_S est substantiellement différent de celui d’une naine blanche. Il y est à la fois beaucoup plus élevé que le flux prédit et la couleur ($J - H$) prend une grande valeur positive (Tremblay & Bergeron 2006), nous donnant dans le cas typique une minimi-

⁴Si on doit moyenner des valeurs de y et V , on suppose que la moyenne est dans le système Bessel.

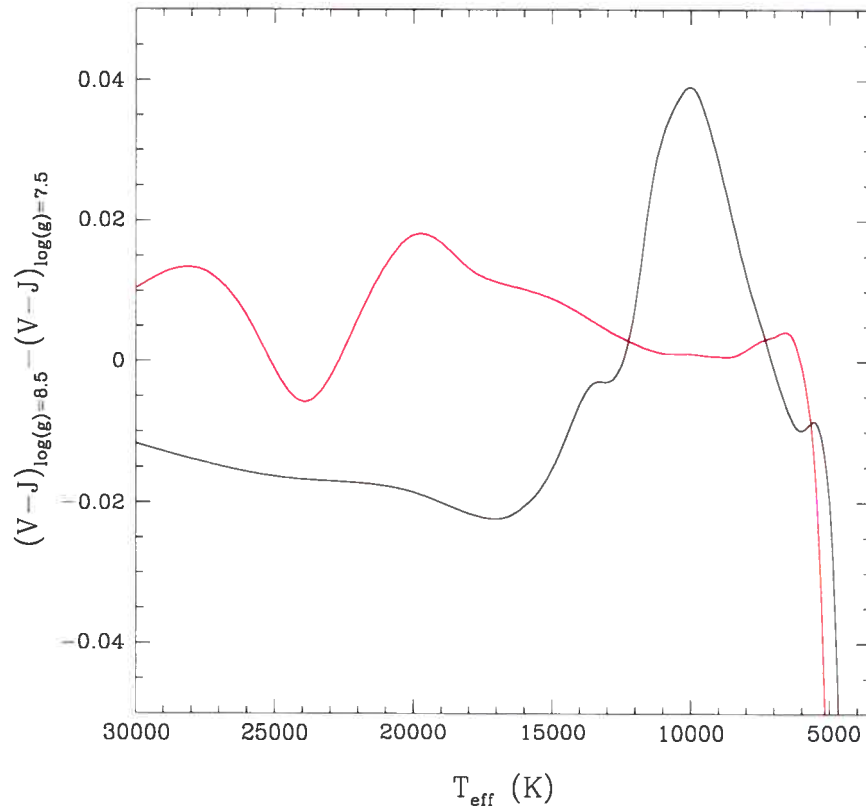


FIGURE 4.4 – Pour nos modèles riches en hydrogène (noir) et hélium (rouge), la différence de la couleur $(V - J)$ pour des valeurs de $\log g$ de 8.5 et 7.5 en fonction de la température effective.

sation de mauvaise qualité et une température effective en dessous de 5000 K. Nous avons éliminé 96 candidats binaires répondant à au moins deux des critères suivants⁵, soit d'avoir (1) une température $VJHK_S$ en deçà de 6000 K et incompatible avec le type spectral, (2) un flux f_H supérieur au flux f_J , et (3) d'avoir $f_J > 10f_V$. Nous avons également éliminé les objets partiellement résolus dans les cartes de champs.

Nous obtenons 21 étoiles DC avec une température effective pour le modèle d'hydrogène en deçà de 5000 K. Puisque pour ces objets, on ne prédit pas de raies d'hydrogène observables, il est impossible de les classer selon la composition et on identifie donc $T_{\text{eff}} = 5000$ K comme la limite de température inférieure de notre analyse.

⁵11 objets ne répondent pas complètement à 2 des critères et 4 objets répondent uniquement au critère d'avoir une minimisation de mauvaise qualité incompatible avec le type spectral

4.3 Détermination des incertitudes

Cette section vise à quantifier les incertitudes sur nos déterminations de T_{eff} et à déterminer les limites de notre analyse. L'objectif est de déterminer la largeur optimale des boîtes de T_{eff} pour l'étude du mélange convectif à la section § 4.4. La figure 4.5 montre le résultat de la minimisation pour huit étoiles naines blanches très brillantes ($11 < V < 13.5$) et analysées à plusieurs reprises dans la littérature. On remarque que dans chaque cas la solution est excellente, tant pour les objets riches en hydrogène que riches en hélium. Dans le tableau 4.1, on compare nos températures avec celles trouvées dans la littérature. Cela démontre que notre technique, avec des données photométriques très précises, permet de trouver la température des naines blanches en bas de $T_{\text{eff}} = 30,000$ K avec un écart moyen de l'ordre de 5% pour tous les types spectraux.

TABLEAU 4.1 – Comparaison entre températures photométriques et spectroscopiques

WD	Type Spectral	T_{phot} (K)	$T_{\text{spec}} (\sigma_{\text{spec}})$ (K)	Référence
0046+051	DZ	6737	6220 (240)	2
0135–052	DA	7413	7275 (18)	1
0310–688	DA	15195	15500 (79)	1
1620–391	DA	25649	24276 (100)	1
1645+325	DBV	25524	24900	3
1647+591	DAV	12585	12258 (61)	1
1917+077	DBQA	11651	10200	4
2032+248	DA	20315	19511 (122)	1

Les incertitudes internes sur T_{phot} sont omises puisqu'on ne connaît pas l'incertitude exacte sur V . Les sources pour les températures spectroscopiques sont (1) A. Gianninas 2005 (communication privée), (2) Dufour (2006), (3) Beauchamp et al. (1999), (4) Oswalt et al. (1991). Pour la référence (2), les températures proviennent d'une combinaison de données spectroscopiques et photométriques.

Les incertitudes sur nos températures peuvent être quantifiées avec le taux de changement de la couleur ($V - J$) en fonction de la température. La figure 4.6 montre la variation de la température dT_{eff} qui correspond à un changement de l'indice ($V - J$) d'une valeur de $d(V - J) = 0.08$, ceci définissant l'incertitude moyenne de cette couleur dans notre échantillon en supposant une incertitude typique de 0.05 pour V . On remarque ainsi que l'incertitude sur notre détermination des températures croît rapidement avec T_{eff} et pour cette raison, on

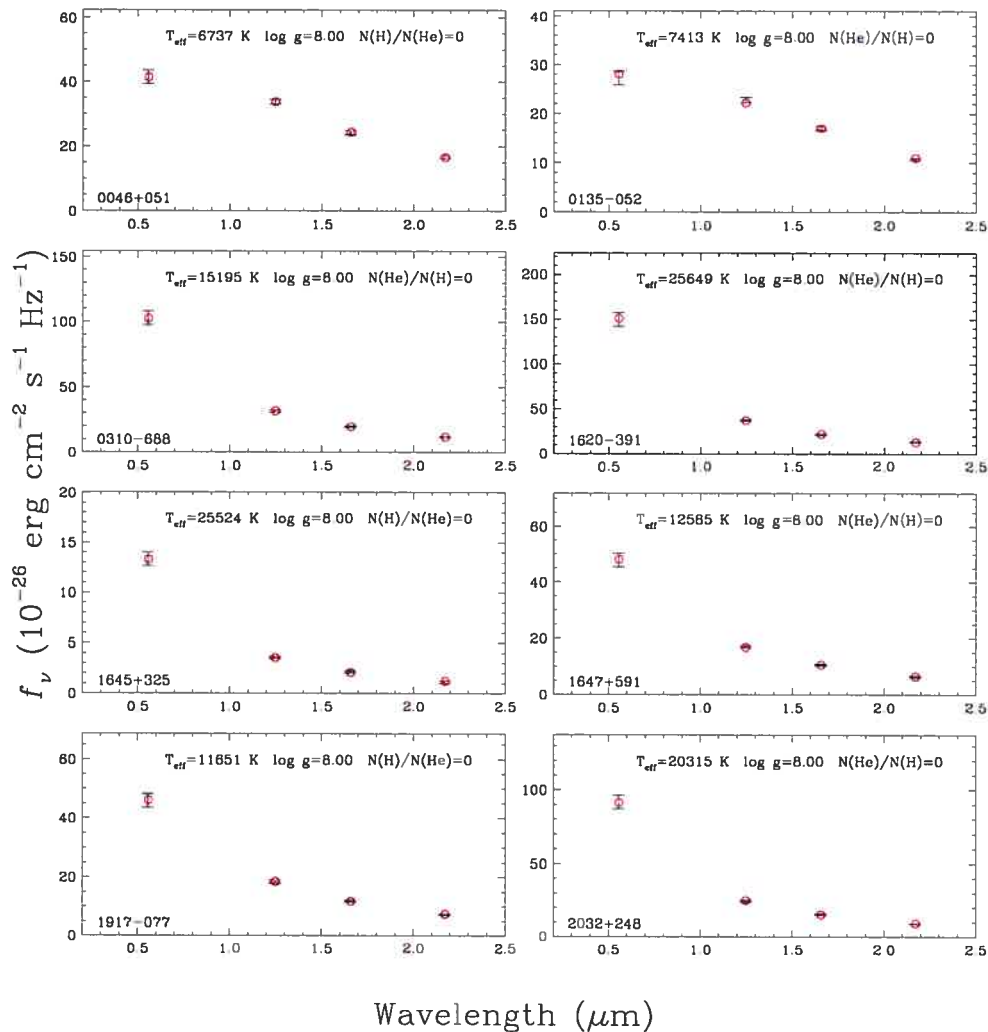


FIGURE 4.5 – Minimisation de la distribution d'énergie $VJHK_S$ (barres d'erreurs) pour huit naines blanches brillantes. Les flux prédits sont présentés par des cercles ouverts rouges et les paramètres atmosphériques obtenus par la minimisation sont donnés dans chaque sous-figure.

restreint notre analyse à des températures plus faibles que 15,000 K.

La figure 4.7 présente, pour 133 naines blanches froides, une comparaison entre nos températures et celles déterminées à partir des données photométriques de BRL97 et BLR01. Les auteurs rendent disponibles des données $BVRIJK$ indépendantes et dans certains cas la mesure de la parallaxe pour contraindre la gravité. Nous avons utilisé notre propre grille de modèles avec les données de BRL97 et BLR01 pour trouver des températures et gravités

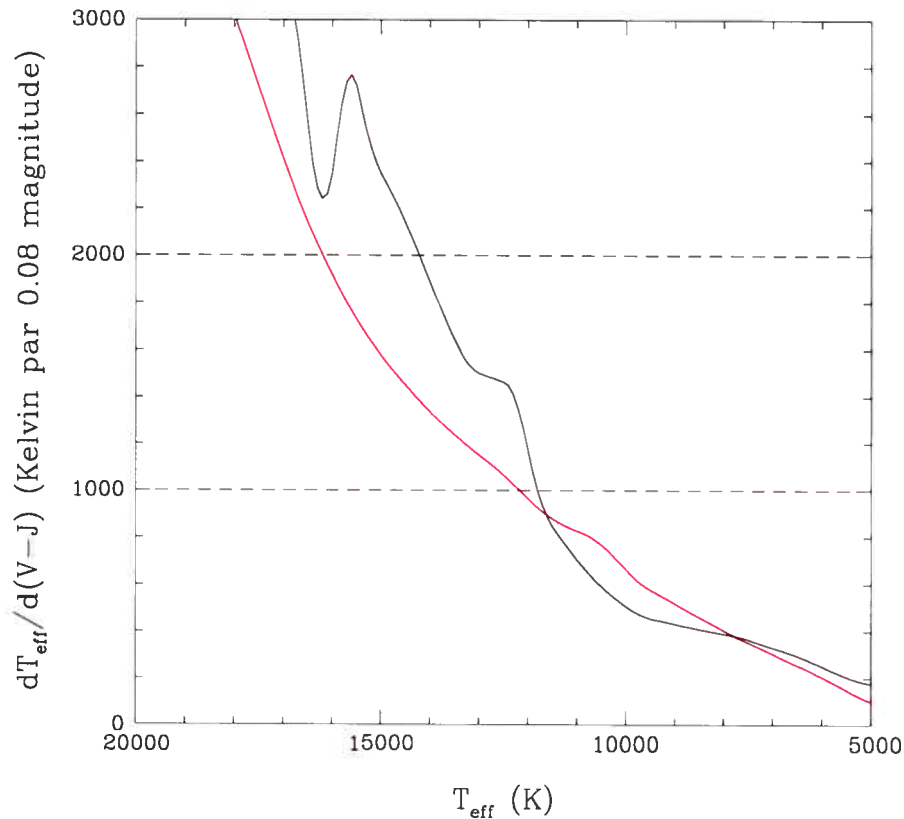


FIGURE 4.6 – Pour nos modèles riches en hydrogène (noir) et hélium (rouge), la variation de la température effective pour une variation de $(V - J)$ de 0.08 magnitude en fonction de la température effective.

légèrement différentes de celles publiées dans ces articles⁶. Pour rendre la comparaison plus homogène, on compare seulement les étoiles pour lesquelles au moins six des sept bandes photométriques $BVRIJHK$ ont été observées par ces auteurs. On remarque que l'accord est excellent à ces températures et que la photométrie $VJHK_S$ est suffisante pour contraindre la température à la précision recherchée dans notre analyse.

La figure 4.8 présente maintenant une comparaison de nos températures avec celles déterminées spectroscopiquement. Pour 189 étoiles DA, on compare avec les températures de A. Gianninas (2005, communication privée) déterminées par la minimisation du profil des raies de Balmer (Bergeron et al. 1992). On remarque que les deux échantillons sont généralement en très bon

⁶Pour les étoiles dites C₂H, on suppose une composition d'hélium pure.

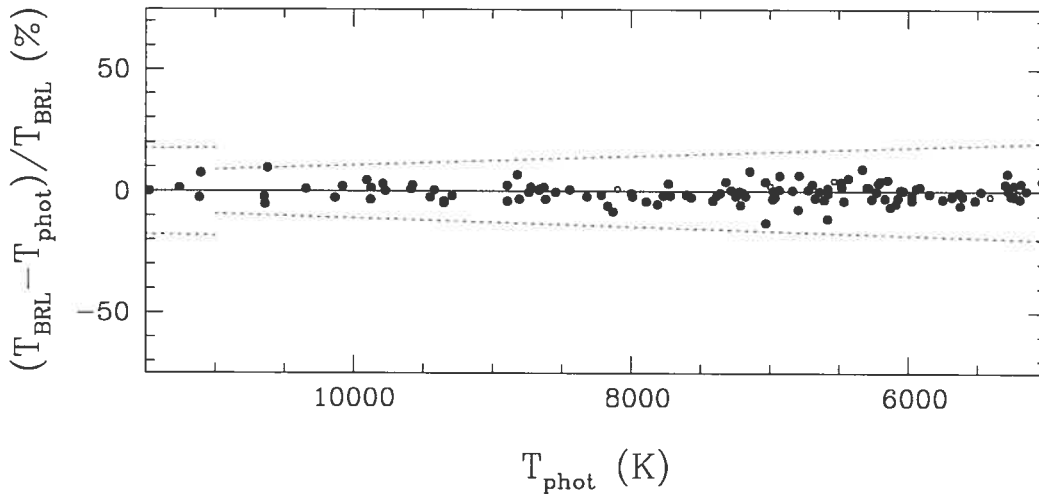


FIGURE 4.7 – Différences entre nos températures et celles déterminées à partir de l'échantillon photométrique de BRL97 et BLR01 en fonction de nos températures pour 133 naines blanches froides. La droite horizontale représente un accord parfait entre les deux échantillons. Les courbes en traits pointillés représentent les erreurs sur la température qui correspondent aux largeurs des boîtes de notre histogramme.

accord mais que pour certaines étoiles, la température spectroscopique est, de façon significative, plus grande que la température photométrique (ΔT_{eff} positif). Une première explication pour ce désaccord est que pour les températures élevées ($T_{\text{eff}} > 11,000$ K), la couleur ($V - J$) change peu avec la température (figure 4.6) et que des naines blanches chaudes avec des données photométriques ayant de grandes incertitudes viennent contaminer ces régions. Cela est confirmé par le fait que la plupart des objets montrant un désaccord sont des naines blanches près de la limite de détection de 2MASS (illustrés par des points ouverts sur la figure 4.8). Ainsi, nous ajoutons la contrainte que seules les naines blanches détectées dans les trois bandes spectrales JHK_S sont admises dans notre analyse pour $T_{\text{eff}} > 11,000$ K. Un deuxième groupe d'objets montrant un ΔT_{eff} positif sont les naines blanches binaires, pour lesquelles la température photométrique peut être substantiellement plus froide en raison de l'excès de flux infrarouge provenant du compagnon. On observe effectivement trois systèmes de deux naines blanches confirmés dans cette région de la figure 4.8 et ces objets sont discutés plus en détail dans l'annexe C. Mentionnons toutefois que dans chacun des cas, notre minimisa-

tion photométrique est excellente et le système double imite ainsi une naine blanche simple d'une température moyennée. Il est donc impossible d'éliminer les doubles dégénérées de façon systématique de notre analyse. Les résultats observationnels actuels (Farihi et al. 2005; Lajoie 2004) montrent toutefois que ce type de système n'est pas assez fréquent pour affecter notre analyse. Il reste onze autres objets avec un ΔT_{eff} plus grand que 20% (voir l'annexe C) pour lesquels il n'y pas d'explication claire. Tous ont également une minimisation photométrique acceptable. Il est probable qu'on y retrouve des étoiles avec des mesures de V imprécises.

Le bas de la figure 4.8 compare pour 18 étoiles DB nos températures avec celles trouvées par Beauchamp et al. (1996) avec le profil des raies d'hélium et leurs modèles d'atmosphère avec une composition d'hélium pure. On remarque que l'accord est excellent bien que les températures spectroscopiques soient systématiquement plus grandes d'environ 5%. Cette différence pourrait provenir du fait que l'on néglige les abondances traces d'hydrogène ou de métaux dans les modèles. Une autre source d'erreurs est l'incertitude dans les calculs d'élargissement des raies d'hélium neutre à basse température pour la minimisation spectroscopique.

La dispersion des valeurs de températures dans les comparaisons précédentes montre que des boîtes d'histogramme de largeur de 1000 K ($T_{\text{eff}} < 11,000$ K) et de 2000 K ($T_{\text{eff}} > 11,000$ K) sont acceptables. On trace à cet effet sur les figures 4.7 et 4.8 les valeurs des erreurs sur la température lorsqu'elles sont identiques à la largeur des boîtes de notre histogramme.

Dans l'annexe B, on présente notre échantillon final de 411 étoiles utilisé pour étudier le mélange convectif à la section §4.4, classé selon l'espèce dominante de l'atmosphère (tableau B.1 et B.2). On donne le résultat de notre minimisation en température, la magnitude V (y) moyenne utilisée et les magnitudes JHK_S provenant du PSC de 2MASS. Notre échantillon est près de deux fois plus grand que celui de Sion (1984) dans le *même intervalle* de température effective.

4.4 Résultats sur le mélange convectif

La figure 4.9 présente un histogramme du nombre d'objets selon la température et la composition pour les étoiles de notre échantillon final de l'annexe B. Le nombre d'étoiles total

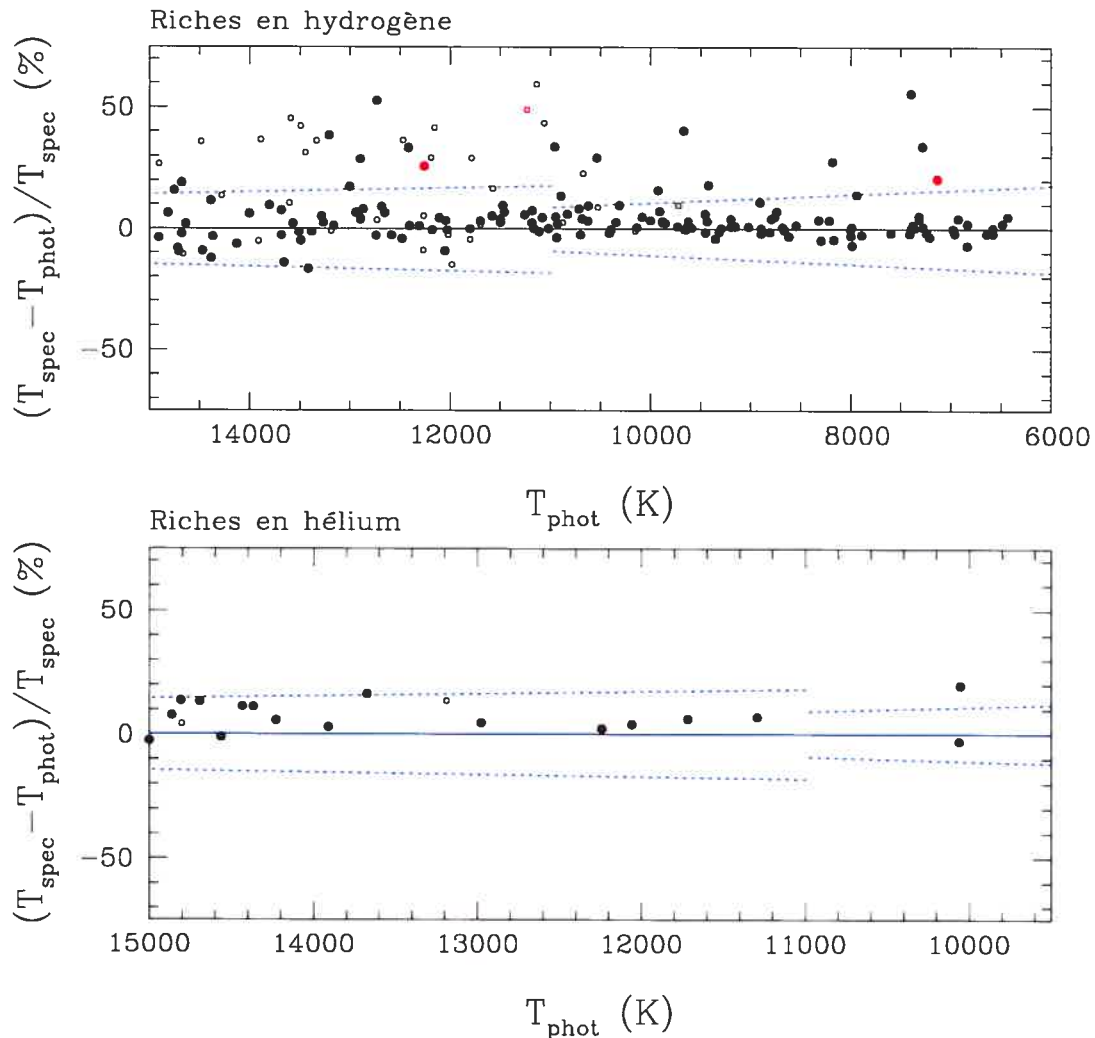


FIGURE 4.8 – *haut*: Différences entre les températures déterminées dans notre analyse et celles déterminées de façon spectroscopique par A. Gianninas (2005) pour un échantillon de 189 étoiles naines blanches DA. Les petits points ouverts représentent les étoiles pour lesquelles les flux 2MASS sont près de la limite de détection et possèdent des incertitudes formelles dans seulement deux des bandes spectrales. Les points rouges représentent des doubles dégénérées connues. Les courbes en bleu ont les mêmes fonctions que pour la figure 4.7. *bas*: Même format qu'en haut, mais en comparant les températures déterminées dans notre analyse avec celles déterminées de façon spectroscopique par Beauchamp et al. (1996) pour un échantillon de 18 étoiles DB.

pour chacune des boîtes avec $T_{\text{eff}} < 11,000$ K est sensiblement le même. Cela s'explique par la compétition entre la fonction de luminosité qui augmente avec le refroidissement et notre échantillon limité en magnitude qui défavorise les naines blanches froides. On remarque que

les étoiles riches en hydrogène composent toujours la majorité des étoiles naines blanches connues. Ainsi le processus de mélange convectif affecte seulement une faible fraction des naines blanches froides.

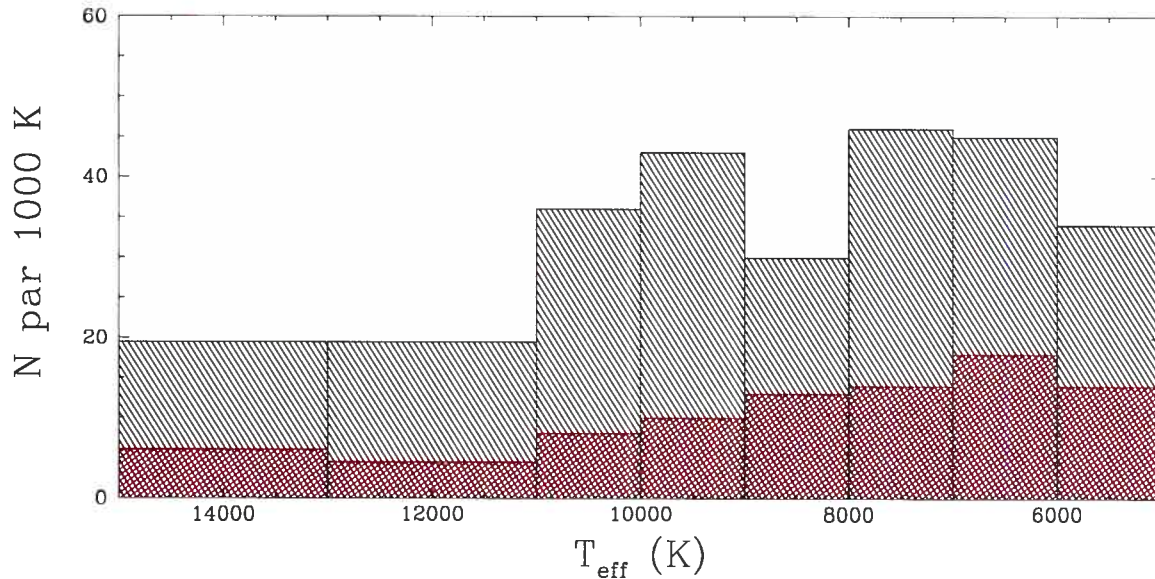


FIGURE 4.9 – Histogramme de la distribution des naines blanches en fonction de la température effective. Les boîtes pour les étoiles riches en hydrogène et en hélium sont noires et rouges respectivement. Le nombre d'étoiles par boîte est par unité de 1000 K.

Pour un échantillon limité en magnitude, comme ici en la magnitude H , on sonde seulement un certain volume de l'espace. Ce volume est défini en terme de la distance à laquelle on peut observer une naine blanche à la magnitude limite. Or, cette distance n'est pas la même pour une naine blanche riche en hydrogène ou en hélium. La figure 4.10 présente à partir de nos modèles d'atmosphère le rapport des volumes sondés pour des étoiles riches en hydrogène et en hélium. Nous corrigeons dorénavant le ratio du nombre d'étoiles riches en hélium sur le nombre d'étoiles riches en hydrogène ($N_{\text{non-DA}}/N_{\text{DA}}$) par le facteur défini sur la figure.

La figure 4.11 présente le rapport ($N_{\text{non-DA}}/N_{\text{DA}}$) avec les données de l'histogramme, en incluant l'effet systématique défini précédemment. Les barres d'erreurs sont statistiques et causées en grande partie par le nombre limité d'étoiles riches en hélium. Nous avons ajouté

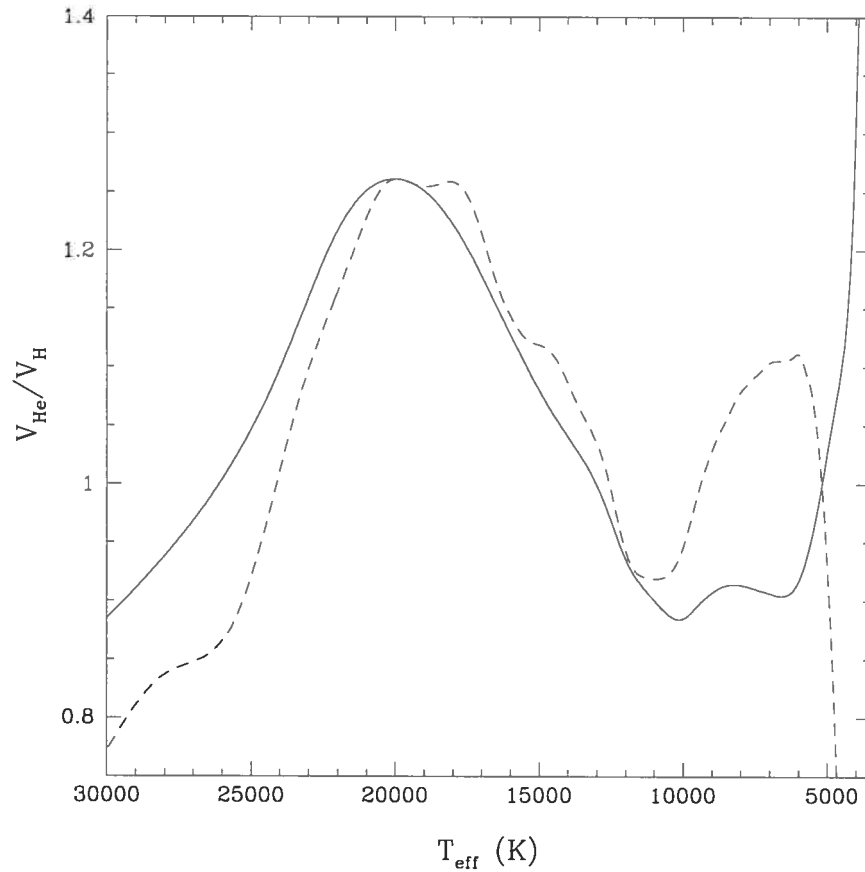


FIGURE 4.10 – Le rapport des volumes sondés pour des naines blanches riches en hélium et en hydrogène dans un relevé limité en magnitude. Notre échantillon de 2MASS, limité en H , et notre échantillon du SDSS, limité en g , sont représentés par les courbes en trait plein et en tirets respectivement.

sur la figure le rapport avec des boîtes déplacées de +500 K par rapport à la figure 4.9. Nous pouvons remarquer une seule tendance importante, soit que le ratio, qui prend une valeur constante de $1/4$ à haute température augmente rapidement vers un autre ratio constant de presque $1/2$ en deçà de $T_{\text{eff}} \sim 9000$ K.

Pour mieux comprendre les implications de ce résultat, nous présentons un modèle théorique du mélange convectif dans les naines blanches à basse température provenant de M. Forestini (1991, communication privée). La figure 4.12 montre, pour une fraction de masse d'hydrogène donnée, la température effective à laquelle il y aura un mélange convectif. Cela correspond de façon qualitative à la valeur de T_{eff} où le bas de la zone de convection d'hydrogène at-

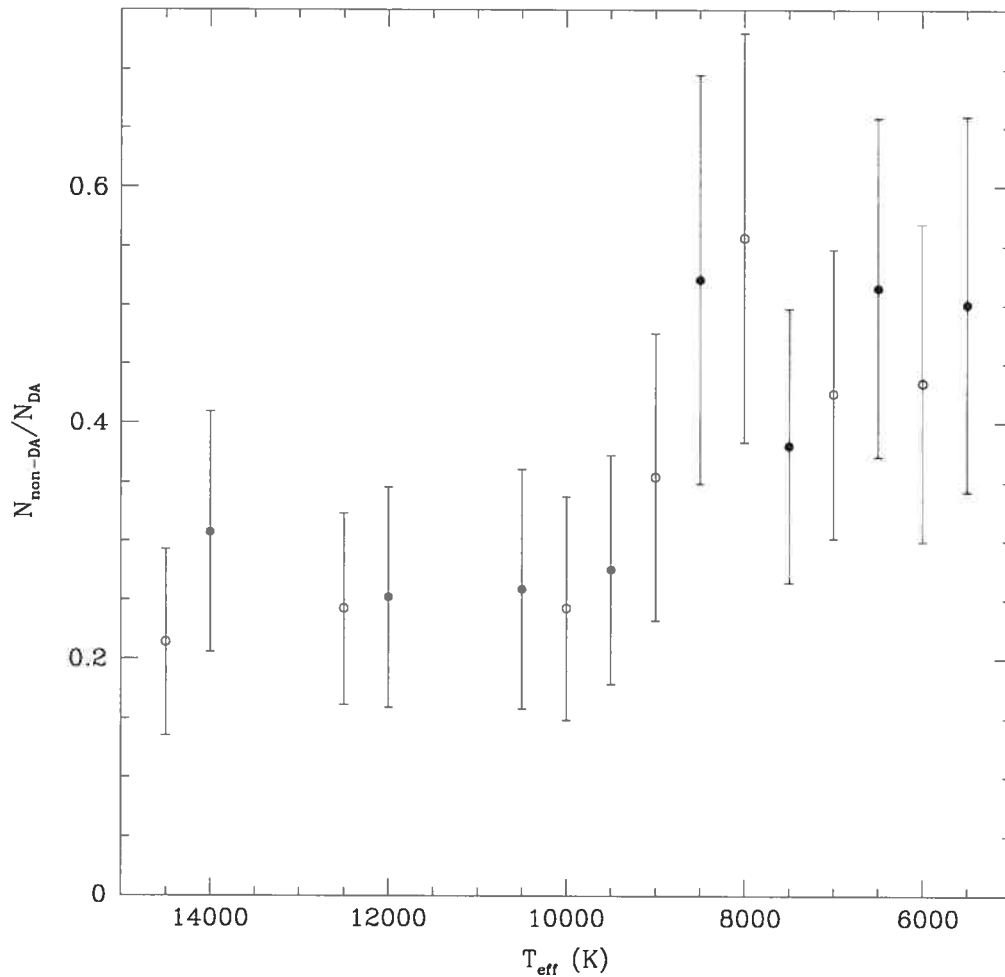


FIGURE 4.11 – Le rapport de nombre d'étoiles riches en hydrogène et riches en hélium en fonction de la température effective, corrigé pour l'effet systématique décrit dans le texte. Les points remplis utilisent les boîtes de température définies par la figure 4.9 et les points ouverts présentent le ratio pour des boîtes déplacées de +500K. Les barres d'erreurs sont statistiques.

teint la zone convective d'hélium sous-jacente. Le calcul complet procède de manière itérative puisque le mélange lui-même modifie la structure de la zone de convection mixte d'hydrogène et d'hélium. Bien que les processus exacts de mélange convectif dans les naines blanches soient encore mal connus, on peut supposer au premier ordre qu'il y aura un mélange complet des couches d'hydrogène et d'hélium. On présente à ce titre sur la figure 4.12 la composition résultante d'une naine blanche se mélangeant à une température donnée.

Une comparaison avec nos résultats implique qu'il y a peu ou pas d'étoiles DA froides

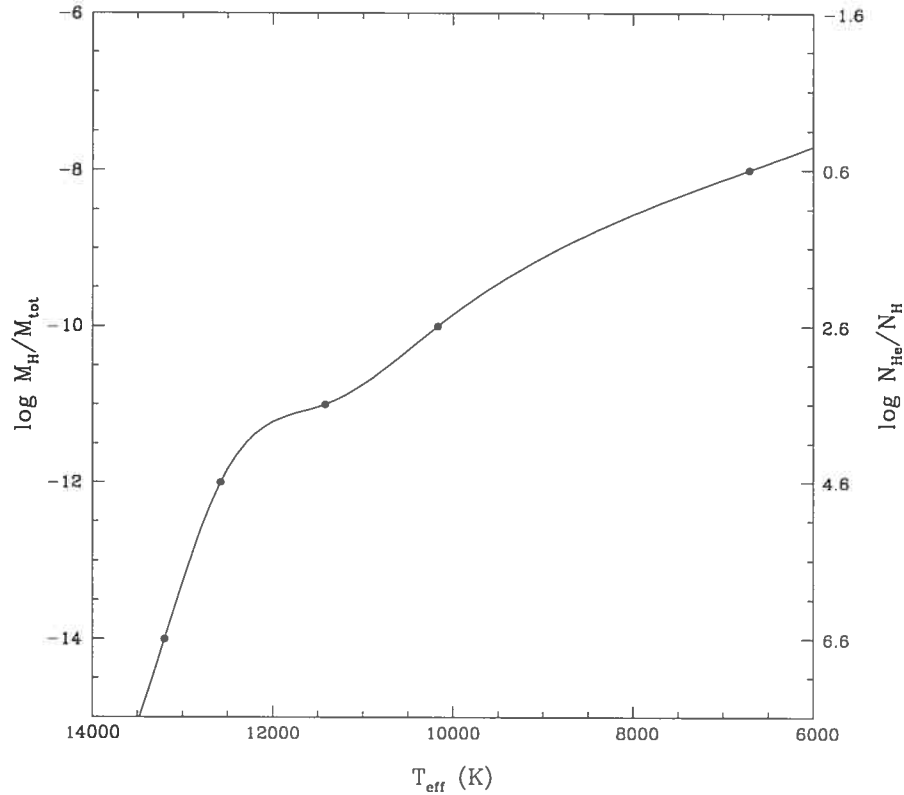


FIGURE 4.12 – La température effective à laquelle il y aura un mélange convectif pour une fraction de masse d’hydrogène donnée à partir des calculs (points remplis) de M. Forestini (1990) pour une naine blanche de $0.6 M_{\odot}$ en supposant une efficacité convective de type ML3. L’abondance d’hélium résultante d’un mélange complet des couches d’hydrogène et d’hélium est identifiée du côté droit de l’ordonnée. La courbe en trait plein est une spline pour la clarté.

avec des couches d’une épaisseur de $\log(M_{\text{H}}/M_{\text{tot}}) \lesssim -10$. L’augmentation du ratio observée autour de $T_{\text{eff}} = 9000$ K pourrait impliquer qu’une fraction⁷ de l’ordre de 15% de DA ($N_{\text{DA transformée}}/N_{\text{DA}}$) auraient une couche superficielle d’hydrogène d’une épaisseur de l’ordre de $\log(M_{\text{H}}/M_{\text{tot}}) \sim -9$. L’absence de mélange convectif à plus basse température pourrait signifier qu’il y a une discontinuité dans la distribution des épaisseurs de couches d’hydrogène dans les étoiles DA. La forte majorité des DA (85%) auraient des couches d’hydrogène massives ($\log(M_{\text{H}}/M_{\text{tot}}) > -7$).

⁷Une transformation de DA en non-DA implique le changement de ratio $(N_{\text{non-DA}}/N_{\text{DA}}) \rightarrow (N_{\text{non-DA}} + N_{\text{DA transformée}})/(N_{\text{DA}} - N_{\text{DA transformée}})$.

Nos résultats sont compatibles d'une part avec l'analyse astérosismologique des ZZ Ceti, encore à ses débuts mais qui montre que ces étoiles posséderaient des couches d'hydrogène massives de $\log(M_{\text{H}}/M_{\text{tot}}) \sim -5$ (Fontaine et al. 1992). Nos résultats sont de plus qualitativement en accord avec l'analyse des étoiles DZ (Dufour 2006) qui, par des mesures d'abondances d'hydrogène, suggère que ces objets pourraient être le résultat du mélange convectif de DA avec des masses d'hydrogène de $\log(M_{\text{H}}/M_{\text{tot}})$ allant de -11.5 à -10.5 .

4.5 Incertitudes systématiques

On discute maintenant des incertitudes systématiques qui pourraient intervenir dans notre analyse. La structure de l'atmosphère de plusieurs étoiles riches en hélium à basse température est affectée de façon significative par des traces de métaux (DZ, DQ) ou d'hydrogène (Provencal et al. 2002; Dufour et al. 2005; Dufour 2006). Puisque les atmosphères froides d'hélium pur sont très neutres et peu opaques en comparaison aux atmosphères d'hydrogène, les abondances traces (qui peuvent être invisibles spectroscopiquement) dans les DC chaudes et les DB froides peuvent également affecter les températures. Les résultats de Dufour et al. (2005; 2006) montrent que les températures en incluant les éléments traces dans les modèles d'atmosphère diminuent de façon systématique par rapport aux températures trouvées avec les modèles d'hélium pur. Ainsi, cela pourrait affecter la température et la forme de la transition observée autour de $T_{\text{eff}} = 9000$ K.

Historiquement, la partie chaude de la distribution des naines blanches a été trouvée dans des relevés d'étoiles bleues (par ex. PG, KUV) tandis que la partie froide a été trouvée par des relevés d'objets avec des mouvements propres élevés (par ex. Giclas, LHS), bien que les deux types de relevés s'entrecoupent de façon importante. Les différences entre les deux genres de relevés pourraient affecter nos résultats. La figure 4.13 présente, pour les étoiles riches en hydrogène et en hélium, l'histogramme du sous échantillon des étoiles avec des mesures de mouvements propres plus grands que 0.1 mas/an comparé avec l'histogramme de toutes les étoiles de notre échantillon. Le sous échantillon avec des mesures de mouvements propres est représentatif des étoiles trouvées dans des relevés de mouvements propres tandis que le reste contient un mélange d'étoiles avec des mouvements propres faibles et des étoiles trouvées dans

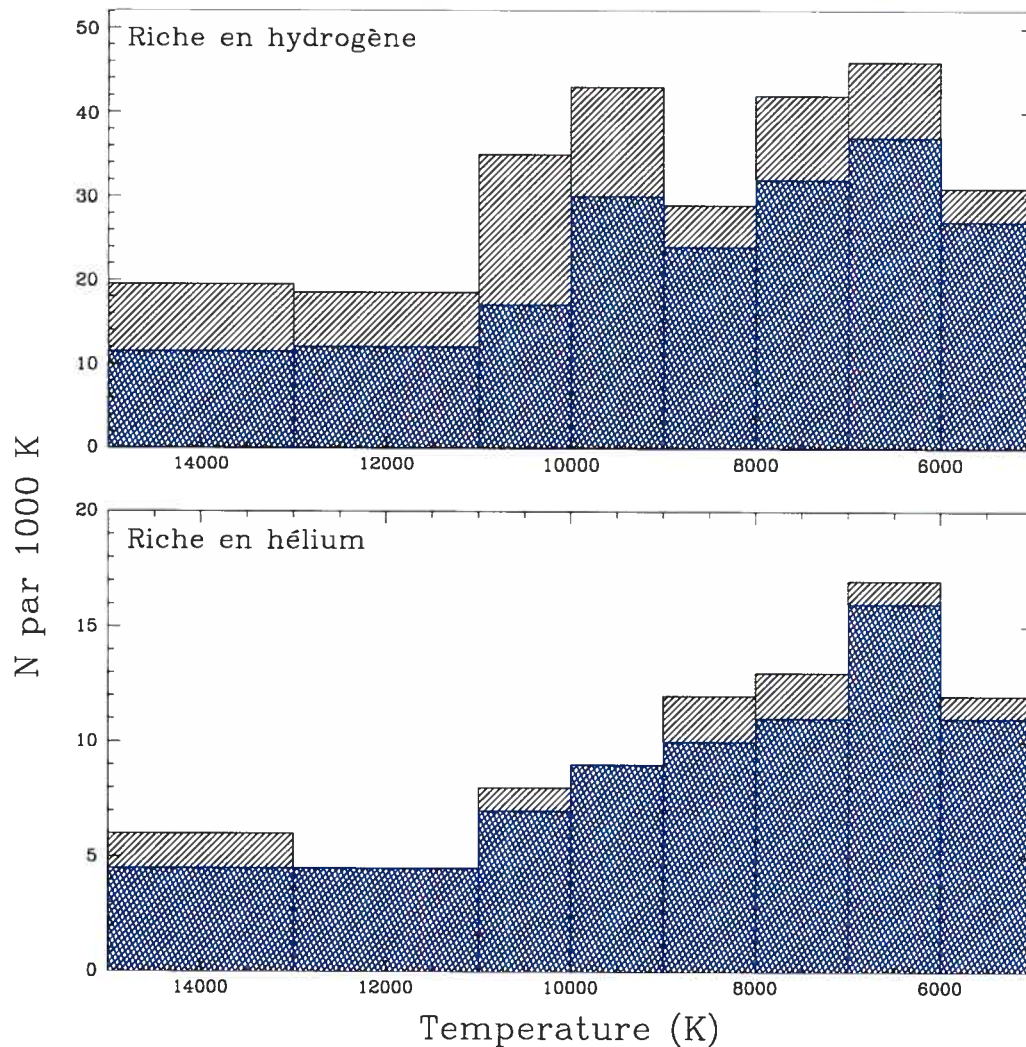


FIGURE 4.13 – *haut*: Pour les naines blanches riches en hydrogène, histogramme du nombre d'étoiles en fonction de la température effective. Les boîtes en bleues présentent le sous échantillon des étoiles avec des mesures de leurs mouvements propres plus grandes que 0.1 mas/an tandis que les boîtes en noir présentent l'échantillon complet *bas*: Même format qu'en haut, mais pour les naines blanches riches en hélium.

des relevés d'étoiles bleues. On remarque que pour les étoiles riches en hydrogène, la fraction de naines blanches sans mesure de mouvements propres est, de façon significative, plus élevée que pour les naines blanches riches en hélium. En particulier, il semble que les relevés d'étoiles bleues ajoutent presque uniquement des étoiles riches en hydrogène ($T_{\text{eff}} \gtrsim 9000\text{K}$). Bien qu'il soit possible que la disponibilité des magnitudes V pour ces objets soit favorisée puisque les naines blanches DA sont plus étudiées, nous avons vérifié que les sources de magnitudes V

pour les étoiles de notre histogramme étaient indépendantes du type spectral.

4.6 Évolution spectrale entre DA et non-DA

Ceci résume donc notre connaissance observationnelle actuelle de l'évolution spectrale entre DA et non-DA pour les naines blanches froides. Cela fait une suite directe à l'analyse de Sion (1984) en augmentant la grandeur de l'échantillon et en augmentant la précision sur la variable indépendante, ici la température effective. On confirme que l'évolution des étoiles riches en hydrogène et en hélium n'est pas indépendante et on précise l'action du processus de mélange convectif qui serait la cause de ce couplage. L'objectif immédiat sera d'obtenir un échantillon homogène avec plus d'étoiles dans le but d'obtenir un profil plus précis. Il serait intéressant de pouvoir utiliser toutes les étoiles du WDC, en mesurant des magnitudes V plus précises et pour plus d'étoiles dans le but d'améliorer les incertitudes statistiques et aussi celles sur les températures effectives. D'autre part, des données photométriques à plus courte longueur d'onde pourraient permettre d'analyser les étoiles plus chaudes que $T_{\text{eff}} = 15,000$ K.

4.7 Naines blanches binaires

Cette section vise à caractériser l'échantillon de naines blanches binaires de 2MASS, l'un des plus homogènes et larges jusqu'ici recensé. Les 96 candidats de naines blanches binaires avec un compagnon froid de la séquence principale identifiés à la section § 4.2 sont présentés dans l'annexe B avec leur photométrie JHK_S pour les objets riches en hydrogène (tableau B.3) et riches en hélium (tableau B.4). La grande majorité des candidats ont été confirmés dans la littérature comme étoiles binaires rapprochées (spectres composites) et nous discutons plus bas de quelques nouveaux cas. Puisque la couleur ($V - J$) d'un tel système est de l'ordre de ~ 2 , on s'attend à détecter dans 2MASS le compagnon froid jusqu'à un flux V limite beaucoup plus faible que pour une naine blanche simple. Ainsi pour des fins de statistiques, nous supposons comme échantillon de départ toutes les naines blanches détectées ou non dans 2MASS avec $V < 17$, dans lequel on dénombre 960 et 178 naines blanches riches en hydrogène et en hélium, respectivement. Notre échantillon de candidats binaires est pratiquement complet puisque

l'excès important en JHK_S est assez brillant pour être détecté dans 2MASS et séparé du flux de la naine blanche (voir § 4.2)⁸.

Nous obtenons 87 et 9 candidats de systèmes binaires pour les naines blanches riches en hydrogène et en hélium, respectivement. Cela implique une fraction totale de 8 ± 1 % de naines blanches binaires (avec une séparation jusqu'à $\sim 2''$) avec un compagnon froid de la séquence principale. À cela il faut ajouter les étoiles naines blanches avec un compagnon de même mouvement propre et les doubles dégénérées.

On remarque que la fraction de binaires est légèrement supérieure pour les étoiles riches en hydrogène (9 ± 1 %) en comparaison aux étoiles riches en hélium (5 ± 2 %). Cela pourrait être expliqué par le fait que certains des systèmes binaires ont déjà interagi. Toutefois, le catalogue du WDC pourrait favoriser les naines blanches DA qui sont plus facilement identifiables lorsqu'un compagnon chaud contamine de façon significative le spectre visible. Nous discutons maintenant d'objets particuliers dans les tableaux B.3 et B.4.

0928-713, 0934-587 – Les coordonnées du WDC pointent vers une dM tandis que celles du ICRS pointent dans une autre région du ciel. Le champ est très riche en étoiles et l'identification pourrait être erronée.

1436-185 – Il n'est pas clair si cet objet est une sous-naine ou une naine blanche.

0104-331, 0823+316, 0950+139, 1103-008, 1312-253, 1942+499 – Ces étoiles chaudes de type DA1 ont un excès infrarouge léger et des couleurs JHK_S compatibles avec un compagnon de type M tardif.

1100+604 – Cet objet est décrit comme une naine blanche DA de 17,920 K par Liebert et al. (2005). Le flux JHK_S montre un excès très important par rapport au flux V de Green et al. (1986). Les couleurs JHK_S sont toutefois cohérentes avec celles d'une naine blanche chaude et il est probable que la magnitude V soit significativement en erreur pour cet objet omis du tableau B.3.

⁸Ceci exclut les naines brunes pour lesquelles Tremblay & Bergeron (2006) ont montré que l'excès JHK_S pouvait ne pas être significatif, or le nombre de tel compagnons est supposé très faible (Farihi et al. 2005).

Chapitre 5

Naines blanches absorbant dans l'infrarouge

Nous avons étudié précédemment la photométrie de naines blanches dans le proche infrarouge avec $T_{\text{eff}} > 5000$ K selon la composition atmosphérique, cette dernière déterminée par les caractéristiques spectrales du visible. Or, pour les naines blanches plus froides, on ne prédit pas de raies dans le visible et il est difficile de déterminer la composition chimique. Une méthode consiste à comparer le flux émergent $BVRIJHK$ qui est différent selon l'espèce dominante de l'atmosphère (BRL97, BLR01). En effet, la fraction d'électrons ainsi que les sections efficaces diffèrent pour des modèles d'hélium et d'hydrogène¹. De plus, nous savons depuis longtemps qu'une autre opacité qui apparaît à basse température dans les naines blanches consiste en l'absorption induite par les collisions entre atomes ou molécules (CIA; Shipman 1977; Mould & Liebert 1978; Wickramasinghe et al. 1982). Cette opacité, qui possède des sections efficaces très différentes selon l'abondance d'hélium, affecte de façon plus importante la partie infrarouge du spectre. Ainsi, notre compréhension des naines blanches froides nécessite une modélisation adéquate du flux infrarouge observé.

La découverte des premières étoiles naines blanches froides montrant une absorption infrarouge significative expliquée par le CIA dans une atmosphère riche en hélium (LHS 1126;

¹En particulier, les atmosphères riches en hydrogène sont caractérisées par l'opacité de $L\alpha$ qui s'étend jusqu'au domaine du visible aux fortes densités caractéristiques des naines blanches froides (Kowalski & Saumon 2006)

Bergeron et al. 1994, LHS 3250; Harris et al. 1999) a relancé le sujet. En particulier, l'appartenance possible de certains de ces objets froids à la composante du halo en fait des candidats de la matière sombre prédite par les expériences de microlentilles (MACHO; Alcock et al. 2000, Eros; Tisserand 2005). Aujourd'hui, on connaît plus d'une dizaine de ces naines blanches froides avec une forte absorption dans l'infrarouge (souvent dites "ultra-cool" dans la littérature). Pourtant l'analyse de ces objets et la détermination de leurs paramètres restent problématiques puisque les modèles montrent des écarts importants par rapport aux observations (Bergeron & Leggett 2002; Kilic et al. 2006b). Le présent chapitre vise tout d'abord à redéfinir cette classe d'étoiles et à tenter d'expliquer leurs caractéristiques avec nos modèles du chapitre § 2.

5.1 Observations

Il existe une confusion dans la littérature à savoir ce qu'on définit comme une naine blanche "ultra-cool" (voir par ex. Farihi 2005). On pose souvent une limite en température effective ($T_{\text{eff}} < 4000$ K) mais puisqu'on ne connaît pas la température de cet objet, cette définition est dangereuse. De plus, on connaît maintenant des objets chauds (LHS 1126, WD 2008-600) avec de l'absorption infrarouge et cette classe d'étoiles n'est pas seulement reliée par la température, mais sans doute également par la composition. On étudie donc ici la classe d'étoiles répondant au critère observationnel simple d'avoir une absorption dans l'infrarouge significativement supérieure à celle prévue par les modèles avec une composition d'hydrogène et $T_{\text{eff}} > 4000$ K. Une conséquence de cette absorption est que le flux devient plus important dans le bleu et que ces naines blanches possèdent des couleurs très bleues (voir la figure 1 de Gates et al. 2004). Le tableau 5.1 présente un résumé des observations sur les objets dans cette classe.

TABLEAU 5.1 – Observations de naines blanches absorbant dans l'infrarouge

	SDSS J1337	LHS 1402	LHS 3250	WD 0343-363	GD 392B	CE 51	LHS 1126	WD 2008-600
Type	DC	DC	DC	DC	DC	DC	C ₂ H	DC?
<i>B</i> (σ_B)	19.80 (0.1)	18.73 (0.05)	18.85 (0.02)	20.5 (0.1)	20.82 (0.09)	19.84 (0.02)	15.20 (0.05)	–
<i>V</i> (σ_V)	19.30 (0.1)	18.05 (0.03)	18.07 (0.01)	19.06 (0.01)	19.50 (0.03)	18.07 (0.02)	14.50 (0.05)	15.84
<i>R</i> (σ_R)	19.1 (0.1)	18.06 (0.03)	17.74 (0.02)	18.30 (0.08)	18.80 (0.02)	17.50 (0.02)	14.08 (0.05)	15.40
<i>I</i> (σ_I)	19.2 (0.1)	18.49 (0.03)	17.87 (0.02)	17.54 (0.02)	18.06 (0.02)	17.31 (0.02)	13.71 (0.05)	14.99
<i>J</i> (σ_J)	20.38 (0.1)	19.09 (0.05)	18.33 (0.05)	17.60 (0.05)	17.73 (0.07)	16.80 (0.2)	13.32 (0.05)	14.93 (0.05)
<i>H</i> (σ_H)	20.71 (0.15)	19.43 (0.1)	18.94 (0.06)	18.2 (0.1)	18.16 (0.09)	16.40 (0.2)	13.47 (0.05)	15.23 (0.11)
<i>K</i> (σ_K)	–	–	19.19 (0.14)	19.0 (0.1)	18.53 (0.30)	–	13.71 (0.05)	–
Couverture Spectrale (μm)	0.4-0.9	0.5-1.0	0.4-2.5	0.4-2.5	0.4-1.0	0.4-0.6	0.15-0.95	0.6-0.8
π (σ_π)	–	–	33.04 (0.5)	25.8 (0.6)	–	–	101.2 (10.4)	–
Références	2,3 (JH)	6,7	1,4	4,5	8	9 (BVRI) 2MASS (JH)	10, 11	12

	SDSS J0947	SDSS J1220	SDSS J1001	SDSSJ1403	SDSS J0854
Type	DC	DC	DC	DC	DC
<i>u</i> (σ_u)	20.77 (0.06)	22.42 (0.04)	21.40 (0.01)	23.68 (0.07)	20.12 (0.06)
<i>g</i> (σ_g)	19.47 (0.01)	20.34 (0.02)	20.02 (0.02)	20.52 (0.03)	18.91 (0.01)
<i>r</i> (σ_r)	18.85 (0.01)	19.32 (0.01)	19.58 (0.02)	19.38 (0.02)	18.93 (0.01)
<i>i</i> (σ_i)	18.94 (0.01)	19.45 (0.02)	19.98 (0.03)	19.05 (0.02)	19.47 (0.03)
<i>z</i> (σ_z)	19.44 (0.05)	19.87 (0.01)	20.52 (0.02)	18.89 (0.05)	19.77 (0.01)
Couverture Spectrale (μm)	0.4-0.9	0.4-0.9	0.4-0.9	0.4-0.9	0.4-0.9
Références	13	13	13	13	13

Références : (1) Harris et al. (1999), (2) Harris et al. (2001), (3) Bergeron & Leggett (2002), (4) Oppenheimer et al. (2001), (5) H. J. Harris (2005, communication privée), (6) Bergeron et al. (2005), (7) Oppenheimer et al. (2001), (8) Farihi (2004), (9) Ruiz & Bergeron (2001), (10) Bergeron et al. (1997), (11) Wolff et al. (2002), (12) Subasavage et al. (2005), (13) Gates et al. (2004). LHS1126 a également des observations du Spitzer Space Telescope (4.5 μm , 8 μm) provenant de Kilic et al. (2006b).

5.2 Connaissances actuelles

La figure 5.1 montre notre meilleure minimisation photométrique *BVRIJHK* pour LHS 3250 en utilisant la grille² du chapitre § 2 et la méthode décrite en § 4.2. Nous avons utilisé les filtres de Bessell (1990) pour intégrer le flux monochromatique et la valeur de la parallaxe trigonométrique pour contraindre la gravité. Toutes les données spectroscopiques existantes pour cet objet sont également présentées. On remarque que la minimisation n'est pas satisfaisante ($\chi^2 = 2.9$) et comparable aux résultats publiés (Bergeron & Leggett 2002). Ceci est également le cas pour tous les autres objets du tableau 5.1 et pour cette raison, on omet la présentation de la détermination des paramètres. La présente section vise plutôt à identifier le désaccord avec les observations.

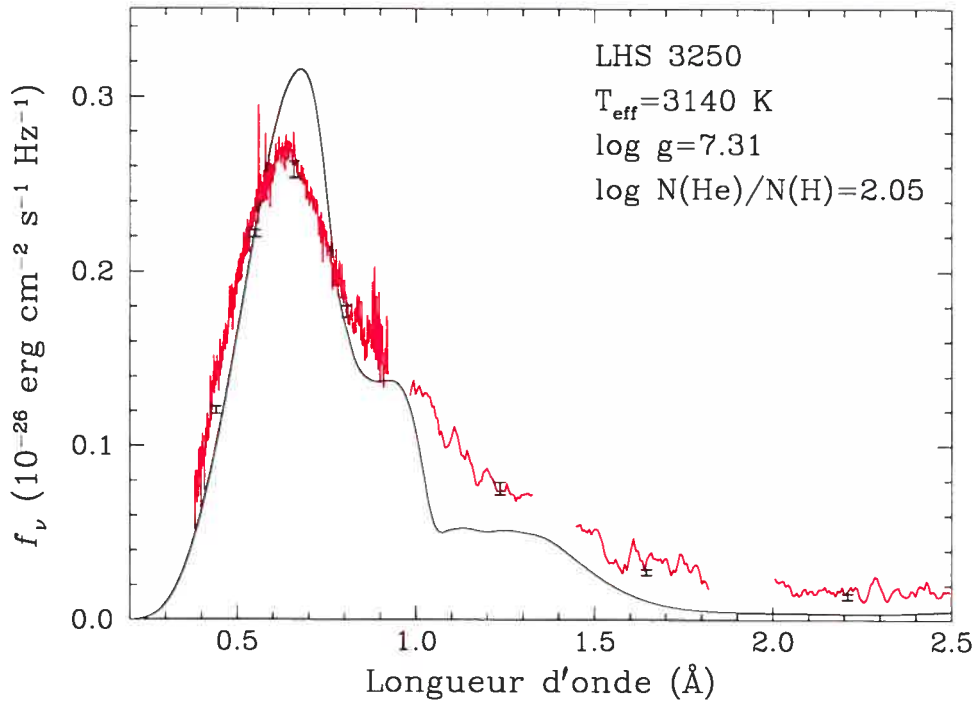


FIGURE 5.1 – La minimisation de la photométrie *BVRIJHK* (barres d'erreurs) de LHS 3250 avec le spectre monochromatique (trait plein) qui correspond aux paramètres optimaux identifiés sur la figure. Les flux intégrés théoriques ayant servi à la minimisation sont omis pour plus de clarté. Le spectre observé est superposé en rouge.

²On utilise ici un gaz parfait, les effets non-idéaux sont discutés plus bas.

5.2.1 Contraintes

On débute par les quelques contraintes apportées par les observations.

Températures effectives – La seule contrainte importante sur les températures effectives sont les quelques mesures de la parallaxe. Si on suppose une masse dans la moyenne ($\log g \sim 8$), on peut avoir une estimation de la température, qui prend des valeurs de $T_{\text{eff}} \sim 3500$ (LHS 3250) jusqu'à ~ 5500 K (LHS 1126).

Compositions – LHS 1126 possède une absorption inconnue, dite C_2H , dans le visible. Bien que cela ne nous apporte pas de contrainte directe, la présence de bandes d'absorption et l'absence de $\text{H}\alpha$ à $T_{\text{eff}} \sim 5500$ K suggèrent fortement que l'hélium est l'élément dominant de l'atmosphère.

5.2.2 Pistes de solutions

On discute maintenant des pistes de solutions possibles en allant vers la plus probable :

Espace des paramètres – Nous avons vérifié par des cartes du χ^2 dans l'espace des paramètres qu'il n'existe pas de solution acceptable pour aucun des objets. Cependant, nous trouvons qu'il existe dans certains cas une dégénérescence avec des χ^2 similaires pour différentes compositions mixtes et températures effectives. Ceci illustre bien notre ignorance de la composition et de la température de cet objets.

Compositions chimiques – En plus de l'hydrogène et de l'hélium, Bergeron & Leggett (2002) ont exploré l'effet d'abondances traces de métaux dans les atmosphères de naines blanches froides. Les auteurs montrent que les métaux ont un effet important sur le flux émergent mais n'améliorent pas la qualité de la minimisation de LHS 3250. L'effet principal des métaux (ou du HeH^+) est de fournir des électrons libres, or on peut produire le même effet en augmentant le ratio de l'hydrogène sur l'hélium. De façon imagée, on pourrait dire qu'on n'obtient pas de nouvelles solutions mais on fait seulement redistribuer les paramètres.

Équation d'état – Pour des paramètres représentatifs des atmosphères de LHS 3250 et LHS 1126, nous montrons à la Figure 5.2 la différence entre des modèles calculés avec une équation d'état idéal et des modèles avec notre grille du chapitre § 2. On remarque que les effets non-idéaux doivent être pris en compte pour LHS 3250. Cependant, pour le modèle de composition mixte

à $T_{\text{eff}} = 5500$ K, les effets non-idéaux sont négligeables et ne peuvent pas expliquer les flux de LHS 1126 observés par Spitzer (Kilic et al. 2006b). Dans tous les modèles étudiés, la molécule H_2 persiste dans la région photosphérique ($\tau \sim 1$) sans être dissociée. Ceci explique que bien qu'il y ait une redistribution du flux avec les effets non-idéaux, l'opacité est toujours dominée par le CIA $\text{H}_2\text{-H}_2$ et He-H_2 dont les caractéristiques déterminent le profil en fréquences du spectre. Ainsi comme pour le paragraphe précédent, on n'obtient pas de *nouvelles solutions*.

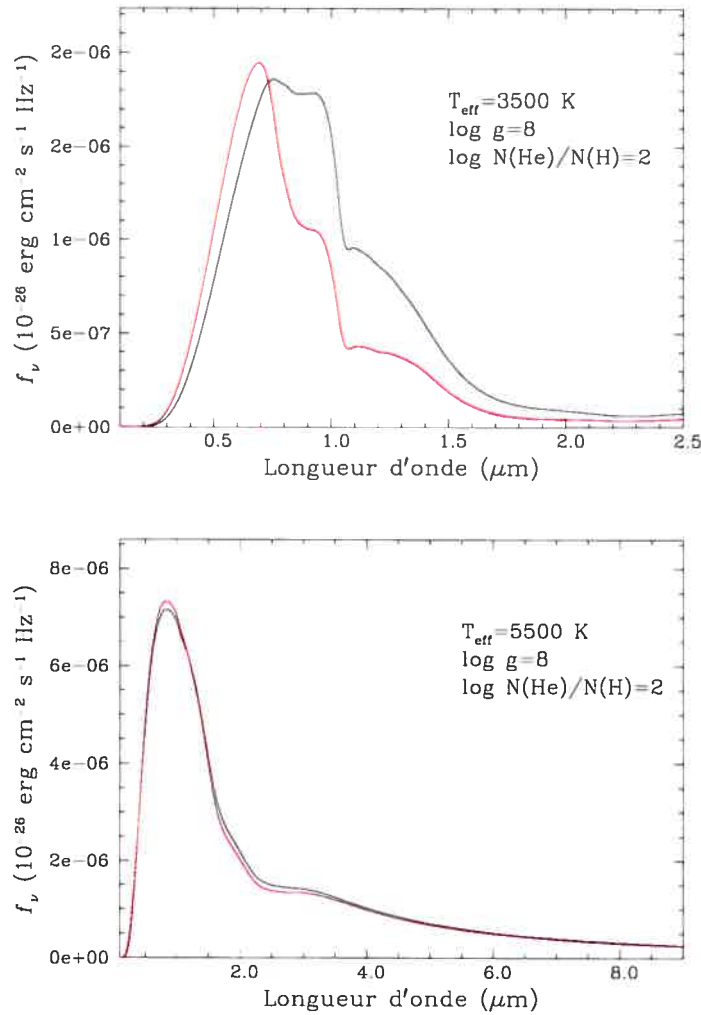


FIGURE 5.2 – *haut* : Comparaison entre le spectre théorique calculé avec une équation d'état non-idéale de HM88 (trait noir) et avec une équation d'état idéal (trait rouge) pour des paramètres atmosphériques caractéristiques de LHS 3250 (identifiés sur la figure). *bas* : Même figure mais pour des paramètres atmosphériques caractéristiques de LHS 1126.

Opacité manquante – Il est possible que l'absorption infrarouge soit expliquée par une ou des

opacités qui manquent à notre modèle. Cette opacité pourrait provenir des constituants principaux de l'atmosphère ou d'une espèce trace qui a été négligée. Cette dernière possibilité est suggérée par la présence d'une bande d'absorption inconnue dans le visible pour LHS 1126. Nous avons calculé une opacité ad-hoc qui reproduit le spectre observé de LHS 3250 (figure 5.2). Nous avons supposé une opacité de type CIA qui dépend de façon quadratique de la densité et nous avons cherché la section efficace qui reproduisait le mieux le spectre observé. Sur la figure 5.3, on remarque que l'opacité ad-hoc prend une forme très similaire aux opacités du CIA et en particulier, elle ressemble beaucoup à l'opacité He-H (négligeable dans nos modèles). Cela suggère fortement que des opacités de type CIA sont responsables de l'absorption.

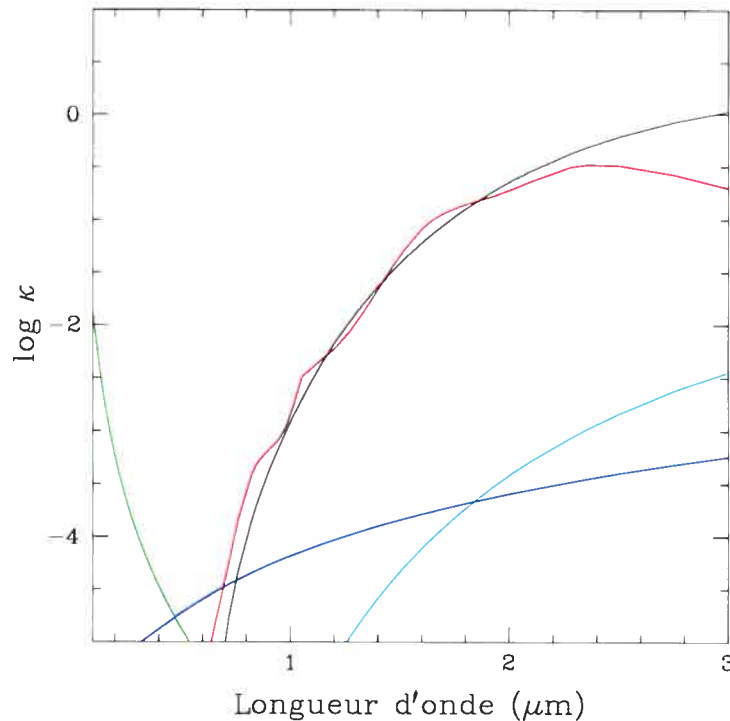


FIGURE 5.3 – La section efficace ad-hoc qui permet de reproduire le spectre observé de LHS 3250, avec $T_{\text{eff}} = 3500$ K et $\log g = 8$. On présente l'opacité résultante (trait noir) pour $T = 3500$ K, $\log P = 10$ et $N(\text{He})/N(\text{H})=100$. On présente également les opacités dominantes pour un gaz réel aux mêmes conditions, avec le CIA $\text{H}_2\text{-He}$ (rouge), le CIA He-H (cyan), le He^- (bleu) et la diffusion Rayleigh (vert).

Absorption induite par collisions à hautes densités – L'opacité du CIA $\text{H}_2\text{-H}_2$ et He-H_2 prédit des maximums d'absorption aux longueurs d'onde qui correspondent aux transitions de vi-

brations de la molécule H_2 . Ces transitions ne sont tout simplement pas observées dans les spectres (par exemple voir la figure 5.2). Les opacités du CIA utilisées sont celles à basses densités avec une correction pour les collisions à trois corps (Lenzuni & Saumon 1992). Cette correction approximative est indépendante de la fréquence et il serait important de faire les calculs exacts à haute densité ce qui est au delà des objectifs de cet ouvrage.

Chapitre 6

Conclusion

Dans le but d'analyser l'ensemble disponible des données photométriques dans le domaine infrarouge, nous avons tout d'abord présenté notre grille de modèles d'atmosphère. Cette dernière permet d'analyser de façon homogène les naines blanches avec une fraction arbitraire d'hélium et d'hydrogène pour un large intervalle de températures effectives. D'autre part, nous avons déterminé que les incertitudes des données publiées, dans les systèmes *CIT*, *2MASS* et du *Spitzer Space Telescope* étaient généralement fiables. Ceci nous a permis d'utiliser ces ensembles photométriques, couplés avec d'autres observations publiées dont la magnitude V , et de les comparer avec les prédictions de modèles d'atmosphère. Nous avons cherché, pour diverses applications (échantillons), à déterminer les paramètres atmosphériques (température effective, gravité) et les anomalies.

Dans un premier temps, nous avons démontré que la base de données *2MASS*, couplée avec la méthode de prédiction du flux infrarouge, est utile pour identifier systématiquement les naines blanches avec un compagnon froid de la séquence principale, que nous avons recensées à la section § 4.7. De plus, nous avons démontré qu'il n'était pas possible d'identifier systématiquement des disques froids autour de naines blanches avec *2MASS* et qu'on doit recourir à des données dans l'infrarouge moyen (par ex. *Spitzer*) où la composante du disque froid domine.

Dans un second temps, la détermination du ratio du nombre détoiles de type non-DA sur DA en fonction de la température effective dans l'échantillon de naines blanches froides de

2MASS ($5000 < T_{\text{eff}} < 15000$ K) montre l'évidence d'un processus qui modifie le type spectral dominant. Nous suggérons que le mélange convectif de la couche superficielle d'hydrogène est responsable de la transition du type DA vers non-DA. Nos résultats montrent que ce mélange affecterait seulement une petite fraction des naines blanches DA ($\sim 15\%$) ayant une couche superficielle d'hydrogène suffisamment mince ($M_{\text{H}}/M_{\text{tot}} \sim 10^{-10}$).

Finalement, nous avons analysé l'évolution spectrale à très basses températures ($T_{\text{eff}} < 5000$ K) où l'absence de caractéristiques spectrales rend la détermination de la composition atmosphérique difficile. Nous avons montré que notre incapacité à bien modéliser l'absorption infrarouge que l'on observe dans certaines de ces étoiles froides ne permet pas de connaître la composition de ces objets. Nous concluons qu'il faudra améliorer les calculs de l'absorption induite par les collisions à hautes densités pour comprendre ces objets.

Bibliographie

- Alcock, C., et al. 2000, ApJ, 542, 281
- Allard, N. F., Koester, D., Feautrier, N., & Spielfiedel, A. 1994, A&AS, 108, 417
- Baglin, A. & Vauclair, G. 1973, A&A, 27, 307
- Beauchamp, A. 1995, Thèse de Ph. D., Université de Montréal
- Beauchamp, A., Wesemael, F., Bergeron, P., Liebert, J., & Saffer, R. A. 1996, ASP Conf. Ser. 96: Hydrogen Deficient Stars, 96, 295
- Beauchamp, A., Wesemael, F., Bergeron, P., Fontaine, G., Saffer, R. A., Liebert, J., & Brassard, P. 1999, ApJ, 516, 887
- Bell, K. L. 1980, Journal of Physics B Atomic Molecular Physics, 13, 1859
- Bergeron, P., Liebert, J., & Greenstein, J. L. 1990, ApJ, 361, 190
- Bergeron, P., Wesemael, F., & Fontaine, G. 1991, ApJ, 367, 253
- Bergeron, P., Saffer, R. A., & Liebert, J. 1992a, ApJ, 394, 228
- Bergeron, P., Ruiz, M.-T., Leggett, S. K., Saumon, D., & Wesemael, F. 1994, ApJ, 423, 456
- Bergeron, P., Saumon, D., & Wesemael, F. 1995, ApJ, 443, 764
- Bergeron, P., Ruiz, M. T., & Leggett, S. K. 1997, ApJ, 133, 413
- Bergeron, P., Leggett, S. K., & Ruiz, M. T. 2001, ApJ, 133, 413
- Bergeron, P., & Leggett, S. K. 2002, ApJ, 580, 1070
- Bergeron, P., Ruiz, M. T., Hamuy, M., Leggett, S. K., Currie, M. J., Lajoie, C.-P., & Dufour, P. 2005, ApJ, 625, 838
- Bessell, M. S. 1990, PASP, 102, 1181

- Borysow U. G., Jorgensen, A., & Fu, Y. 2001, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 68, 235
- Brassard, P., & Fontaine, G. 2006, *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 77, 439
- Winisdoerffer, C., & Chabrier, G. 2005, *Phys. Rev. E*, 71, 026402
- Cohen, M., Wheaton, W. A., & Megeath, S. T. 2003, *AJ*, 126, 1090
- Dalgarno, A., & Williams, D. A. 1962, *ApJ*, 136, 690
- Dufour, P., Bergeron, P., & Fontaine, G. 2005, *ApJ*, 627, 404
- Dufour, P. 2006, Thèse de Ph. D., Université de Montréal
- Engel, E. A., Doss, N., Harris, G. J., Tennyson, J. 2005, *MNRAS*, 357, 471
- Farihi, J. 2004, *ApJ*, 610, 1013
- Farihi, J., Becklin, E. E., & Zuckerman, B. 2005, *ApJS*, 161, 394
- Farihi, J. 2005, *AJ*, 129, 2382
- Fontaine, G., & Wesemael, F. 1987, *IAU Colloq. 95: Second Conference on Faint Blue Stars*, 319
- Fontaine, G., & Wesemael, F. 1991, *IAU Symp. 145: Evolution of Stars: the Photospheric Abundance Connection*, 145, 421
- Fontaine, G., Brassard, P., Bergeron, P., & Wesemael, F. 1992, *ApJ*, 399, L91
- Friedrich, S., Koester, D., Christlieb, N., Reimers, D., & Wisotzki, L. 2000, *A&A*, 363, 1040
- Gates, E., et al. 2004, *ApJ*, 612, L129
- Green, R. F., Schmidt, M., & Liebert, J. 1986, *ApJS*, 61, 305
- Gustafsson, M., & Frommhold, L. 2001, *ApJ*, 546, 1168
- Gustafsson, M., & Frommhold, L. 2003, *A&A*, 400, 1161
- Harris, H. C., Dahn, C. C., Vrba, F. J., Henden, A. A., Liebert, J., Schmidt, G. D., & Reid, I. N. 1999, *ApJ*, 524, 1000
- Harris, H. C., et al. 2001, *ApJ*, 549, L109
- Holberg, J. B., & Magargal, K. 2005, *ASP Conf. Ser. 334: 14th European Workshop on White Dwarfs*, 334, 419

- Holberg, J. B., & Bergeron, P. 2006, *AJ*, 132, 1221
- Hummer, D. G., & Mihalas, D. 1988, *ApJ*, 331, 794
- Mihalas, D., Dappen, W., & Hummer, D. G. 1988, *ApJ*, 331, 815
- John, T. L. 1968, *MNRAS*, 138, 137
- John, T. L. 1988, *A&A*, 193, 189
- John, T. L. 1994, *MNRAS*, 269, 871
- Jørgensen, U. G., Hammer, D., Borysow, A., & Falkesgaard, J. 2000, *A&A*, 361, 283
- Kilic, M., et al. 2006, *AJ*, 131, 582
- Kilic, M., von Hippel, T., Mullally, F., Reach, W. T., Kuchner, M. J., Winget, D. E., & Burrows, A. 2006b, *ApJ*, 642, 1051
- Kissel, L. 2000, *Radiation Physics and Chemistry*, 59, 185
- Koester, D. 1976, *A&A*, 52, 415
- Koester, D., et al. 2001, *A&A*, 378, 556
- Koester, D., Rollenhagen, K., Napiwotzki, R., Voss, B., Christlieb, N., Homeier, D., & Reimers, D. 2005, *A&A*, 432, 1025
- Kurucz, R. L. 1970, *SAO Special Report*, 309
- Lajoie, C. F. 2004, *Mémoire de M. Sc.*
- Lenzuni, P., & Saumon, D. 1992, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, vol. 23, 23, 223
- Lemke, M. 1997, *A&AS*, 122, 28
- Liebert, J., Bergeron, P., & Holberg, J. B. 2005, *ApJS*, 156, 47
- MacDonald, J., & Vennes, S. 1991, *ApJ*, 371, 719
- Mihalas, D. 1978, San Francisco, W. H. Freeman and Co., 1978. 650 p.,
- Mould, J., & Liebert, J. 1978, *ApJ*, 226, L29
- Neale, L., & Tennyson, J. 1995, *ApJ*, 454, L169
- Olsen, E. C. 1974, *PASP*, 86, 80

- Oswalt, T. D., Sion, E. M., Hammond, G., Vauclair, G., Liebert, J. W., Wegner, G., Koester, D., & Marcum, P. M. 1991, *AJ*, 101, 583
- Oppenheimer, B. R., et al. 2001, *ApJ*, 550, 448
- Oppenheimer, B. R., Hambly, N. C., Digby, A. P., Hodgkin, S. T., & Saumon, D. 2001, *Science*, 292, 698
- Provencal, J. L., Shipman, H. L., Koester, D., Wesemael, F., & Bergeron, P. 2002, *ApJ*, 568, 324
- Putney, A. 1997, *ApJS*, 112, 527
- Ruiz, M. T., & Bergeron, P. 2001, *ApJ*, 558, 761
- Saha, S., Datta, K. K., & Barua, A. K. 1978, *Journal of Physics B Atomic Molecular Physics*, 11, 3349
- Saumon, D. 1990, Ph.D. Thesis
- Saumon, D., & Chabrier, G. 1991, *Phys. Rev. A*, 44, 5122
- Schmidt, G. D., Vennes, S., Wickramasinghe, D. T., & Ferrario, L. 2001, *MNRAS*, 328, 203
- Shipman, H. L. 1972, *ApJ*, 177, 723
- Shipman, H. L. 1977, *ApJ*, 213, 138
- Sion, E. M. 1984, *ApJ*, 282, 612
- Sion, E. M. 1996, *ASP Conf. Ser. 96: Hydrogen Deficient Stars*, 96, 223
- Stancil, P. C. 1994, *ApJ*, 430, 360
- Strittmatter, P. A. & Wickramasinghe, D. T. 1971, *MNRAS*, 152, 47
- Subasavage, J. P., Henry, T. J., Hambly, N. C., Brown, M. A., & Jao, W.-C. 2005, *AJ*, 129, 413
- Tisserand, P. 2005, *SF2A-2005: Semaine de l'Astrophysique Francaise*, 569
- Tremblay, P.-E., & Bergeron, P. 2006, *ArXiv Astrophysics e-prints*, arXiv:astro-ph/0611899
- Vauclair, G. & Reisse, C. 1977, *A&A*, 61, 415
- Wachter, S., Hoard, D. W., Hansen, K. H., Wilcox, R. E., Taylor, H. M., & Finkelstein, S. L. 2003, *ApJ*, 586, 1356

Wesemael, F., van Horn, H. M., Savedoff, M. P., & Auer, L. H. 1980, ApJS, 43, 159

Wickramasinghe, D. T., Allen, D. A., & Bessell, M. S. 1982, MNRAS, 198, 473

Wolff, B., Koester, D., & Liebert, J. 2002, A&A, 385, 995

Remerciements

Pour sa direction lors de mon projet de mémoire, son aide essentielle et l'idée originale des thèmes présentés dans cet ouvrage, je tiens à remercier Pierre Bergeron. De plus, le mémoire ne serait pas aussi complet sans l'aide des mes collègues, Patrick Dufour et Alexandros Gianninas et l'expérience acquise dans notre groupe de recherche à partir des travaux de Gilles Fontaine et François Wesemael. Je remercie de plus mes parents et amis avec qui j'ai pu partagé mon enthousiasme quant à mes projets et qui m'ont encouragé tout au long du processus de la maîtrise.

Annexe A

Précisions sur l'équation d'état

A.1 Ionisation par pression

Comme il est mentionné dans Mihalas et al. (1988, voir l'annexe B de Mihalas), on doit tenir compte du terme de deuxième ordre de l'interaction entre les particules neutres pour permettre l'ionisation par pression. On multiplie donc la probabilité d'occupation par le terme w^{n2} qui prend la valeur

$$w_{i,j}^{n2} = \exp \left(-C \left[\frac{4\pi}{3} \sum_k n_k (r_{i,1} + r_{k,1})^3 \right]^2 \right) \quad (\text{A.1})$$

où C est un coefficient numérique et tous les rayons sont ceux de l'état fondamental. Puisque ce terme affecte de façon égale l'état fondamental et tous les niveaux excités, il peut être vu comme une modification du potentiel d'ionisation. Ce terme prend essentiellement la valeur 1 jusqu'à ce que la densité soit assez élevée pour permettre une ionisation par pression brusque (< 0.1 dex en pression). On ajoute également la correction correspondante sur la pression totale. On choisit $C=10$ pour que l'ionisation par pression se produise lorsque le terme du premier ordre dans la pression soit une fraction importante de la pression totale. Pour une atmosphère riche en hydrogène, l'ionisation par pression se produit à $\rho_I \sim 0.1 \text{ g cm}^{-3}$, pour $4000 < T < 10000 \text{ K}$. Pour une atmosphère riche en hélium dans le même intervalle de températures, la transition se produit à $\rho_I = 4-7 \text{ g cm}^{-3}$. Il est à noter que le régime transitoire

entre les régimes neutre et ionisé est beaucoup plus complexe que la description approximative¹ de HM88, faute entre autres d'avoir des mesures expérimentales pour calibrer le paramètre libre C . Notons néanmoins que nos valeurs de ρ_I se rapprochent de celles prédites par Saumon & Chabrier (1991) et Winisdoerffer & Chabrier (2005).

A.2 Quantités thermodynamiques

L'énergie et l'entropie de chaque couche atmosphérique sont des quantités nécessaires au calcul du flux convectif. La formulation de ces quantités pour un gaz idéal reste valide, mais avec la fonction de partition de HM88 (éq. 2.3). À cela, nous ajoutons la contribution des électrons dégénérés :

$$U_e = \frac{2}{3} P_e \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{S_e}{k} = -\frac{\mu}{kT} n_e + 5 \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} f_{5/2}(-\mu/kT) \quad (\text{A.3})$$

A.3 Illustration de l'équation d'état

Les figures A.1 et A.2 comparent dans le plan $\log P - \log \rho$ notre équation d'état à celle d'un gaz parfait pour $T = 5000$ K et des compositions d'hydrogène et d'hélium. La densité non-idéale est plus faible puisque la pression d'interaction entre les neutres et la pression de dégénérescence électronique contribuent de façon positive à la pression totale. Pour la composition d'hydrogène, on remarque un saut associé à l'ionisation par pression de l'hydrogène qui peut être vu comme une transition de phase.

La figure A.3 montre le plan $\log P - U$ pour une composition d'hydrogène et $T = 5000$ K. On remarque que l'énergie interne du gaz non-idéal est inférieure à celle du gaz idéal dans le régime du plasma neutre, ce qui est expliqué par le fait que les états d'énergie excités sont détruits par les interactions. L'énergie interne augmente ensuite rapidement lors de l'ionisation par pression.

¹Pour aucun des modèles de notre grille la photosphère est dans ce régime.

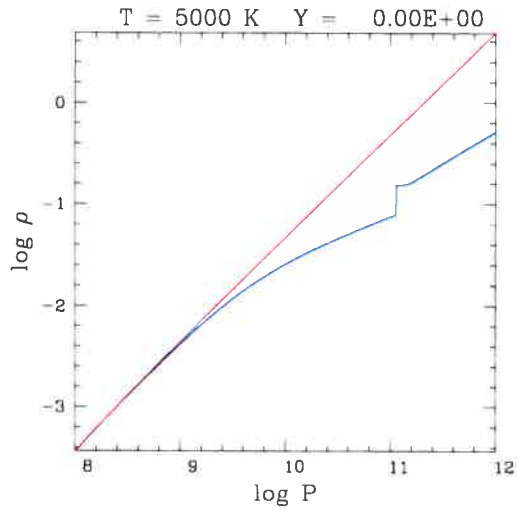


FIGURE A.1 – Pour une composition d’hydrogène, notre équation d’état dans le plan $\log P - \log \rho$ (en bleu) comparée à l’équation d’état idéale (rouge).

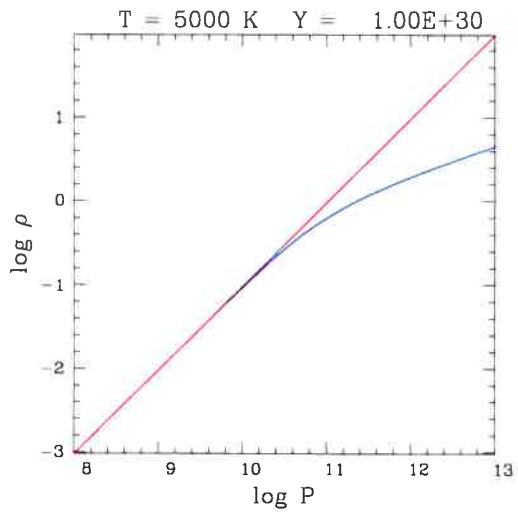


FIGURE A.2 – Même que la figure A.1 mais pour une composition d’hélium.

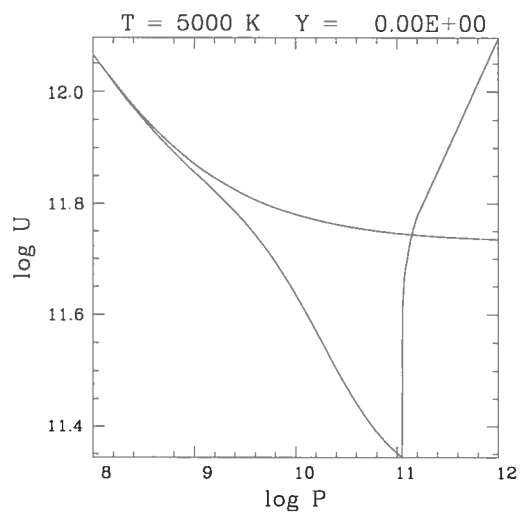


FIGURE A.3 – Même que la figure A.1 mais dans le plan $\log P - U$. L'unité d'énergie est arbitraire.

Annexe B

Échantillon de 2MASS

TABLEAU B.1 – Échantillon de naines blanches de 2MASS riches en hydrogène

WD	T_{eff}	V	J (σ_J)	H (σ_H)	K_S (σ_K)
0000–345	7028	14.95	14.117 (0.024)	14.024 (0.038)	13.919 (0.063)
0009+501	6580	14.37	13.490 (0.022)	13.249 (0.026)	13.191 (0.030)
0011+000	9589	15.34	15.148 (0.039)	15.214 (0.094)	15.101 (0.139)
0011–134	6169	15.88	14.813 (0.036)	14.549 (0.057)	14.628 (0.082)
0018–267	5314	13.80	12.504 (0.026)	12.106 (0.025)	12.006 (0.023)
0019+423	6001	16.44	15.341 (0.049)	15.119 (0.069)	14.939 (0.097)
0021–234	8565	16.12	15.690 (0.073)	15.727 (0.152)	15.426 (null)
0023–109	9282	16.23	16.050 (0.082)	15.842 (0.168)	15.676 (0.248)
0024–556	9982	15.17	15.005 (0.039)	15.231 (0.097)	15.092 (0.142)
0028–274	7946	15.17	14.677 (0.033)	14.521 (0.049)	14.394 (0.070)
0031+150	6876	16.87	16.081 (0.106)	15.938 (0.169)	15.520 (0.205)
0031–274	14887	14.22	14.581 (0.034)	14.624 (0.061)	14.572 (0.107)
0032–175	9728	14.93	14.789 (0.037)	14.755 (0.066)	14.728 (0.103)
0033+016	11113	15.55	15.650 (0.057)	15.522 (0.090)	16.119 (0.303)
0037–006	10536	14.85	14.897 (0.037)	14.854 (0.057)	14.704 (0.092)
0048–207	5151	17.19	15.748 (0.060)	15.378 (0.090)	15.216 (0.125)
0049–473	10861	16.53	16.664 (0.126)	16.289 (0.201)	16.853 (null)
0052+226	9658	16.18	16.021 (0.077)	16.109 (0.162)	15.522 (0.212)
0053–237	5993	17.27	16.159 (0.068)	15.961 (0.138)	15.801 (0.235)
0101+048	8215	14.01	13.504 (0.024)	13.396 (0.032)	13.418 (0.034)
0102+210.1	5411	17.95	16.518 (0.097)	16.504 (0.198)	15.548 (null)
0103–278	14130	15.45	15.785 (0.071)	15.808 (0.134)	15.702 (0.213)
0106–109.1	5758	17.51	16.244 (0.085)	16.159 (0.140)	16.429 (null)
0107+267	12941	15.12	15.404 (0.054)	15.355 (0.112)	15.306 (0.150)
0113–243	7147	14.93	14.161 (0.024)	14.003 (0.036)	13.966 (0.057)
0117–145	5238	16.96	15.563 (0.056)	15.131 (0.079)	15.192 (0.161)
0120–024	6081	17.48	16.461 (0.092)	16.295 (0.213)	15.571 (0.187)
0121+401	5519	17.11	15.858 (0.078)	15.507 (0.151)	15.279 (0.170)
0126+101	8807	14.38	14.032 (0.024)	13.952 (0.038)	13.964 (0.053)
0133–116	12481	14.13	14.382 (0.033)	14.308 (0.053)	14.433 (0.094)
0135–052	7410	12.83	12.114 (0.024)	11.954 (0.022)	11.969 (0.023)
0136+152	8002	14.94	14.365 (0.032)	14.336 (0.045)	14.196 (0.068)
0136+768	12053	14.94	15.086 (0.050)	15.262 (0.105)	15.145 (0.158)

TABLEAU B.1 – Suite

WD	T_{eff}	V	J (σ_J)	H (σ_H)	K_S (σ_K)
0141–675	6278	13.90	12.867 (0.022)	12.659 (0.025)	12.579 (0.030)
0142+312	8739	14.80	14.425 (0.029)	14.320 (0.048)	14.429 (0.065)
0143+216	9198	15.06	14.784 (0.036)	14.812 (0.060)	14.676 (0.077)
0148+467	14705	12.43	12.768 (0.024)	12.826 (0.032)	12.846 (0.030)
0149–114	9417	16.60	16.492 (0.119)	15.998 (0.189)	16.434 (null)
0151+017	11459	15.00	15.133 (0.037)	15.071 (0.096)	15.356 (0.166)
0154–071	10266	16.30	16.302 (0.095)	16.043 (0.189)	16.785 (null)
0208+396	7278	14.53	13.832 (0.024)	13.670 (0.034)	13.595 (0.038)
0222+314	9310	15.80	15.601 (0.050)	15.468 (0.110)	15.455 (0.137)
0222+422.2	8643	16.80	16.496 (0.110)	16.264 (0.169)	16.166 (0.243)
0225+004	7927	18.08	16.544 (0.103)	15.737 (0.107)	15.542 (0.182)
0230–144	5302	15.77	14.489 (0.030)	14.261 (0.048)	14.161 (0.068)
0231–054	12654	14.31	14.540 (0.033)	14.558 (0.052)	14.659 (0.101)
0235+069	9797	16.50	16.389 (0.120)	16.274 (0.220)	17.028 (null)
0235–125	12306	15.40	15.586 (0.073)	15.652 (0.131)	15.662 (0.295)
0236+259	5506	16.20	14.914 (0.031)	14.606 (0.050)	14.471 (0.069)
0236+745	9020	15.93	15.645 (0.060)	15.539 (0.121)	15.608 (0.224)
0239+109	7860	16.22	15.580 (0.062)	15.910 (0.209)	15.431 (0.205)
0240+341	6041	16.10	15.004 (0.039)	14.716 (0.068)	14.766 (0.092)
0243–026	6962	15.54	14.679 (0.035)	14.589 (0.044)	14.477 (0.091)
0245+541	5033	15.41	13.870 (0.024)	13.545 (0.040)	13.469 (0.039)
0253+508	13004	15.22	15.584 (0.058)	15.305 (0.107)	15.071 (0.116)
0255–705	10936	14.00	14.036 (0.030)	14.125 (0.041)	13.987 (0.061)
0257+080	6581	15.90	14.966 (0.042)	14.746 (0.061)	14.847 (0.109)
0302+621	10626	14.95	15.015 (0.044)	14.989 (0.089)	14.749 (0.095)
0314+648	7397	16.54	15.923 (0.099)	15.650 (0.165)	15.549 (0.213)
0322–019	5261	16.18	14.761 (0.042)	14.439 (0.052)	14.378 (0.084)
0326–273	7938	13.78	13.216 (0.103)	13.109 (0.090)	13.101 (0.121)
0332+320	10395	15.49	15.434 (0.051)	15.408 (0.097)	15.725 (0.174)
0339–035	12046	15.31	15.475 (0.056)	15.641 (0.127)	15.459 (0.192)
0341–459	10831	15.01	15.052 (0.043)	15.083 (0.075)	14.973 (0.130)
0354+556	8153	16.72	16.338 (0.111)	15.776 (0.174)	15.584 (null)
0357+081	5477	15.88	14.562 (0.038)	14.343 (0.056)	14.122 (0.056)
0401+250	11582	13.80	13.910 (0.028)	13.968 (0.046)	14.001 (0.054)
0402+543	14389	15.39	15.738 (0.067)	15.604 (0.124)	15.941 (0.250)
0406+592	14346	14.40	14.838 (0.046)	14.658 (0.066)	14.669 (0.086)
0407+179	13267	14.16	14.424 (0.035)	14.509 (0.059)	14.459 (0.080)
0415+271	10985	15.10	15.134 (0.038)	15.361 (0.090)	15.065 (0.094)
0416+701	11803	14.74	14.941 (0.043)	14.868 (0.068)	14.907 (0.100)
0417+361	10928	15.62	15.706 (0.065)	15.566 (0.128)	15.775 (0.217)
0419–161	6202	17.42	16.415 (0.109)	16.093 (0.216)	15.320 (null)
0433+270	5632	15.79	14.598 (0.038)	14.232 (0.058)	14.136 (0.069)
0433+406	10152	16.55	16.520 (0.125)	16.316 (0.260)	16.231 (null)
0437+093	6216	16.96	16.057 (0.080)	15.589 (0.106)	15.463 (0.138)
0440+510	8658	15.96	15.576 (0.051)	15.504 (0.112)	15.548 (0.141)
0452+103	7270	16.85	16.152 (0.084)	15.951 (0.153)	15.299 (null)
0453–295	13226	15.07	15.343 (0.044)	15.389 (0.107)	15.218 (0.155)
0455+553	10310	15.98	15.995 (0.066)	15.881 (0.117)	15.610 (0.195)
0503–174	5278	15.99	14.739 (0.035)	14.408 (0.047)	14.397 (0.086)
0511+079	6998	15.89	15.107 (0.047)	14.924 (0.064)	14.863 (0.082)
0517+307	11499	15.56	15.709 (0.068)	15.657 (0.128)	15.684 (0.226)
0518+333	7143	16.03	15.374 (0.085)	15.122 (0.207)	14.806 (0.157)
0525+271	6821	15.20	14.333 (0.026)	14.140 (0.037)	14.152 (0.052)
0526+271	6238	15.42	14.333 (0.026)	14.140 (0.037)	14.152 (0.052)

TABLEAU B.1 – Suite

WD	T_{eff}	V	J (σ_J)	H (σ_H)	K_S (σ_K)
0532+414	7319	14.78	14.087 (0.029)	13.944 (0.036)	13.816 (0.049)
0532-560	10526	16.00	16.023 (0.085)	15.882 (0.185)	16.348 (null)
0551+468	5188	17.22	15.712 (0.057)	15.461 (0.078)	15.511 (0.154)
0553+053	5974	14.11	12.930 (0.022)	12.720 (0.025)	12.653 (0.024)
0557+237	7757	16.90	16.412 (0.094)	15.984 (0.169)	15.932 (0.241)
0559+158	7190	16.80	16.064 (0.076)	15.928 (0.157)	15.845 (0.262)
0618+067	6074	16.39	15.377 (0.062)	15.017 (0.071)	14.957 (0.139)
0627+299	13846	14.80	15.128 (0.038)	15.176 (0.071)	14.924 (0.089)
0628+314	9967	15.90	15.830 (0.067)	15.840 (0.142)	15.461 (0.167)
0632+409	7423	16.75	16.060 (0.082)	16.110 (0.205)	15.759 (0.197)
0637+477	13284	14.81	15.047 (0.046)	15.137 (0.084)	15.230 (0.153)
0641+438	12978	15.53	15.771 (0.059)	15.801 (0.148)	15.862 (0.224)
0644+025	6927	15.69	14.868 (0.045)	14.757 (0.069)	14.576 (0.103)
0648+641	6130	16.64	15.533 (0.061)	15.412 (0.098)	15.331 (0.165)
0659-063	6838	15.34	14.538 (0.028)	14.218 (0.051)	14.355 (0.074)
0713+584	9380	11.98	11.773 (0.022)	11.733 (0.020)	11.721 (0.018)
0726+392	12109	15.81	16.031 (0.105)	16.039 (0.228)	15.740 (0.254)
0732-427	13685	14.13	14.444 (0.035)	14.437 (0.060)	14.410 (0.087)
0752+365	8169	16.09	15.583 (0.064)	15.444 (0.131)	15.877 (0.346)
0752-676	5286	13.99	12.726 (0.023)	12.476 (0.026)	12.362 (0.024)
0756+437	6785	16.28	15.389 (0.041)	15.233 (0.063)	15.339 (0.136)
0804+446	6090	17.77	16.639 (0.122)	16.624 (0.253)	16.083 (null)
0813+217	6264	17.02	15.944 (0.068)	15.842 (0.142)	15.958 (0.240)
0816+376	10839	15.60	15.639 (0.073)	15.665 (0.172)	16.815 (null)
0816+387	7891	16.55	16.070 (0.103)	15.833 (0.194)	15.583 (0.220)
0820-585	8026	16.59	16.122 (0.083)	15.997 (0.196)	15.531 (0.199)
0826+455	10000	15.10	15.006 (0.043)	15.039 (0.087)	14.842 (0.133)
0827+328	7380	15.73	14.985 (0.044)	14.964 (0.076)	14.865 (0.121)
0830+371	8791	16.01	15.678 (0.054)	15.639 (0.128)	15.411 (0.171)
0836+404	13417	15.52	15.840 (0.073)	15.693 (0.130)	15.845 (0.219)
0839-327	9154	11.87	11.578 (0.030)	11.539 (0.033)	11.547 (0.029)
0853-264.2	7181	16.97	16.166 (0.088)	16.202 (0.168)	15.764 (null)
0858+363	11499	14.55	14.634 (0.034)	14.770 (0.063)	14.705 (0.092)
0913+442	8545	15.36	14.955 (0.050)	14.861 (0.081)	14.906 (0.155)
0921+354	11081	15.50	15.599 (0.065)	15.614 (0.127)	15.475 (0.182)
0926-039	13491	14.76	14.962 (0.041)	15.127 (0.055)	15.055 (0.167)
0927-173	7413	16.04	15.401 (0.055)	15.183 (0.077)	15.111 (0.152)
0930+294	8618	15.91	15.588 (0.066)	15.399 (0.106)	15.284 (0.150)
0935-371.2	8297	15.03	14.705 (0.080)	14.603 (0.079)	14.624 (0.117)
0939+071	6288	14.90	13.986 (0.030)	13.675 (0.036)	13.598 (0.034)
0941-068	5943	16.46	15.373 (0.042)	15.019 (0.069)	14.990 (0.133)
0942+236.1	7045	17.33	16.636 (0.105)	16.323 (0.181)	16.029 (0.239)
0942+236.2	6661	17.51	16.781 (0.120)	16.257 (0.178)	17.349 (null)
0943+330	6612	17.12	16.386 (0.108)	15.974 (0.161)	15.846 (0.213)
0943+371	7636	17.13	16.545 (0.123)	16.277 (0.240)	17.076 (null)
0943+441	14385	13.33	13.643 (0.028)	13.707 (0.041)	13.722 (0.046)
0946+381	5060	17.13	15.607 (0.067)	15.295 (0.127)	15.208 (0.171)
0949-353	7492	16.77	16.068 (0.080)	16.186 (0.229)	15.488 (null)
0950-572	12740	14.87	15.177 (0.068)	15.033 (0.091)	15.164 (0.180)
0954-710	14717	13.47	13.794 (0.026)	13.844 (0.031)	13.917 (0.050)
0955+247	8662	15.08	14.654 (0.034)	14.659 (0.069)	14.661 (0.076)
1012+083.1	6390	16.04	15.246 (0.063)	15.132 (0.110)	14.955 (0.142)
1013-010	7911	15.33	14.799 (0.030)	14.605 (0.055)	14.711 (0.117)
1015+076	6693	15.37	14.565 (0.039)	14.221 (0.046)	14.245 (0.086)

TABLEAU B.1 – Suite

WD	T_{eff}	V	J (σ_J)	H (σ_H)	K_S (σ_K)
1019+637	6978	14.70	13.874 (0.029)	13.733 (0.047)	13.692 (0.049)
1022+050	10714	14.20	14.193 (0.035)	14.237 (0.033)	14.185 (0.065)
1024-382	7064	15.89	15.084 (0.047)	14.925 (0.068)	15.084 (0.152)
1026+117	6995	16.62	15.902 (0.095)	15.552 (0.127)	15.298 (null)
1027-261	5803	17.05	15.893 (0.072)	15.575 (0.103)	15.523 (0.179)
1031-147	13258	16.04	16.271 (0.085)	16.599 (0.226)	15.713 (0.239)
1045-091	8924	16.57	16.239 (0.080)	16.229 (0.163)	15.665 (null)
1046+281	10894	15.47	15.515 (0.052)	15.526 (0.115)	15.620 (0.207)
1053-290	9667	15.38	15.230 (0.046)	15.165 (0.090)	15.200 (0.176)
1055-072	7810	14.31	13.770 (0.029)	13.680 (0.032)	13.485 (0.038)
1102-183	8054	15.99	15.499 (0.049)	15.288 (0.105)	15.383 (0.198)
1108+475	12308	15.38	15.657 (0.054)	15.350 (0.092)	15.618 (0.222)
1114+067	6296	16.75	15.701 (0.072)	15.599 (0.124)	15.518 (0.257)
1116+026	11700	14.57	14.752 (0.039)	14.730 (0.051)	14.611 (0.105)
1116-307	10343	16.48	16.587 (0.152)	16.139 (0.184)	16.089 (null)
1120+439	12734	15.81	16.053 (0.077)	15.977 (0.158)	16.200 (0.362)
1121+216	7599	14.20	13.574 (0.024)	13.420 (0.026)	13.399 (0.034)
1122+546	14678	15.43	15.765 (0.058)	15.858 (0.141)	15.709 (0.187)
1123+426	9274	16.40	16.186 (0.080)	16.246 (0.162)	15.651 (0.168)
1124-293	9196	15.02	14.782 (0.034)	14.710 (0.044)	14.602 (0.091)
1130-125	13300	15.50	15.742 (0.092)	15.857 (0.152)	15.680 (0.297)
1133-528	5453	15.83	14.514 (0.039)	14.201 (0.055)	14.112 (0.059)
1143+321	14005	13.67	14.013 (0.036)	13.984 (0.059)	14.026 (0.082)
1143+633	5560	16.39	15.119 (0.040)	14.845 (0.066)	14.676 (0.104)
1146-290	5580	17.30	16.037 (0.092)	15.737 (0.172)	16.462 (null)
1147+255	10137	15.66	15.590 (0.048)	15.568 (0.101)	15.693 (0.183)
1148+544	9456	16.68	16.511 (0.104)	16.330 (0.228)	15.620 (null)
1150-153	10567	16.00	16.038 (0.119)	15.926 (0.173)	16.119 (null)
1152-127	10495	15.76	15.792 (0.068)	15.693 (0.116)	15.572 (0.229)
1202-232	8680	12.79	12.402 (0.024)	12.301 (0.027)	12.342 (0.026)
1204-136	11162	15.53	15.658 (0.063)	15.580 (0.116)	15.437 (0.193)
1208+576	5974	15.79	14.679 (0.034)	14.362 (0.052)	14.458 (0.095)
1223-659	8035	13.91	13.334 (0.041)	13.257 (0.057)	13.297 (0.056)
1225+006	9918	14.83	14.778 (0.042)	14.660 (0.058)	14.584 (0.112)
1232+479	14906	14.51	14.866 (0.041)	14.879 (0.081)	14.960 (0.150)
1236+457	6606	16.44	15.599 (0.062)	15.197 (0.101)	15.727 (null)
1236-495	10622	13.82	13.806 (0.024)	13.815 (0.036)	13.907 (0.062)
1237-028	10412	15.97	15.971 (0.068)	15.922 (0.138)	15.754 (0.250)
1242-105	8119	14.70	14.230 (0.032)	14.066 (0.030)	14.083 (0.060)
1244+149	9907	15.87	15.802 (0.067)	15.627 (0.136)	15.721 (0.217)
1244-125	13685	14.70	15.018 (0.037)	15.008 (0.065)	14.793 (0.123)
1253+378	9980	15.77	15.833 (0.084)	15.521 (0.106)	15.450 (0.139)
1256+286	6495	16.76	15.814 (0.071)	15.481 (0.107)	15.824 (0.204)
1257+037	5752	15.81	14.655 (0.040)	14.316 (0.050)	14.220 (0.089)
1257+278	8894	15.41	15.132 (0.046)	14.977 (0.076)	14.986 (0.089)
1307+354	10875	15.31	15.344 (0.051)	15.398 (0.096)	14.989 (null)
1309+853	5570	15.98	14.686 (0.034)	14.459 (0.063)	14.342 (0.090)
1314-153	14638	14.86	15.172 (0.049)	15.256 (0.091)	15.323 (0.208)
1315-110	9200	15.58	15.366 (0.057)	15.213 (0.109)	15.186 (0.191)
1317+453	13509	14.06	14.317 (0.036)	14.441 (0.059)	14.387 (0.066)
1319+466	13570	14.55	14.867 (0.035)	14.859 (0.075)	14.767 (0.083)
1325+581	6433	16.70	15.945 (0.092)	15.700 (0.147)	15.716 (0.251)
1325-089	13006	15.15	15.390 (0.050)	15.400 (0.108)	15.645 (0.284)
1327-083	14368	12.32	12.621 (0.037)	12.677 (0.041)	12.736 (0.048)

TABLEAU B.1 – Suite

WD	T_{eff}	V	J (σ_J)	H (σ_H)	K_S (σ_K)
1330+015.1	7741	17.02	16.396 (0.119)	16.298 (0.206)	15.802 (null)
1334+366	6804	16.39	15.553 (0.047)	15.344 (0.081)	15.312 (0.122)
1334-160	12417	15.33	15.532 (0.053)	15.553 (0.103)	15.733 (0.295)
1342-237	9953	16.06	16.010 (0.085)	15.799 (0.138)	16.460 (null)
1343-135	9754	15.83	15.723 (0.062)	15.623 (0.151)	15.351 (0.224)
1344+106	7244	15.09	14.407 (0.038)	14.139 (0.053)	14.235 (0.080)
1347+281	7709	16.37	15.743 (0.068)	15.675 (0.103)	15.596 (0.151)
1348-273	8905	15.20	14.907 (0.110)	14.797 (0.249)	14.754 (0.227)
1349+144	12269	15.34	15.501 (0.053)	15.724 (0.139)	15.520 (0.212)
1356-233	9644	14.98	14.818 (0.035)	14.715 (0.073)	15.090 (0.191)
1408+323	14679	14.07	14.396 (0.031)	14.484 (0.054)	14.431 (0.073)
1418-088	7990	15.36	14.764 (0.037)	14.731 (0.057)	14.756 (0.103)
1420+228	10016	16.80	16.815 (0.147)	17.818 (null)	16.131 (0.258)
1422+095	13658	14.23	14.532 (0.059)	14.499 (0.099)	14.610 (0.099)
1425-811	11182	13.51	13.577 (0.022)	13.603 (0.025)	13.645 (0.047)
1428+373	12870	15.48	15.801 (0.059)	15.571 (0.089)	15.584 (0.227)
1429-037	13293	15.80	16.097 (0.094)	16.086 (0.182)	15.639 (0.279)
1434-223	7619	16.37	15.827 (0.074)	15.524 (0.139)	15.404 (0.178)
1455+298	7358	15.59	14.972 (0.047)	14.606 (0.075)	14.739 (0.128)
1457-086	13209	15.77	16.041 (0.098)	16.212 (0.233)	15.614 (0.228)
1503-070	6973	15.89	15.079 (0.052)	14.988 (0.100)	14.847 (0.104)
1503-093	12870	15.15	15.343 (0.050)	15.480 (0.112)	15.725 (0.257)
1507-105	9854	15.41	15.294 (0.055)	15.222 (0.069)	15.456 (0.192)
1508+637	10699	14.65	14.720 (0.038)	14.573 (0.063)	14.807 (0.117)
1510+566	8759	16.33	16.052 (0.075)	15.722 (0.122)	15.889 (0.279)
1514+033	7772	13.99	13.579 (0.028)	13.328 (0.030)	13.270 (0.029)
1522-041	10832	16.30	16.319 (0.101)	16.519 (0.238)	15.922 (0.335)
1534+503	8828	15.71	15.421 (0.059)	15.272 (0.102)	15.110 (0.158)
1537+651	9632	14.64	14.461 (0.029)	14.449 (0.048)	14.468 (0.094)
1539-035	9452	15.23	15.010 (0.045)	15.027 (0.072)	14.941 (0.115)
1555-089	12685	14.94	15.194 (0.050)	15.167 (0.101)	15.187 (0.155)
1559+369	10682	14.35	14.426 (0.030)	14.320 (0.045)	14.390 (0.082)
1605+177	10673	16.70	16.745 (0.132)	16.615 (0.277)	16.492 (null)
1606+422	11475	13.86	13.984 (0.025)	14.026 (0.042)	14.050 (0.073)
1609+135	9293	15.09	14.861 (0.036)	14.779 (0.056)	14.857 (0.109)
1611+390	10025	15.50	15.433 (0.051)	15.348 (0.111)	15.336 (0.185)
1616-390	7348	14.10	13.666 (0.028)	13.300 (0.033)	13.203 (0.037)
1625+093	6835	16.13	15.250 (0.062)	15.187 (0.103)	15.036 (0.142)
1628-873	6613	14.58	13.734 (0.024)	13.458 (0.037)	13.405 (0.045)
1630+618	11791	15.47	15.646 (0.076)	15.766 (0.170)	15.262 (0.181)
1633+433	6642	14.82	13.991 (0.029)	13.773 (0.035)	13.607 (0.043)
1635+137	6331	16.92	15.929 (0.076)	15.673 (0.144)	15.727 (0.211)
1637+335	9877	14.62	14.551 (0.031)	14.467 (0.045)	14.424 (0.081)
1639+153	7985	15.63	15.073 (0.042)	14.979 (0.087)	15.060 (0.128)
1639+537	8131	15.04	14.493 (0.027)	14.479 (0.048)	14.369 (0.085)
1647+591	12585	12.23	12.425 (0.021)	12.463 (0.021)	12.522 (0.030)
1655+210	5806	16.60	15.469 (0.052)	15.149 (0.073)	14.919 (0.121)
1655+215	9450	14.08	13.886 (0.026)	13.816 (0.030)	13.863 (0.050)
1656-062	5610	17.18	15.956 (0.071)	15.696 (0.115)	15.210 (0.153)
1704+481.1	13916	14.48	14.730 (0.037)	14.799 (0.065)	15.167 (0.162)
1704+481.2	8988	14.45	14.112 (0.040)	14.067 (0.050)	14.120 (0.067)
1714-547	7283	15.57	14.943 (0.041)	14.647 (0.076)	14.510 (0.094)
1716+020	13384	14.28	14.603 (0.056)	14.534 (0.070)	14.562 (0.109)
1733-544	6672	15.73	14.802 (0.044)	14.677 (0.084)	14.693 (0.105)

TABLEAU B.1 – Suite

WD	T_{eff}	V	J (σ_J)	H (σ_H)	K_S (σ_K)
1736+052	9351	15.86	15.682 (0.067)	15.573 (0.122)	15.351 (0.175)
1740-706	10188	16.60	16.604 (0.116)	16.329 (0.205)	15.645 (null)
1750+098	10353	15.64	15.631 (0.061)	15.579 (0.145)	15.627 (0.243)
1756+827	7397	14.31	13.634 (0.025)	13.472 (0.030)	13.431 (0.050)
1809+284	14752	15.12	15.381 (0.056)	15.569 (0.105)	15.743 (0.200)
1811+327.1	7564	16.40	15.716 (0.057)	15.675 (0.126)	15.760 (0.201)
1811+327.2	6150	17.24	16.214 (0.091)	15.953 (0.172)	15.809 (0.213)
1818+126	6794	15.89	14.989 (0.040)	14.885 (0.069)	14.876 (0.108)
1820+609	5019	15.67	14.075 (0.032)	13.810 (0.030)	13.797 (0.052)
1822+008	8020	16.59	16.044 (0.101)	16.008 (0.176)	15.022 (null)
1824+040	12031	13.93	14.107 (0.032)	14.111 (0.045)	14.225 (0.084)
1829+548	6424	15.50	14.387 (0.024)	14.320 (0.038)	14.326 (0.083)
1840+042	8895	14.85	14.443 (0.050)	14.374 (0.075)	14.651 (0.099)
1840-111	9872	14.24	14.138 (0.030)	14.039 (0.064)	14.157 (0.068)
1855+338	11257	14.65	14.737 (0.034)	14.769 (0.056)	14.799 (0.124)
1858+393	9777	15.63	15.533 (0.047)	15.441 (0.088)	15.248 (0.146)
1900+705	11928	13.22	13.334 (0.023)	13.439 (0.031)	13.417 (0.048)
1911+135	14471	14.04	14.264 (0.030)	14.506 (0.057)	14.544 (0.116)
1935+276	12180	13.02	13.183 (0.023)	13.213 (0.029)	13.329 (0.043)
1953-011	7998	13.69	13.070 (0.029)	13.029 (0.031)	13.014 (0.040)
1959+059	9723	16.41	16.272 (0.101)	16.198 (0.228)	15.534 (null)
2007-219	9622	14.40	14.199 (0.023)	14.202 (0.044)	14.259 (0.076)
2032+188	12898	15.46	15.804 (0.101)	15.527 (0.171)	15.264 (0.228)
2039-682	14815	13.40	13.729 (0.026)	13.806 (0.039)	13.800 (0.050)
2048+263	5215	15.60	14.100 (0.056)	13.908 (0.068)	13.602 (null)
2059+190	7211	16.38	15.642 (0.070)	15.559 (0.141)	15.397 (0.159)
2059+247	6038	16.57	15.522 (0.057)	15.205 (0.082)	15.061 (0.143)
2105-820	10082	13.58	13.478 (0.026)	13.451 (0.033)	13.533 (0.039)
2107-216	6090	16.80	15.688 (0.055)	15.476 (0.106)	15.695 (0.214)
2111+261	8319	14.67	14.230 (0.036)	14.116 (0.041)	14.095 (0.057)
2115-560	9434	14.27	14.110 (0.029)	13.996 (0.055)	14.022 (0.061)
2123-229	11080	15.59	15.606 (0.058)	15.926 (0.159)	15.599 (0.210)
2124+550	13163	14.70	14.987 (0.053)	14.957 (0.090)	14.905 (0.162)
2126+734	13804	12.81	13.096 (0.030)	13.164 (0.038)	13.166 (0.044)
2136+229	9880	15.17	15.106 (0.060)	15.055 (0.087)	14.816 (0.116)
2139+132.1	7627	16.57	16.023 (0.072)	15.732 (0.121)	15.487 (0.212)
2148+539	8182	16.74	16.349 (0.128)	15.979 (0.201)	16.011 (0.305)
2159-754	9079	14.99	14.722 (0.039)	14.674 (0.067)	14.547 (0.099)
2201-228	10372	16.20	16.276 (0.104)	15.967 (0.210)	15.672 (0.234)
2207+142	7316	15.66	14.971 (0.040)	14.782 (0.086)	14.772 (0.098)
2209-147	7637	15.09	14.484 (0.033)	14.385 (0.058)	14.177 (0.077)
2213+317	7127	17.00	16.332 (0.128)	16.048 (0.212)	15.712 (0.260)
2216+484	7468	16.13	15.476 (0.062)	15.297 (0.096)	15.318 (0.161)
2240-017	9314	16.18	15.969 (0.072)	15.886 (0.148)	15.794 (0.229)
2246+223	10345	14.37	14.341 (0.029)	14.317 (0.047)	14.360 (0.090)
2248+293	5686	15.52	14.316 (0.029)	13.983 (0.038)	13.941 (0.044)
2253-081	6485	16.50	15.629 (0.067)	15.279 (0.086)	15.195 (0.168)
2303+242	11185	15.39	15.490 (0.049)	15.413 (0.105)	15.701 (0.205)
2309+258	7183	15.30	14.353 (0.031)	14.461 (0.049)	14.446 (0.081)
2316+123	13259	15.23	15.466 (0.059)	15.716 (0.150)	15.139 (0.189)
2322+137	5455	15.95	14.512 (0.034)	14.371 (0.049)	14.364 (0.095)
2323+157.1	9918	15.11	15.051 (0.043)	14.938 (0.072)	14.881 (0.138)
2323+256	5624	17.06	15.843 (0.072)	15.430 (0.120)	15.464 (0.158)
2324+060	13004	15.38	15.624 (0.060)	15.885 (0.203)	15.484 (0.190)

TABLEAU B.1 – Suite

WD	T_{eff}	V	J (σ_J)	H (σ_H)	K_S (σ_K)
2326+049	9923	13.03	13.132 (0.029)	13.075 (0.022)	12.689 (0.029)
2329+267	9421	15.36	15.184 (0.041)	15.100 (0.087)	15.030 (0.111)
2333-049	10956	15.65	15.731 (0.054)	15.717 (0.111)	15.484 (0.192)
2336-079	11018	13.26	13.339 (0.029)	13.341 (0.023)	13.352 (0.031)
2337-760	12897	14.80	15.031 (0.042)	15.137 (0.081)	15.038 (0.144)
2341+322	12406	12.93	13.171 (0.029)	13.195 (0.037)	13.179 (0.028)
2347+292	5848	15.73	14.571 (0.029)	14.345 (0.044)	14.159 (0.065)
2348-244	10946	15.33	15.429 (0.049)	15.399 (0.113)	15.092 (0.138)
2359-434	9004	12.76	13.927 (0.029)	13.615 (0.032)	13.539 (0.046)

TABLEAU B.2 – Échantillon de naines blanches de 2MASS riches en hélium

WD	T_{eff}	V	J (σ_J)	H (σ_H)	K_S (σ_K)
0000-170	12976	14.68	14.821 (0.044)	14.912 (0.078)	15.100 (0.142)
0002+729	14563	14.31	14.615 (0.036)	14.597 (0.055)	14.758 (0.100)
0007+308	8099	16.78	16.449 (0.128)	16.193 (0.224)	16.614 (null)
0038-226	6230	14.64	13.342 (0.028)	13.483 (0.033)	13.738 (0.044)
0046+051	6721	12.38	11.688 (0.022)	11.572 (0.024)	11.498 (0.025)
0101-250	10021	16.80	14.387 (0.024)	14.320 (0.038)	14.326 (0.083)
0115+159	9577	13.85	13.727 (0.025)	13.680 (0.022)	13.726 (0.044)
0123-262	7218	15.00	14.435 (0.029)	14.313 (0.044)	14.331 (0.072)
0127-311	8348	16.10	15.727 (0.069)	15.910 (0.200)	15.676 (null)
0200-127	10718	14.55	14.512 (0.030)	14.540 (0.060)	14.662 (0.096)
0203-181	8641	16.00	15.717 (0.063)	15.892 (0.148)	15.168 (0.152)
0233-242	5332	15.74	14.445 (0.034)	14.335 (0.054)	14.117 (0.066)
0311-543	5422	14.91	13.769 (0.030)	13.452 (0.033)	13.379 (0.039)
0324+738	5541	17.59	16.466 (0.124)	16.179 (0.253)	14.921 (null)
0330-000	5984	16.90	15.917 (0.105)	15.909 (0.218)	16.372 (null)
0341+182	6692	15.21	14.590 (0.031)	14.350 (0.049)	14.230 (0.060)
0423+120	6054	15.41	14.485 (0.034)	14.347 (0.042)	14.249 (0.065)
0435+410	14805	14.81	15.116 (0.046)	15.254 (0.099)	14.901 (0.137)
0435-088	6480	13.77	13.006 (0.030)	12.906 (0.032)	12.763 (0.035)
0548-001	6607	14.58	13.730 (0.026)	13.675 (0.026)	13.705 (0.042)
0551+123	7809	15.92	15.402 (0.054)	15.590 (0.112)	14.202 (null)
0552-041	5197	14.46	13.047 (0.027)	12.860 (0.027)	12.777 (0.026)
0654+027	8822	16.22	16.086 (0.088)	15.824 (0.133)	15.399 (0.188)
0704-508	6204	16.97	16.081 (0.062)	16.093 (0.131)	15.688 (0.196)
0706+377	6931	15.61	15.064 (0.053)	14.783 (0.052)	14.834 (0.079)
0714+458	10059	15.18	15.077 (0.044)	15.201 (0.107)	15.029 (0.142)
0749+526	7286	15.70	14.387 (0.024)	14.320 (0.038)	14.326 (0.083)
0751+578	9773	15.08	14.966 (0.038)	14.965 (0.063)	14.966 (0.121)
0806-661	11103	13.71	13.704 (0.023)	13.739 (0.025)	13.781 (0.043)
0838+338	6764	16.47	15.708 (0.070)	15.830 (0.171)	15.697 (0.187)
0840+414	8342	16.76	16.561 (0.121)	16.147 (0.205)	15.733 (0.253)
0843+358	9491	14.81	14.678 (0.036)	14.628 (0.066)	14.592 (0.094)
0855+604.2	8023	16.34	16.043 (0.087)	15.608 (0.131)	15.636 (null)
0856+331	10646	15.19	15.172 (0.041)	15.156 (0.083)	15.312 (0.163)
0900+734	5051	16.99	15.560 (0.064)	15.265 (0.108)	15.132 (0.132)
0912+536	7196	13.86	13.308 (0.025)	13.211 (0.026)	13.133 (0.030)
0935-371.1	10404	14.79	14.766 (0.045)	14.736 (0.049)	14.826 (0.128)
0937+093	5202	18.09	16.702 (0.152)	16.302 (null)	16.030 (0.275)
0946+534	8630	15.21	14.913 (0.049)	14.888 (0.072)	14.916 (0.118)
0959+149	6380	15.48	14.697 (0.036)	14.524 (0.055)	14.464 (0.079)
1008+290	5089	17.51	15.125 (0.046)	14.720 (0.063)	14.535 (0.077)
1033+714	5263	16.88	14.387 (0.024)	14.320 (0.038)	14.326 (0.083)
1039+145	6788	16.52	15.823 (0.069)	15.749 (0.156)	15.681 (0.205)
1043-188	5918	15.49	14.633 (0.033)	14.346 (0.041)	14.035 (0.067)
1055-039	7797	16.48	16.119 (0.077)	15.762 (0.120)	15.646 (null)
1056+345	12056	15.52	15.673 (0.053)	15.541 (0.091)	15.757 (0.216)
1107+265	14226	15.83	16.192 (0.085)	15.938 (0.126)	16.049 (0.249)
1115-029	10641	15.33	15.304 (0.051)	15.246 (0.084)	15.734 (0.241)
1128-143	7329	16.88	16.507 (0.146)	16.137 (0.195)	15.331 (0.233)
1142-645	8443	11.48	11.188 (0.024)	11.130 (0.025)	11.104 (0.026)
1154+186	7768	16.60	15.098 (0.042)	15.220 (0.099)	15.087 (0.145)
1201+437	7795	16.50	16.082 (0.106)	15.915 (0.219)	16.352 (null)
1225-079	13255	14.67	14.882 (0.043)	14.918 (0.075)	14.849 (0.117)
1242-348	8841	14.62	14.387 (0.024)	14.320 (0.038)	14.326 (0.083)

TABLEAU B.2 – Suite

WD	T_{eff}	V	J (σ_J)	H (σ_H)	K_S (σ_K)
1300–355	8081	15.77	14.387 (0.024)	14.320 (0.038)	14.326 (0.083)
1301+287	9418	15.49	14.387 (0.024)	14.320 (0.038)	14.326 (0.083)
1313–198	5627	17.14	15.875 (0.082)	15.612 (0.097)	15.550 (0.190)
1328+307	7030	16.04	15.402 (0.044)	15.282 (0.087)	15.413 (0.135)
1336+123	14432	14.72	15.001 (0.041)	15.019 (0.077)	15.108 (0.139)
1409–184	5683	17.12	16.076 (0.092)	15.814 (0.161)	15.700 (0.241)
1415–064	9519	16.20	16.001 (0.096)	16.177 (0.211)	15.402 (null)
1426+442	6947	16.90	16.321 (0.109)	15.957 (0.202)	16.015 (null)
1444–096	14691	14.98	15.226 (0.049)	15.385 (0.101)	15.497 (0.222)
1459+821	14862	14.88	15.150 (0.055)	15.352 (0.130)	15.245 (0.220)
1524+566	5076	16.92	15.513 (0.050)	15.208 (0.076)	15.096 (0.121)
1542–275	10052	15.38	15.277 (0.049)	15.322 (0.080)	15.320 (0.161)
1626+368	9352	13.81	13.637 (0.024)	13.652 (0.034)	13.575 (0.042)
1633+572	6465	15.00	14.110 (0.028)	14.077 (0.037)	14.135 (0.062)
1641+732	9120	16.65	16.471 (0.137)	16.290 (0.296)	15.234 (null)
1705+030	7175	15.18	14.565 (0.032)	14.499 (0.032)	14.511 (0.078)
1708–147	9210	14.36	14.148 (0.039)	14.194 (0.054)	14.103 (0.074)
1712+215	7318	16.51	15.892 (0.065)	16.043 (0.133)	16.124 (null)
1726–578	11648	15.37	15.488 (0.071)	15.392 (0.140)	15.397 (0.194)
1748+708	5240	14.15	12.709 (0.021)	12.528 (0.023)	12.507 (0.023)
1814+248	6345	16.92	16.078 (0.087)	16.115 (0.168)	15.510 (0.261)
1822+410	14365	14.34	14.609 (0.031)	14.664 (0.054)	14.702 (0.097)
1831+197	7716	16.43	15.977 (0.095)	16.043 (0.184)	15.608 (0.198)
1837–619	9252	14.78	14.527 (0.037)	14.542 (0.048)	14.739 (0.099)
1841–367	6398	16.16	15.347 (0.043)	15.199 (0.082)	15.259 (0.132)
1917+386	6284	14.59	13.776 (0.030)	13.669 (0.032)	13.519 (0.025)
1917–077	11488	12.29	12.351 (0.026)	12.355 (0.025)	12.421 (0.026)
2010+310	14875	14.82	15.181 (0.044)	15.157 (0.084)	14.951 (0.107)
2027+073	7686	16.20	15.664 (0.056)	16.080 (0.213)	15.605 (0.217)
2034–532	14249	14.46	14.749 (0.032)	14.717 (0.053)	14.872 (0.115)
2049–222	8120	15.00	14.568 (0.035)	14.602 (0.059)	14.573 (0.073)
2058+342	11292	15.69	15.744 (0.070)	15.848 (0.155)	15.568 (0.193)
2059+316	9792	15.07	14.968 (0.053)	14.927 (0.068)	14.980 (0.115)
2107+427	12812	15.61	15.799 (0.082)	15.902 (0.175)	15.431 (0.238)
2129+000	13908	14.70	14.894 (0.035)	15.050 (0.086)	15.217 (0.149)
2140+207	8723	13.24	12.981 (0.021)	12.928 (0.035)	12.922 (0.029)
2144–079	13673	14.81	15.029 (0.053)	15.205 (0.103)	14.895 (0.138)
2147+280	12242	14.63	14.715 (0.036)	14.841 (0.069)	14.878 (0.129)
2154–512	6583	14.76	14.007 (0.034)	13.908 (0.028)	13.806 (0.046)
2216–657	10936	14.50	14.538 (0.037)	14.504 (0.062)	14.527 (0.094)
2311–068	7731	15.40	14.951 (0.036)	14.942 (0.071)	14.730 (0.093)
2312–024	6535	16.32	15.488 (0.059)	15.754 (0.170)	14.862 (null)
2316–173	11714	14.09	14.172 (0.030)	14.194 (0.045)	14.255 (0.077)
2352+401	8237	14.91	14.576 (0.038)	14.453 (0.061)	14.508 (0.086)

TABLEAU B.3 – Échantillon de naines blanches binaires riches en hydrogène

WD	V	J (σ_J)	H (σ_H)	K_S (σ_K)	Note
0023+388	15.97	13.810 (0.026)	13.268 (0.030)	12.939 (0.033)	
0034-211	14.51	11.454 (0.023)	10.884 (0.021)	10.648 (0.026)	
0104-331	13.56	14.740 (0.038)	14.162 (0.044)	13.913 (0.057)	*
0116-231	16.29	14.640 (0.042)	14.100 (0.037)	13.828 (0.055)	
0131-163	13.97	12.966 (0.027)	12.468 (0.028)	12.215 (0.030)	
0145-257	14.51	12.412 (0.026)	11.830 (0.021)	11.594 (0.023)	
0205+133	14.76	12.799 (0.022)	12.198 (0.024)	11.961 (0.020)	
0232+035	12.36	11.265 (0.024)	10.733 (0.021)	10.557 (0.019)	
0252-055	13.95	5.709 (0.019)	5.263 (0.047)	5.090 (0.018)	h
0303-007	16.00	13.164 (0.021)	12.627 (0.027)	12.405 (0.024)	
0308+096	15.23	13.723 (0.029)	13.183 (0.031)	12.934 (0.035)	
0347+171	13.73	7.776 (0.023)	7.401 (0.059)	7.249 (0.022)	h
0354+463	15.52	13.594 (0.027)	13.084 (0.038)	12.727 (0.027)	
0354-368	12.45	11.322 (0.023)	11.049 (0.026)	10.955 (0.021)	h
0419-487	14.39	10.720 (0.024)	10.148 (0.023)	9.852 (0.025)	
0429+176	13.91	10.753 (0.021)	10.161 (0.019)	9.913 (0.017)	
0430+136	16.45	13.533 (0.021)	12.877 (0.023)	12.634 (0.026)	
0628-020	15.33	10.729 (0.027)	10.144 (0.026)	9.857 (0.024)	
0642-166	8.44	-1.391 (0.109)	-1.391 (0.184)	-1.390 (0.214)	h
0710+741	14.97	14.692 (0.033)	14.423 (0.061)	14.148 (0.065)	
0718-316	15.46	13.253 (0.025)	12.749 (0.026)	12.502 (0.027)	
0736+053	10.92	-0.498 (0.150)	-0.666 (0.270)	-0.658 (0.322)	h
0800-533	15.73	13.703 (0.033)	13.186 (0.027)	12.991 (0.027)	
0823+316	15.78	16.588 (0.145)	15.957 (null)	15.727 (0.201)	
0842+490	15.00	7.296 (0.023)	7.277 (0.020)	7.239 (0.018)	h
0850-617	14.67	12.422 (0.038)	11.883 (0.037)	11.748 (0.034)	r
0854-256	16.51	12.426 (0.024)	11.788 (0.021)	11.478 (0.024)	r
0928-713	15.22	12.612 (0.024)	12.003 (0.026)	11.882 (0.023)	**
0934-587	15.56	11.167 (0.024)	11.062 (0.026)	10.997 (0.024)	**
0950+139	16.02	16.518 (0.097)	15.945 (0.157)	16.099 (0.258)	
1001+203	15.35	12.640 (0.021)	12.028 (0.021)	11.766 (0.020)	
1013-050	14.21	10.607 (0.027)	9.990 (0.025)	9.770 (0.023)	
1026+002	13.60	11.751 (0.024)	11.219 (0.026)	10.943 (0.019)	
1033+464	14.31	12.564 (0.022)	12.032 (0.024)	11.752 (0.018)	
1042-690	12.87	11.423 (0.026)	10.896 (0.027)	10.561 (0.021)	
1103-008	16.20	15.427 (0.045)	14.942 (0.064)	14.646 (0.109)	
1123+189	14.06	12.754 (0.023)	12.217 (0.019)	11.990 (0.020)	
1211-169	11.10	7.972 (0.019)	7.341 (0.024)	7.218 (0.022)	
1213+528	13.29	9.979 (0.022)	9.340 (0.027)	9.033 (0.021)	
1214+032	15.32	9.234 (0.018)	8.671 (0.022)	8.422 (0.018)	
1218+497	16.24	14.588 (0.038)	14.002 (0.036)	13.837 (0.060)	
1247-176	16.12	13.502 (0.024)	12.863 (0.023)	12.601 (0.031)	
1254-133	16.04	14.499 (0.033)	13.973 (0.051)	13.706 (0.051)	
1305+018	15.08	12.982 (0.026)	12.400 (0.023)	12.144 (0.021)	r
1307-141	16.44	13.849 (0.023)	13.226 (0.035)	13.013 (0.036)	
1312-253	15.69	14.977 (0.047)	14.531 (0.055)	14.277 (0.062)	*
1314+293	12.83	10.373 (0.019)	9.807 (0.029)	9.565 (0.025)	
1319-288	15.99	12.754 (0.024)	12.271 (0.023)	11.986 (0.023)	
1333-063	16.05	14.389 (0.033)	13.843 (0.036)	13.644 (0.041)	
1334-326	16.34	14.047 (0.029)	13.378 (0.026)	13.249 (0.032)	
1339+606	16.94	15.555 (0.058)	15.143 (0.074)	14.776 (0.082)	
1346-065	16.20	15.474 (0.060)	14.792 (0.073)	14.461 (0.095)	*
1347-129	14.68	10.829 (0.024)	10.271 (0.024)	9.983 (0.021)	
1415+132	15.35	14.263 (0.036)	13.725 (0.046)	13.553 (0.046)	

TABLEAU B.3 – Suite

WD	V	$J (\sigma_J)$	$H (\sigma_H)$	$K_S (\sigma_K)$	Note
1424+503	13.80	10.626 (0.020)	10.008 (0.015)	9.822 (0.022)	
1432-164	14.89	11.738 (0.024)	11.158 (0.028)	10.870 (0.024)	
1433+538	16.09	14.667 (0.035)	14.216 (0.050)	13.919 (0.045)	
1436-185	16.56	15.992 (0.079)	15.602 (0.095)	15.179 (0.143)	**
1436-216	15.94	13.312 (0.027)	12.770 (0.022)	12.519 (0.029)	
1443+336	16.39	14.284 (0.030)	13.725 (0.030)	13.516 (0.040)	
1459+305	13.98	11.227 (0.021)	10.635 (0.022)	10.401 (0.018)	r
1504-770	15.42	13.337 (0.024)	12.823 (0.024)	12.711 (0.034)	*
1603+125	15.60	13.552 (0.023)	13.120 (0.023)	12.977 (0.026)	h
1610+383	16.40	14.437 (0.034)	13.807 (0.036)	13.521 (0.042)	
1619+414	16.80	13.937 (0.021)	13.311 (0.029)	13.025 (0.027)	
1631+781	13.38	10.975 (0.021)	10.398 (0.021)	10.164 (0.014)	
1643+143	15.64	12.732 (0.024)	12.125 (0.031)	11.957 (0.024)	
1717-345	16.38	12.870 (0.039)	12.208 (0.060)	11.940 (0.054)	
1819+580	13.93	14.058 (0.032)	13.718 (0.035)	13.401 (0.039)	
1833+644	16.90	14.098 (0.030)	13.516 (0.030)	13.241 (0.038)	
1845+019	12.95	12.398 (0.053)	12.014 (0.082)	11.520 (0.047)	r
1918+110	16.07	15.380 (0.073)	13.935 (0.056)	13.259 (0.050)	r
1942+499	14.60	15.515 (0.052)	14.822 (0.062)	14.396 (0.090)	*
2011+398	14.50	13.044 (0.024)	12.520 (0.024)	12.260 (0.032)	
2022+198	15.60	14.370 (0.033)	13.845 (0.043)	13.595 (0.047)	
2046+396	14.43	14.611 (null)	14.535 (0.048)	14.403 (0.084)	r
2128+469	15.05	11.193 (0.024)	10.547 (0.024)	10.345 (0.018)	
2151-015	14.55	12.452 (0.029)	11.778 (0.022)	11.414 (0.027)	
2154+408	15.19	12.877 (0.025)	12.383 (0.033)	12.148 (0.027)	
2207-303	14.80	12.939 (0.036)	12.694 (0.039)	12.661 (0.034)	r
2253+054	16.19	11.393 (0.024)	11.126 (0.027)	11.055 (0.021)	
2256+249	13.66	11.675 (0.020)	11.180 (0.025)	10.915 (0.018)	
2257+162	16.14	15.439 (0.054)	15.088 (0.074)	14.736 (0.108)	
2309-276	17.08	15.039 (0.047)	14.673 (0.069)	14.505 (0.093)	*
2317+268	16.30	14.609 (0.033)	14.074 (0.036)	13.783 (0.050)	
2350-706	14.40	8.920 (0.032)	8.690 (0.036)	8.674 (0.021)	h

Notes : r – le compagnon de la naine blanche est partiellement résolue dans l’atlas 2MASS.

h – le compagnon est une étoile chaude de type inférieur à M .

$*$ – le compagnon n’est pas mentionné dans la littérature.

** – le candidat est particulièrement incertain et discuté dans le texte.

Pour 0354-368 et 1603+125, la magnitude V est probablement dominé par le compagnon.

TABLEAU B.4 – Échantillon de naines blanches binaires riches en hélium

WD	V	$J (\sigma_J)$	$H (\sigma_H)$	$K_S (\sigma_K)$	Note
0003-570	15.50	13.309 (0.026)	12.629 (0.024)	12.432 (0.027)	
0426+588	12.41	6.622 (0.021)	6.012 (0.020)	5.717 (0.021)	
0738-172	13.05	10.155 (0.022)	9.628 (0.023)	9.291 (0.021)	
1004-178	15.60	12.555 (0.022)	11.983 (0.027)	11.745 (0.023)	*
1132-325	15.00	4.784 (0.228)	4.138 (0.214)	4.022 (0.036)	h
1133+358	15.77	11.625 (0.019)	11.079 (0.021)	10.802 (0.019)	
1215+323	16.99	11.000 (0.021)	10.414 (0.018)	10.140 (0.018)	r
1333+487	14.01	11.794 (0.023)	11.200 (0.017)	10.927 (0.023)	
2005-525	15.58	14.576 (0.048)	14.157 (0.050)	14.171 (0.059)	*

Voir le Tableau 4.3 pour les notes.

Annexe C

Cas Particuliers de l'Échantillon de 2MASS

Cette section discute d'objets individuels dont les résultats de la minimisation ont attiré notre attention. Tout d'abord, on s'intéresse aux 11 étoiles DA de la Figure 4.6 dont l'écart entre la température photométrique et spectroscopique est plus de 20%.

0518+333, 1349+144 – Ces objets sont des naines blanches doubles pour lesquelles A. Gianninas (2005) obtient des masses spectroscopiques de 0.39 et 0.46 M_{\odot} respectivement.

1053-290 – On obtient une température photométrique de 9700 K pour cet objet comparée aux paramètres spectroscopiques de $T_{\text{eff}} = 16,200$ K et $M = 0.43 M_{\odot}$. La faible masse spectroscopique et la faible température photométrique laissent croire que cet objet est également une naine blanche double.

1457-086 – Cette étoile DAZ a une température spectroscopique de 21,500 K et une forte abondance de calcium (Koester et al. 2005). Nous obtenons une température photométrique de 13,200 K avec la magnitude V de Kilkenny et al. (1997; WDC)¹. La minimisation photométrique est acceptable mais la bande K_S montre un excès avec un flux supérieur à la bande H .

0314+648, 1120+439, 1334-160, 1714-547, 1809+284, 2148+539, 2329+267, 2333-049 – Tous ces objets ont une minimisation photométrique excellente, mais la température spec-

¹Les références avec l'indice WDC sont des magnitudes trouvées dans le *White Dwarf Catalog*.

troscopique est dans tous les cas au moins 20% supérieure à la température photométrique. Aucun des objets a une masse significativement en dessous de la moyenne et il n'y a pas de raison de croire que ce sont des naines blanches binaires. La raison la plus probable de l'écart est une erreur sur les magnitudes V provenant de Hintzen & Jensen (1979; WDC) (0314+648), Green et al. (1986; WDC) (1120+439), Silvestri et al. (2002; WDC) (1334-160), Wegner (1979; WDC) et Wickramasinghe & Bessell (1977; WDC) (1714-547), Wegner (1983; WDC) et Giclas (1974; WDC) (1809+284), Liebert et al. (1983; WDC) (2148+539), Wegner & Dupuis (1993; WDC) et Routly (1972; WDC) (2329+267), Hintzen & Jensen (1969; WDC) (2333-049).

1408+323 – Pour cet objet bien connu, on obtient également une excellente minimisation avec une température photométrique de 14,500 K tandis que la température spectroscopique prend une valeur de 18,700 K. Bien que cet objet possède plusieurs déterminations de la magnitude V , ces dernières diffèrent sur un intervalle de près de 0.1 magnitude, ce qui pourrait expliquer l'écart observé.

Nous discutons maintenant de toutes les autres minimisations qui ont attiré notre attention.

0127-311 – Cet objet n'a pas de classification spectroscopique claire. Friedrich et al. (2000) ont observé l'étoile plusieurs fois dans une période de 10 ans et affirment que c'est une DB variable. Des observations plus récentes de Schmidt et al. (2001) identifient l'étoile comme non-magnétique avec une raie faible et élargie dans le visible pouvant être attribuée soit au doublet de Na I ou à He I. Notre minimisation à $T_{\text{eff}} = 8300$ K avec la magnitude V de Reimers et al. (1996; WDC) contredit la classification de DB et montre que l'étoile pourrait être binaire.

0203-181, 1128-143 – Ces objets ont été identifiés spectroscopiquement comme DB (0203-181, Putney 1997; 1128-143 Friedrich et al. 2000). La photométrie 2MASS de ces objets est inhabituelle avec un flux en K_S supérieur au flux en H , avec laquelle nous obtenons des températures de 8000 K, incompatible avec le type spectral. Ces objets pourraient avoir des compagnons ou des disques.

0239+109 – Cet objet a été classifié comme une binaire DA+DC (Bergeron et al. 1990). Nous

trouvons une température photométrique de 7860 K qui est compatible avec la température de la composante DC déterminée dans Bergeron et al.

1117-023 – En utilisant la magnitude V de Koester et al. (2001), nous trouvons pour cette DA une température au delà de 40,000 K, incompatible avec la température spectroscopique de 13,800 K de Koester et al.

1542-275 – Cet objet a été identifié comme une DB4 à partir d'observations spectroscopiques (Farihi et al. 2005). En utilisant la magnitude V de Silvestri et al. (2002; WDC), on obtient une température de ~ 10000 K, incompatible avec le type spectral. Bien que la minimisation soit d'une qualité acceptable, il est possible que la magnitude V soit légèrement en erreur.

2309+258 – Nous obtenons une mauvaise minimisation pour cette étoile DA avec aucun des points du modèle à l'intérieur des barres d'erreurs. Il est probable que la magnitude V de Wegner & Swanson (1993; WDC) soit significativement en erreur.