

Université de Montréal

**Une exploitation additionnelle du catalogue de mouvements propres LSPM
pour l'étude statistique des étoiles naines blanches**

par
Antoine Darveau-Bernier

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

Août, 2016

© Antoine Darveau-Bernier, 2016.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

**Une exploitation additionnelle du catalogue de mouvements propres LSPM
pour l'étude statistique des étoiles naines blanches**

présenté par:

Antoine Darveau-Bernier

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

René Doyon,	président-rapporteur
Pierre Bergeron,	directeur de recherche
Patrick Dufour,	membre du jury

Mémoire accepté le: 30 août 2016

SOMMAIRE

Ce mémoire présente une exploitation additionnelle du catalogue LSPM comportant deux grandes parties, soit la poursuite du relevé des naines blanches à l'intérieur d'un rayon de 40 pc et l'étude de la contrepartie SDSS de ce catalogue. La première consiste à utiliser les critères basés sur des diagrammes de mouvements propres réduits établis dans des travaux antérieurs afin de dresser une liste de candidates naines blanches. Quelques modifications quant à l'ordre de priorité ainsi que le critère basé sur les magnitudes photographiques seront apportées. Une approche de moindres carrés non-linéaire appliquée aux magnitudes observées dans les systèmes photométriques disponibles permet ensuite de déterminer la distance des objets sélectionnés par comparaison avec les plus récents modèles de naines blanches disponibles. Un second critère est appliqué en se basant sur la qualité de l'ajustement résultant de la procédure. Ceci mènera à l'identification de 31 nouvelles naines blanches, dont 11 situées vraisemblablement à moins de 40 pc. Une nouvelle liste de candidates a aussi pu être établie pour la poursuite du relevé. La seconde partie consiste à utiliser tous les objets du 7e relevé du SDSS identifiés dans le catalogue LSPM pour l'étude statistique des naines blanches, essentiellement via la détermination de leur fonction de luminosité. Pour ce faire, un critère basé sur les diagrammes de mouvements propres réduits sera encore une fois utilisé. La distance des objets sélectionnés sera déterminée selon la même procédure, mais cette fois en ne se limitant pas à 40 pc. La méthode de pondération selon le volume observable ($1/v_{\max}$) est utilisée afin de compenser pour le biais introduit par la sensibilité du catalogue à la magnitude. Cependant, d'autres facteurs viennent influencer la détermination de la fonction de luminosité et une analyse de ceux-ci est finalement présentée.

Mots clés : voisinage solaire - distance - étoiles : naines blanches - techniques : $1/v_{\max}$ - techniques : photométrie et spectroscopie - paramètres fondamentaux - fonction de luminosité

ABSTRACT

We present an additional exploitation of the Lépine & Shara Proper Motion catalog (LSPM) divided in two main parts: a follow up and some improvements on the census of northern white dwarfs within 40 pc of the Sun and a study of the SDSS white dwarfs component in the LSPM survey. The former consists in the use of criteria previously established in order to create a list of white dwarf candidates with an associated priority. The priority order has been enriched and one of the criteria has been slightly modified. We then use a non-linear least square method to the observed magnitudes in each available photometric system simultaneously in order to determine the atmospheric parameters and, in particular, the distance of each white dwarf candidate. This approach allows a second criteria to be applied on our sample based on the goodness of the fit. This will lead us to the identification of 31 new white dwarfs, from which 11 are likely to remain within 40 pc of the Sun. A new list of 340 candidates has also been established for eventual observations. The latter consists in the use of all the objects from the 7th data release of the SDSS that have a counterpart in the LSPM catalog to elaborate a statistical study of white dwarfs, in this case by calculating the white dwarf luminosity function. To do so, one of the same criterion mentioned above will be used to make a first selection of presumed white dwarfs. Afterwards, the distance will be determined by the same least-square method, but without any restriction on the distance. To balance the effect due to the sensibility in magnitude of the survey, we used a ponderation method based on the maximum observable volume ($1/v_{\max}$). However, other factors come to affect our results and the last part of this work concentrates on their identification.

Keywords: solar neighborhood - distance - stars: white dwarfs - luminosity function - fundamentals parameters - techniques: $1/v_{\max}$ - techniques: photometric and spectroscopic.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	iii
ABSTRACT	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
REMERCIEMENTS	xii
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 : LE CATALOGUE LSPM	3
2.1 L'algorithme	3
2.2 Achèvement par l'ajout d'autres catalogues de mouvements propres	4
2.3 Astrométrie	4
2.4 Photométrie	5
2.5 Comparaison avec le catalogue USNO-B1.0	6
CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE	8
3.1 Modèles d'atmosphère	8
3.2 Méthode photométrique	8
3.3 Méthode spectroscopique	11
CHAPITRE 4 : LA FONCTION DE LUMINOSITÉ	16
4.1 Intérêt théorique	18
4.2 Méthode $1/v_{\max}$	21

**CHAPITRE 5 : POURSUITE DU RELEVÉ DES NAINES BLANCHES À
L'INTÉRIEUR D'UN VOLUME DE 40 pc 24**

5.1 Critères de sélections basés sur les diagrammes de mouvements propres réduits 24

5.1.1 Critère basé sur le système *ugriz* 25

5.1.2 Approximation du filtre V 26

5.1.3 Critère basé sur le système *GALEX* 26

5.1.4 Critère basé sur le système 2MASS 27

5.1.5 Critère basé sur le système de magnitudes photographiques 28

5.1.6 Critères additionnels et ordre de priorité 29

5.2 Identification des naines blanches connues 30

5.3 Détermination de la distance 31

5.4 Critère additionnel sur le χ^2 32

5.5 Analyse rétrospective des critères basés sur les diagrammes de mouvement
propres réduits 37

5.6 Observations 42

5.6.1 État du relevé 42

5.6.2 Spectres observés 43

5.6.3 Analyse spectroscopique 52

5.6.4 Analyse photométrique 52

5.6.5 Comparaison et résultats 53

**CHAPITRE 6 : ÉTUDE DE LA POPULATION DE NAINES BLANCHES
DANS LA CONTREPARTIE SDSS DU CATALOGUE DE
MOUVEMENT PROPRE LSPM 64**

6.1 L'échantillon 64

6.2 Méthode $1/v_{max}$ 67

6.3 Effet du $\log g$ 67

6.4 Effet du rougissement 72

6.5 Évolution en distance de la distribution des magnitudes absolues 73

6.6 Effet de la coupure en mouvement propre 75

CHAPITRE 7 :CONCLUSION	80
BIBLIOGRAPHIE	82

LISTE DES TABLEAUX

5.I	Critères de mouvements propres réduits appliqués aux contaminants identifiés par inspection visuelle des spectres observés	37
5.II	Paramètres atmosphériques des naines blanches découvertes	63

LISTE DES FIGURES

3.1	Exemples de résultats pour la méthode photométrique.	12
3.2	Exemple de résultat pour la méthode spectroscopique (DA).	14
3.3	Exemple de résultat pour la méthode spectroscopique (DA+dM).	15
4.1	Comparaison entre quatre fonctions de luminosité observées.	17
4.2	Comparaison entre les fonctions de luminosité théoriques et celle observée pour l'échantillon à moins de 40 pc.	20
5.1	Diagramme de mouvements propres réduits ($H_g, g - z$).	25
5.2	Diagramme de mouvements propres réduits ($H_V, \text{NUV}-V$).	27
5.3	Diagramme de mouvements propres réduits ($H_V, V - J$).	28
5.4	Diagramme de mouvements propres réduits ($H_V, V - I_N$).	29
5.5	Exemples de résultats selon le χ^2 pour la méthode photométrique.	34
5.5	Exemples de résultats selon le χ^2 (suite).	35
5.5	Exemples de résultats selon le χ^2 (suite).	36
5.6	Diagramme de mouvements propres réduits ($H_g, g - z$) pour les objets dont le critère $V - J$ n'est pas applicable.	40
5.7	Diagramme de mouvements propres réduits ($H_V, V - I_N$) pour les objets dont le critère $V - J$ n'est pas applicable.	41
5.8	État du relevé des naines blanches.	42
5.9	Spectres des nouvelles naines blanches de type DA.	45
5.10	Spectre de la nouvelle naine blanche de type DA+dM.	46
5.11	Spectres des nouvelles naines blanches de type DC.	47
5.12	Spectres des nouvelles naines blanches de type DB, DQ, et DZ.	48
5.13	Spectres des objets identifiés comme des contaminants.	49
5.13	Spectres identifiés comme des contaminants (suite).	50
5.14	Types spectraux indéterminés.	51
5.15	Résultats de l'analyse spectroscopique pour les 20 nouvelles DA.	54

5.16	Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles DA découvertes.	55
5.16	Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles DA (suite).	56
5.16	Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles DA (suite).	57
5.16	Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles DA (suite).	58
5.17	Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles naines blanches de type spectral différent de DA.	59
5.17	Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles naines blanches de type spectral différent de DA (suite).	60
5.17	Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles naines blanches de type spectral différent de DA (suite).	61
5.18	Comparaison entre les températures effectives photométriques et spectroscopiques pour les nouvelles DA.	62
6.1	Sensibilité de la fonction de luminosité à l'âge.	65
6.2	Empreinte celeste du 7e relevé du SDSS.	66
6.3	Fonction de luminosité pondérée par l'inverse du volume maximum	68
6.4	Comparaison entre les températures effectives photométriques et spectroscopiques.	70
6.5	Distribution des valeurs de χ^2	71
6.6	Comparaison entre les températures effectives photométriques et spectroscopiques en corrigeant pour le rougissement.	72
6.7	Influence du $\log g$ sur la fonction de luminosité calculée à l'aide de la méthode $1/v_{max}$	73
6.8	Fonction de luminosité corrigée pour le rougissement.	74
6.9	Évolution des paramètres des distributions de M_g selon la distance.	75
6.10	Distributions en vitesses tangentielles.	76

6.11	Distributions des rapports v/v_{\max}	78
6.12	Effet des coupures en v_{\tan} sur la fonction de luminosité.	79

REMERCIEMENTS

Je voudrais premièrement remercier mon directeur de recherche, Pierre Bergeron, pour m'avoir fait confiance tout au long de mon parcours. Il m'a d'abord initié à ce qu'est la recherche, à l'occasion de mon premier stage d'été, et a su, durant ces deux dernières années, me faire devenir un bien meilleur chercheur que je ne l'étais (pour ne pas dire un chercheur tout court!). J'aimerais aussi le remercier pour avoir su gérer mon attirance envers la dernière minute, ce qui lui a sûrement causé une petite surdose de stress. Finalement, sur une note humoristique, j'aimerais le remercier pour ses courriels...

Je remercie aussi ma famille, qui m'a toujours supporté dans mes projets et cru en mes capacités. C'est sans équivoque un des facteurs qui m'a mené où j'en suis.

Ensuite, j'aimerais bien sûr remercier mes amis, sans qui ma présence à l'Université de Montréal ne serait pas aussi agrémentée de joie et de rires.

Je remercie aussi mes collègues de bureau, qui m'ont détourné de mon travail de temps en temps, mais aussi qui n'ont pas bronché malgré tout le va et vient causé par mon implication étudiante.

Finalement, je voudrais remercier Marilyn, qui savait me faire oublier tout ce qui pouvait me trotter dans la tête. C'est toujours bon pour garder le moral!

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Les naines blanches représentent la fin de vie de 97% des étoiles de notre galaxie. Leur masse se situe environ entre 0.07 et $8 M_{\odot}$, la grande majorité d'entre elles se regroupant près de $0.6 M_{\odot}$. Présentant un rayon typique de l'ordre de celui d'une planète tellurique comme la Terre, ces objets sont sujets à de très grandes densités, soit d'environ $10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Conséquemment, ceux-ci présenteront des gravités de surface très élevées ($\log g \sim 8$) ainsi que de faibles luminosités. Leur masse n'étant pas assez grande pour provoquer les réactions nucléaires présentes au coeur des étoiles typiques, c'est la pression de dégénérescence des électrons qui devra combattre la gravité et empêcher la naine blanche de s'effondrer sur elle-même. L'explication de ce phénomène fut d'ailleurs une des premières réussites de la mécanique quantique.

La plupart des progéniteurs des naines blanches ont brûlé l'hydrogène et l'hélium dans leur noyau et la majeure partie de la masse est formée des restes de la combustion de l'hélium, soit principalement du carbone et de l'oxygène. Les proportions sont cependant difficiles à déterminer précisément, à cause de l'incertitude liée à la fusion de l'hélium. Les gravités intenses auxquelles ces étoiles sont sujettes conduit à un tri gravitationnel particulièrement efficace. Leur structure typique sera donc composée d'un noyau de carbone et d'oxygène entouré d'une mince couche d'hélium, au-dessus de laquelle repose un voile d'hydrogène. Malgré leur très faible épaisseur, ces couches sont très opaques et joueront un rôle prépondérant dans l'évolution des naines blanches. Les quantités d'hydrogène et d'hélium résiduels sont directement reliées aux stades précurseurs des naines blanches. D'ailleurs, ces couches sont en soi le sujet d'un large domaine d'étude.

Les naines blanches ne peuvent que se refroidir puisqu'elles ne font plus de réactions nucléaires, la pression de dégénérescence des électrons les empêchant d'atteindre des pressions suffisantes. On peut donc s'attendre à ce que le rayon soit indépendant de la température, tout au long de l'évolution de l'étoile. De plus, cette pression de dégénérescence mène

à la fameuse relation masse-rayon. Celle-ci se résume grossièrement à dire que plus une naine blanche est massive, plus le rayon sera petit. Cette relation particulière devient très pratique dans la détermination de leur distance. En effet, la quantité de lumière que l'on mesure dépend, entre autres, de l'angle solide ($\pi R^2/D^2$). Or, si l'on réussit à déterminer la masse (et donc le rayon), on peut alors obtenir un bon estimé de la distance. Cette technique sera d'ailleurs utilisée de manière récurrente dans le cadre des travaux présentés ici.

La relation entre la masse et le rayon dépend aussi du stade d'évolution des naines blanches et des processus de refroidissement. Les modèles de Fontaine et al. (2001) tiennent compte de manière précise des mécanismes physiques y étant reliés. Ceux-ci seront aussi utilisés pour la majeure partie de cette étude.

Il est évident que l'amélioration de la compréhension de l'évolution des naines blanches et de leur structure est non seulement utile dans le domaine leur étant propre, mais dans celui concernant leurs progéniteurs, c'est-à-dire 97% des objets de la galaxie. Une manière de valider les modèles est de calculer la fonction de luminosité des étoiles naines blanches. Celle-ci est décrite plus en détail dans le chapitre 4. Son calcul nécessite cependant d'établir de grands échantillons et c'est l'objet de cet ouvrage.

Les travaux présentés dans Limoges et al. (2013) et Limoges et al. (2015) ont confirmé l'efficacité de l'utilisation de critères basés sur des mouvements propres du catalogue LSPM (décrit dans le chapitre 2) afin d'isoler les naines blanches des autres objets stellaires. Nous présenterons donc, en premier lieu, la poursuite des travaux de Limoges et al. (2015) en y apportant quelques améliorations. La meilleure compréhension des critères de sélection permettra ensuite d'isoler efficacement un grand nombre de naines blanches potentielles afin de calculer une fonction de luminosité pour de grandes échelles.

CHAPITRE 2

LE CATALOGUE LSPM

Le catalogue LSPM tente de répertorier les objets dont le mouvement propre μ est plus grand que $40 \text{ mas} \cdot \text{année}^{-1}$. Il est basé sur l'algorithme SUPERBLINK décrit par Lépine et al. (2002) et il a été étudié par Lépine & Shara (2005) et Lépine & Gaidos (2011) en ce qui a trait à sa qualité, notamment en le corrélant aux précédents catalogues de mouvements propres. Une liste des objets ayant un mouvement propre supérieur à $150 \text{ mas} \cdot \text{année}^{-1}$ est déjà publiée par Lépine & Shara (2005). Cette section résume les caractéristiques du catalogue.

2.1 L'algorithme

L'algorithme SUPERBLINK utilise les images de différentes époques et les compare directement afin d'identifier les objets s'étant déplacés. Il est optimisé pour traiter les plaques POSS-I (année 1950) et POSS-II (Reid et al., 1991) des *Digitized Sky Surveys* (DSS). Les images d'un même champ sont soustraites afin de faire ressortir les objets s'étant déplacés. Ainsi, ceux n'ayant pas un mouvement propre assez important s'annuleront tout simplement. Sinon, une paire de signaux négatif et positif apparaîtra de manière distincte ou en partie superposés. Il est parfois nécessaire de réduire la qualité des images les plus récentes afin de pouvoir procéder à cette étape. Afin de mieux analyser les objets à faible mouvement propre identifiés après une première application de l'algorithme, ceux-ci sont effacés des plaques de l'époque la plus ancienne et on réeffectue l'opération. Ainsi, les deux signaux n'interfèrent pas lorsqu'ils sont soustraits. Ensuite, le résultat de la soustraction est additionné aux plaques de l'époque la plus ancienne en appliquant le décalage nécessaire à l'annulation des deux signaux. Ce décalage se trouve à être le mouvement propre en pixels par année, qui sera converti éventuellement en $\text{mas} \cdot \text{année}^{-1}$. L'usage de critères basés sur la magnitude ainsi que la densité de magnitude permet de déterminer la vraisemblance de l'association entre deux objets.

L'algorithme comporte cependant quelques failles. En premier lieu, pour des magnitudes se situant près de la limite de sensibilité des plaques POSS-I ($V \simeq 19$), la détection se fait beaucoup plus difficilement. C'est particulièrement le cas pour des régions densément peuplées, comme le disque mince de la galaxie. En second lieu, la saturation des plaques POSS-I et POSS-II peut mener à une mauvaise identification du centroïde. Cet effet se répercutera dans le calcul des mouvements propres. Seulement les cibles ayant $V > 10$ seront donc conservées. Certains champs ne pourront même pas être analysés par SUPERBLINK pour des magnitudes $V \leq 4$.

2.2 Achèvement par l'ajout d'autres catalogues de mouvements propres

Afin de palier la coupure agissant sur les objets trop brillants, les données du Tycho-2 *Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars* (Tycho-2; Høg et al. 2000) ainsi que du *All-sky Compiled Catalogue of 2.5 million stars* (ASCC-2.5; Kharchenko 2001) ont été ajoutées. Les deux catalogues sont basées sur les données du satellite *Hipparcos* et fournissent des mouvements propres pour chacun de leurs objets. Le second est utilisé principalement pour compléter le premier. Par le fait même, le catalogue LSPM a dû être corrélé à ceux-ci à titre comparatif. Pour les objets se retrouvant dans plusieurs catalogues, le mouvement propre le plus précis a été conservé.

Par ailleurs, dans le but d'identifier des systèmes binaires n'étant pas bien définis dans les plaques photographiques, les objets du catalogue LSPM ont été associés à ceux du 2MASS *All-Sky Point Source Catalog* (Cutri et al., 2003). Ce dernier peut résoudre des séparations allant jusqu'à 1 seconde d'arc, contrairement aux plaques photographiques qui peinent à distinguer des séparations inférieures à 10 secondes d'arc. Les magnitudes *JHKs* ont donc été rendues disponibles pour ces objets.

2.3 Astrométrie

Afin de déterminer les coordonnées selon le Système de référence céleste international (en anglais *International Celestial Reference System*, ICRS) pour l'époque 2000.0, les données *Hipparcos* extrapolées (van Leeuwen, 2007) sont utilisées prioritairement. Viennent

ensuite les coordonnées de 1991.25 fournies par Tycho-2 extrapolées pour l'époque 2000.0 à l'aide des mouvements propres. À défaut de n'avoir aucune de ces données, ce qui est le cas pour une grande proportion des objets, les coordonnées 2MASS sont utilisées. Ces données sont disponibles pour une majorité d'objets et ont été prises avec une relativement bonne précision selon le système ICRS, à une époque très près de 2000.0. Elles sont donc très fiables. Finalement, lorsqu'aucune de ces coordonnées n'est disponible, les positions sont extrapolées à partir des plaques POSS-II et des mouvements propres.

2.4 Photométrie

Les plaques photographiques utilisées par l'algorithme SUPERBLINK fournissent elles-mêmes des données photométriques. Pour les plaques POSS-I, uniquement les filtres rouges (émulsion xx103aE + plexi) sont disponibles. Pour POSS-II, les filtres bleus (émulsion IIIa-J avec filtre GG385), rouges (émulsion IIIaF avec filtre RG610) et proche infrarouge (émulsion IVN avec filtre RG9) sont disponibles. Il est important de noter que chaque objet n'est pas nécessairement visible dans chacun des filtres. Ce sont les filtres rouges de POSS-II qui ont été utilisés par l'algorithme. Cependant, extraire des données photométriques directement à partir de plaques numérisées n'est pas une tâche facile. C'est le catalogue UNSO-B1.0 (Monet et al., 2003), fournissant aussi les mouvements propres des objets s'y retrouvant, qui a été utilisé à cette fin. Ce dernier est aussi basé sur des plaques photographiques dont POSS-I et POSS-II. Le catalogue LSPM a donc été corrélé à USNO-B1.0 afin d'utiliser des magnitudes photographiques B_J , R_F et I_N (IIIa-J, IIIa-F et IV-N) déterminées à partir de numérisations fiables des plaques POSS-II. La comparaison des deux catalogues est cependant très conflictuelle et sera traitée dans la section 2.5. Par ailleurs, les magnitudes photographiques présentent des incertitudes allant de 0.3 mag à 0.5 mag (Monet et al., 2003), et sont sujettes à des erreurs systématiques. L'ajout d'autres systèmes photométriques est donc nécessaire pour pallier à leur manque de précision.

Heureusement, les étapes menant à la construction du catalogue LSPM ont nécessité l'association aux objets des catalogues Tycho-2, ASCC-2.5 ainsi que 2MASS, rendant la tâche d'extraire les données photométriques y étant associées plus facile. Les magnitudes

B_T et V_T de Tycho-2 ayant des erreurs inférieures à 0.1 mag ont donc été acquises. Les filtres B et V de Johnson disponibles dans le ASCC-2.5 ont été transformées en magnitudes B_T et V_T par souci d'uniformité, à l'aide de relations empiriques. Le catalogue 2MASS a, quant à lui, permis d'extraire les filtres JHK_s , ayant une incertitude de 0.02 mag pour des magnitudes allant jusqu'à 15. Il est complet jusqu'à $J \simeq 16.5$.

Finalement, deux autres systèmes photométriques ont été ajoutés. Le cinquième relevé du catalogue *GALEX* (Gil de Paz et al., 2009) ainsi que le septième relevé du SDSS (Abazajian et al., 2009) ont été corrélés au catalogue LSPM afin d'extraire les magnitudes FUV, NUV et *ugriz*. Ces dernières étant les plus précises disponibles dans le catalogue LSPM, avec des erreurs de l'ordre de 1% pour les bandes *griz* et 2% pour *u* (Padmanabhan et al., 2008).

2.5 Comparaison avec le catalogue USNO-B1.0

Étant donné que le catalogue USNO-B1.0 (Monet et al., 2003) est aussi basé sur des numérisations de plaques photographiques, incluant POSS-I et POSS-II, et qu'il dispose de relativement bonnes données photométriques, la comparaison avec le catalogue LSPM s'impose. Plusieurs problèmes ont déjà été relevés par des travaux précédents. En particulier, pour les objets à haut mouvement propre ($\mu > 180 \text{ mas} \cdot \text{année}^{-1}$) et situés à de hautes latitudes galactiques, le taux de faux positifs est évalué à 99% par Gould (2003). La comparaison avec les objets du catalogue NLTT laisse aussi entendre que le degré de complétude du catalogue est très faible pour de hauts mouvements propres dans les régions situées à de faibles latitudes galactiques ($\sim 30\%$ d'objets manquants). Plusieurs problèmes sont mis en lumière grâce à la corrélation avec le catalogue LSPM. Notamment, certains objets ayant un mouvement propre élevé sont considérés comme plusieurs objets distincts au lieu d'un seul s'étant déplacé. D'autres ne sont tout simplement pas listés dans USNO-B1.0 alors qu'ils sont clairement visibles sur les plaques. Un travail de moine a donc dû être fait afin d'associer les bonnes magnitudes aux bons objets. Globalement, la comparaison entre les deux catalogues (voir Lépine & Shara 2005) laisse entendre que USNO-B1.0 est au mieux complet et fiable à 90% pour de hautes latitudes galactiques et pour les objets

dont le mouvement propre est inférieur à $500 \text{ mas} \cdot \text{année}^{-1}$ et dont $14 < V < 19$. Sinon, le degré de complétude tombe en-dessous de 70%.

En comparaison, pour le catalogue LSPM, les tests internes permettent de déterminer une borne inférieure pour le degré de complétude à 90% pour des objets ayant $V \leq 19$ et étant situés à de faibles latitudes galactiques. Pour des latitudes galactiques élevées ($|b| > 15^\circ$), le degré de complétude est évalué à 99.0% pour des objets plus brillants que $V = 19$.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Modèles d’atmosphère

Les modèles utilisés dans l’analyse qui suit sont principalement calculés en considérant des atmosphères d’hydrogène pur ou d’hélium pur. Les premiers sont décrits originalement par Bergeron et al. (1995) et des améliorations décrites par Tremblay & Bergeron (2009) leur ont été apportées subséquemment. Les seconds sont décrits par Bergeron et al. (2011).

En résumé, les modèles riches en hydrogène tiennent compte des effets d’équilibre thermodynamiques non-locaux pour des températures effectives supérieures à 30,000 K. La convection est traitée à l’aide de la théorie de la longueur de mélange en utilisant la paramétrisation $ML2/\alpha = 0.7$. Pour tenir compte de manière réaliste des opacités dues aux transitions de type lié-lié et lié-libre et aux populations des divers niveaux d’énergie, l’emploi du formalisme de Hummer & Mihalas (1988) est nécessaire. Les atomes d’hydrogène, de H^- et l’hydrogène moléculaire sont traités de cette manière. Les améliorations de Tremblay & Bergeron (2009) impliquent entre autres un traitement plus précis des profils d’élargissement Stark des raies d’hydrogène ainsi que de l’opacité de l’aile rouge de la raie $Ly\alpha$ calculée par Kowalski & Saumon (2006).

La grille de modèles utilisée pour la majeure partie de l’analyse couvre des intervalles de température allant comme suit : 1500 K - [250 K] - 5500 K - [500 K] - 17,000 K, 20,000 K - [5000 K] - 90,000 K - [10,000 K] - 120,000 K. Les températures entre crochets donnent les intervalles utilisés. La grille couvre aussi des $\log g$ allant de 6.00 à 9.50 avec par bonds de 0.25.

3.2 Méthode photométrique

La méthode photométrique, décrite en détail par Bergeron et al. (1997), consiste à utiliser les magnitudes apparentes de différents systèmes photométriques afin de déterminer les paramètres physiques des étoiles naines blanches. Pour ce faire, les flux théoriques

moyennés sur une bande passante donnée devront être comparés aux flux moyens observés. La conversion entre le flux moyen f_λ^m et la magnitude observée dans une bande m est donnée par la relation

$$m = -2.5 \log f_\lambda^m + c_m \quad (3.1)$$

où c_m est une constante de calibration. Pour calculer f_λ^m à partir de la distribution d'énergie, on utilise les fonctions de transmission S_λ propres aux différents filtres selon l'équation suivante :

$$f_\lambda^m = \frac{\int_0^\infty S_\lambda f_\lambda \lambda \, d\lambda}{\int_0^\infty S_\lambda \lambda \, d\lambda} \quad (3.2)$$

où f_λ est le flux observé. La détermination des c_m n'est pas triviale et la démarche est décrite en détail dans Holberg & Bergeron (2006). Afin d'y parvenir, les auteurs se sont basés principalement sur les données spectro-photométriques de l'étoile Vega fournies par Bohlin & Gilliland (2004) et obtenues à partir du télescope spatial Hubble. Les bandes passantes pour le système 2MASS (JHK_s) sont décrites par Cohen et al. (2003) et celles du système USNO-B1.0 (B_J, R_F, I_N) par Monet et al. (2003).

Pour les systèmes *ugriz* et *GALEX* (FUV, NUV), les flux doivent plutôt être moyennés selon l'équation

$$f_\nu^m = \frac{\int_0^\infty S_\nu f_\nu \, d[\log \nu]}{\int_0^\infty S_\nu \, d[\log \nu]} \quad (3.3)$$

et sont basés sur le système de référence AB₉₅. Pour ces deux ensembles de magnitudes, on utilise respectivement les bandes passantes tirées de Doi et al. (2010) et de Morrissey & GALEX Science Team (2004). Malgré que le système *ugriz* soit basé sur le système AB₉₅, des corrections décrites par Eisenstein et al. (2006) doivent être appliquées en sus.

La conversion des magnitudes observées en flux moyennés étant maintenant possible, il suffit de comparer ces derniers avec les flux moyens théoriques. Les flux théoriques sont calculés à partir du flux d'Eddington (déterminé à l'aide des modèles d'atmosphère) selon la relation $f_\lambda = 4\pi (R/D)^2 H_\lambda$, où R est le rayon de l'étoile, D est sa distance par rapport à l'observateur et H_λ est le flux d'Eddington. De manière pratique, on peut calculer directement les flux d'Eddington moyennés, puisque R et D ne dépendent pas de

λ . Il suffit alors d'utiliser les deux équations suivantes :

$$H_\lambda^m = \frac{\int_0^\infty S_\lambda H_\lambda \lambda \, d\lambda}{\int_0^\infty S_\lambda \, d\lambda} \quad (3.4)$$

et

$$f_\lambda^m = 4\pi \left(\frac{R}{D}\right)^2 H_\lambda^m \quad (3.5)$$

On a donc 2 paramètres déterminés par la méthode photométrique, soit l'angle solide donné par le rapport $\pi(R/D)^2$ et H_λ . Généralement, ce dernier dépend de 3 facteurs, soient la température effective, le $\log g$ ainsi que la composition atmosphérique de l'objet. Or, dans ce cas-ci, la composition est déterminée préalablement et le $\log g$ est fixé. On utilise alors l'approche non-linéaire de moindres carrés de Levenberg-Marquardt (Press et al., 1986) pondérée par l'incertitude afin de déterminer la solution correspondant le mieux aux flux observés. Dans le cas où la parallaxe est connue, un $\log g$ initial de 8 est choisi. Une fois la T_{eff} et R déterminés (D est connu avec la parallaxe), des modèles d'évolution similaire à ceux décrits par Fontaine et al. (2001)¹ sont utilisés afin de déterminer la masse de la naine blanche. On peut alors déterminer une nouvelle gravité de surface grâce à la relation bien connue

$$g = \frac{GM}{R^2}. \quad (3.6)$$

Cette nouvelle valeur est généralement différente du $\log g$ initial et, le cas échéant, il faudra réitérer en mettant à jour la valeur du $\log g$ initial. Les paramètres atmosphériques sont recalculés et on répète les étapes jusqu'à cohérence entre la valeur du $\log g$ final et le $\log g$ initial. Dans les cas plus fréquents où la parallaxe n'est pas disponible, on suppose $\log g = 8$ (valeur moyenne pour les naines blanches connues) avec une erreur de 0.25 dex correspondant à une dispersion de 2σ de la distribution en $\log g$ pour les naines blanches chaudes établie par Gianninas et al. (2011). Dans ce cas, la méthode photométrique fournit un bon estimé de la distance en utilisant encore une fois les séquences évolutives de Fontaine et al. (2001) et la relation 3.6 pour déterminer le rayon. Il faut toutefois rester conscient

¹À la différence de Fontaine et al. (2001), on suppose un cœur carbone-oxygène ainsi qu'une proportion d'hélium $q(\text{He}) \equiv \log M_{\text{He}}/M_{\text{étoile}} = 10^{-2}$ et $q(\text{H}) = 10^{-4}$ pour les atmosphères riches en hydrogène et $q(\text{He}) = 10^{-2}$ et $q(\text{H}) = 10^{-10}$ pour celles riches en hélium.

de l'influence de la supposition sur le $\log g$.

La figure 3.1 montre des exemples de résultats de la méthode photométrique.

3.3 Méthode spectroscopique

La méthode spectroscopique pour les étoiles de type spectral DA est décrite par Bergeron et al. (1992) et Liebert et al. (2005). En résumé, celle-ci consiste à comparer les spectres observés aux spectres synthétiques, convolués selon un profil instrumental gaussien. Pour ce faire, seulement les profils de raies de la série de Balmer sont utilisés ; on utilise généralement $H\beta$ à $H8$ (si disponibles), mais il est possible d'inclure aussi $H\alpha$. On doit donc d'abord les extraire en normalisant le spectre selon le continu. Deux procédures sont employées à cette fin. Lorsque la série de Balmer est bien définie, c'est-à-dire entre 9000 K et 16,000 K, il est préférable d'utiliser des profils pseudo-gaussiens ainsi que la méthode de Levenberg-Marquardt décrite précédemment afin d'isoler les raies du continu et de déterminer les points de normalisation. C'est la méthode la plus précise. Par contre, lorsque la première procédure ne fonctionne pas, il faut normaliser en utilisant les spectres synthétiques et en permettant des décalages en longueur d'onde, un choix de points zéro ainsi que des corrections polynomiales en λ allant jusqu'à un ordre de 6. Ceci permet d'être indépendant de la qualité de la calibration des spectres observés, quoique des données bien calibrées facilitent grandement la tâche. Ensuite, la technique de minimisation du χ^2 de Levenberg-Marquardt est encore une fois employée pour déterminer la meilleure solution en se basant uniquement sur les raies. La température effective et le $\log g$ sont déterminés avec cette procédure. Un exemple de résultat est présenté à la figure 3.2.

Dans le cas où certaines raies sont trop faibles, mal définies ou contaminées, il est possible de les soustraire à la procédure. Par exemple, pour des systèmes binaires non-résolus composés d'une DA et d'un compagnon de type spectral M (DA+dM), les raies les plus froides comme $H\alpha$, $H\beta$ et parfois même $H\gamma$ doivent être exclues. Cette situation est illustrée par la figure 3.3.

Pour les naines blanches de type spectral DB et DBA, la méthode décrite par Bergeron et al. (2011) doit être employée. Celle-ci est similaire à celle utilisée pour les DA, mais

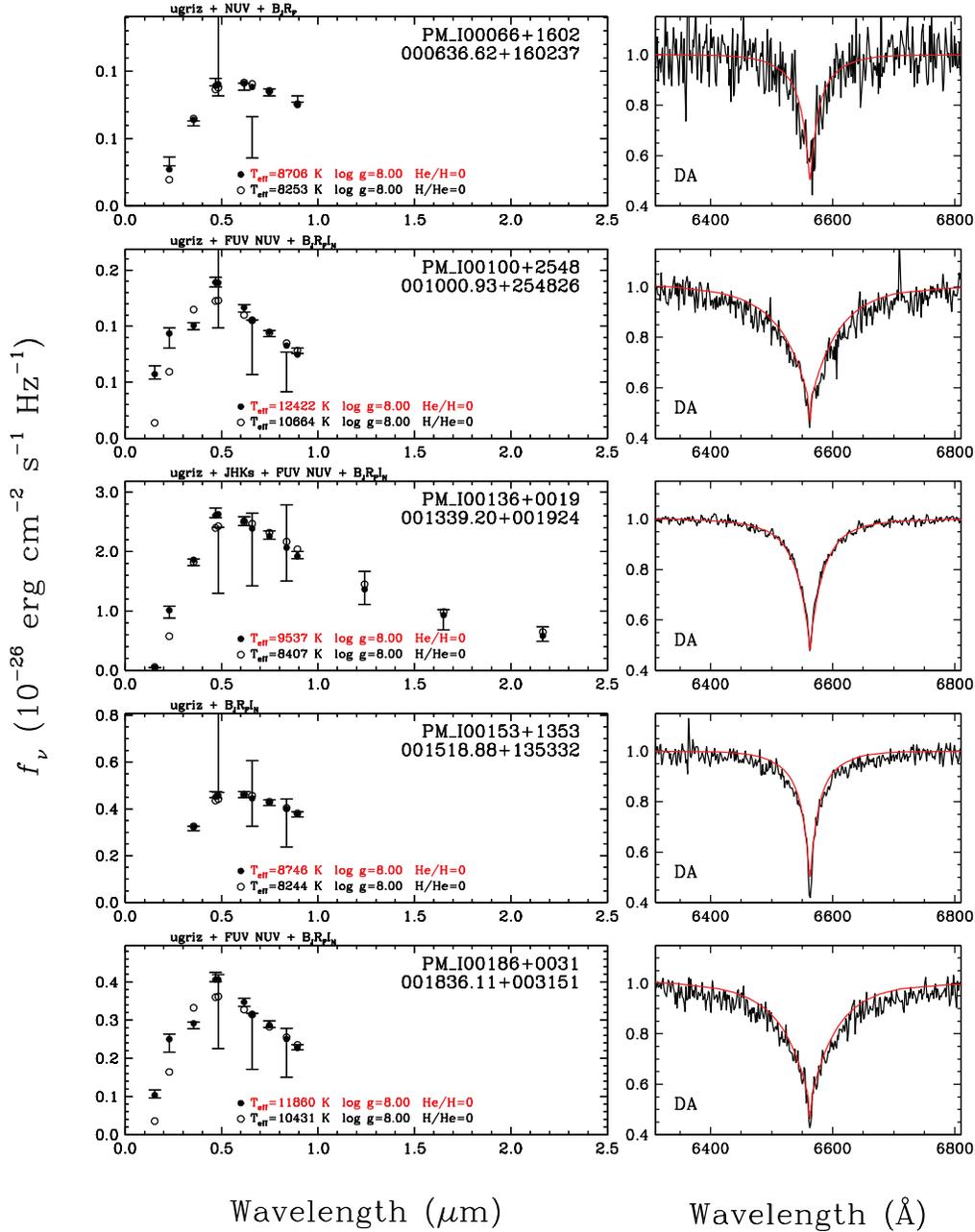


Figure 3.1 Exemples de résultats pour la méthode photométrique. Les données observées sont représentées par les barres d'erreurs tandis que les points correspondent aux modèles. Deux compositions différentes d'atmosphères sont proposées, soit d'hydrogène pur (cercle fermés) ou d'hélium pur (cercles ouverts). Les spectres synthétiques pour une atmosphère pure en hydrogène et les paramètres atmosphériques déterminés selon la méthode photométrique sont présentés dans l'encadré à droite pour la région où la raie H α devrait se manifester. Ceci permet d'évaluer si la solution d'hydrogène pur est envisageable ou non ainsi que de renchérir sur la validité de la solution finale. Les magnitudes utilisées sont identifiées au-dessus de chaque solution.

en ajoutant la proportion H/He comme paramètre libre. La normalisation se fait en sélectionnant des portions du spectre comme références et en utilisant les spectres synthétiques ainsi que des corrections allant jusqu'à λ^5 .

La méthode spectroscopique étant entièrement basée sur la forme des raies, certaines restrictions s'imposent. Premièrement, la série de Balmer est bien définie pour des températures effectives entre 7000 K et 40,000 K. Il est parfois possible d'appliquer la méthode un peu en deçà de ces limites (6100 K si H α est disponible), mais il faut être prudent. À la limite inférieure, la sensibilité des raies au $\log g$ est grandement diminuée et il est parfois préférable d'en forcer la valeur pour pouvoir déterminer T_{eff} . Cet effet sera identifiable en se basant sur les erreurs du $\log g$ anormalement grandes ($\sigma_{\log g} \simeq 0.3$ dex). Deuxièmement, deux solutions sont envisageables dû à la largeur équivalente maximale des raies des spectres synthétiques qui se produit à $\sim 13,500$ K pour les DA (voir figure 4 de Bergeron et al. 1995) et à $\sim 22,000$ K pour les DB(A) (voir figure 2 de Bergeron et al. 2011). Ainsi, la solution finale donnée par la technique de moindres carrés est dépendante de la valeur initiale utilisée. Dans notre cas, les données photométriques sont toujours disponibles et nous pourrions donc contourner ce problème en utilisant les valeurs obtenues grâce à la méthode photométrique pour initialiser la procédure.

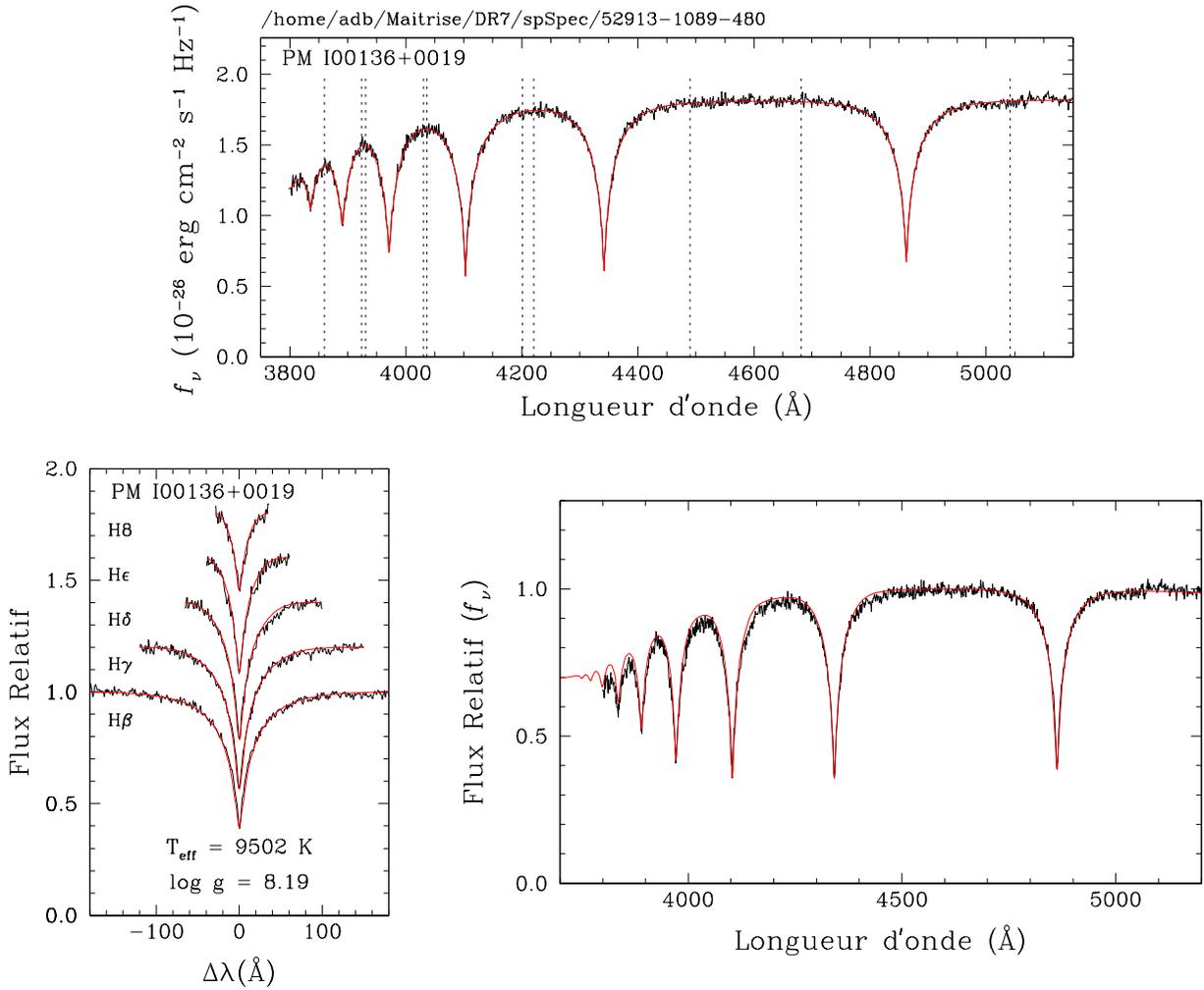


Figure 3.2 Exemple de résultat pour la méthode spectroscopique appliquée à une naine blanche de type spectral DA. L'encadré du haut montre les sections utilisées pour normaliser le spectre observé et extraire les raies. En bas à gauche, on peut voir la solution finale (en rouge) comparée aux raies extraites et normalisées du spectre observé. La section en bas à droite montre la solution finale complète comparée au flux observé ; les deux sont normalisés à $\lambda = 4600\text{\AA}$.

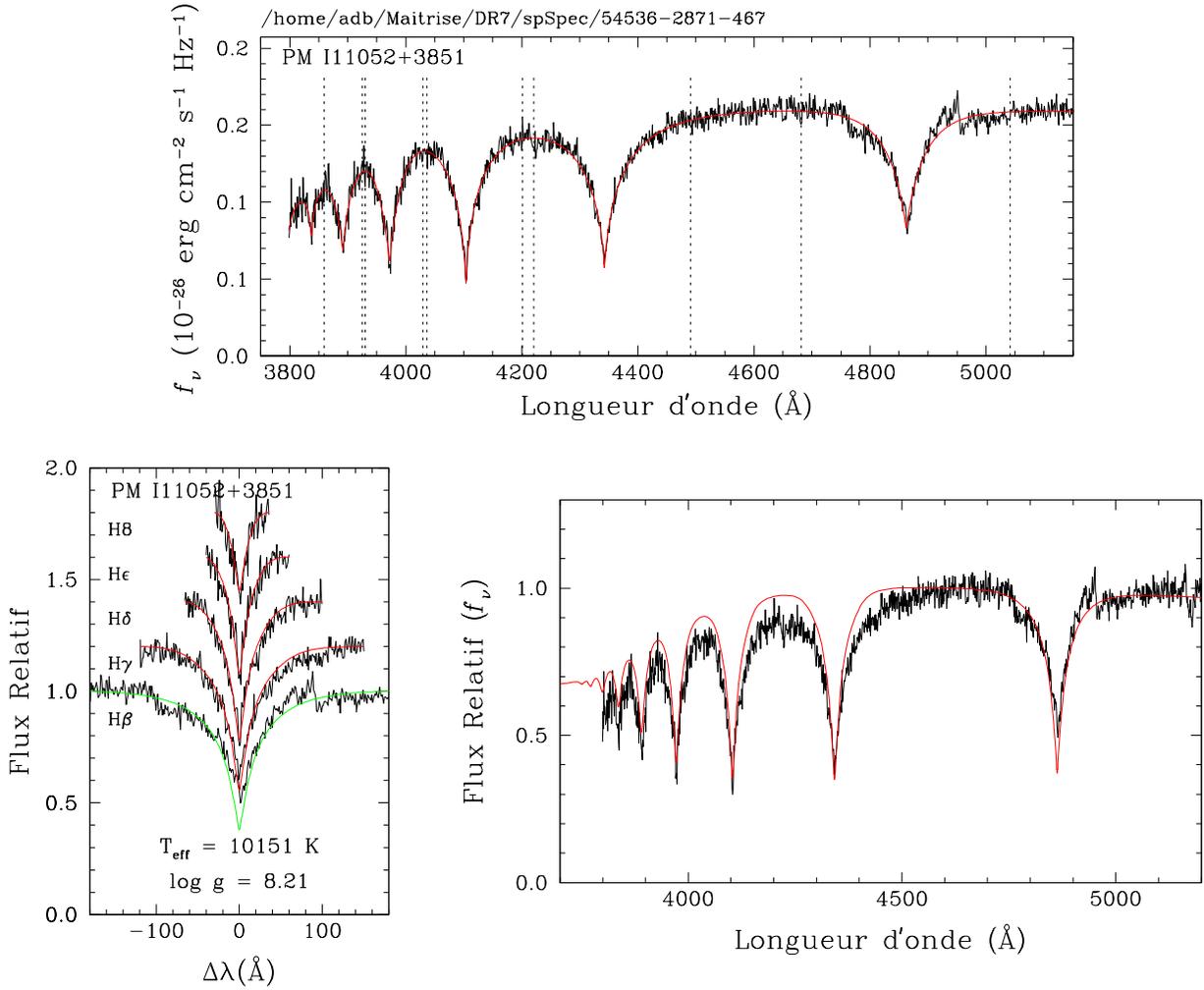


Figure 3.3 Exemple de résultat pour la méthode spectroscopique appliquée à une naine blanche de type spectral DA+dM. La description est la même qu'à la figure 3.2. La courbe en vert sert à désigner la ou les raies qui ont été exclues afin d'éviter la contamination causée par le compagnon de type spectral M non-résolu.

CHAPITRE 4

LA FONCTION DE LUMINOSITÉ

La fonction de luminosité des étoiles naines blanches fait l'objet de plusieurs études depuis des années. La figure 4.1 tirée de Limoges et al. (2015) montre une sélection des observations de quatre d'entre elles. Comme le montre la figure, la fonction de luminosité se résume à la distribution en luminosité (M_{bol} dans ce cas-ci) d'un échantillon de naines blanches donné. Afin de pouvoir comparer les différentes mesures entre elles, le nombre d'objets par tranche de luminosité est donné par pc^3 . Comme on parle ici de l'étude d'une population d'objets, le calcul de la fonction de luminosité est sujet à l'influence de biais statistiques. Celui-ci nécessite donc l'établissement d'un échantillon non-biaisé.

Un première manière de contourner le problème est de recenser toutes les naines blanches à l'intérieur d'un volume fini. C'est ce qui a été fait par Giammichele et al. (2012) et Limoges et al. (2015) pour les objets se situant respectivement à moins de 20 pc de la Terre et dans l'hémisphère nord à moins de 40 pc. La première de ces deux études ne dispose malheureusement pas d'un échantillon assez grand pour déterminer la fonction de luminosité précisément et en tirer des conclusions poussées. La seconde, quant à elle, ne dispose pas d'un échantillon complet (estimé à 65%) et des biais observationnels pourraient influencer son calcul. Les travaux décrit par Torres & García-Berro (2016) ont d'ailleurs tenté de pallier à ces biais en simulant l'effet des critères de sélection de l'échantillon de Limoges et al. (2015) décrits précédemment par Limoges et al. (2013).

Une deuxième méthode consiste à compenser pour le biais observationnel en ne se limitant non pas au volume, mais bien à la magnitude. Connaissant la magnitude limite d'un relevé, il devient possible de contrebalancer l'effet de sélection y étant rattaché en donnant un poids basé sur la magnitude absolue d'un objet. C'est la méthode qui a été utilisée précédemment par Harris et al. (2006) ainsi que Bergeron et al. (2011) (voir figure 4.1). On l'appelle méthode de $1/v_{\text{max}}$ et elle sera décrite dans la section 4.2.

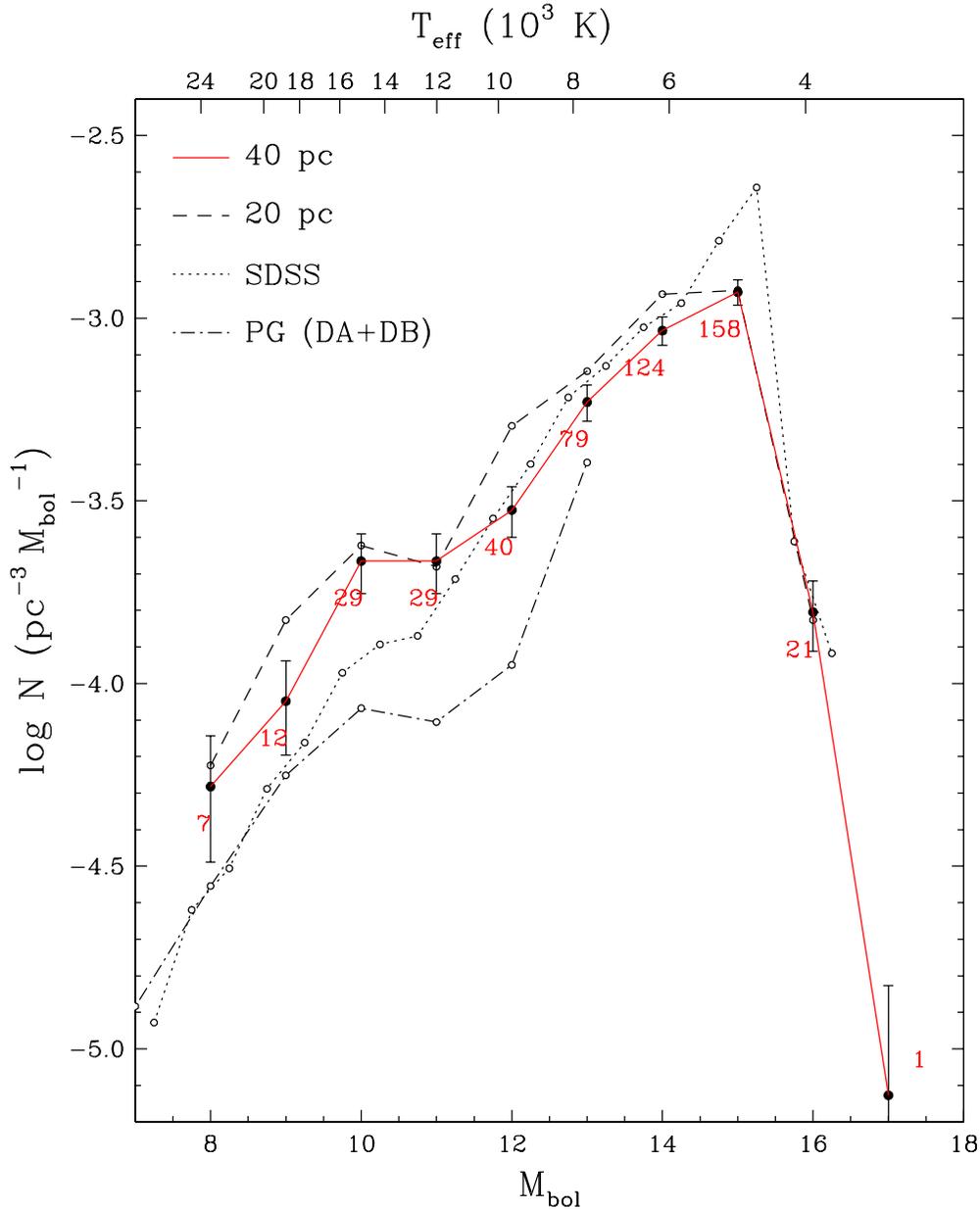


Figure 4.1 Comparaison entre quatre fonctions de luminosité observées. La figure est tirée de Limoges et al. (2015) (figure 27). Les différentes fonctions sont représentées selon M_{bol} . La ligne rouge continue représente le résultat de l'article duquel la figure est tirée (naines blanches à moins de 40 pc) avec le nombre absolu de naines blanches dans chacun des intervalles de M_{bol} . Les lignes en tirets, en pointillé et en tirets/pointillé indiquent respectivement le résultat de Giammichele et al. (2012) pour les naines blanches à l'intérieur d'un volume de 20 pc, de Harris et al. (2006) pour les naines blanches du SDSS et de Bergeron et al. (2011) pour les naines blanches de type DA et DB dans le relevé PG. L'échelle de température associée aux magnitudes bolométriques et correspondant à une naine blanche d'une masse de $0.6 M_{\odot}$ est donnée sur l'axe horizontal supérieur.

4.1 Intérêt théorique

Les naines blanches représentent la fin de la vie de la grande majorité des étoiles de notre galaxie et sont donc indispensables à la compréhension de l'évolution des différentes populations que l'on y trouve. Or, la fonction de luminosité est intrinsèquement reliée aux différents mécanismes entourant le refroidissement des étoiles naines blanches ainsi qu'à l'origine et à la vie de leurs progéniteurs de la séquence principale. Les modèles d'évolution sont même utilisés dans la détermination du $\log g$ pour la méthode photométrique (voir section 3.2). Ils sont aussi nécessaires à une meilleure compréhension de l'évolution spectrale des naines blanches. En effet, le type spectral semble évoluer au fur et à mesure que l'étoile se refroidit, via l'apparition de nouveaux processus de transport d'énergie et de matière comme le mélange convectif. La pertinence d'avoir des modèles représentatifs de la réalité est sans équivoque.

Le calcul théorique de la fonction de luminosité requiert une connaissance approfondie des processus physiques reliés à la structure interne de l'étoile et à son atmosphère. Celui-ci est décrit en détail par Fontaine et al. (2001). En résumé, le taux de refroidissement d'une naine blanche dépend de 2 facteurs : la quantité d'énergie thermique emmagasinée dans l'intérieur de l'étoile et l'efficacité du transport de la chaleur partant du noyau vers le milieu interstellaire. Une modélisation fidèle devra donc tenir compte, tout d'abord, de l'évolution du réservoir thermique, passant d'un état liquide à cristallin et dont le rayon s'étendra progressivement jusqu'à constituer la quasi totalité de la naine blanche. Parallèlement, les différents mécanismes de transport d'énergie, comme le transport radiatif, la convection et le couplage convectif, devront s'adapter à la modification de la structure.

Le code de Fontaine et al. (2001) tient compte des phénomènes suivant : les processus de cristallisation, c'est-à-dire la variation de la frontière entre les régions cristallisées et celles qui ne le sont pas, la libération de chaleur latente y étant associée ainsi que la redistribution entre les phases liquides et solides, la diffusion des différentes espèces chimiques, le mélange convectif et les processus nucléaires résiduels.

La particularité de ces modèles est que toute la structure est prise en compte simultanément, permettant de mieux décrire le phénomène de couplage convectif ainsi que la

contraction gravitationnelle de l’enveloppe de la naine blanche, effet important se produisant à de faibles luminosités. C’est aussi essentiel à la caractérisation de l’évolution de la partie cristalline de la naine blanche, partant du coeur de la naine blanche, formé de carbone et d’oxygène, jusqu’à ses couches externes d’hélium et d’hydrogène.

Cette innovation a permis de mettre en lumière de nouveaux effets sur les séquences de refroidissement ainsi que sur la fonction de luminosité, en particulier par rapport au couplage convectif. Ce phénomène apparaît lorsque la zone convective rejoint le réservoir d’énergie, correspondant environ au coeur dégénéré de la naine blanche. On dit donc que la surface devient couplée avec le réservoir. À ce point, les détails de la stratification de l’atmosphère deviennent très importants puisque la convection est essentiellement adiabatique.

Avant le couplage convectif, les couches externes plutôt opaques empêchent le réservoir thermique de libérer sa chaleur efficacement. Cependant, par après, l’atmosphère devient beaucoup plus transparente et un excès d’énergie emmagasinée doit être libéré. Cette surdose d’énergie créera une accumulation des naines blanches dans l’intervalle de luminosité (ou de M_{bol}) où le phénomène apparaît. Par la suite, les temps de refroidissement deviendront, à l’inverse, beaucoup plus courts puisque l’efficacité du refroidissement pour une atmosphère entièrement convective est beaucoup plus grande que pour une atmosphère majoritairement radiative.

Une autre influence importante sur la forme de la fonction de luminosité vient de la population à partir de laquelle celle-ci est déterminée. En effet, un taux constant de formation d’étoile (supposition faite pour le disque galactique) ne donnera pas le même résultat qu’une formation simultanée due à l’effondrement d’un nuage de poussière et de gaz (supposition pour les amas d’étoiles). Ensuite, le temps de vie sur la séquence principale aura lui aussi une influence sur la distribution en masse de la population de naines blanches et, conséquemment, sur la distribution en luminosité.

La figure 4.2 tirée de Limoges et al. (2015) montre la comparaison entre trois fonctions de luminosité théoriques calculées pour différents âges du disque galactique ainsi que le résultat pour l’échantillon des naines blanches de l’hémisphère nord à moins de 40 pc. On

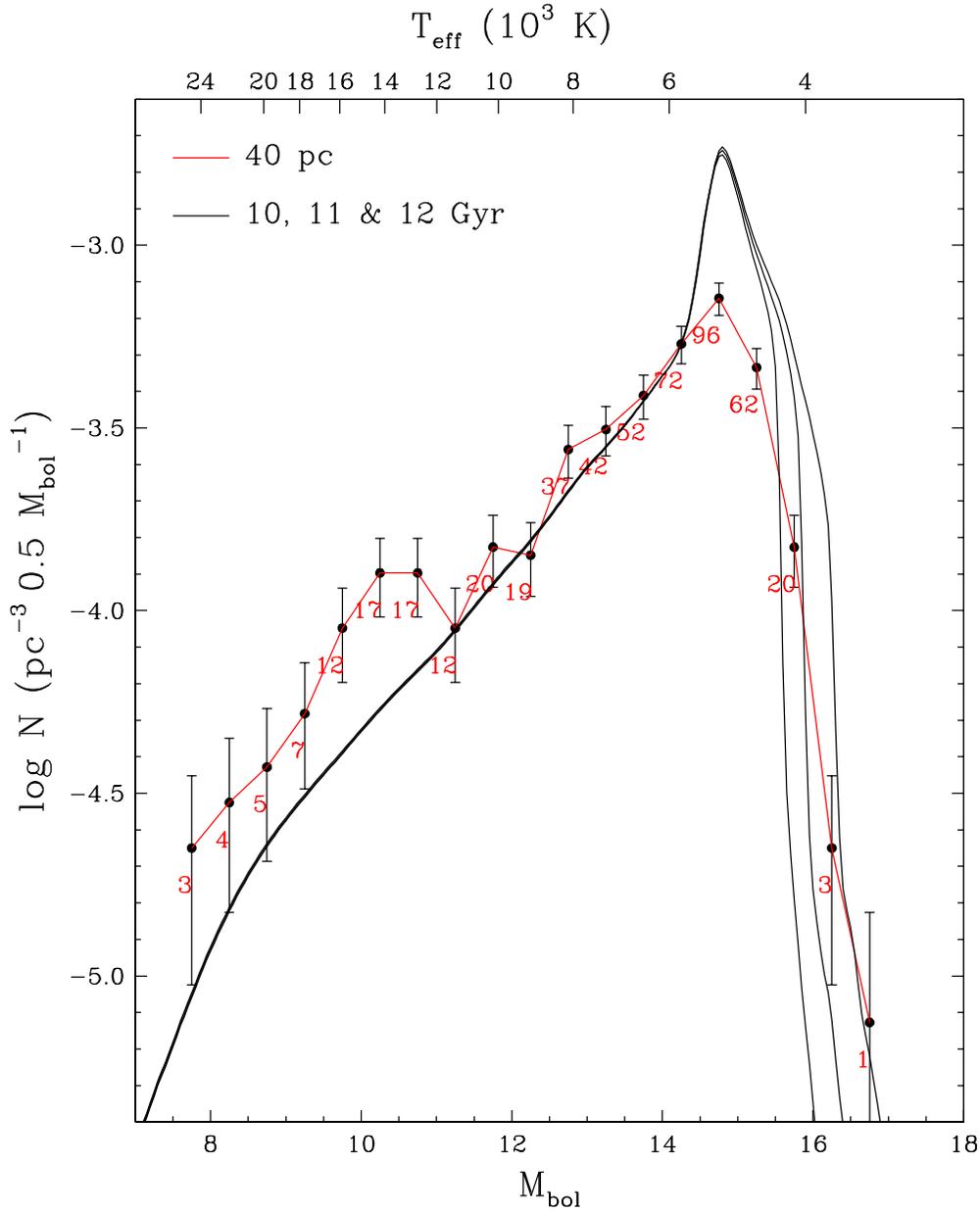


Figure 4.2 Comparaison entre les fonctions de luminosité théoriques et celle observée pour l'échantillon à moins de 40 pc. La figure est tirée de Limoges et al. (2015) (figure 28). Les différentes fonctions sont représentées selon M_{bol} . La ligne rouge continue représente le résultat de l'article duquel la figure est tirée (naines blanches à moins de 40 pc) avec le nombre absolu de naines blanches dans chacun des intervalles de M_{bol} . Les lignes continues noires représentent les fonctions de luminosité théoriques de Fontaine et al. (2001) pour des âges de 10, 11 et 12 milliards d'années (lire de gauche à droite). L'échelle de température associée aux magnitudes bolométriques et correspondant à une naine blanche d'une masse de $0.6 M_{\odot}$ est donnée sur l'axe horizontal supérieur.

peut facilement voir la bosse décrite ci-haut causée par l’accumulation de naines blanches à $M_{\text{bol}} \sim 15$ suite à l’apparition du couplage convectif. D’ailleurs, celle-ci ne semble pas apparaître dans le résultat de Limoges et al. (2015) ainsi que dans certains résultats précédents, ce qui laisse croire que certains processus sont mal compris, où alors que certains biais empêchent de la détecter. C’est d’ailleurs la partie moins lumineuse de la fonction de luminosité et donc, la plus difficile à observer. On peut aussi distinguer une autre bosse centrée à $M_{\text{bol}} \sim 10.5$ laissant croire à un sursaut de formation d’étoile dans le voisinage du Soleil.

4.2 Méthode $1/v_{\text{max}}$

La méthode $1/v_{\text{max}}$ a été appliquée pour la première fois pour le calcul de la fonction de luminosité des quasars par Schmidt (1968). Elle consiste à corriger le biais observationnel dû à la limite en magnitude apparente d’un échantillon. En résumé, un poids est donné à chaque objet selon le volume maximal, v_{max} , dans lequel celui-ci est observable, considérant la magnitude limite de l’échantillon. Ainsi, un objet étant très lumineux, par exemple, sera détectable dans un très grand volume observable et son importance dans le calcul de la fonction de luminosité sera diminuée. Il est important de noter que cette méthode ne considère aucune limite inférieure en magnitude et ne traite d’aucun autre biais observationnel, exception faite de la distribution spatiale des étoiles par rapport au plan galactique.

Le calcul de la fonction de luminosité requiert de connaître la magnitude limite du système utilisé, la distribution spatiale des objets selon la ligne de visée ainsi que la détermination de la magnitude absolue de chacun des objets de l’échantillon. Bien que la magnitude limite d’un relevé de grande envergure soit généralement bien connue, d’autres facteurs peuvent entrer en compte lors de la détermination de l’échantillon utilisé pour le calcul. Il existe cependant un test permettant de la déterminer.

Celui-ci consiste à calculer d’abord v_{max} pour tous les objets. Cependant, puisque la distribution spatiale n’est pas uniforme, il faudra compenser cet effet en ajoutant un facteur

de correction. Le calcul se fera donc via les équations suivantes :

$$d_{\max} = 10^{(V_{\text{lim}} - M_V + 5)/5}, \quad (4.1)$$

$$v_{\max} = \int_0^{d_{\max}} e^{-|z|/z_0} 4\pi r^2 dr, \quad (4.2)$$

$$z = r \sin \theta. \quad (4.3)$$

Ici, d_{\max} est la distance maximale à laquelle un objet d'une magnitude absolue M_V peut être observé étant donnée la magnitude limite du relevé V_{lim} . Le facteur de correction e^{-z/z_0} représente simplement l'atténuation en densité des objets du disque galactique en fonction de la latitude galactique z . La valeur de $z_0 = 250$ pc en accord avec Boyle (1989) est généralement celle qui est utilisée.

On peut aussi calculer un « volume pondéré » (v) pour chaque objet en utilisant les mêmes équations, mais en remplaçant la magnitude limite V_{lim} dans l'équation 4.1 par la magnitude observée V . Maintenant, puisque l'échantillon est limité par la magnitude, la distribution des rapports v/v_{\max} pour chaque objet devrait être uniforme à la bonne magnitude limite. Comme le mentionne Schmidt (1968), il suffit d'obtenir $\langle v/v_{\max} \rangle = 0.5$ pour que la condition soit satisfaite.

Ce test doit cependant être utilisé avec précaution, puisque la distribution des v/v_{\max} pourrait respecter le critère de la moyenne sans toutefois être uniforme. Il est donc important d'étudier le comportement de v/v_{\max} en fonction des divers paramètres pouvant influencer l'échantillon. Plus de détails à ce sujet seront présentés dans le chapitre 6. Dans le contexte de cette étude, la valeur de V_{lim} de 19 sera choisie puisqu'elle est bien connue pour le catalogue LSPM.

Une fois V_{lim} déterminée, tous les objets ayant une magnitude observée $V < V_{\text{lim}}$ devront être retirés de l'échantillon. On peut ensuite associer un poids $1/v_{\max}$ à chaque objet pour le calcul de la fonction de luminosité. Généralement, celle-ci est présentée pour des intervalles de magnitude bolométrique (M_{bol}) au lieu d'absolue (M_V). On utilise donc M_V dans le calcul des contributions de chaque étoile, mais M_{bol} pour définir les intervalles. La fonction de luminosité obtenue est appelée « fonction de luminosité différentielle » et

on la note ϕ . Le calcul est donné par

$$\phi(M_{\text{bol}}) = \sum_{n_b} 1/v_{\text{max}_i} \quad (4.4)$$

où n_b est le nombre d'objets par tranche de M_{bol} et v_{max_i} est donné par l'intégrale 4.2 appliquée à l'objet i , dont la solution donne :

$$v_{\text{max}_i} = \left(d_{\text{max}_i} \frac{z_0}{|z_i|} \right)^3 \left[2 \left(1 - \left(1 + \frac{|z_i|}{z_0} \right) e^{-|z_i|/z_0} \right) - \left(\frac{|z_i|}{z_0} \right)^2 e^{-|z_i|/z_0} \right]. \quad (4.5)$$

L'incertitude pour chaque intervalle de M_{bol} est alors donnée par

$$\sigma_\phi = \left[\sum_{n_b} (1/v_{\text{max}_i})^2 \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

en considérant une distribution spatiale uniforme (Boyle, 1989).

L'utilisation de cette méthode doit être faite en sachant que plusieurs facteurs autres que la magnitude pourraient intervenir. L'extinction du milieu interstellaire, un biais par rapport à la vitesse tangentielle ou alors la distinction entre divers groupes d'étoiles sont des exemples de ce qui pourrait influencer les résultats du calcul. Plus de détails sont donnés au chapitre 6.

CHAPITRE 5

POURSUITE DU RELEVÉ DES NAINES BLANCHES À L'INTÉRIEUR D'UN VOLUME DE 40 pc

Ce chapitre présente une continuation des travaux de Limoges et al. (2015), c'est-à-dire le recensement de toutes les naines blanches dans l'hémisphère nord, à une distance inférieure à 40 pc. La méthode employée afin d'identifier les naines blanches potentielles sera cependant quelque peu différente.

5.1 Critères de sélections basés sur les diagrammes de mouvements propres réduits

Pour une magnitude donnée m , on définit le mouvement propre réduit comme $H_m = m + 5 \log \mu + 5$. C'est un analogue de la magnitude absolue, $M_m = m + 5 \log \pi + 5$ où π est la parallaxe. On peut d'ailleurs mettre en relation ces deux quantités avec l'équation $H_m = M_m + 5 \log v_{\text{tan}} - 3.38$ où v_{tan} est la vitesse tangentielle. On comprend donc que pour un objet donné, H_m est équivalent à M_m , mais à une constante près qui dépend de la vitesse tangentielle de l'objet. Sachant que les populations de naines blanches occupent une région bien définie dans les diagrammes couleur-magnitude, il est légitime de s'attendre à ce qu'un phénomène semblable se produise pour des diagrammes mettant en relation couleurs et mouvements propres réduits (diagrammes de mouvements propres réduits). Les figures 5.1, 5.2, 5.3 et 5.4 présentent les quatre critères de sélection basés sur des diagrammes de mouvements propres réduits appliqués aux objets du catalogue LSPM situés dans l'hémisphère nord, chacun étant applicable selon la disponibilité des données photométriques pour un objet donné.

Étant donné certaines différences dans l'analyse de Limoges et al. (2013) et celle-ci, il est pertinent de répéter la description du processus de sélection de manière exhaustive. Pour l'analyse qui suit, les mentions du catalogue LSPM feront référence à la contrepartie des objets de l'hémisphère nord.

5.1.1 Critère basé sur le système *ugriz*

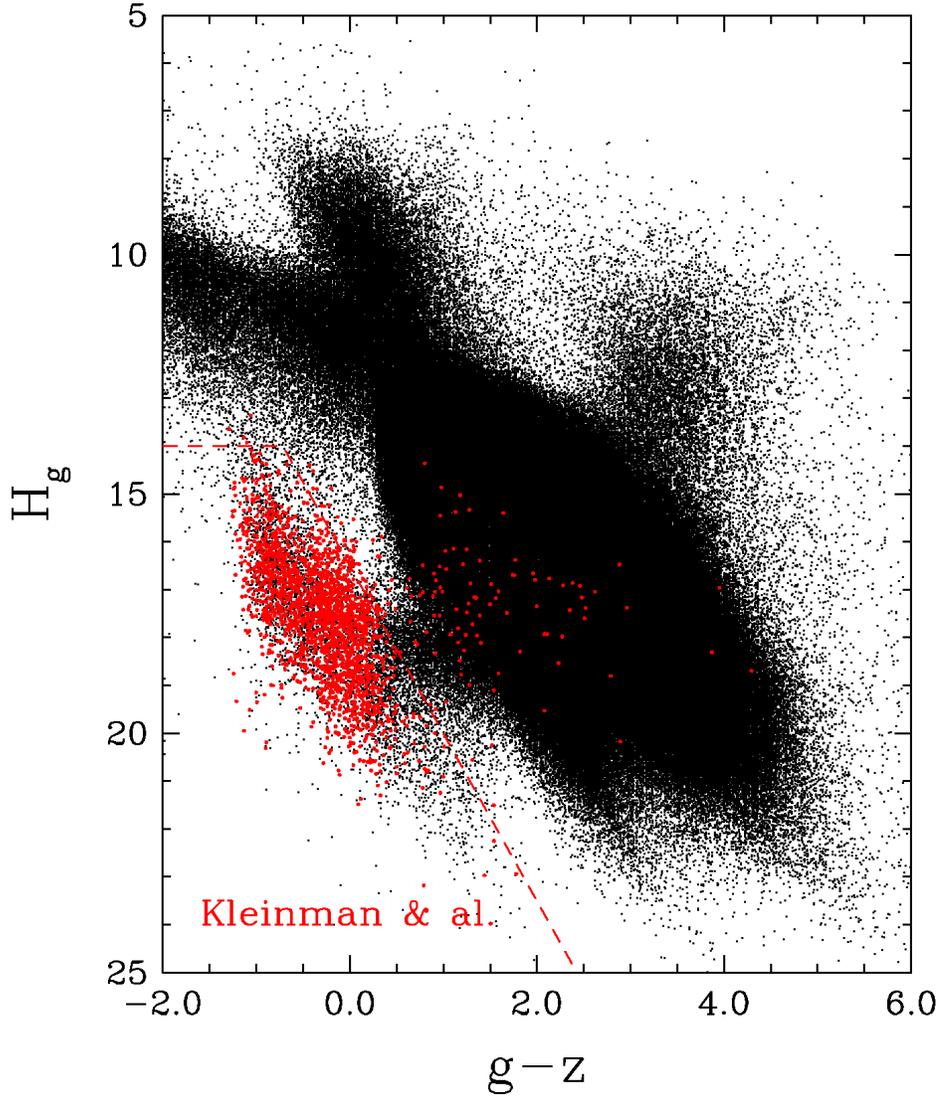


Figure 5.1 Diagramme de mouvements propres réduits (H_g , $g - z$) pour les objets du catalogue LSPM. Les naines blanches identifiées spectroscopiquement par Kleinman et al. (2013) sont représentées par les points rouges. La ligne pointillée trace les limites du critère de sélection.

La figure 5.1 présente une sélection des 740,735 objets du catalogue LSPM ayant une contrepartie dans le septième relevé du SDSS sous la forme d'un diagramme de mouve-

ments propres réduits. Les naines blanches identifiées spectroscopiquement par Kleinman et al. (2013) (points rouges) illustrent très bien la démarcation entre les étoiles de la séquence principale et les naines blanches. Le critère de sélection se résume aux deux tests suivants : $H_g > 3.5(g - z) + 16.5$ et $H_g > 14$, le plus restrictif étant appliqué. De plus, afin d’empêcher les erreurs dues à la saturation des filtres du système *ugriz* (voir York et al. 2000), seulement les objets respectant les conditions $u > 13$, $g > 14$, $r > 14$, $i > 14$ et $z > 12$ sont conservés. Les quelques naines blanches situées à l’extérieur des bornes du critère sont en majorité accompagnées d’une naine M non résolue, ce qui explique leur indice de couleur plus rouge. 6519 naines blanches potentielles sont identifiées à l’aide de ces critères.

5.1.2 Approximation du filtre V

Étant donné que le filtre V_T du catalogue Tycho-2 n’est disponible que pour une minorité d’objets, une approximation de la magnitude V proposée par Lépine & Shara (2005) utilisant les magnitudes photographiques sera appliquée. La relation est donnée par :

$$V = B_J - 0.46(B_J - R_F) \quad (5.1)$$

Ces magnitudes sont cependant moins précises et l’incertitude de la magnitude V ainsi calculée est évaluée à ± 0.5 mag, toujours selon Lépine & Shara (2005).

5.1.3 Critère basé sur le système *GALEX*

La figure 5.2 est équivalente à la figure 5.1, mais en considérant les objets du sixième relevé de la base de données *GALEX* associés à ceux du catalogue LSPM dont le filtre NUV est disponible ainsi que les filtres photographiques de l’équation 5.1 (175,096 objets). Le critère de sélection donné par l’équation $H_V > \text{NUV} - V + 14$ est positif pour 17,569 objets.

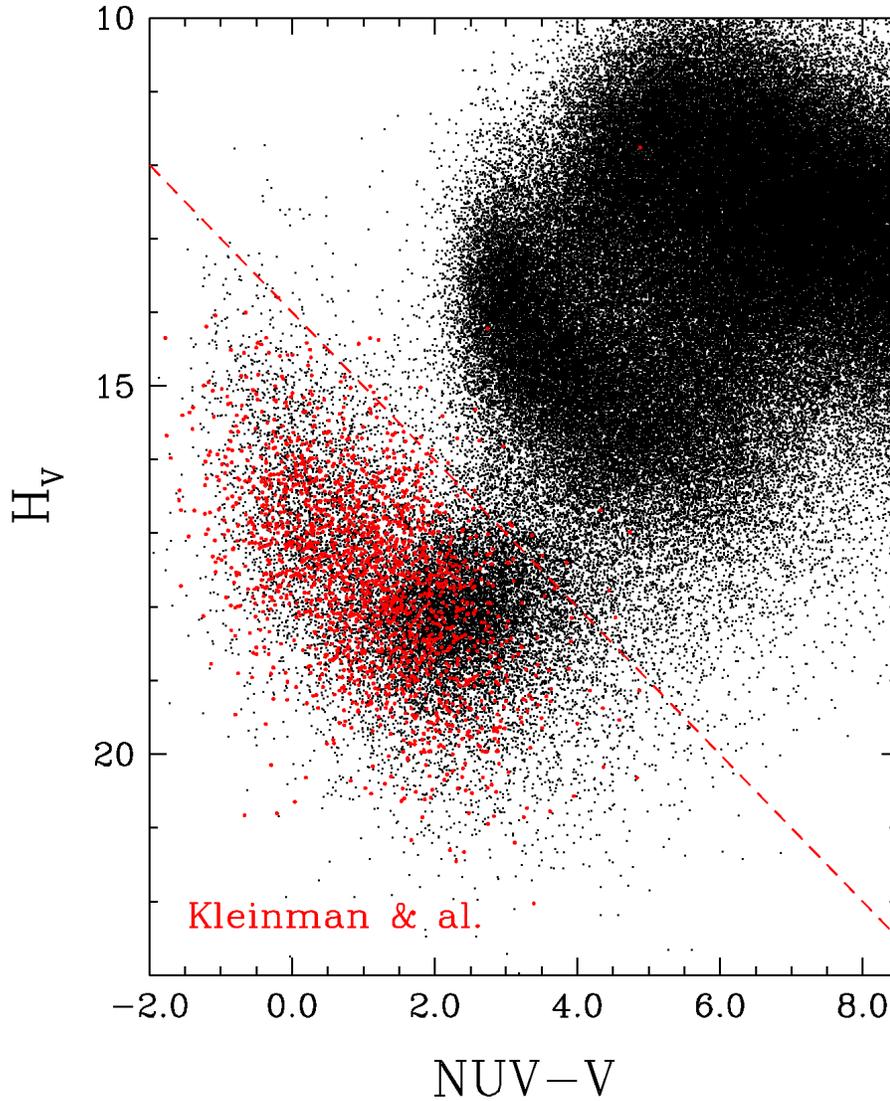


Figure 5.2 Diagramme de mouvements propres réduits (H_V , $NUV-V$) pour les objets du catalogue LSPM. Les naines blanches identifiées spectroscopiquement par Kleinman et al. (2013) sont représentées par les points rouges.

5.1.4 Critère basé sur le système 2MASS

La figure 5.3 présente le critère pour les objets ayant le filtre J du système 2MASS ainsi que les magnitudes photographiques nécessaires au calcul de V (équation 5.1), totalisant 1,265,333 objets. Les 2486 objets respectant les critères $H_V > 3.5(V - J) + 13$ et $H_V > 14$ sont conservés pour la suite de l'analyse.

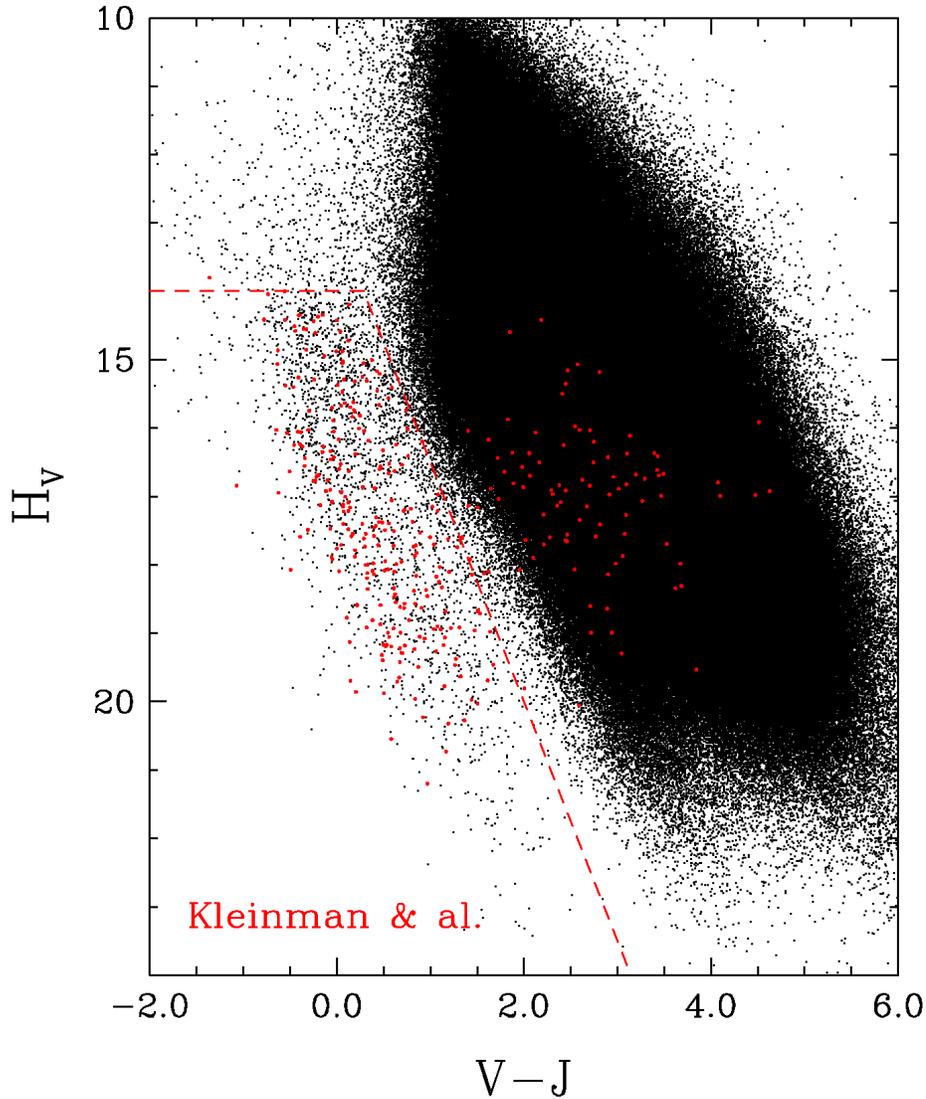


Figure 5.3 Diagramme de mouvements propres réduits (H_V , $V - J$) pour les objets du catalogue LSPM. Les naines blanches identifiées spectroscopiquement par Kleinman et al. (2013) sont représentées par les points rouges.

5.1.5 Critère basé sur le système de magnitudes photographiques

La figure 5.4 présente le dernier critère basé sur les diagrammes de mouvements propres. Les 878,460 objets ayant les trois filtres du système USNO-B1.0 (B_J , R_F et I_N) sont présentés ici. La dispersion élevée est due à la faible précision du système photographique. Le critère de sélection est donné par les tests $H_V > 3.5(V - I_N) + 15$ et $H_V > 14$ et met en évidence 15,472 objets.

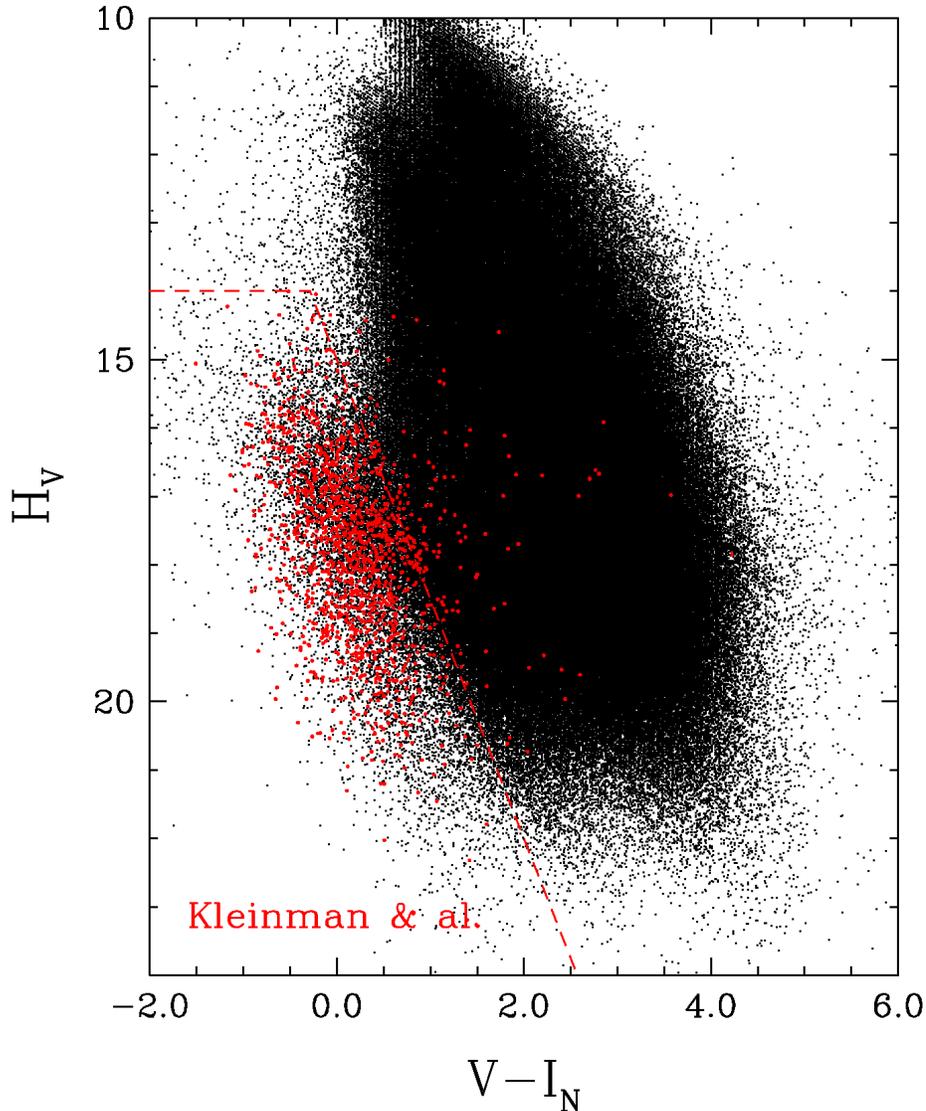


Figure 5.4 Diagramme de mouvements propres réduits (H_V , $V - I_N$) pour les objets du catalogue LSPM. Les naines blanches identifiées spectroscopiquement par Kleinman et al. (2013) sont représentées par les points rouges.

5.1.6 Critères additionnels et ordre de priorité

Afin de réduire la contamination des étoiles de la séquence principale, un critère additionnel doit être appliqué à tous les objets pour lesquels la bande J de 2MASS est disponible. Ce dernier est basé sur l'analyse de Kawka et al. (2004), mais modifié pour les filtres V et J et va comme suit : $H_V > 3.5(V - J) + 13$. Il sera cependant seulement appliqué aux objets dont la magnitude V est plus élevée que 14 mag ($V < 14$) afin de tenir compte

des erreurs introduites par l’incertitude sur le mouvement propre relevées par Kilic et al. (2006) et Sayres et al. (2012) pouvant être liées à des magnitudes trop faibles.

L’ordre de priorité est établi en fonction de la précision et de la pertinence du système photométrique choisi. On a donc le critère en $g - z$ suivi de celui en $NUV - V$, en $V - J$ et finalement en $V - I_N$. Le résultat du critère le plus élevé prédomine sur ceux du dessous. Par exemple, un objet ne respectant pas le critère en $g - z$ est automatiquement relayé dans le bas de l’ordre de priorité, même si ceux étant moins prioritaires sont positifs. Inversement, si le premier est positif et que les autres sont négatifs, l’objet est tout de même gardé au sommet de l’ordre de priorité. Tous les objets ne respectant pas le critère additionnel sont systématiquement retirés. 30,099 naines blanches potentielles ressortiront de ce processus.

Cette approche diffère quelque peu de celle utilisée par Limoges et al. (2013), utilisant les mêmes critères, mais étant moins élaborée. Seulement 2 ordres de priorité étaient établis. Si un des trois premiers critères était respecté, l’objet était automatiquement de priorité 1 et si seulement le quatrième critère était respecté, l’objet était relayé au second plan. L’échantillon étant très grand (6886 candidats), il devient préférable d’ajouter des échelons. Il est toutefois pertinent de conserver les objets dont un seul critère est positif, même si les critères plus importants sont négatifs, puisque 76/441 naines blanches à l’intérieur de 40 pc tirées du tableau 5¹ de Limoges et al. (2015) sont dans cette situation.

5.2 Identification des naines blanches connues

Le but de cette partie du projet étant d’identifier de nouvelles naines blanches, il est nécessaire de retirer de notre analyse les objets ayant déjà été identifiés. Pour ce faire, la liste de cibles potentielles a été corrélée avec le catalogue de McCook & Sion, avec le catalogue des naines blanches du septième relevé du SDSS (Kleinman et al., 2013) et finalement avec la base de données SIMBAD. Pour les deux premiers, un critère sur la position était appliqué et les données photométriques disponibles étaient ensuite comparées

¹Le tableau 5 de Limoges et al. (2015) comporte 491 objets et non 441. Les 441 sont ceux qui se retrouvent dans LSPM et qui répondent aux critères décrits plus haut.

afin de s'assurer d'une bonne association et de choisir le bon objet lorsque plus d'une naine blanche pouvait correspondre. Pour SIMBAD, l'objet le plus près identifié comme une naine blanche à l'intérieur d'un rayon de 50 secondes d'arc était associé à cette position. Cette limite est plutôt large, mais permet de s'assurer de ne pas observer d'objet dont le spectre est déjà disponible. La liste des objets identifiés a été soigneusement conservée et il est toujours possible d'y revenir, si besoin est.

5.3 Détermination de la distance

On recherche les objets à l'intérieur d'un rayon de 40 pc. Il est donc nécessaire de déterminer une distance pour chacun d'eux. Pour ce faire, la méthode photométrique décrite dans la section 3.2 a été appliquée au 30,099 candidates en supposant $\log g = 8$ et en les considérant de type spectral DA. Tous les systèmes photométriques disponibles sont utilisés. Pour assurer la convergence de la procédure de minimisation du χ^2 de Levenberg-Marquardt, dès que la température effective d'un objet sortait des limites de la grille de modèles, le processus était avorté et on passait automatiquement au suivant. Par ailleurs, la méthode est sensible à la température initiale utilisée dans certain cas, occasionnant une mauvaise détermination de la température effective. Afin de pallier à ces erreurs, quatre températures effectives initiales sont introduites (5000, 8000, 15,000 et 25,000); celle menant à la T_{eff} finale ayant le plus petit χ^2 était conservée. Cet effet n'avait d'ailleurs pas été remarqué pour les premières observations, menant ainsi à la découverte de naines blanches à l'extérieur de la limite de 55 pc.

Comme mentionné dans la section 3.2, la technique photométrique consiste en une comparaison des flux moyennés f_{λ}^m observés et théoriques, menant à la détermination de deux paramètres, $(R/D)^2$ et H_{λ}^m . Afin de déterminer la distance, il est nécessaire de connaître le rayon de l'objet. En faisant la supposition de $\log g = 8$ et en se référant au modèles d'évolution de Fontaine et al. (2001) modifiés, il devient possible de déterminer la masse et donc le rayon selon la formule $g = GM/R^2$. Afin de tenir compte de l'erreur introduite par cette supposition, la limite de 40 pc sera étendue à 55 pc.

5.4 Critère additionnel sur le χ^2

La méthode photométrique, en plus de fournir un estimé de la distance des objets, donne un bon indice sur la forme de la distribution d'énergie. De manière pratique, les objets dont le spectre est très différent de celui d'une naine blanche peuvent être identifiés et retirés de l'échantillon via le χ^2 . Celui-ci est obtenu selon la relation

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(f_{\text{th}}^{m_i} - f_{\text{obs}}^{m_i})^2}{\sigma_i^2} \quad (5.2)$$

où la somme opère sur les différents flux moyennés disponibles et σ est l'incertitude y étant attachée. Les objets problématiques présenteront une valeur anormalement élevée et il est donc possible de les exclure en choisissant un bon χ_{max}^2 . Ceci aura aussi pour effet de retrancher les objets ayant des données photométriques non cohérentes provoquées, par exemple, par une mauvaise association d'un système photométrique à un objet, ou alors tout simplement une variation due aux époques respectives des relevés. De plus, les incertitudes de chacun des systèmes étant prises en compte, la méthode privilégiera les données les plus précises dans le calcul et une naine blanche potentielle ayant une seule mesure aberrante ne sera pas exclue pour autant. Finalement, ce critère additionnel aura pour effet de retrancher la plupart des types spectraux DA+dM.

La figure 5.5 illustre quelques-unes de ces situations. Tout d'abord, on peut remarquer la valeur très élevée du χ^2 pour la naine blanche PM_I01101+1326. C'est un cas typique de système binaire composé d'une DA et d'une naine M (DA+dM). Évidemment, les modèles de naines blanches ne seront pas capables de reproduire ce type de distribution d'énergie efficacement. Ensuite, on peut voir que pour plusieurs de ces objets, les magnitudes photographiques (B_J , R_F et I_N) sont généralement éloignées de celles des autres systèmes photométriques. Par contre, leurs grandes incertitudes leur enlèvent de l'importance, permettant ainsi de garder les objets semblant être en accord avec les modèles. Il est aussi important de remarquer que lorsque seulement les magnitudes photographiques sont disponibles, la valeur du χ^2 est anormalement faible (voir objet PM_I01222+3259); ceci n'est pas garant d'une bonne détermination des paramètres atmosphériques pour autant. Cet

effet est généralement dû à des barres d'erreur trop grandes par rapport à la variation des données théoriques ou à un sur-ajustement (*overfitting* en anglais) des données observées. Dans ce cas précis, c'est une combinaison des deux possibilités puisque que les modèles varient par rapport à deux paramètres (T_{eff} et R/D), comparativement à trois données observées, et que les incertitudes sont effectivement très grandes. Heureusement, les critères décrits précédemment gardent ces objets au bas de l'ordre de priorité.

La figure 5.5 (3e partie) montre aussi l'effet de l'analyse sur les naines blanches ne présentant pas une atmosphère riche en hydrogène. Les objets PM_I08038+0855 et PM_I08040+0750 ont été identifiés respectivement comme présentant un type spectral DB(Z+dM) et DQ. On peut voir que leur valeur de χ^2 est bien plus faible pour la solution riche en hélium (cercles blancs) que pour celle riche en hydrogène (cercles noirs).

Lors des différentes séances d'observation, un χ_{max}^2 de 50 était choisi. Ce choix devrait normalement permettre de conserver la majorité de naines blanches dont l'atmosphère est riche en hydrogène. Cependant, puisque la solution riche en hydrogène est la seule qui était considérée, les DB ayant les magnitudes *ugriz* ont peu de chance de s'être retrouvées dans la liste de cibles. De plus, celles qui ont pu passer de justesse le critère en χ_{max}^2 ne présenteront pas la bonne valeur de distance et de température effective. Ceci est dû au fait que le problème du choix de solution riche en hélium ou riche en hydrogène n'avait pas été soulevé avant les observations. Depuis, les codes ont été modifiés afin d'automatiser ce choix. Une autre amélioration pouvant être apportée à cette facette est d'utiliser le χ^2 réduit. En effet, le calcul du χ^2 actuel (équation 5.2) désavantagera un objet ayant un plus grand nombre d'observations. Par exemple, la naine blanche PM_I01109+1439 donne un résultat beaucoup plus fiable que PM_I01222+3259 alors qu'elles présentent respectivement un χ^2 de 19.45 et de 0.02. Le χ^2 réduit est obtenu simplement en ajoutant le facteur $1/\nu$ devant la somme, ν étant donné par le nombre de degrés de liberté. Dans ce cas-ci, on a que ν est donné par la différence entre le nombre de filtres observés et le nombre de paramètres des modèles (2). Dans cet exemple, PM_I01109+1439 aurait un χ^2 réduit de 2.43 et l'autre ne changerait pas.

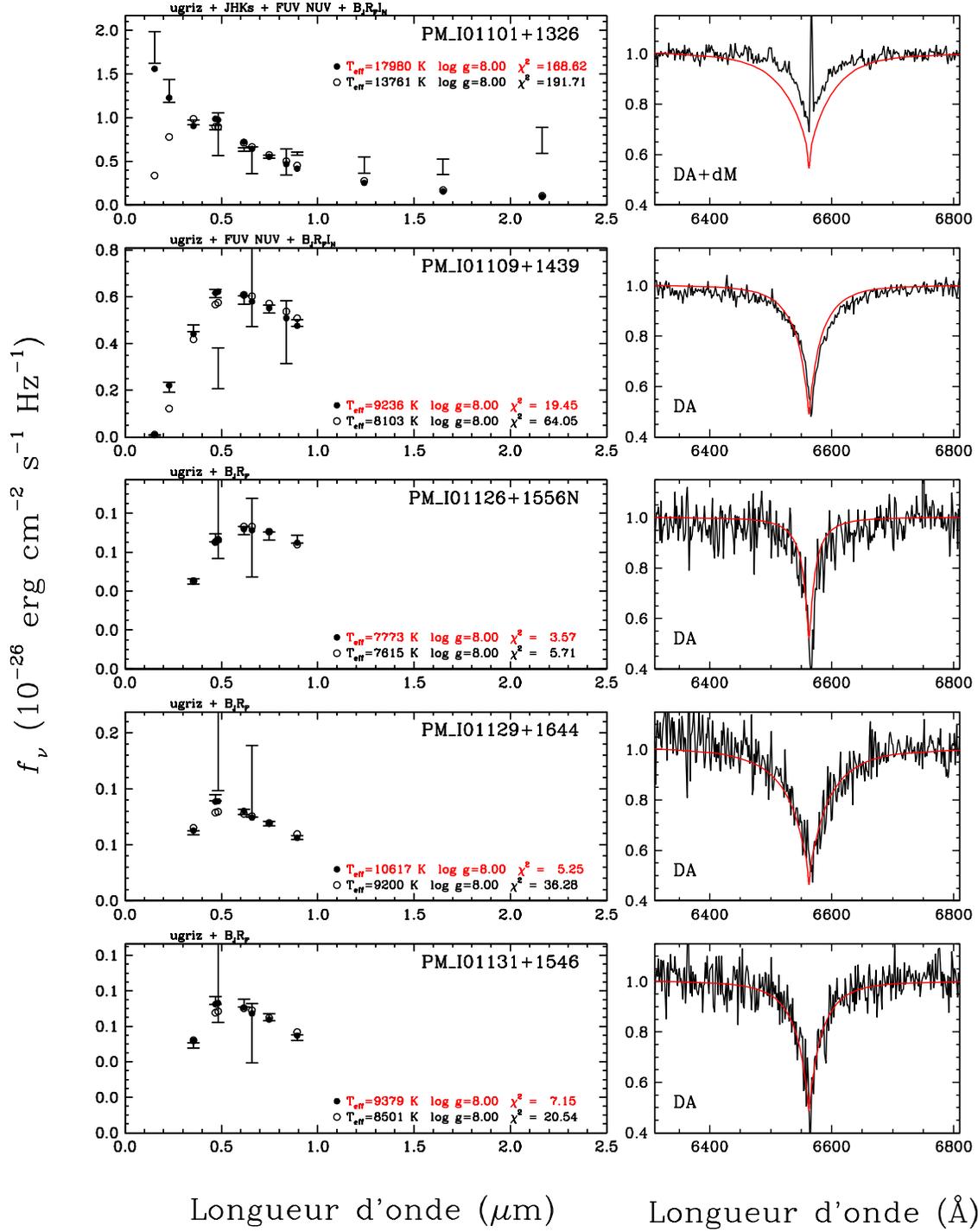


Figure 5.5 Exemple de résultats selon le χ^2 pour la méthode photométrique. Même description que pour la figure 3.1, mais donnant la valeur du χ^2 pour les deux types de solutions au lieu de la proportion H/He. Les objets proviennent des naines blanches du septième relevé du SDSS identifiée spectroscopiquement par Kleinman et al. (2013). Les types spectraux présentés sont également tirés de cet article. La solution riche en hydrogène est systématiquement choisie et la valeur du χ^2 est indiquée dans chaque encadré.

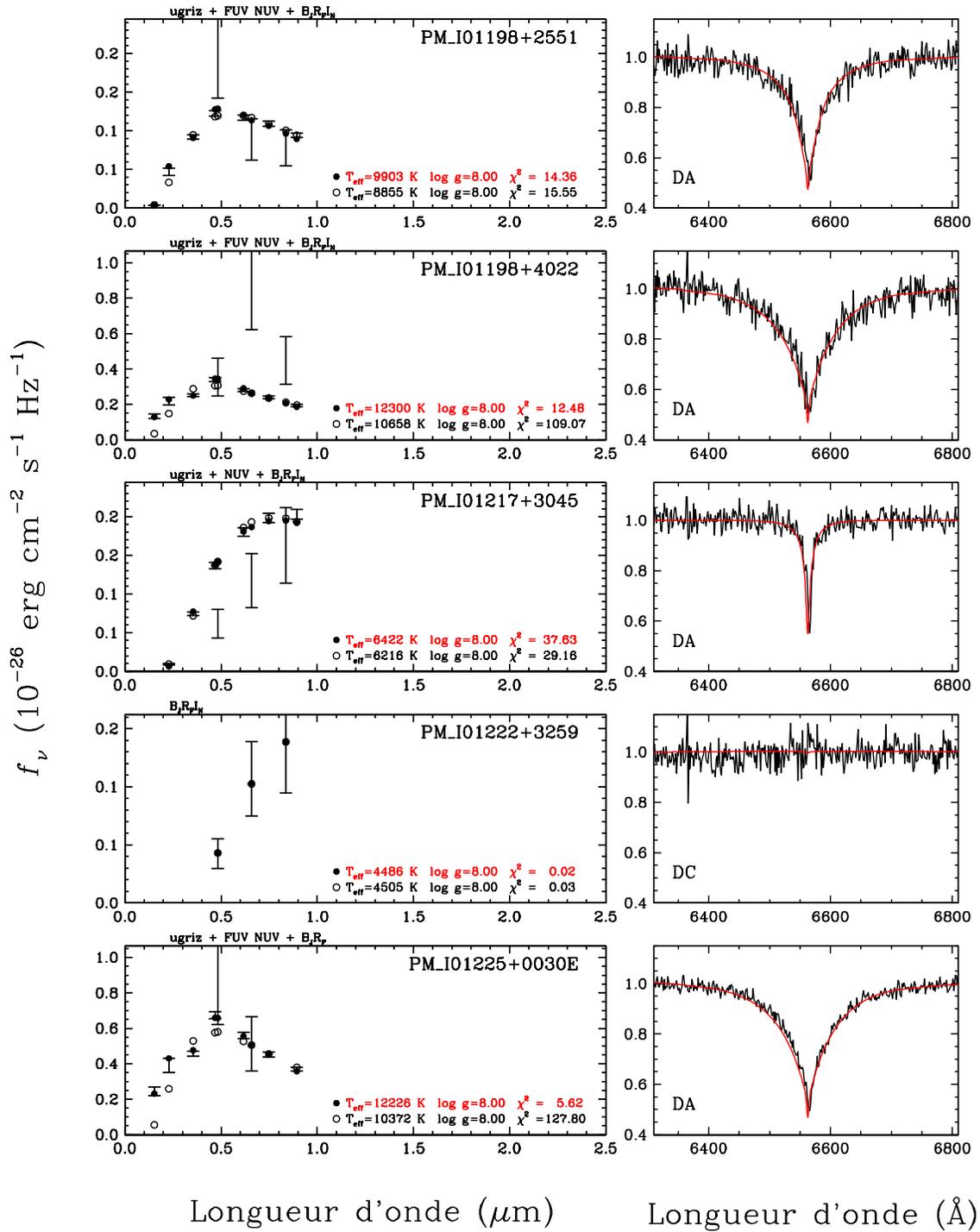


Figure 5.5 Exemples de résultats selon le χ^2 (suite).

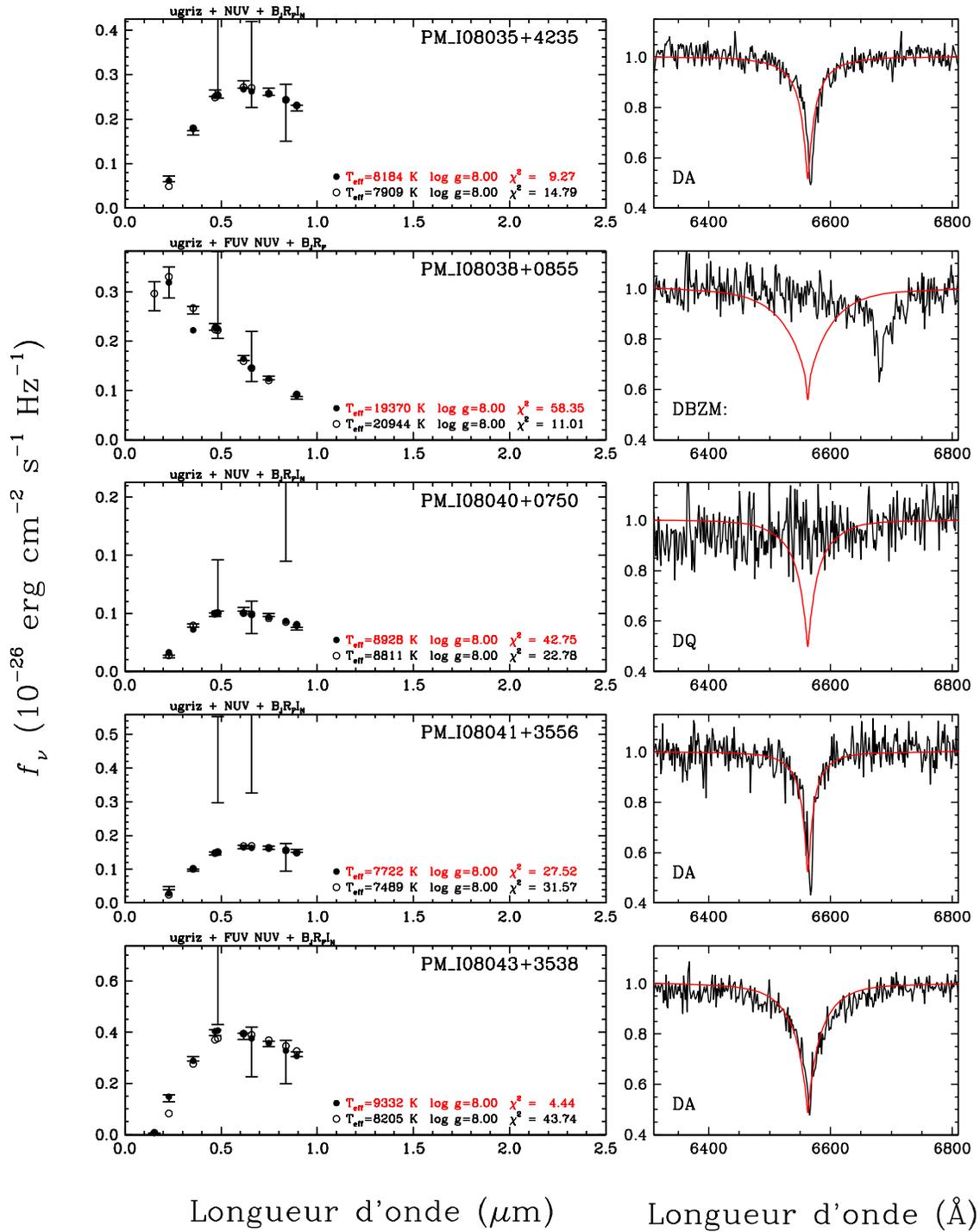


Figure 5.5 Exemples de résultats selon le χ^2 (suite).

5.5 Analyse rétrospective des critères basés sur les diagrammes de mouvement propres réduits

Les travaux de Limoges et al. (2015) laissent place à une analyse plus approfondie des critères basés sur les diagrammes de mouvements propres réduits. Ils permettent d'améliorer notre compréhension de ces derniers et, par conséquent, le taux de succès du relevé.

Premièrement, en se basant sur la liste des objets observés pour le relevé des naines blanches à l'intérieur de 40 pc, incluant les faux positifs, il est possible de mieux comprendre les caractéristiques des contaminants potentiels. 129 objets se retrouvant à la fois dans cette liste et celle que nous avons mis à jour pour les objets à moins de 55 pc ont été identifiés par inspection visuelle des spectres comme étant des faux positifs. Le tableau 5.I présente les résultats de ces objets vis-à-vis les quatre critères de sélection. On remarque que le critère basé sur le système *ugriz* est très efficace pour isoler les naines blanches avec seulement 6.8% de faux-positifs. Les autres critères sont cependant enclin à la contamination, le critère $V - J$ étant le pire. Cependant, ces nombres doivent être considérés avec précaution. En effet, ils sont basés sur des notes prises après inspection visuelle et sont donc sujet à une mauvaise identification. De plus, ils sont biaisés par l'ordre de priorité établi. Par exemple, les objets présents à cause du critère $V - I_N$ uniquement sont peu probables ; ils risquent plutôt d'avoir répondu positivement à un critère plus important, comme $g - z$. Puisque les magnitudes sont disponibles pour une grande majorité d'objets, le critère a pu être appliqué de surcroît. Les conclusions intéressantes et sans ambiguïté sont les suivantes : le critère $g - z$ est très fiable contrairement à celui en $V - J$ qui, pour sa part, conserve une grande proportion de contaminants.

Tableau 5.I Critères de mouvements propres réduits appliqués aux contaminants identifiés par inspection visuelle des spectres observés

Critère	Positifs	Négatifs	Non-applicable
$g - z$	5	68	56
NUV - V	7	10	112
$V - J$	87	10	32
$V - I_N$	68	39	22

En utilisant aussi tous les objets ayant été identifiés comme des naines blanches selon le procédé décrit à la section 5.2, il est possible de pousser l’analyse encore plus loin. Premièrement, les objets du catalogue de McCook & Sion ainsi que ceux du septième relevé du SDSS (Kleinman et al., 2013) ont une identification visuelle de leur type spectral. Il est donc possible de savoir si un type spécifique est défavorisé par les critères. Encore une fois, ces identifications ont été faites visuellement et sont donc enclines à l’erreur humaine (certains cas ont été constatés). Néanmoins, le type spectral DA+dM (DA avec un compagnon de type M) sort du lot ; tous les critères leur étant applicables sont négatifs sauf pour $NUV - V$. Ce sont d’ailleurs ces objets qui sont éparpillés à l’extérieur des zones délimitées par les critères dans les figures 5.1, 5.3 et 5.4. Il ne semblait pas avoir d’effet favorisant quelqu’autre type spectral.

Maintenant, un autre effet particulier a pu être constaté en ce qui a trait au test $V - J$. Celui-ci n’a pas pu être appliqué à un grand nombre d’objets. Or, le système 2MASS ainsi que les plaques photographiques devraient couvrir tout l’hémisphère nord. Dès lors, la seule explication pour cette lacune est que ces objets sont simplement trop peu brillants. Bien que les naines blanches soient des objets plutôt bleus, elles devraient tout de même être détectables dans les bandes en proche infrarouge. Ainsi, les objets n’ayant pas la magnitude J sont très susceptibles d’être des naines blanches très éloignées ou des objets trop bleus pour être des naines blanches. Ce phénomène est présenté dans la figure 5.6 où le test $g - z$ est ré-illustré en marquant les objets pour lesquels le critère $V - J$ n’a pas pu être appliqué et en ajoutant la condition $\chi_{\text{phot}}^2 < 100$ (points rouges). Cette dernière sert simplement à diminuer la densité de points sans pour autant retirer ceux qui pourraient être pertinents. Les points bleus font partie d’un sous-ensemble des points rouges pour lequel $D_{\text{phot}} < 55$ pc. On remarque donc qu’à part pour quelques candidates naines blanches (59) très froides (elles ont toutes une température effective photométrique inférieure à 6000 K), la plupart de ces objets ne respectent pas le critère en $g - z$ et sont bien regroupés. Il est donc pratiquement certain que ce ne sont pas des naines blanches étant donné que la photométrie $ugriz$ est la plus adéquate à l’identification de naines blanches.

Ces objets étant représentatifs de la population de naines blanches, ils devraient être utiles afin d’observer leur comportement par rapport à d’autres critères. La figure 5.7 le fait pour le critère $V - I_N$ en reportant en graphique les objets bleus de la figure 5.6, c’est-à-dire ceux dont le critère $V - J$ n’a pas pu être appliqué et dont la distance photométrique se situe à moins de 55 pc. Ils sont ensuite départagés selon leur réponse au critère $g - z$. On remarque que les objets exclus par ce dernier sont rassemblés très près de la limite du critère de sélection et $V - I_N$, ce qui corrobore l’idée qu’ils soient des contaminants et non des naines blanches. De plus, les objets froids ayant été sélectionnés à l’aide du critère de la figure 5.6 se retrouvent pratiquement tous (50/59) dans le bas du diagramme, à l’intérieur du critère de sélection en $V - I_N$. À la lumière de ces observations, on comprend que la plupart des objets ne possédant pas la magnitude J ont une chance très faible d’être des naines blanches. Afin de pallier le fait que les quelques candidates naines blanches froides identifiables uniquement avec le critère en $V - I_N$ risquent d’être noyées dans une mer de contaminants, un nouveau critère s’ajoutant à l’ancien (voir sous-section 5.1.5) est suggéré. Celui-ci est présenté à la figure 5.7 et est donné par

$$H_V > 1.6(V - I_N) + 18.7. \quad (5.3)$$

Le critère le plus restrictif des deux doit être choisi. On a ainsi que celui établi précédemment par Limoges et al. (2013) s’applique pour des indices de couleur $V - I_N$ supérieurs à ~ 1.95 et le nouveau s’applique au reste. Dès lors, seulement 2 candidates sur 50 seront délaissées alors que seulement 12 contaminants potentiels sur 449 s’infiltreront.

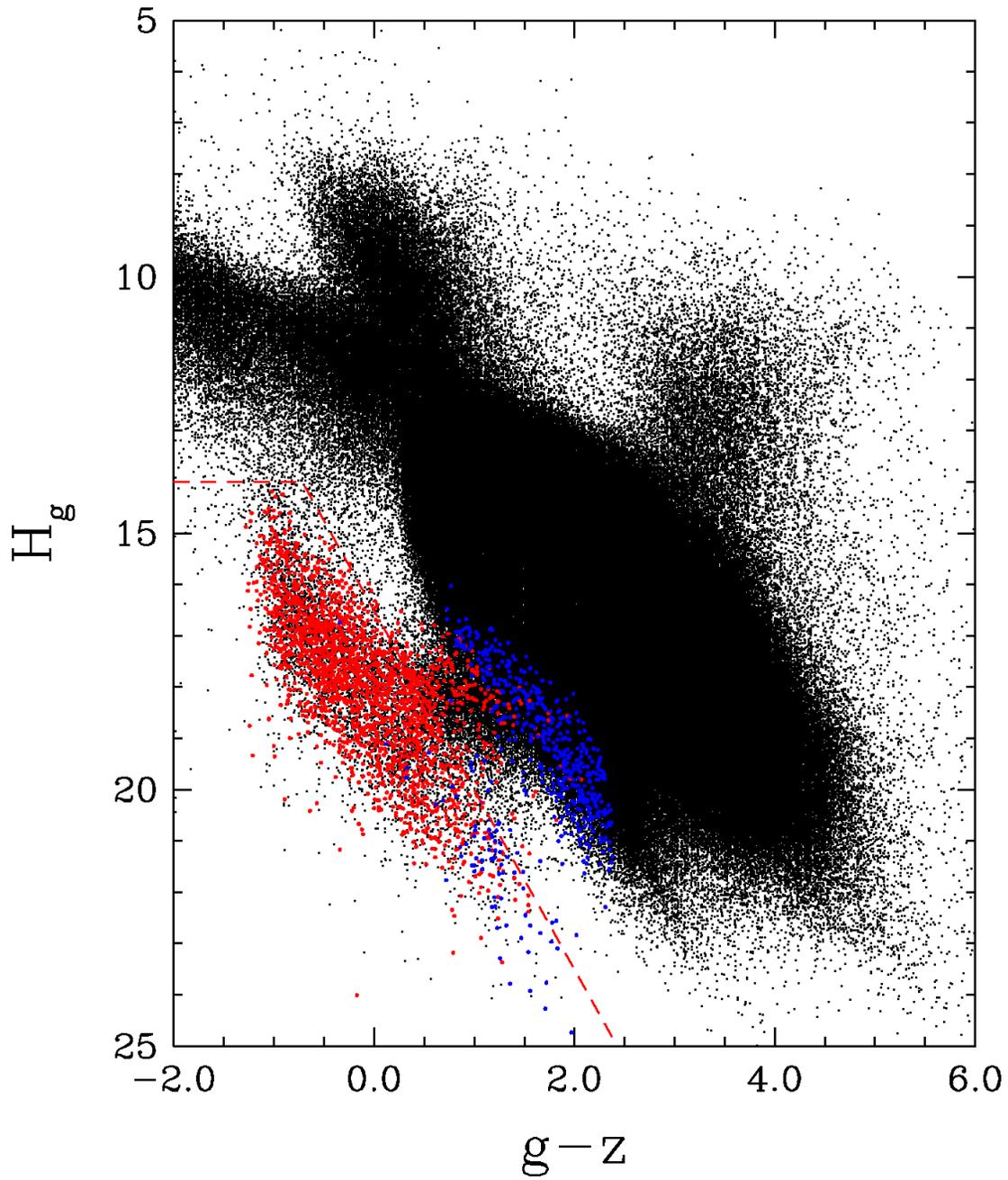


Figure 5.6 Diagramme de mouvements propres réduits ($H_g, g - z$) pour les objets du catalogue LSPM. Les points rouges représentent les objets pour lesquels le critère $V - J$ n'a pas pu être appliqué et dont le $\chi_{\text{phot}}^2 < 100$. La condition $D_{\text{phot}} < 55$ pc est ajoutée aux deux précédentes pour les objets illustrés par des points bleus. La ligne pointillée trace les limites du critère de sélection.

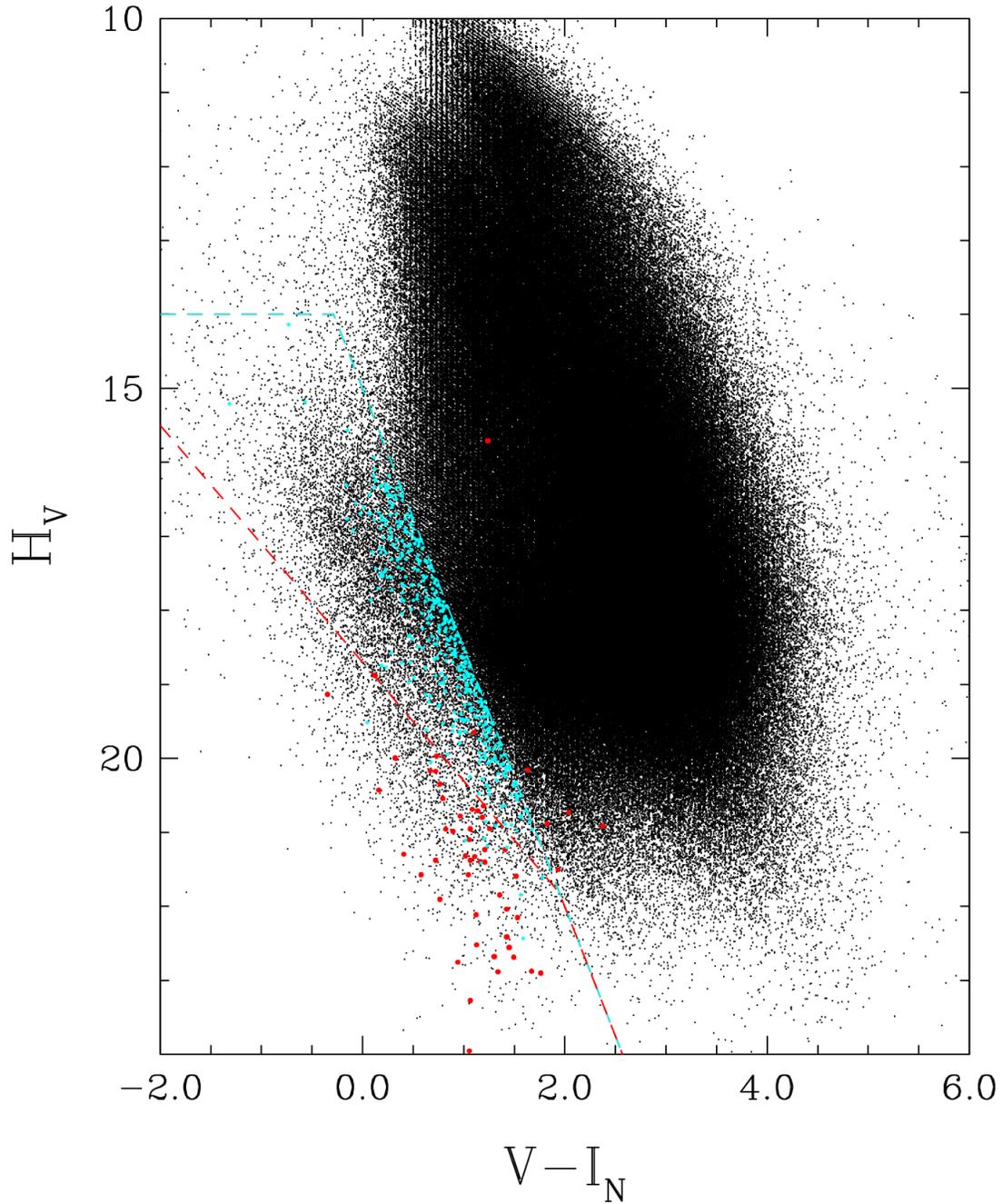


Figure 5.7 Diagramme de mouvements propres réduits (H_V , $V - I_N$) pour les objets du catalogue LSPM. Les points en couleurs correspondent à ceux identifiés en bleu dans la figure 5.6. Ceux en rouge représentent les candidates naines blanches froides identifiées à l'aide du critère $g - z$. Les points en cyan correspondent aux contaminants identifiés par ce même critère. Le nouveau critère est dépeint par la ligne pointillée rouge et l'ancien par celle en cyan. Les deux se recoupent dans le bas du diagramme.

5.6 Observations

5.6.1 État du relevé

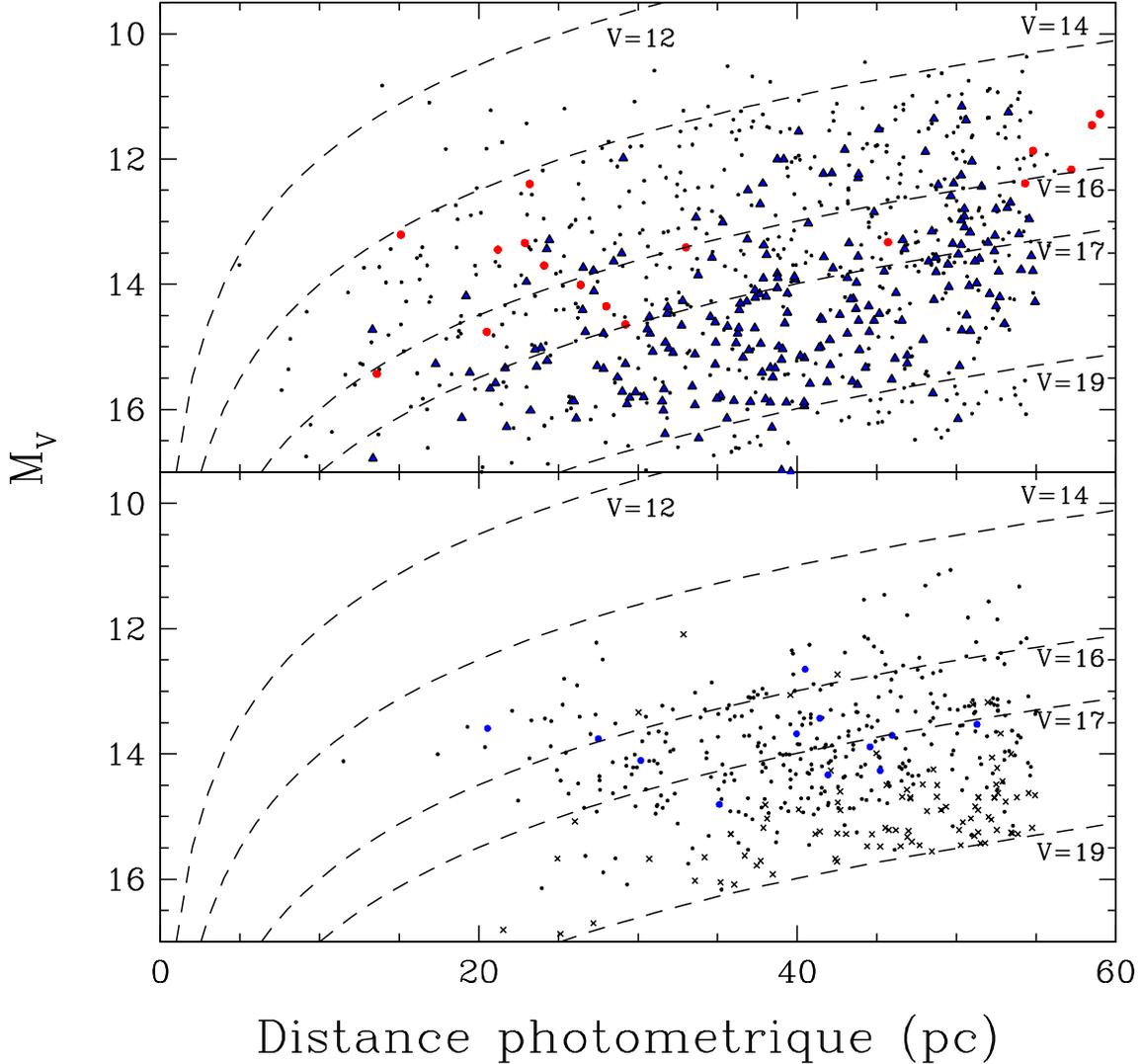


Figure 5.8 État du relevé des naines blanches. La fenêtre du haut présente les naines blanches confirmées spectroscopiquement alors que la fenêtre du bas montre les candidates restantes. Dans celle du haut, les points noirs indiquent les naines blanches connues avant le début du relevé, les triangles bleus, celles identifiées par Limoges et al. (2015) et les cercles rouges, celles découvertes durant ce projet. Dans la partie inférieure, les cercles bleus identifient les objets observés, mais dont le spectre était trop bruyant pour conclure quoi que ce soit. Les autres sont tous des candidates et celles dont la priorité est de second ordre (au sens de Limoges et al. 2015) sont marquées par un x. Les courbes en tirets montrent la relation pour une magnitude V constante.

La figure 5.8 présente l'état du relevé des naines blanches de l'hémisphère nord à moins de 40 pc du Soleil. On remarque que 11 naines blanches ont été ajoutées à l'échantillon. Celles-ci seront présentées dans les sections qui suivront. Les 4 naines blanches les plus rapprochées sont, en ordre croissant de distance, PM_I21242+2335, PM_I02204+4101E, PM_I19548+0848 et PM_I02389+4033. Force est de constater que les candidates se situent de plus en plus dans les régions de faible magnitude apparente, rendant leur observation plus ardue. En comparant avec la figure 1 de Limoges et al. (2015), on remarque que 57 candidates se retrouvent à moins de 30 pc. Ceci est dû à la différence entre les méthodes employées pour déterminer la distance. Par contre, la plupart de ces objets n'ont que les magnitudes JHK_s ou les magnitudes photographiques et sont généralement à la limite des critères de sélection. Ce ne sont donc pas les plus propices à une détermination précise de la distance, quelle que soit la méthode. Au final, 340 candidates de premier ordre de priorité restent à observer.

5.6.2 Spectres observés

Tous les spectres présentés dans cette sous-section ont été obtenus à l'Observatoire du Mont-Mégantic. Un total de 56 objets furent observés. Cependant, dû à plusieurs facteurs comme la présence de nuage et/ou de la lune, la faible intensité des objets observés ou le coucher/lever du soleil, 10 des 56 spectres ont été considérés comme inutilisables. Des 46 restant, 20 montrent des raies de la série de Balmer ayant la forme caractéristique des naines blanches de type spectral DA. Ceux-ci sont présentés à la figure 5.9. Ensuite, une naine blanche de type DA+dM (voir figure 5.10) ainsi que 6 de type DC (aucune raie, voir figure 5.11) ont été identifiées. Cependant, pour les DC, il est parfois difficile de distinguer ce qui n'est que du bruit de ce qui pourrait être de faibles raies ou bandes d'absorption. Finalement, la figure 5.12 présente les spectres des naines blanches découvertes de type DB (2), DQ (2) et DZ (1). Celles-ci méritent une description un peu plus approfondie. On peut remarquer que le premier spectre présente clairement les raies d'hélium, typiques du type spectral DB, mais aussi la série de Balmer. Le type spectral DBA serait donc plus adéquat. Le second spectre est plutôt bruyant, mais permet de distinguer les raies

d'hélium et la présence potentielle de raies d'hydrogène (d'où le « A ? »). Les deux DQ montrent les bandes d'absorption du carbone (plus faibles pour la seconde) ainsi que des traces d'hydrogène pour la première et de faibles trace d'hélium et d'hydrogène pour la deuxième. La présence d'hydrogène est cependant très peu probable pour une DQ, ce qui laisse envisager la présence d'un objet non résolu. La dernière a été identifiée comme DZ, mais nécessitera de meilleures observations dans la partie bleue du spectre afin de détecter ou non le doublet H et K du calcium. La présence de la raie à environ 4226 Å propre au Ca I reste aussi à expliquer.

Les autres spectres observés sont des faux positifs ayant contaminé nos critères de sélection. La plupart (9 objets) ont été identifiés comme des types spectraux M ou autres (voir figure 5.13). Certains (4) n'ont toutefois pas pu être identifiés et sont présentés à la figure 5.14.

Au final, 32 naines blanches ont été découvertes comparativement à seulement 13 faux-positifs, donnant un taux de détection de 71% (on ne considère pas les spectres trop bruyants pour lesquels on ne peut conclure quoi que ce soit). Cependant, comme il a été mentionné à la section 5.3, un problème avec la détermination de la distance photométrique n'a été remarqué qu'après la première séance d'observation. Ainsi, plusieurs naines blanches détectées risquent de se situer bien plus loin que 40 pc. L'analyse des paramètres atmosphériques permettra de déterminer cette distance.

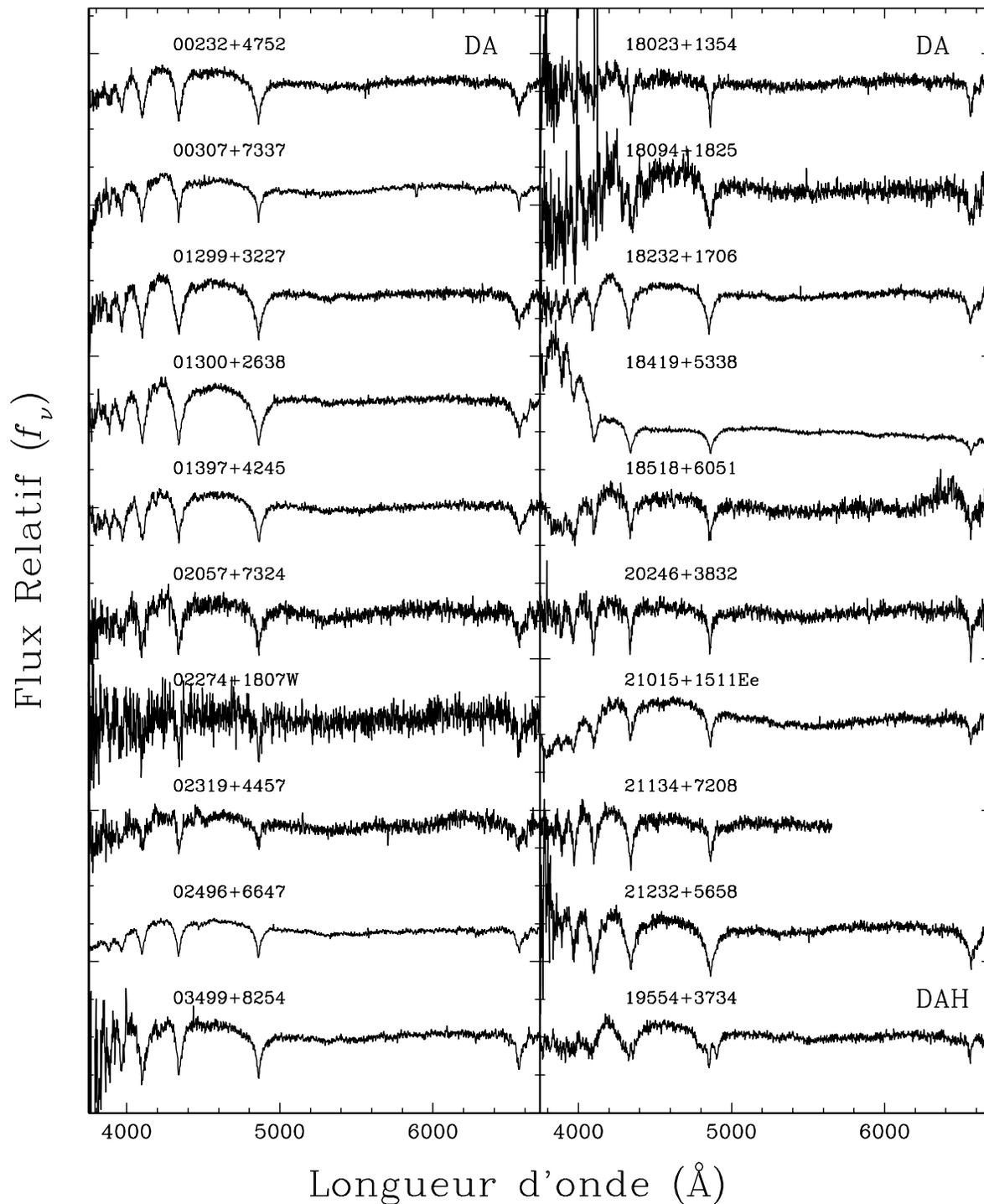


Figure 5.9 Spectres des nouvelles naines blanches de type DA. Les 19 premiers sont pour des DA classiques et le dernier spectre pour une DA magnétique présentant clairement la séparation des raies d'absorption due à l'effet Zeeman. À part cette dernière, les naines blanches présentées sont en ordre d'ascension droite croissante. Les spectres sont normalisés par rapport au continu et décalés de manière à ce qu'ils soient tous visibles simultanément. Les chiffres suivant le préfixe PM_I constituant le nom de chaque objet sont étiquetés au-dessus de leur spectre respectif. Le flux très élevé de la partie bleu du spectre de PM_I18419+5338 est du à une mauvaise calibration.

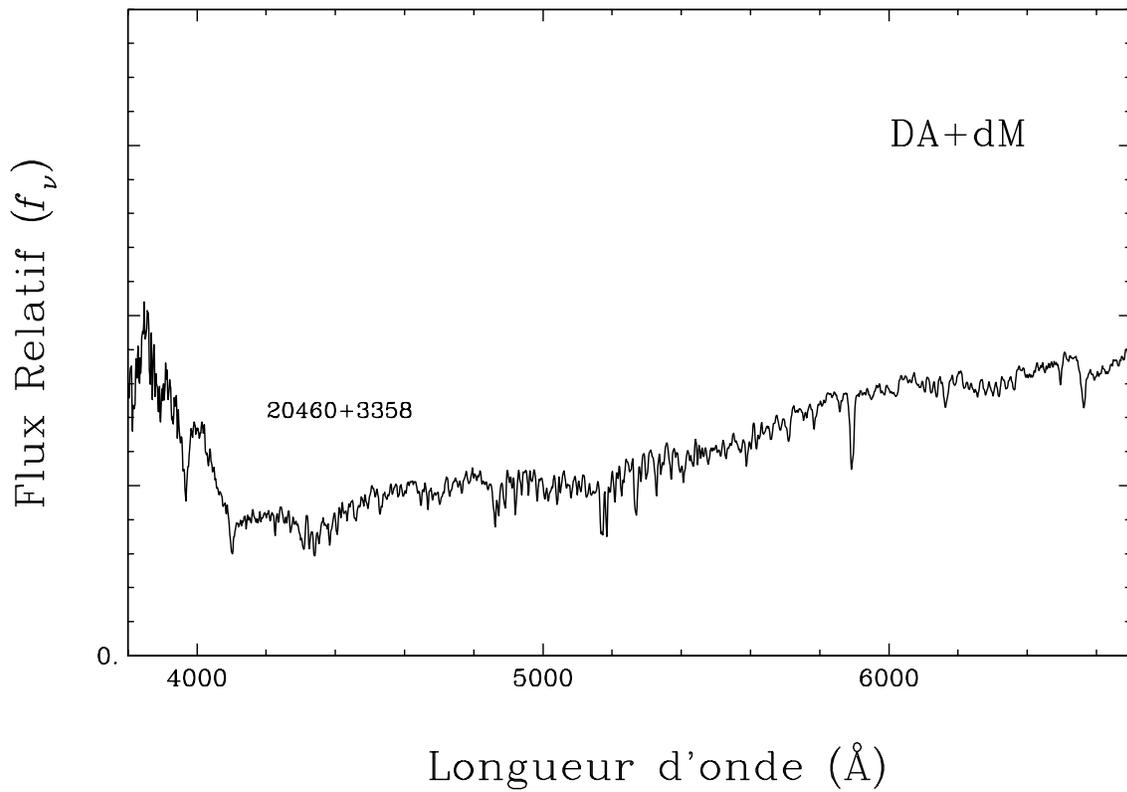


Figure 5.10 Spectre de la nouvelle naine blanche PM J20460+3358 de type DA+dM. Le spectre est normalisé par rapport au continu unité. On peut voir clairement la partie bleue du spectre présentant les raies élargies de la série de Balmer typiques des naines blanches de type DA et dans la partie rouge, la contamination de la naine M.

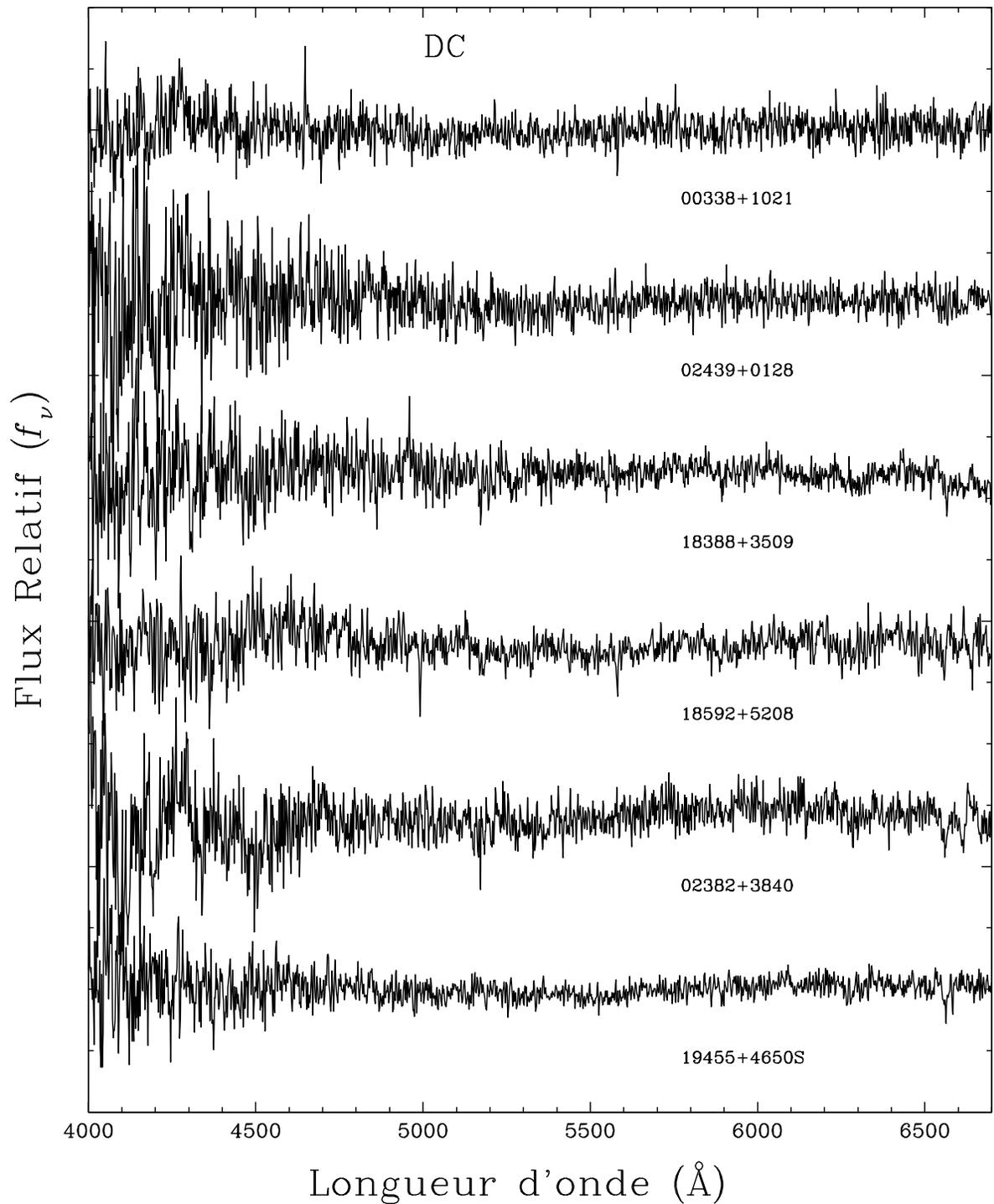


Figure 5.11 Spectres des nouvelles naines blanches de type DC. Celles-ci ne montrent aucune raie, sauf quelques-unes semblant présenter une raie $H\alpha$ faible. Les 6 DC sont classées par ordre croissant d'ascension droite. Les spectres sont normalisés par rapport au continu et décalés de manière à ce qu'ils soient tous visibles simultanément. Les chiffres suivant le préfixe PM_I constituant les noms de chaque objet sont étiquetés en-dessous de leur spectre respectif.

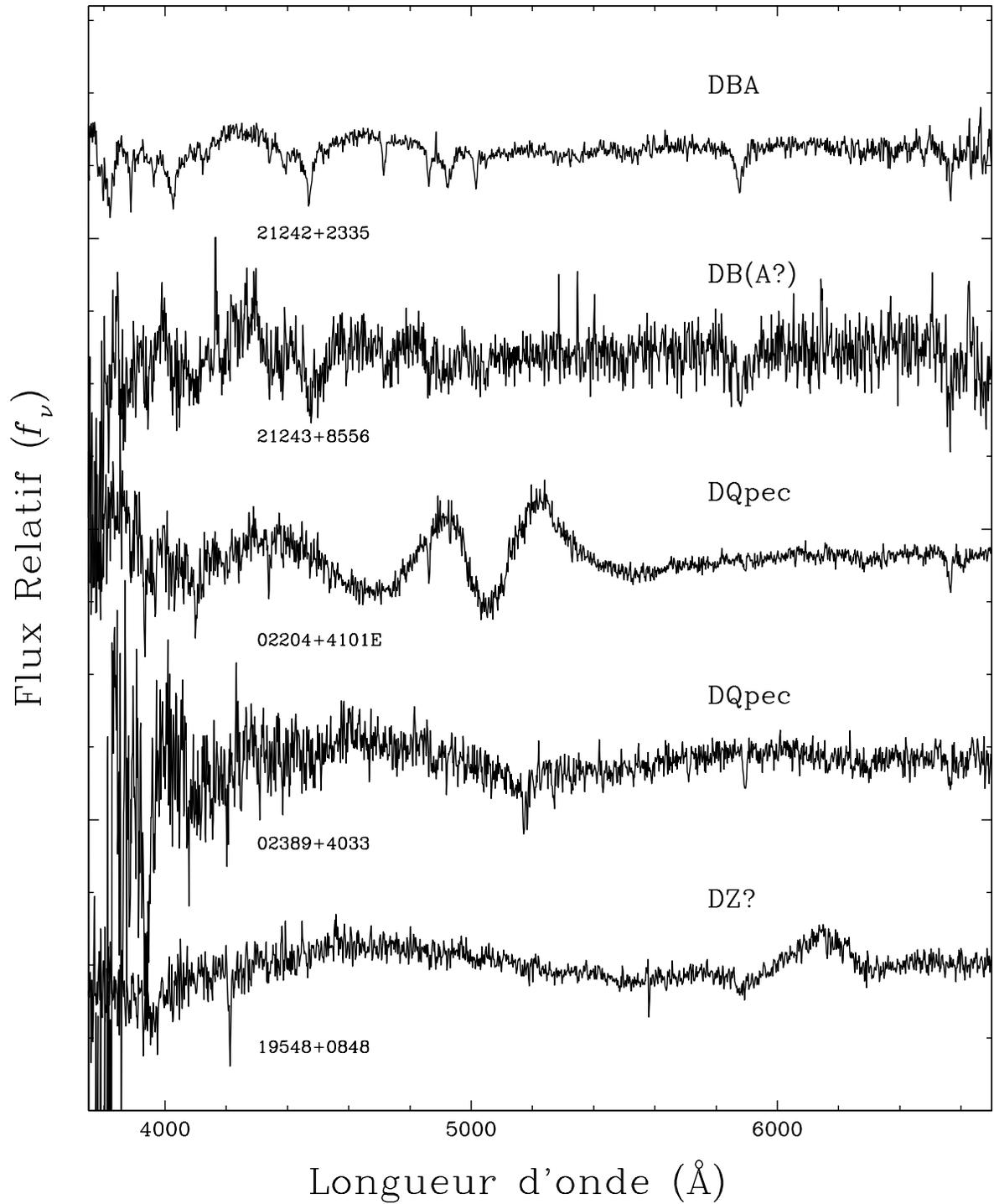


Figure 5.12 Spectres des nouvelles naines blanches de type DB, DQ et DZ. Les spectres sont normalisés par rapport au continu et décalés de manière à ce qu'ils soient tous visibles simultanément. Les chiffres suivant le préfixe PM.I constituant le nom de chaque objet sont étiquetés en-dessous de leur spectre respectif alors que le type spectral est au-dessus. Voir texte pour une description plus approfondie.

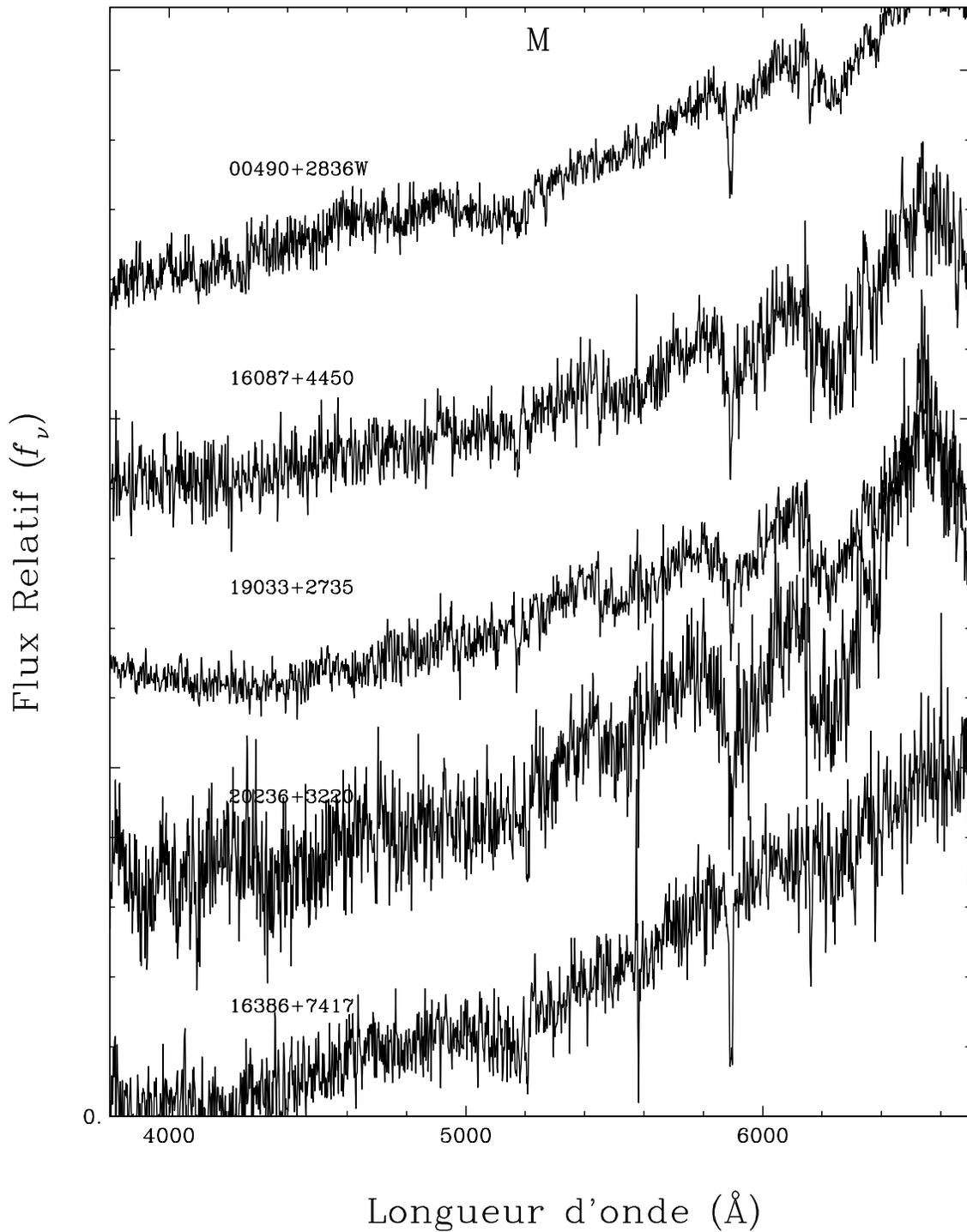


Figure 5.13 Spectres identifiés comme des contaminants. Les spectres sont normalisés par rapport au continu et décalés de manière à ce qu'ils soient tous visibles simultanément. Les chiffres suivant le préfixe PM-I constituant le nom de chaque objets sont étiquetés au-dessus de leur spectre respectif.

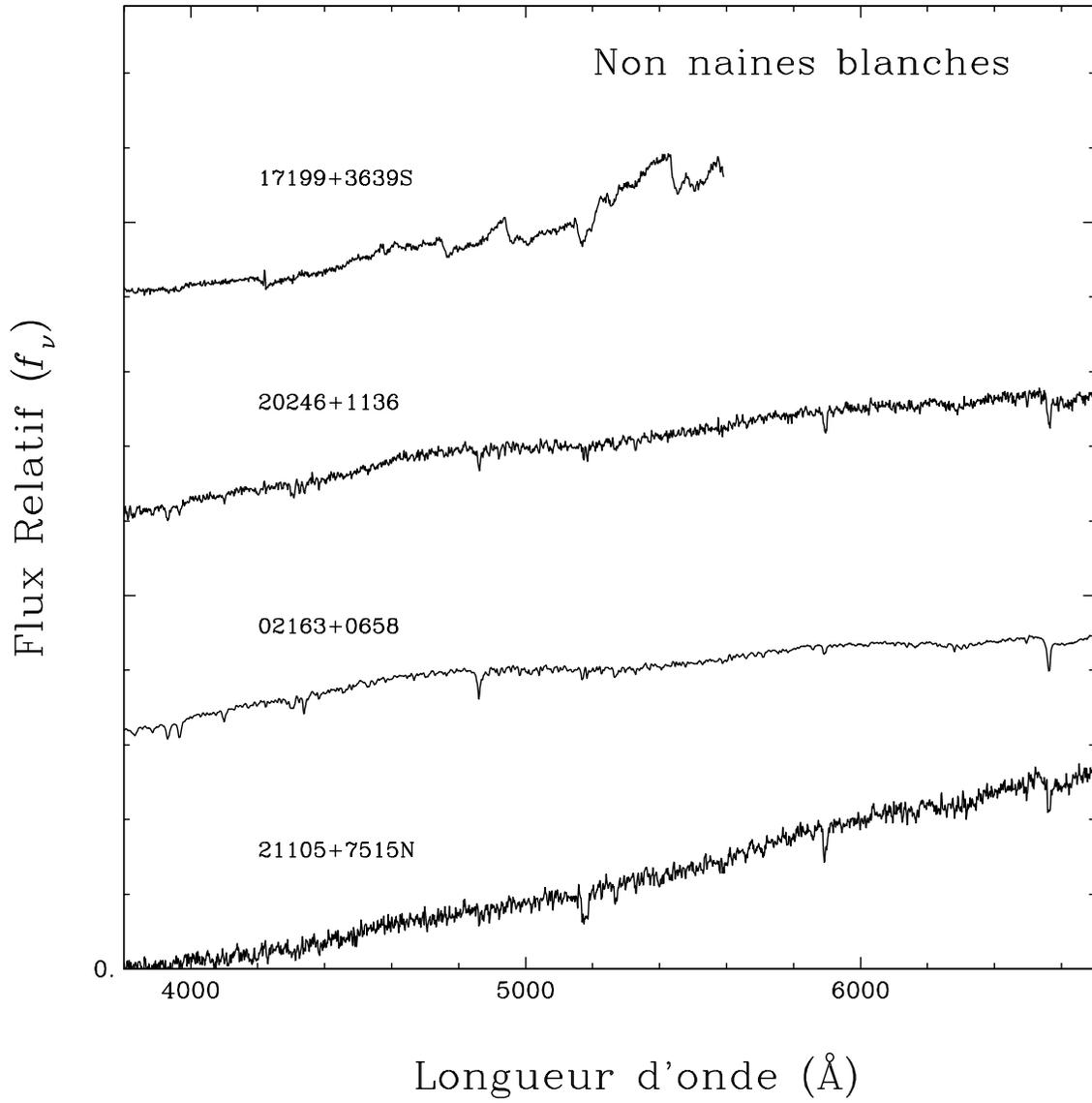


Figure 5.13 Spectres identifiés comme des contaminants (suite).

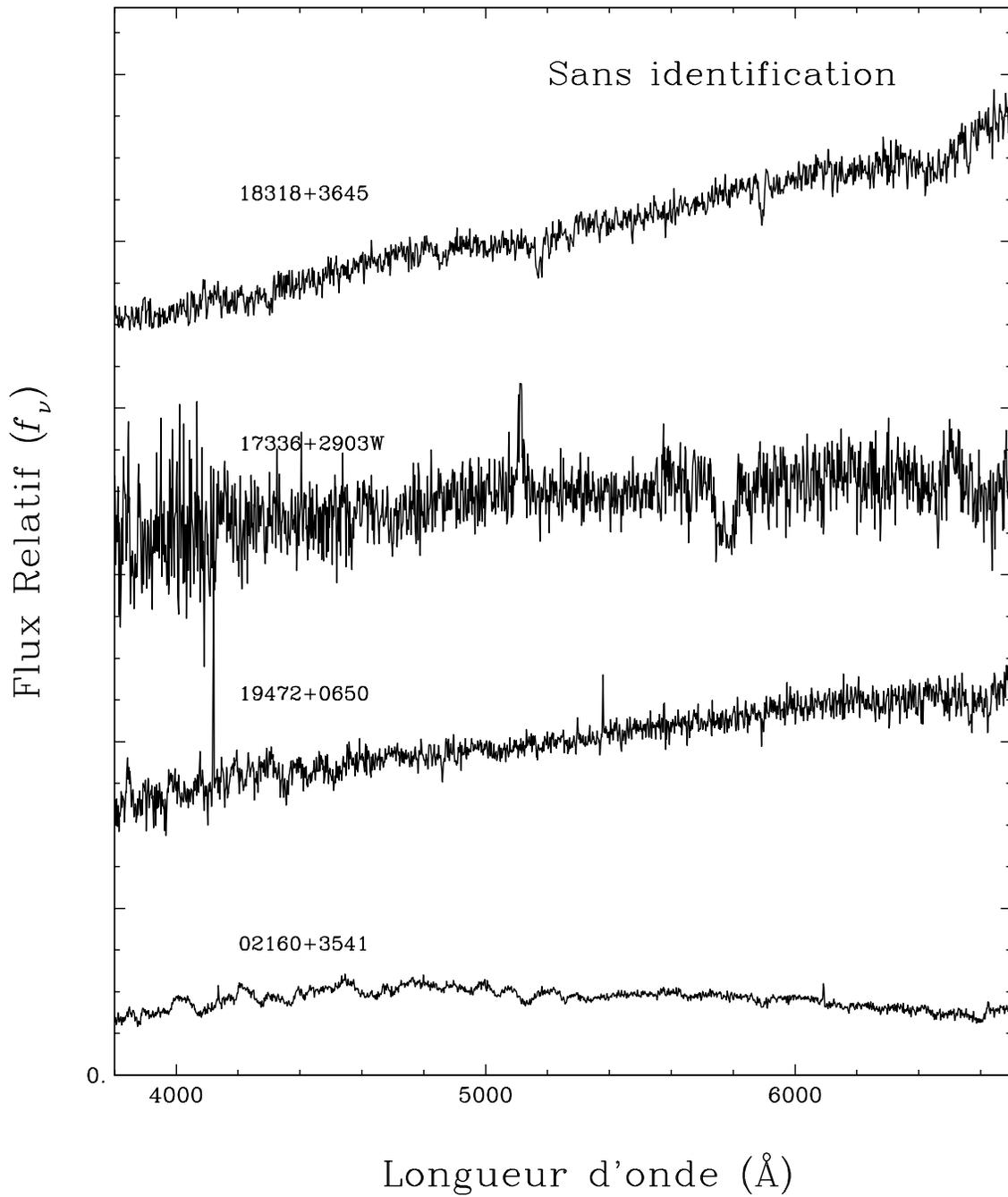


Figure 5.14 Spectres pour lesquels aucun type spectral n'a été déterminé. Les spectres sont normalisés par rapport au continu et décalés de manière à ce qu'ils soient tous visibles simultanément. Les chiffres suivant le préfixe PM1 constituant le nom de chaque objets sont étiquetés au-dessus de leur spectre respectif.

5.6.3 Analyse spectroscopique

Les naines blanches de type DA ont toutes été analysées à l'aide de la méthode spectroscopique décrite à la section 3.3. Les résultats sont présentés à la figure 5.15 en montrant uniquement la solution choisie par rapport aux raies de la série de Balmer disponibles et ayant pu être extraites du spectre correctement. Le nom de la raie la plus froide et de la raie la plus chaude leur est étiqueté. Il a parfois été nécessaire de fixer le $\log g$ à 8.00 pour que la procédure fonctionne correctement. Le résultat pour PM_I19554+3734 ne doit pas être pris en compte puisque le magnétisme n'est pas inclus par les modèles utilisés ici. On remarque aussi que plusieurs objets nécessiteraient de meilleures observations pour la partie bleue du spectre afin d'ajouter la raie H8 ou tout simplement un meilleur rapport signal sur bruit. C'est particulièrement le cas pour les naines blanches les plus froides, qui sont ironiquement celles qui nous intéressent le plus puisque plus susceptibles de se situer à l'intérieur de 40 pc.

5.6.4 Analyse photométrique

La méthode photométrique décrite à la section 3.2 a été utilisée afin de déterminer les paramètres atmosphériques des objets, mais avec une variante selon le type spectral. Pour les naines blanches de type DA, le $\log g$ est choisi à partir des résultats de la méthode spectroscopique en supposant une atmosphère riche en hydrogène. Pour les autres types spectraux, le type d'atmosphère est choisi selon l'objet en fonction du meilleur accord entre les modèles et les données. Les résultats pour les DA sont présentés à la figure 5.16 et ceux pour les autres types spectraux à la figure 5.17.

On remarque d'abord que l'accord entre la raie H α et les spectres théoriques semble bon pour la plupart des DA. Cependant, certaines présentent des données photométriques plutôt étranges, comme PM_I18518+6051 et PM_I20246+3832, rendant la méthode photométrique peu fiable. Les températures effectives sont généralement sous-évaluées dans ces cas.

Pour les autres types spectraux, certains spectres ne semblent pas concorder avec les données photométriques. Une mauvaise association de l'objet ou une erreur lors de l'obser-

vation du spectre pourrait expliquer ces incohérences. Par exemple, dans les régions très peuplées, il était difficile d’isoler les cibles et plusieurs objets pouvaient se retrouver dans la fente. Un suivi avec les images de ces régions du ciel sera nécessaire afin de s’assurer de la validité des résultats. Par contre, il est raisonnable de se fier aux objets présentant un bon accord entre le spectre et le résultat de la méthode photométrique. En ce qui a trait aux DBA, la méthode photométrique semble pencher entre une solution d’hydrogène pur et d’hélium pure, confirmant le type spectral leur ayant été attribué. Des modèles de composition intermédiaire devons être utilisés afin d’obtenir les meilleurs résultats possibles. L’objet ayant été identifié comme une DZ semble bien correspondre aux modèles de naines blanches froides. Cependant, les mesures dans le visible ont dû être exclues de la procédure de moindres carrés. De meilleurs données photométriques dans le visible seront nécessaires afin d’améliorer la fiabilité de ce résultat.

5.6.5 Comparaison et résultats

Afin d’évaluer la validité des résultats, les températures effectives obtenues à l’aide des deux différentes méthodes ont été comparées entre elles. Le résultat est présenté à la figure 5.18. Les résultats sont généralement en accord, exceptions faites des 5 objets identifiés. La dispersion est attribuable au manque de précision des magnitudes photométriques ou au bruit dans les spectres. En considérant ceci, il est possible d’utiliser, en bonne approximation, la distance photométrique pour les objets non problématiques.

Le tableau 5.II présente les différents paramètres atmosphériques déterminés à l’aide des deux méthodes (si disponibles) pour toutes les nouvelles naines blanches. Lorsque le $\log g$ spectroscopique n’est pas disponible, un $\log g$ de 8.00 est choisi avec une incertitude de 0.25 (voir section 3.2 pour justification). En se basant sur les distances y étant présentées, on peut conclure, de manière optimiste, que 11 naines blanches à l’intérieur de 40 pc ont été découvertes grâce à la poursuite du relevé. Les trois objets problématiques avec $D_{\text{phot}} < 40$ pc ne sont pas inclus dans ce nombre.

Relative Flux

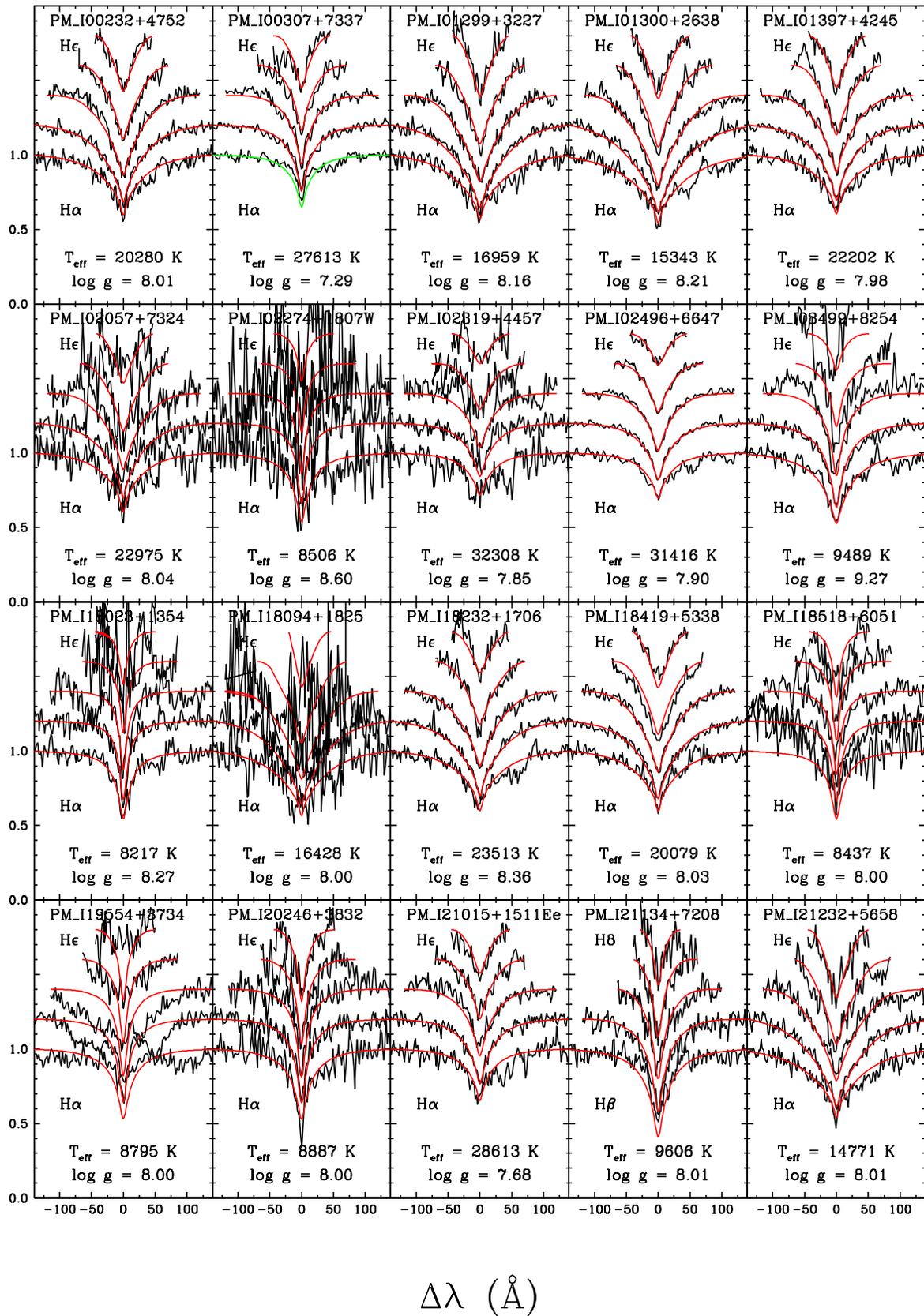


Figure 5.15 Résultats de l'analyse spectroscopique des 20 nouvelles DA. Les objets sont en ordre croissant d'ascension droite. Les courbes rouges montrent la meilleure solution alors que celles en vert indiquent lorsqu'une raie n'est pas utilisée dans la procédure de moindres carrés.

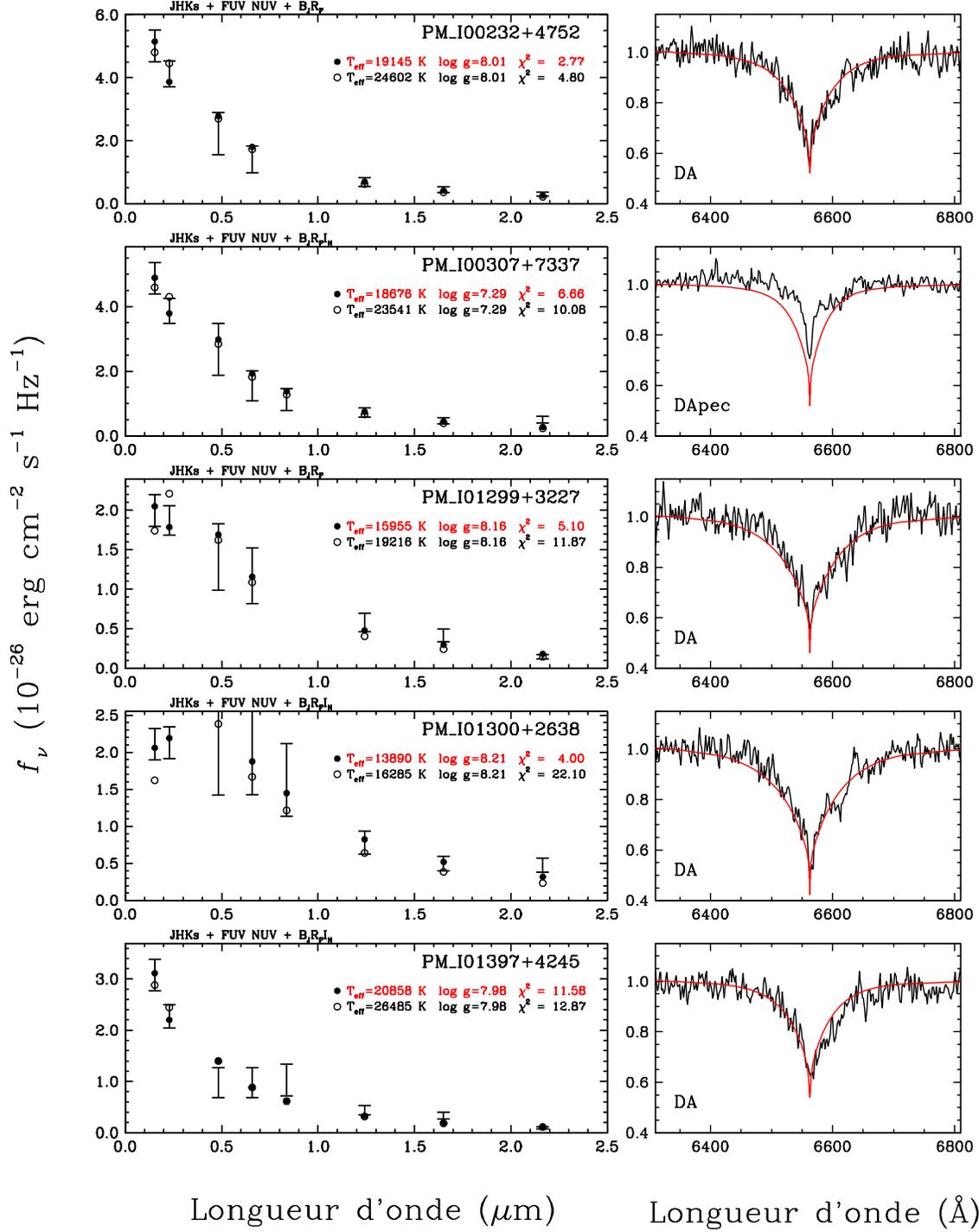


Figure 5.16 Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles DA découvertes. Même description que pour la figure 5.5. Le $\log g$ choisi est celui déterminé à l'aide de la méthode spectroscopique. Le triangle rouge est utilisé pour signifier la présence d'une donnée aberrante à l'extérieur de l'encadré associé à PM_I21232+5658.

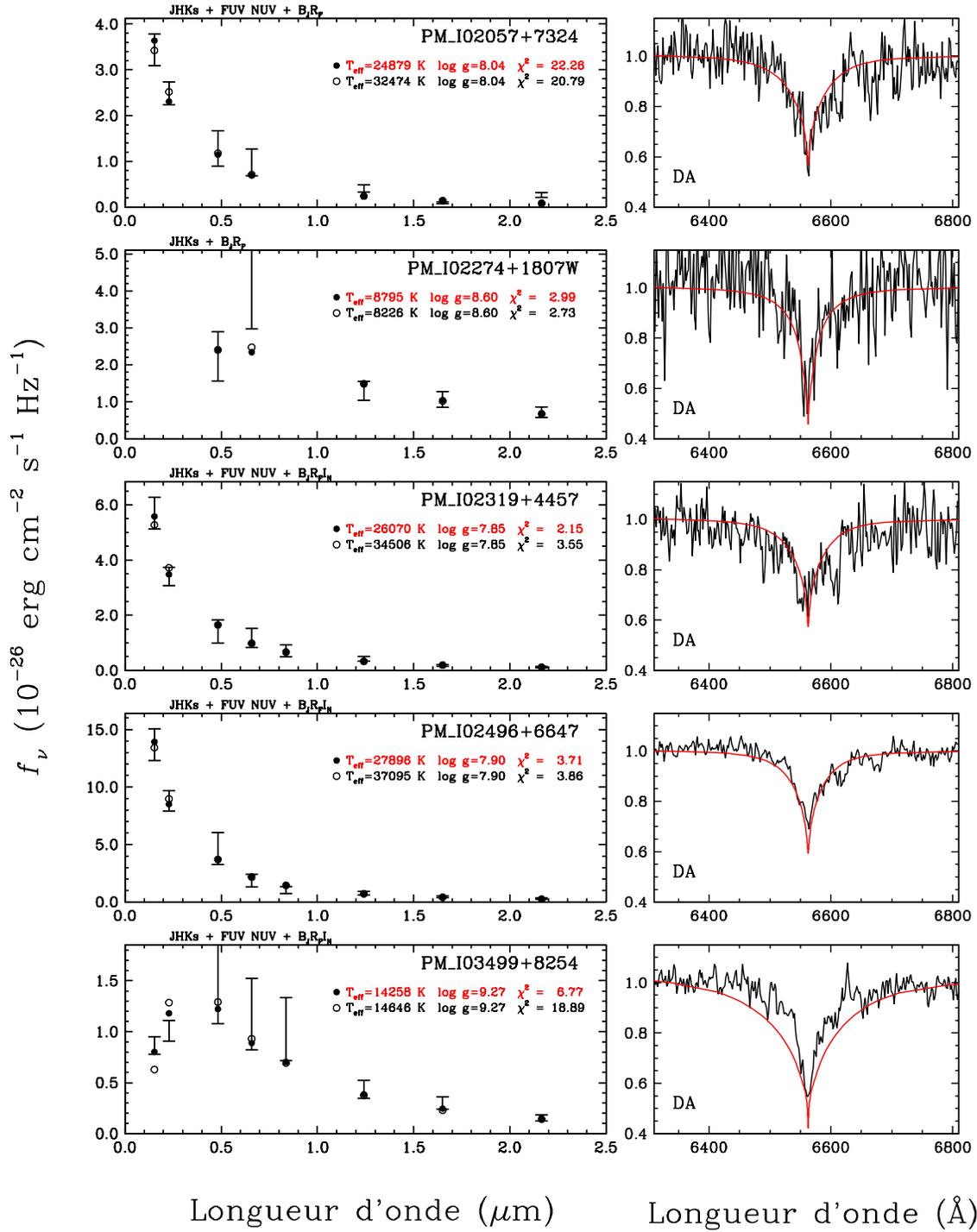


Figure 5.16 Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles DA (suite).

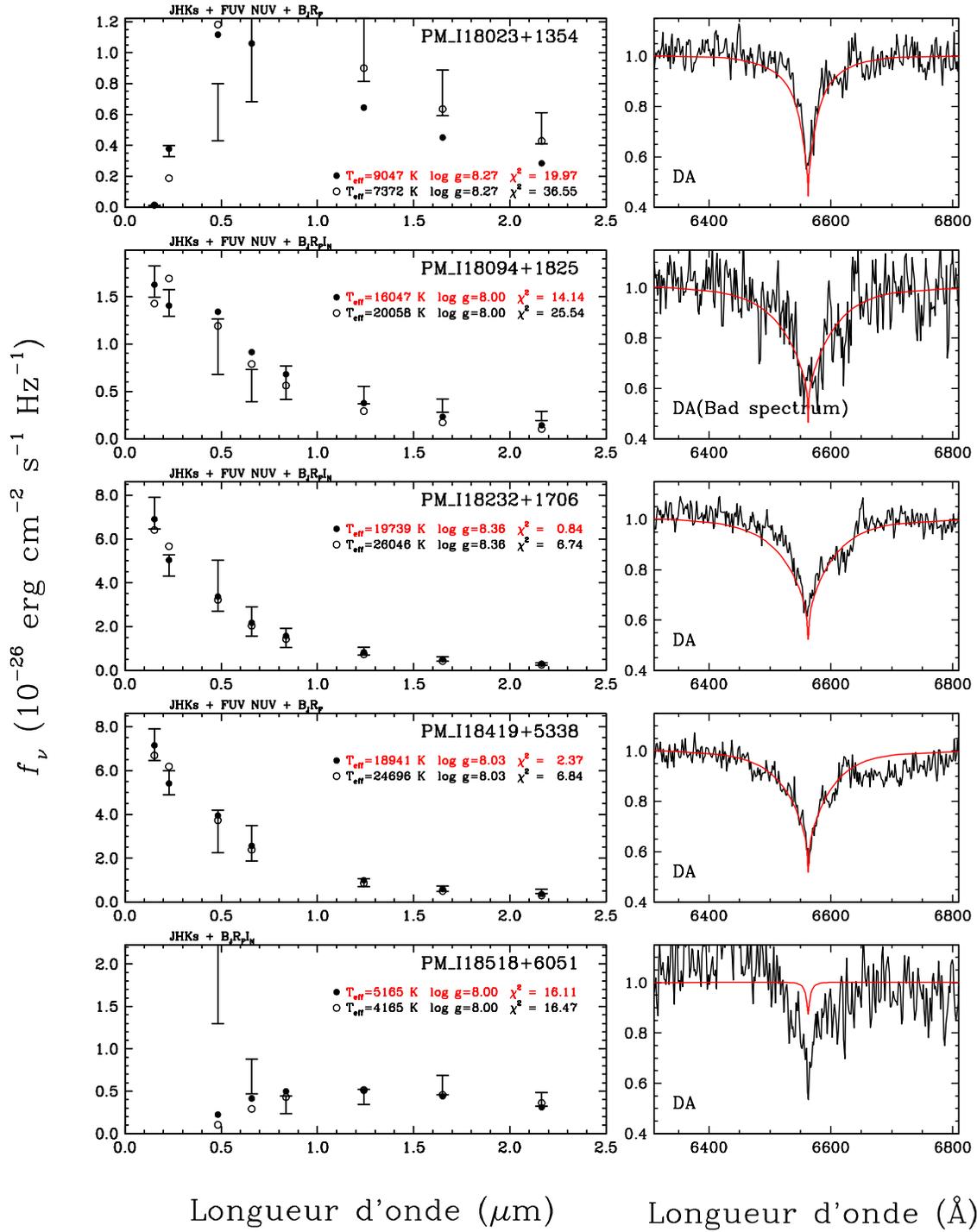


Figure 5.16 Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles DA (suite).

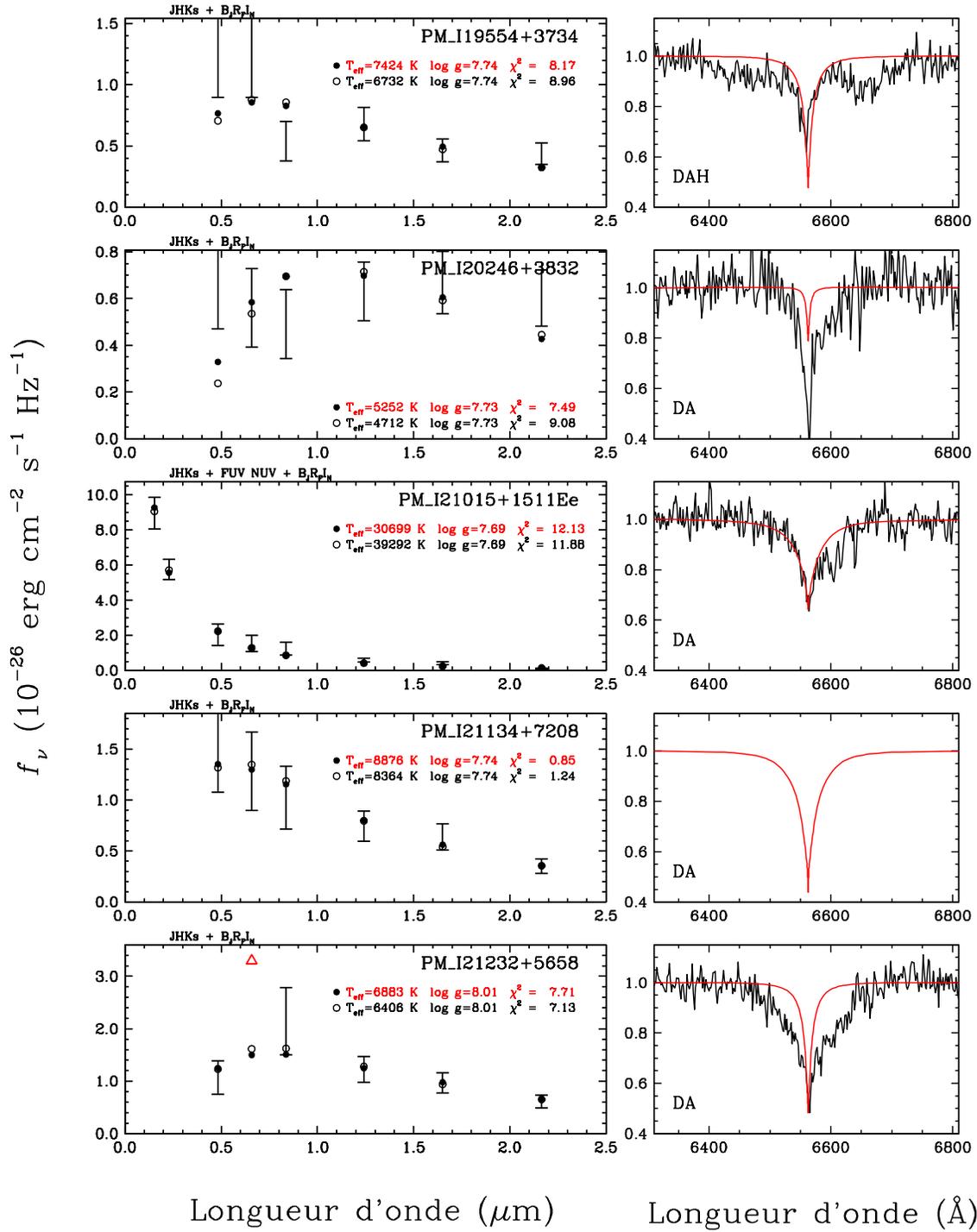


Figure 5.16 Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles DA (suite).

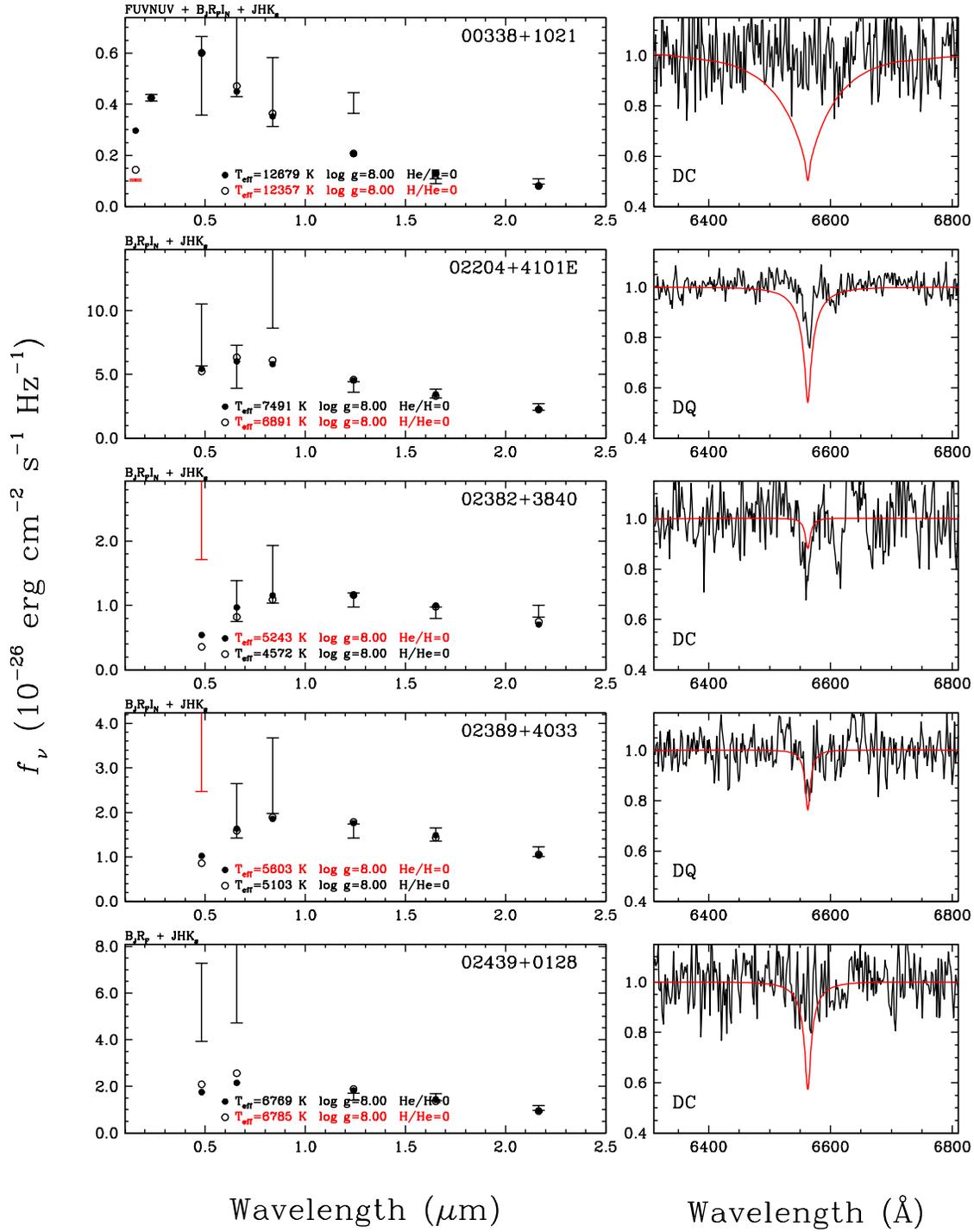


Figure 5.17 Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles naines blanches de type spectral différent de DA. Même description que pour la figure 5.5. Un $\log g$ de 8.00 est choisi pour chacun des objets. La composition de l’atmosphère est déterminée objet par objet. Certaines données photométriques ont dû être exclues de la procédure de moindres carrés et sont indiquées en rouge.

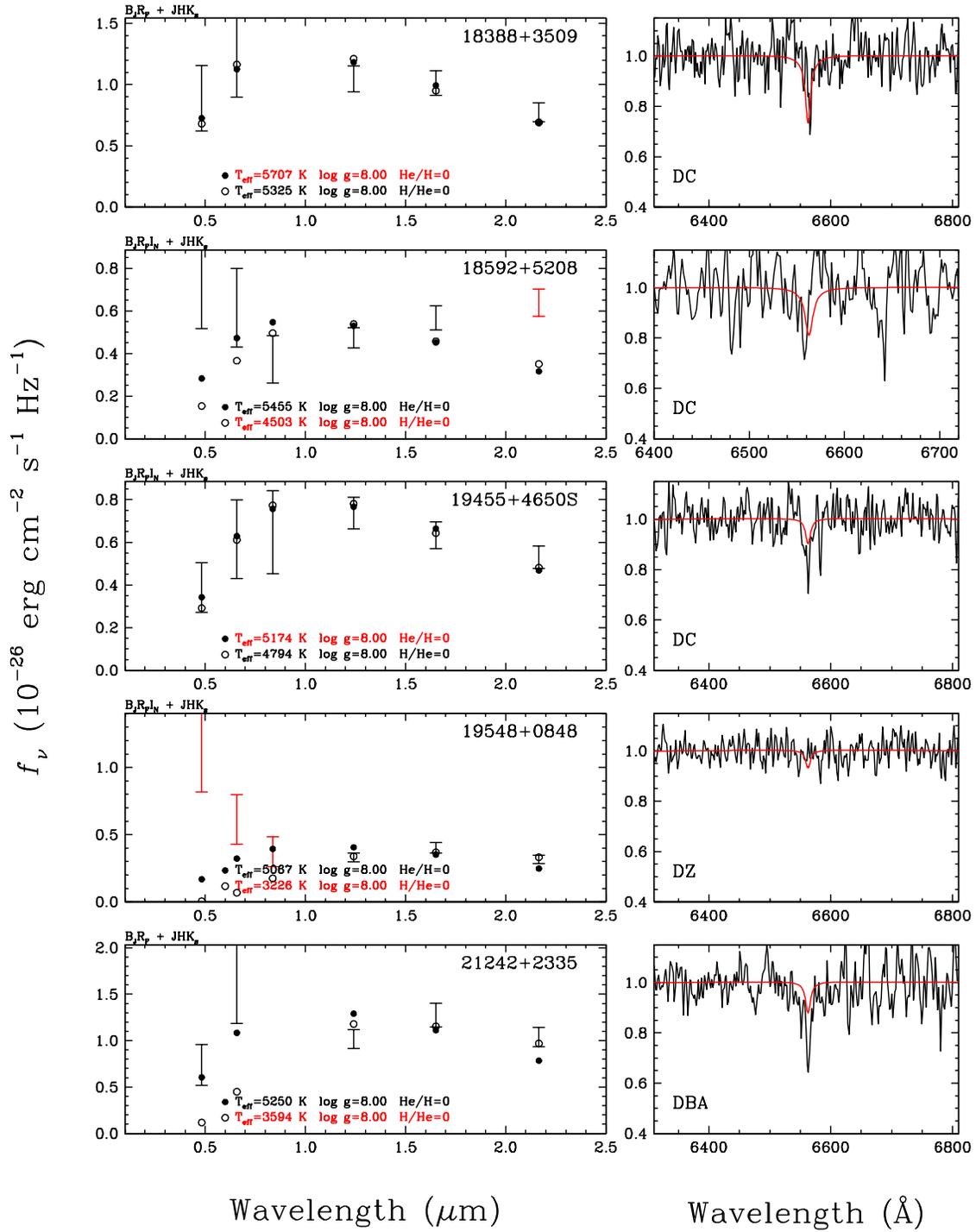
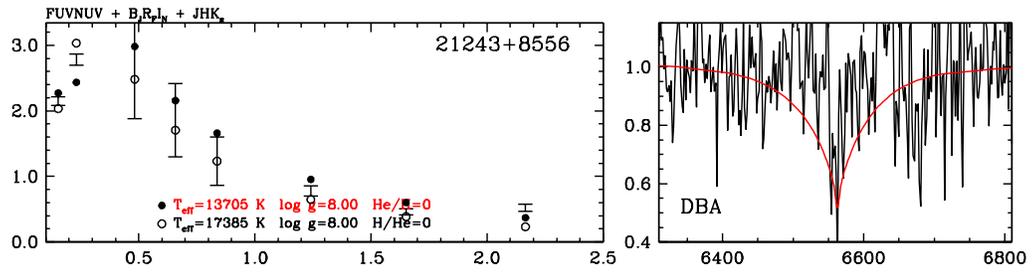


Figure 5.17 Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles naines blanches de type spectral différent de DA (suite).

f_ν (10^{-26} erg cm^{-2} s^{-1} Hz^{-1})



Wavelength (μm)

Wavelength (\AA)

Figure 5.17 Résultats de la méthode photométrique appliquée aux nouvelles naines blanches de type spectral différent de DA (suite).

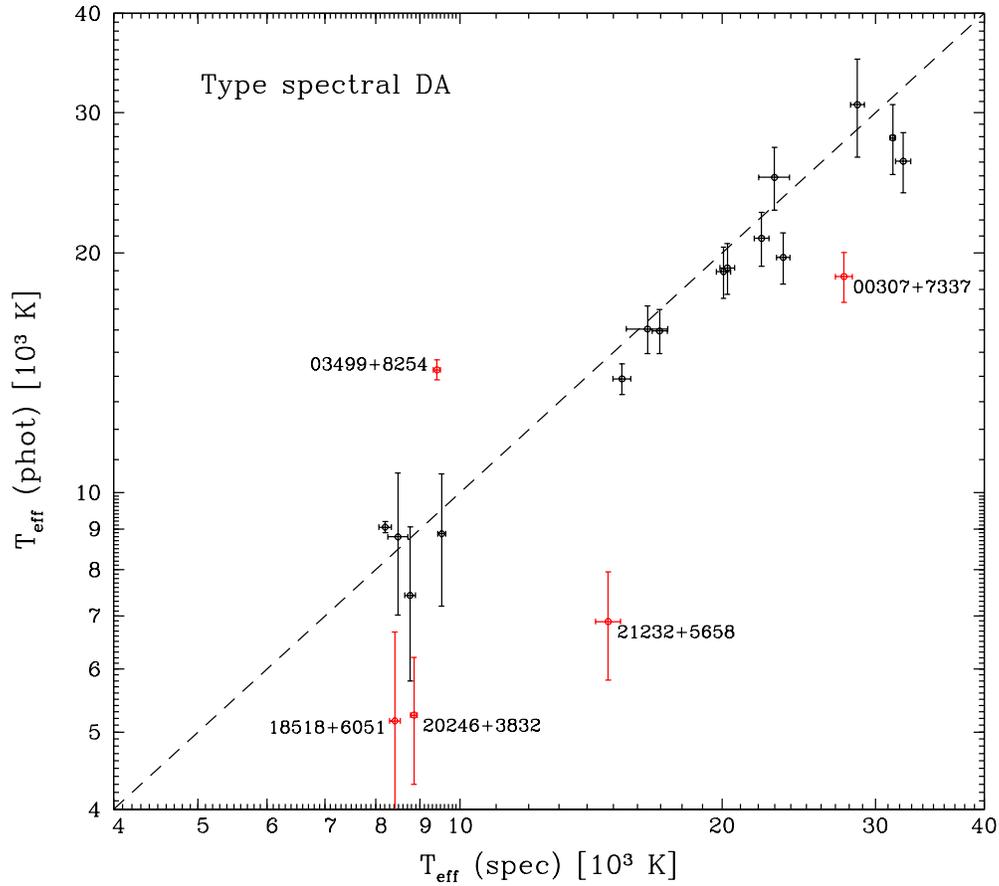


Figure 5.18 Comparaison entre les températures effectives photométriques et spectroscopiques pour les nouvelles DA. Les cercles rouges indiquent les objets dont la différence de température effective spectroscopique et photométrique est supérieure à $\sim 15\%$. La ligne pointillée représente la relation 1 : 1.

Table 5.II. Paramètres atmosphériques des naines blanches découvertes

PM I	ST	$T_{\text{eff}}(\text{spec})$ (K)	$T_{\text{eff}}(\text{phot})$ (K)	log g	M/M_{\odot}	M_V	M_{bol}	D (pc)	log τ
00232+4752	DA	20281 (391)	19145 (1412)	8.01 (0.06)	0.63	11.12	8.97	82.1 (11.3)	7.93
00307+7337	DA	27613 (627)	18676 (1343)	7.29 (0.10)	0.33	10.01	8.00	127.6 (17.2)	7.46
00338+1021	DC	-	12357 (353)	8.00 (0.25)	0.59	11.49	10.93	115.3 (7.6)	8.57
01299+3227	DA	16960 (341)	15955 (1019)	8.16 (0.07)	0.71	11.54	10.01	80.0 (10.1)	8.33
01300+2638	DA	15344 (357)	13890 (610)	8.21 (0.06)	0.74	11.87	10.70	54.8 (5.5)	8.53
01397+4245	DA	22203 (431)	20858 (1620)	7.98 (0.06)	0.61	10.83	8.55	127.6 (18.0)	7.73
02057+7324	DA	22975 (941)	24879 (2244)	8.04 (0.14)	0.66	10.18	7.86	159.7 (28.5)	7.40
02204+4101E	DQ	-	6891 (1276)	8.00 (0.25)	0.58	13.21	13.48	15.1 (3.5)	9.23
02274+1807W	DA	8506 (221)	8795 (1780)	8.60 (0.35)	0.98	13.34	13.34	22.9 (6.3)	9.40
02319+4457	DA	32309 (644)	26070 (2263)	7.85 (0.15)	0.56	10.03	7.36	160.3 (25.9)	7.17
02382+3840	DC	-	5243 (1250)	8.00 (0.25)	0.58	13.70	14.66	24.1 (12.3)	9.65
02389+4033	DQ	-	5603 (1288)	8.00 (0.25)	0.59	13.45	14.36	21.2 (8.0)	9.46
02439+0128	DC	-	6785 (1998)	8.00 (0.25)	0.58	12.40	13.55	23.2 (10.2)	9.25
02496+6647	DA	31416 (202)	27896 (2815)	7.90 (0.05)	0.59	9.90	7.14	110.9 (20.7)	7.07
03499+8254	DA	9490 (86)	14258 (412)	9.27 (0.09)	1.29	13.41	12.62	33.0 (2.8)	9.13
18023+1354	DA	8217 (131)	9047 (147)	8.27 (0.25)	0.77	13.33	12.67	45.7 (4.4)	9.07
18094+1825	DA	16428 (896)	16047 (1107)	8.00 (0.25)	0.62	11.62	9.74	101.1 (13.8)	8.20
18232+1706	DA	23514 (422)	19739 (1460)	8.36 (0.06)	0.85	11.28	9.41	59.0 (7.8)	8.20
18388+3509	DC	-	5707 (797)	8.00 (0.25)	0.59	14.01	14.28	26.4 (5.1)	9.42
18419+5338	DA	20079 (384)	18941 (1402)	8.03 (0.06)	0.64	11.02	9.06	67.0 (9.3)	7.97
18518+6051	DA	8437 (122)	5165 (1517)	8.00 (0.25)	0.58	13.40	14.73	35.8 (45.9)	9.69
18592+5208	DC	-	4503 (781)	8.00 (0.25)	0.57	14.35	15.34	28.0 (10.2)	9.85
19455+4650S	DC	-	5174 (636)	8.00 (0.25)	0.58	14.64	14.72	29.2 (6.2)	9.68
19548+0848	DZ	-	3226 (284)	8.00 (0.25)	0.57	14.76	16.79	20.5 (4.4)	10.00
19554+3734	DAH	8796 (123)	7424 (1626)	8.00 (0.25)	0.45	12.39	12.77	54.3 (18.4)	8.97
20246+3832	DA	8888 (81)	5252 (951)	8.00 (0.25)	0.43	14.04	14.30	36.5 (16.3)	9.36
21015+1511Ee	DA	28614 (520)	30699 (4309)	7.68 (0.10)	0.50	9.34	6.37	186.8 (49.0)	6.94
21134+7208	DA	9607 (100)	8876 (1676)	8.01 (0.12)	0.46	12.17	11.99	57.2 (15.4)	8.78
21232+5658	DA	14772 (484)	6883 (1070)	8.01 (0.09)	0.60	12.95	13.48	30.8 (7.0)	9.21
21242+2335	DBA	-	3594 (558)	8.00 (0.25)	0.57	15.43	16.32	13.6 (4.6)	9.96
21243+8556	DBA	-	13705 (237)	8.00 (0.25)	0.61	11.46	10.44	58.5 (2.4)	8.41

CHAPITRE 6

ÉTUDE DE LA POPULATION DE NAINES BLANCHES DANS LA CONTREPARTIE SDSS DU CATALOGUE DE MOUVEMENT PROPRE LSPM

Le calcul d'une fonction de luminosité est essentiel à la compréhension de l'histoire des différentes populations de naines blanches et permet d'évaluer la validité des modèles d'évolution utilisés dans la communauté scientifique. La figure 6.1 présentant les modèles de Fontaine et al. (2001), illustre la sensibilité de la partie froide de la fonction de luminosité à l'âge d'une population. Le calcul est cependant difficile à faire puisqu'il nécessite un échantillon non biaisé. Les travaux de Giammichele et al. (2012) et Limoges et al. (2015) ont tenté de recenser les naines blanches dans un volume fini afin d'y parvenir. D'autres comme Harris et al. (2006) se sont plutôt basés sur une méthode de pondération par l'inverse du volume maximum observable ($1/v_{\text{max}}$) en utilisant un échantillon complet en magnitude (voir 4.2). Cependant, ce dernier calcul a été fait en utilisant le catalogue de mouvement propre USNO-B1.0. Or, comme il a été montré dans le chapitre 2, le catalogue LSPM est beaucoup plus complet et contient moins de données erronées. Il devient donc pertinent de tenter une nouvelle analyse. De plus, Harris et al. (2006) utilisent les données provenant du troisième relevé du SDSS afin d'obtenir la photométrie *ugriz*, comparativement au septième relevé dans notre cas.

6.1 L'échantillon

Afin de mieux cerner les différents biais, nous nous concentrerons uniquement sur les objets du catalogue LSPM identifiés dans le septième relevé du SDSS. Ce choix nous assure la disponibilité de la photométrie *ugriz*, le système le plus adéquat pour la détermination des paramètres atmosphériques des naines blanches. En effet, en plus d'être bien situé sur le spectre électromagnétique, il est disponible pour un grand nombre d'objets et il est très précis. La figure 6.2 montre les régions du ciel sondées par le septième relevé du SDSS

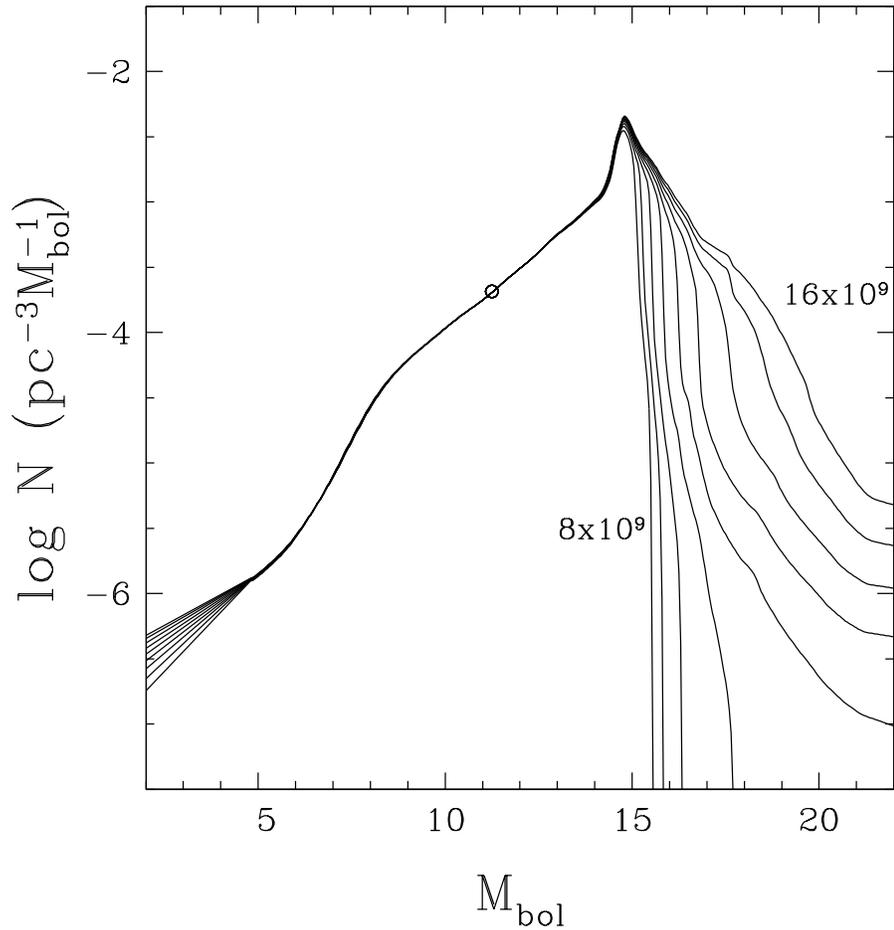


Figure 6.1 Sensibilité de la fonction de luminosité à l'âge d'une population de naines blanches pour un disque galactique. Les courbes théoriques décrites par Fontaine et al. (2001) vont de 8 à 16 milliards d'années par intervalles de un milliard d'années. Elles ont été normalisées par rapport au point représenté par un cercle vide. La figure, tirée de Fontaine et al. (2001), a été modifiée dans sa forme pour les besoins de cet ouvrage.

ainsi que les naines blanches candidates et confirmées qui seront utilisées dans notre étude. Celles-ci se situent généralement à des latitudes galactiques élevées à cause des objectifs propres au SDSS. Le critère de Limoges basé sur les diagrammes de mouvements propres réduits ($H_g, g - z$) ainsi que le critère additionnel en $V - J$ (voir section 5.1) sont ensuite appliqués afin de conserver uniquement les naines blanches potentielles et de diminuer la présence de contaminants. La détermination d'une fonction de luminosité nécessite de connaître la magnitude absolue (M_g) de chaque naine blanche, et donc, la distance. Celle-ci

est déterminée à l'aide de la méthode photométrique décrite à la section 3.2, en supposant $\log g = 8$. Afin de mieux restreindre l'échantillon, un critère additionnel sur le χ^2 doit être appliqué. Pour le début de l'analyse, tous les systèmes photométriques disponibles sont utilisés, permettant ainsi une vision plus large de la distribution d'énergie. Un premier critère sur le χ^2 est appliqué afin d'éliminer les résultats médiocres ainsi que les systèmes binaires non résolus pouvant mener à une sous-estimation de la température photométrique. Notre choix de critère s'est arrêté à $\chi_{\max}^2 = 50$ et sera raffiné subséquemment. Des naines blanches de type DA + dM seront donc volontairement exclues de l'analyse.

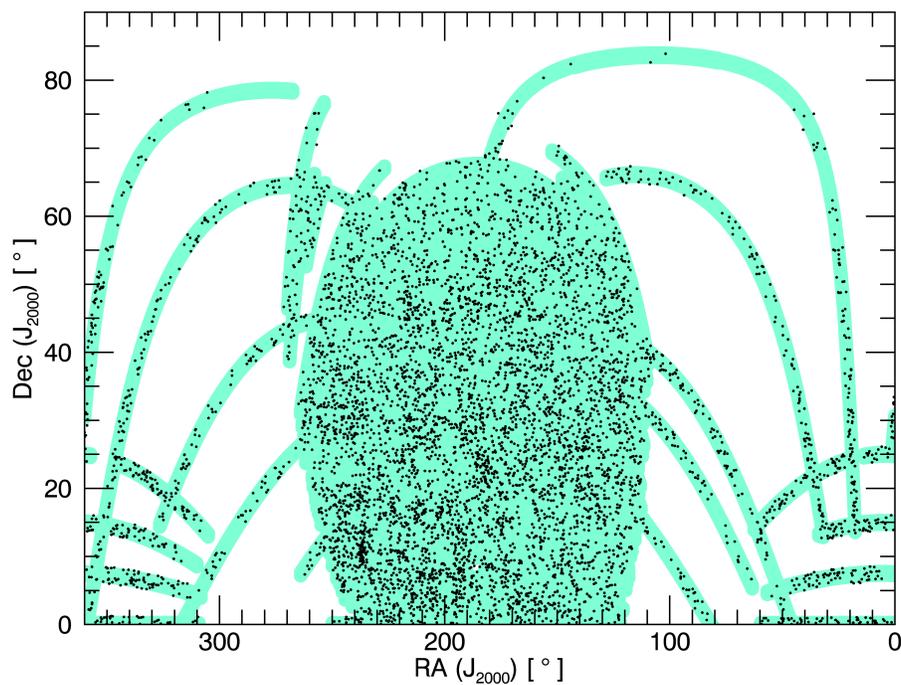


Figure 6.2 Distribution spatiale du 7e relevé du SDSS dans l'hémisphère nord. Les régions colorées représentent la superficie couverte alors que les points montrent la position des candidates naines blanches sélectionnées pour l'analyse.

6.2 Méthode $1/v_{max}$

La figure 6.3 montre le résultat brut du calcul de la fonction de luminosité comparé à celui obtenu de Harris et al. (2006), les deux étant obtenues en pondérant par l'inverse du volume. On remarque un désaccord entre les 2 résultats, principalement aux extrémités. En effet, à des magnitudes élevées, notre résultat se situe en-dessous de celui de Harris et al. (2006) alors qu'il est fortement au-dessus pour de faibles magnitudes. De plus, la fonction que nous avons obtenue se rend à des températures très élevées ($> 30,000$ K) qui ne sont pas nécessairement fiables. En effet, la photométrie disponible ne se rend pas assez loin dans l'ultraviolet pour pouvoir cibler le pic de la distribution d'énergie, nous amenant ainsi dans l'approximation de Rayleigh-Jeans. Nous étudierons les effets pouvant améliorer l'accord entre les 2 résultats dans les lignes qui suivront.

6.3 Effet du $\log g$

La supposition de $\log g = 8$ est nécessaire afin de déterminer une distance pour chacun des objets de notre échantillon. Afin d'évaluer son effet sur le calcul de la fonction de luminosité, nous avons dû associer les objets du catalogue LSPM aux naines blanches identifiées spectroscopiquement par Kleinman et al. (2013). Toutes les naines blanches disponibles ont été traitées par la technique spectroscopique (décrite dans la section 3.3) permettant ainsi de déterminer le $\log g$ de manière précise, contrairement à la méthode photométrique. À des fins de simplicité et à cause de l'importance de l'échantillon (2332 objets), les naines blanches ont toutes été considérées de type spectral DA, c'est-à-dire avec une atmosphère présentant des traces d'hydrogène, englobant la majorité des naines blanches (Limoges et al., 2015). Les autres types ont été rejetés durant la procédure de détermination des paramètres atmosphériques, excepté les types DA+dM, i.e. les systèmes binaires non résolus composés d'une DA et d'un compagnon stellaire de type spectral M. Ces derniers présentent un spectre dont uniquement les raies plus rouges sont polluées par le compagnon, et donc peuvent être traitées spectroscopiquement en excluant les dites raies. De plus, la température photométrique est utilisée comme valeur initiale dans le processus

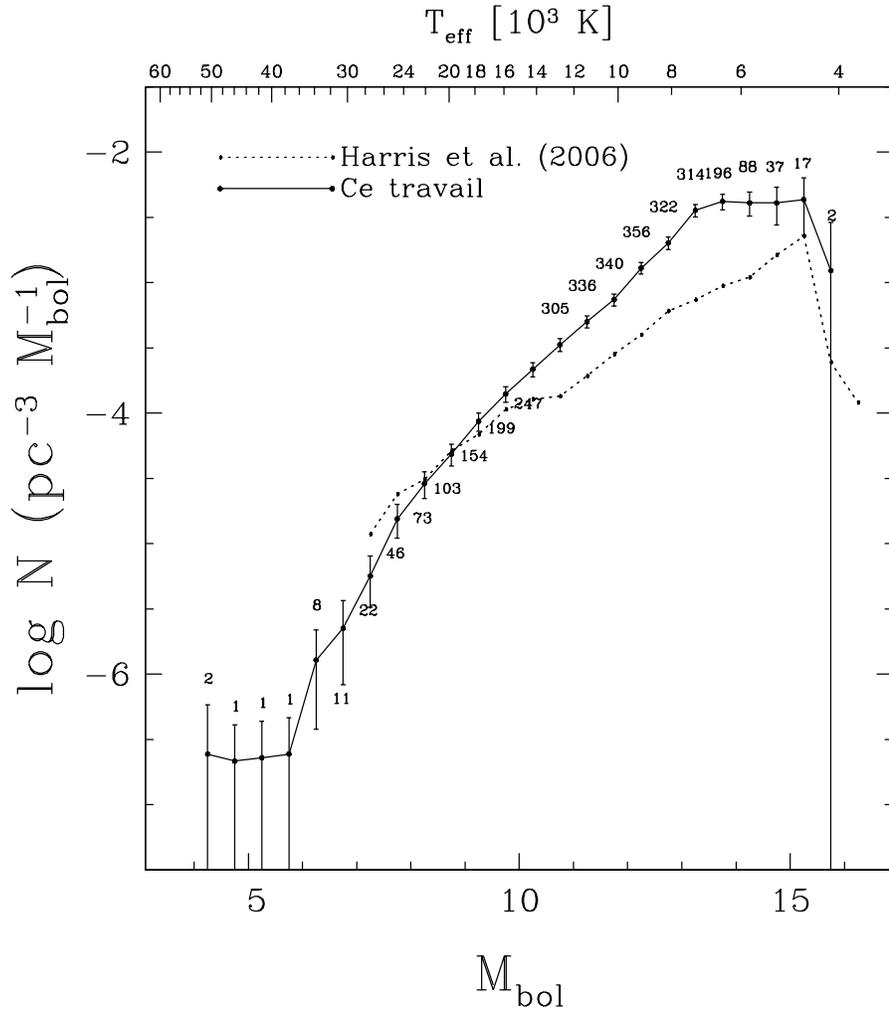


Figure 6.3 Fonction de luminosité calculée à l’aide de la méthode $1/v_{\max}$. La courbe en pointillé représente le résultat de Harris et al. (2006) alors que la ligne continue représente notre résultat brut. Une échelle de température correspondant aux magnitudes bolométriques a été ajoutée en considérant une masse de $0.6 M_{\odot}$. Les quantités rattachées aux points indiquent le nombre d’objets utilisés pour chaque intervalle de magnitude bolométrique.

de minimisation du χ^2 afin d’éviter le problème dû au choix de solution chaude ou froide, de part et d’autre du maximum de la force des raies de Balmer (voir section 3.3). Un critère sur l’erreur du $\log g$ est aussi appliqué afin de conserver uniquement les valeurs fiables. La figure 6.4 montre la comparaison entre les températures effectives déterminées à l’aide des deux différentes méthodes. Le désaccord à de faibles températures est attribuable au types spectraux DA+dM dont l’excès dans l’infrarouge engendre une température photométrique

trop froide. La sous-évaluation systématique à des températures effectives plus élevées est due au rougissement par le milieu interstellaire. Seules les naines blanches les plus chaudes seront affectées à cause du biais observationnel du SDSS. En effet, elles doivent être assez lumineuses pour être détectées à des distances où l’extinction est importante et elles risquent de saturer à moins de 80 pc. Le problème dû aux compagnons non-résolus peut facilement être réglé en appliquant un critère sur le χ^2 à la méthode photométrique. Une valeur de χ_{\max}^2 de 50 est choisie de manière à conserver le plus grand nombre de naines blanches tout en éliminant les cas pathologiques.

Pour corriger l’erreur systématique causée par l’extinction du milieu interstellaire, le procédé décrit par Tremblay et al. (2011) est utilisé en se basant sur la paramétrisation de Harris et al. (2006). Le tout consiste à modifier la méthode photométrique de manière à ce qu’après avoir déterminé la distance photométrique, une correction pour le rougissement est appliquée en se basant sur les valeurs d’extinction maximale fournies par le SDSS calculées selon Schlegel et al. (1998). Une fois la photométrie corrigée, les paramètres atmosphériques sont recalculés et on réitère jusqu’à convergence de la solution. Cependant, n’ayant de disponible que les corrections pour la photométrie *ugriz*, seulement celle-ci sera utilisée dans le processus. Les résultats obtenus seront plus précis, aux dépens de la vision large du spectre électromagnétique. Cependant, les étapes précédentes ont déjà permis d’exclure la majorité des cas pathologiques (systèmes binaires ou faux positif). Ce gain en précision se reflète sur la distribution du χ^2 comme le montre la figure 6.5 permettant de raffiner un de nos critères. Un χ_{\max}^2 de 4 sera choisi en se basant sur l’analyse de la méthode photométrique appliquée au système *ugriz* faite par Genest-Beaulieu (2014). Ainsi $\sim 67\%$ des objets sont conservés.

La figure 6.6 montre la comparaison entre les températures photométriques corrigées et spectroscopiques. Seulement les objets dont le χ^2 photométrique est inférieur à 50 (ancien critère) sont montrés ici. On peut voir que les températures photométriques élevées ne sont plus systématiquement sous-évaluées. La dispersion demeure cependant grande pour de hautes températures. On peut remarquer que le nouveau critère sur le χ^2 permet de retirer une grande partie des cas en désaccord.

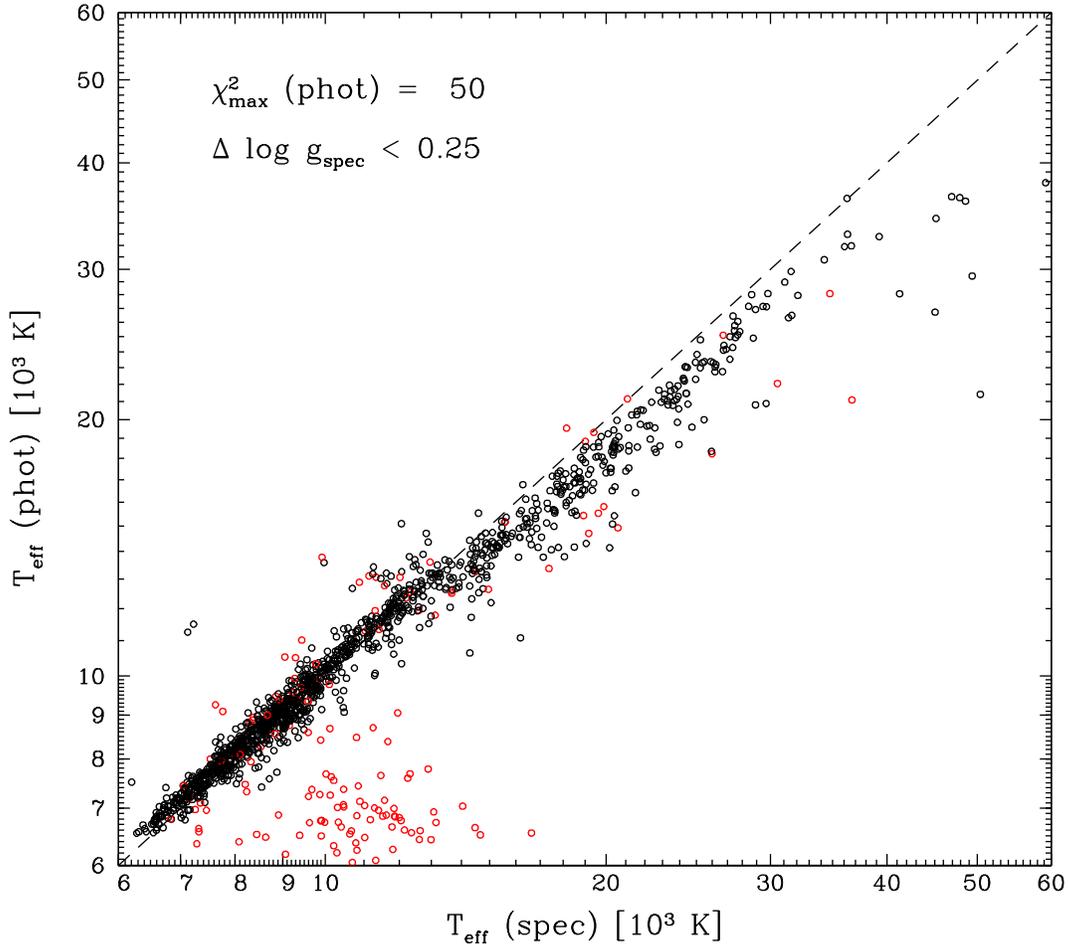


Figure 6.4 Comparaison entre les température effective déterminées à l’aide des méthodes photométrique et spectroscopique pour les naines blanches identifiées spectroscopiquement par Kleinman et al. (2013) se retrouvant dans le catalogue SUPERBLINK. Les cercles rouges représentent les objets dont le χ^2 est supérieur à 50. La ligne pointillée représente la relation 1 : 1. Les objets dont la détermination du $\log g$ spectroscopique présentait une erreur supérieure à 0.25 ont été retirés.

En considérant ces corrections, il devient possible de déterminer l’effet de la supposition $\log g = 8$ dans le calcul de la fonction de luminosité. La figure 6.7 présente la comparaison entre la fonction de luminosité déterminée en considérant le $\log g$ spectroscopique et en considérant $\log g = 8$. Les deux résultats sont très similaires. Une petite différence apparaît à l’extrémité froide des fonctions de luminosité, mais à moins de un sigma. L’extrémité chaude ($> 40,000$ K) montre un comportement erratique attribuable au déplacement du pic de la distribution d’énergie limitant le système *ugriz* à la queue

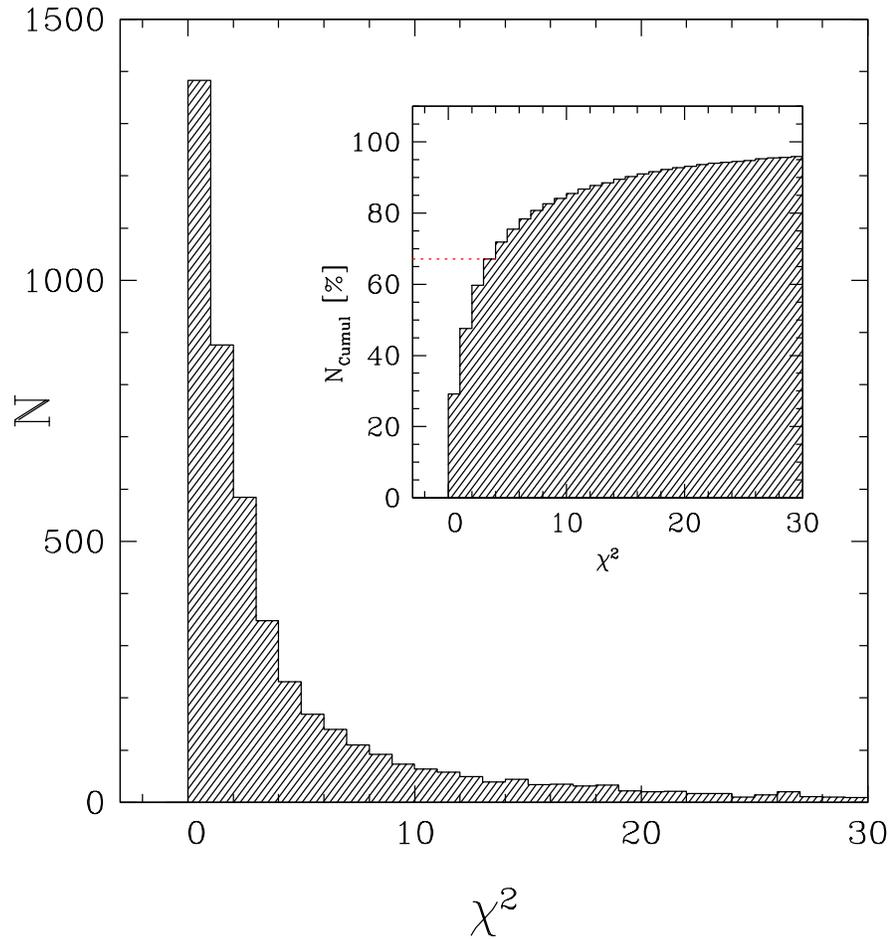


Figure 6.5 Histogramme et distribution cumulatives des valeurs de χ^2 obtenues lors de l'analyse des données photométriques des objets de notre échantillon selon la méthode décrite dans la section 3.2. La ligne pointillée rouge représente le critère sur le χ^2 appliqué sur l'échantillon.

de la distribution. On tombe donc dans l'approximation de Rayleigh-Jeans. D'ailleurs, ces objets seront dorénavant exclus de notre analyse. Il faut noter cependant que ces fonctions sont utiles uniquement à des fins de comparaison et ne sont pas significatives physiquement. D'ailleurs, elles ne s'étendent pas à de faibles luminosités puisqu'il n'est plus possible de déterminer le $\log g$ en-dessous de 5000 K, l'intensité des raies d'hydrogène étant trop faible. On ne peut donc qu'extrapoler nos conclusions pour des luminosités inférieures à $15 M_{\text{bol}}$. Heureusement, la majeure partie de la fonction de luminosité ainsi que son sommet se situent en-dessous de cette frontière.

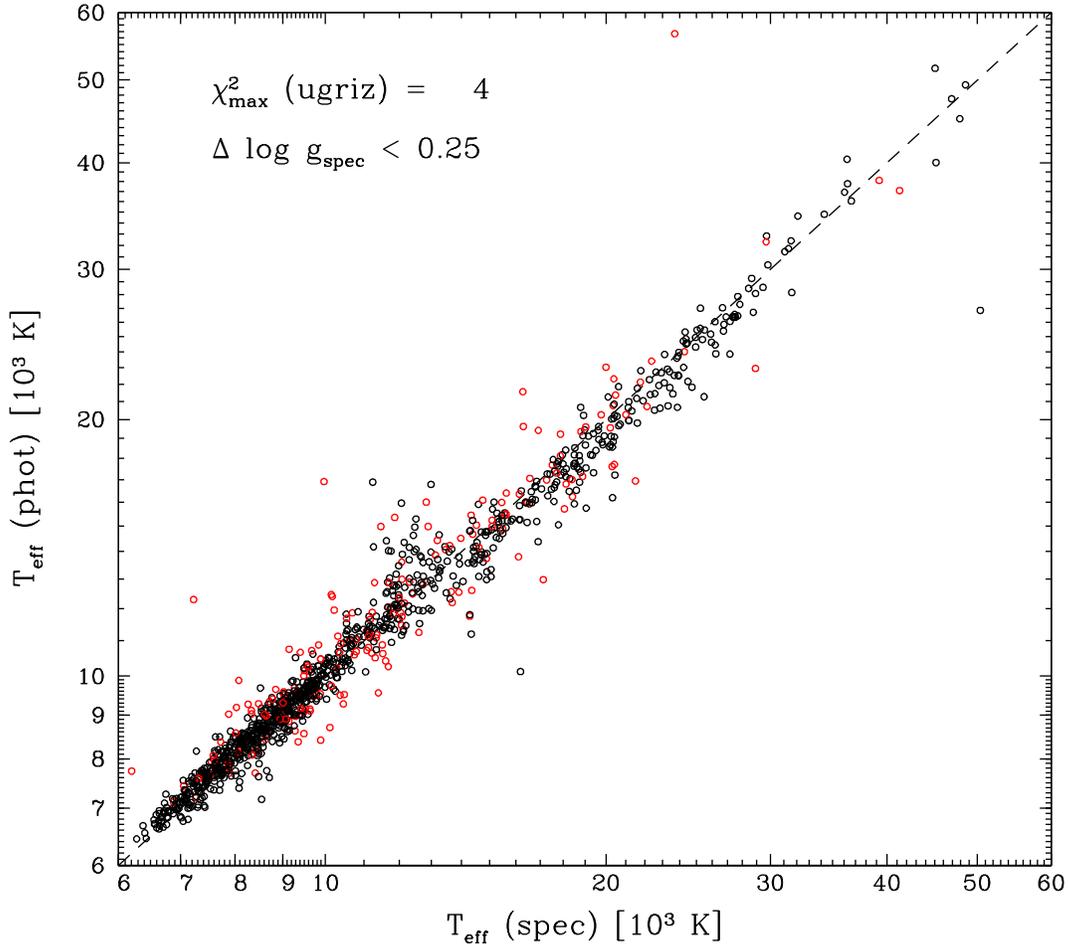


Figure 6.6 Identique à la figure 6.6, mais en choisissant les objets tels que $\chi^2 < 50$ (en utilisant toutes la photométrie disponible) et en répétant l’analyse en utilisant uniquement le système *ugriz* corrigé pour le rougissement. Les objets en rouges ont un $\chi_{ugriz}^2 > 4$

6.4 Effet du rougissement

L’utilisation des données spectroscopiques ont permis de mettre en lumière l’effet du rougissement sur la détermination des températures photométriques élevées. On peut donc s’attendre à ce que ceci ait une répercussion pour les petites valeurs de M_{bol} . La figure 6.8 montre la différence dans les résultats lorsqu’on tient compte de l’extinction. Comme attendu, la partie froide est peu influencée (un peu diminuée à cause du critère plus sélectif sur le χ^2) alors que l’allure de la fonction de luminosité à $M_{\text{bol}} < 11.5$ présente des différences notables. En effet, non seulement la correction rehausse la fonction, mais elle

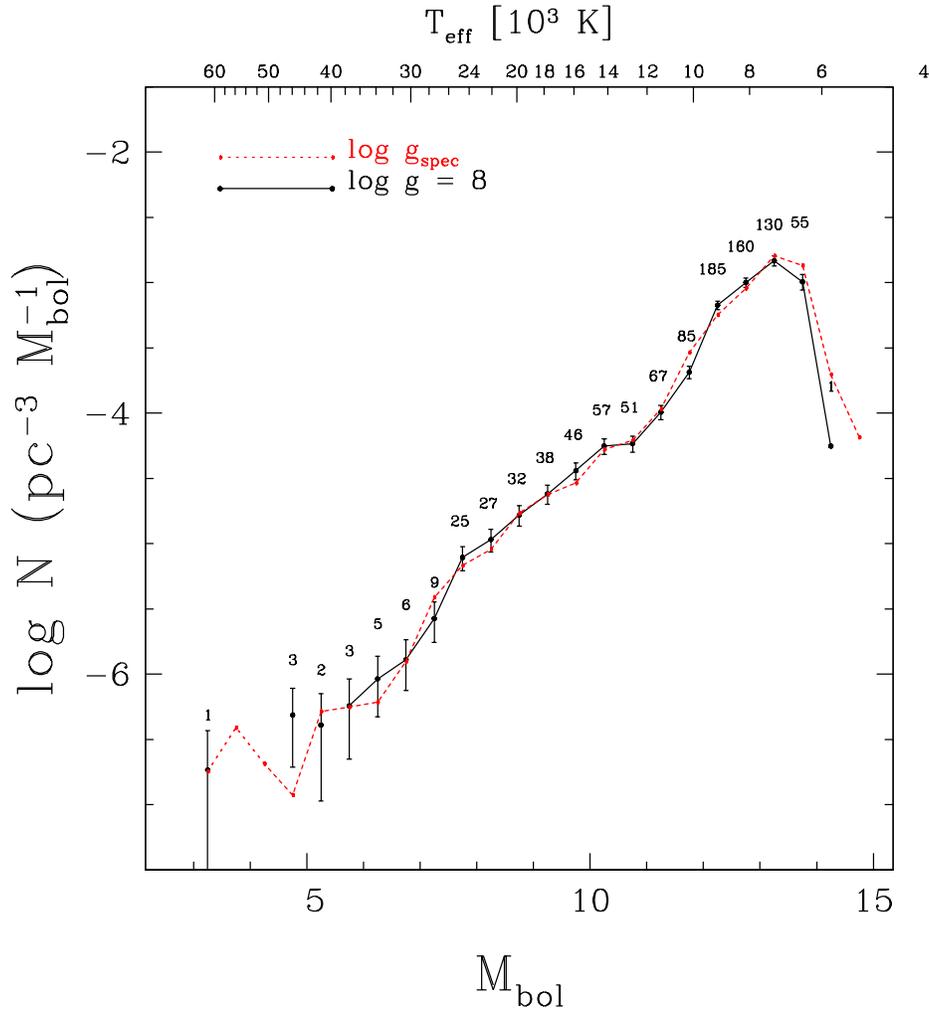


Figure 6.7 Effet de la supposition de $\log g = 8$ sur le calcul de la fonction de luminosité. Seulement les objets dont $\chi^2 < 4$ ont été pris en compte. La correction pour le rougissement est appliquée.

fait aussi apparaître une bosse à $M_{\text{bol}} = 10.5$, présente dans plusieurs autres travaux.

6.5 Évolution en distance de la distribution des magnitudes absolues

L'excès marqué dans la partie froide de la fonction de luminosité ne pouvant être expliqué ni par la supposition de $\log g = 8$, la magnitude ou le rougissement laisse entrevoir la présence d'autres biais. La figure 6.9 présente l'évolution de la moyenne et des extrémums des distributions en magnitudes absolues dans chaque intervalle de 10 pc. On

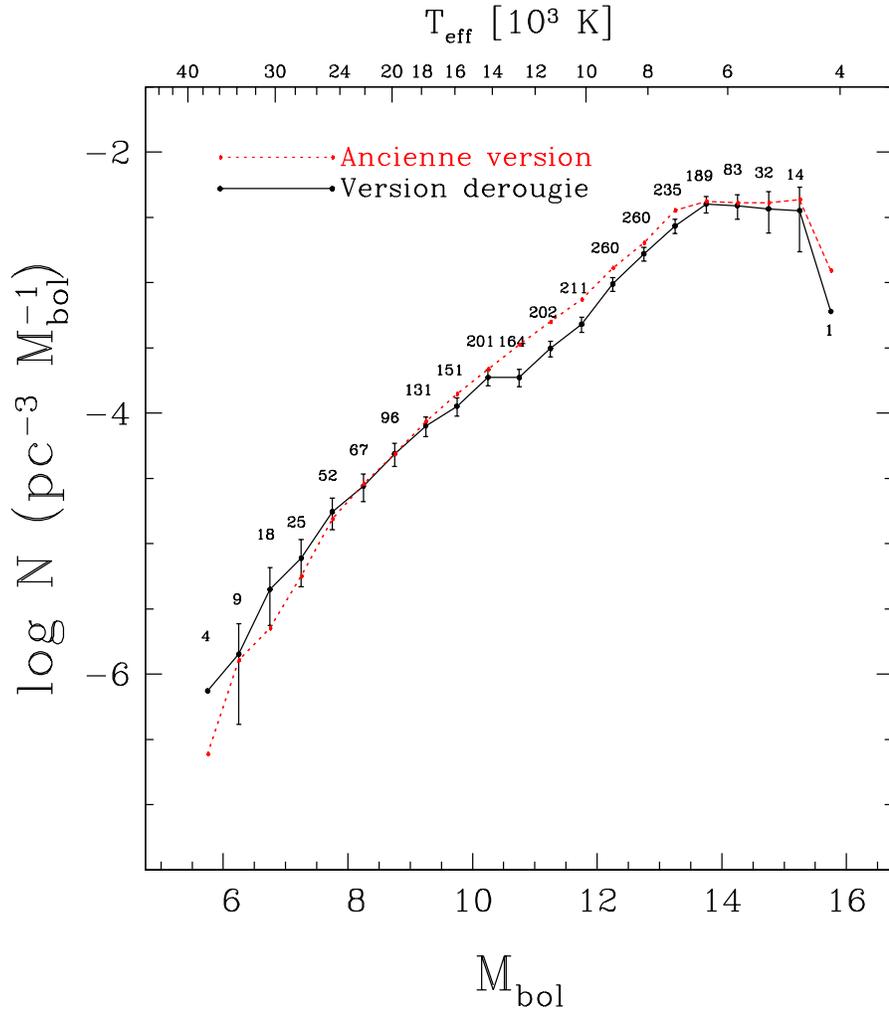


Figure 6.8 La figure 6.3 est reportée ici pour la fonction de luminosité brute et celle corrigée pour le rougissement.

peut facilement remarquer l'effet de la sensibilité de l'échantillon à la magnitude g (zone rouge), déjà connu et corrigé grâce à la méthode $1/v_{\max}$. On peut aussi distinguer une coupure affectant les luminosités élevées à des distances inférieures à 80 pc. C'est l'effet de la saturation du filtre g du SDSS, évalué à $g < 14$ par York et al. (2000), illustré par la zone bleue. Tous les objets en dessous de cette limite ont été volontairement exclus de l'échantillon. On peut donc s'attendre à ce que le nombre de naines blanches plus lumineuses soit légèrement sous-évalué puisque cet effet n'est pas compensé dans le calcul de la fonction de luminosité. Il est aussi intéressant de noter qu'on ne peut avoir un échantillon

complet de naines blanches en magnitude en utilisant le système *ugriz* puisqu'au moment où la coupure $g < 14$ cesse d'être effective (à ~ 80 pc), les étoiles de faibles luminosités ne sont plus assez brillantes. Finalement, le comportement erratique des distributions à des distances supérieures à 270 pc laisse croire que d'autres biais entrent en compte. Une explication possible est la coupure en mouvement propre du catalogue LSPM ($\mu > 40$ mas \cdot année $^{-1}$).

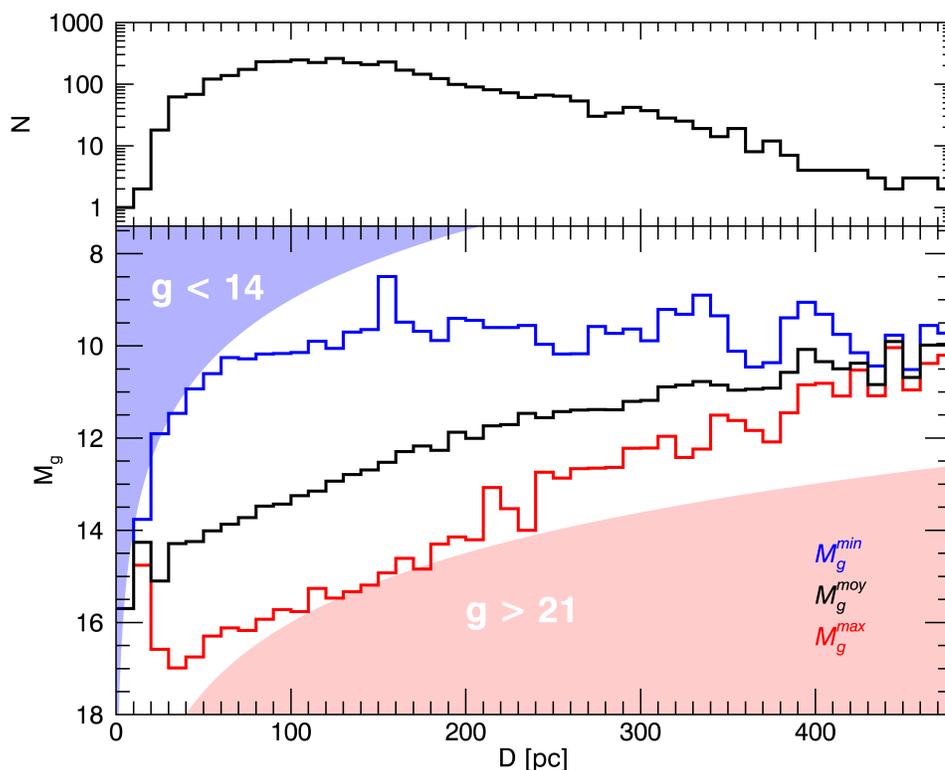


Figure 6.9 Dans la fenêtre du bas : évolution des paramètres des distributions de M_g pour des populations de naines blanches potentielles selon la distance, à intervalles de 10 pc. Le volume est donc donné par une coquille de 10 pc d'épaisseur et dont le rayon intérieur croît par bonds de 10 pc. Dans la fenêtre du haut : histogramme du nombre d'objets par tranches de 10 pc.

6.6 Effet de la coupure en mouvement propre

La figure 6.10 montre 3 distributions de vitesses tangentielles pour des intervalles de distances donnés. On peut voir qu'à de courtes distances (fenêtre à gauche), la coupure en

mouvement propre n'affecte pas la distribution des naines blanches candidates, culminant à $40 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Jusqu'à 180 pc (centre), la coupure affecte le maximum de la distribution, mais le nombre d'objets demeure important grâce au très grand volume. Par contre, à 260 pc, l'ampleur du volume ne peut plus compenser la coupure en mouvement propre et l'échantillon devient petit. C'est pourquoi les paramètres de la distribution en M_g ont un comportement aussi erratique.

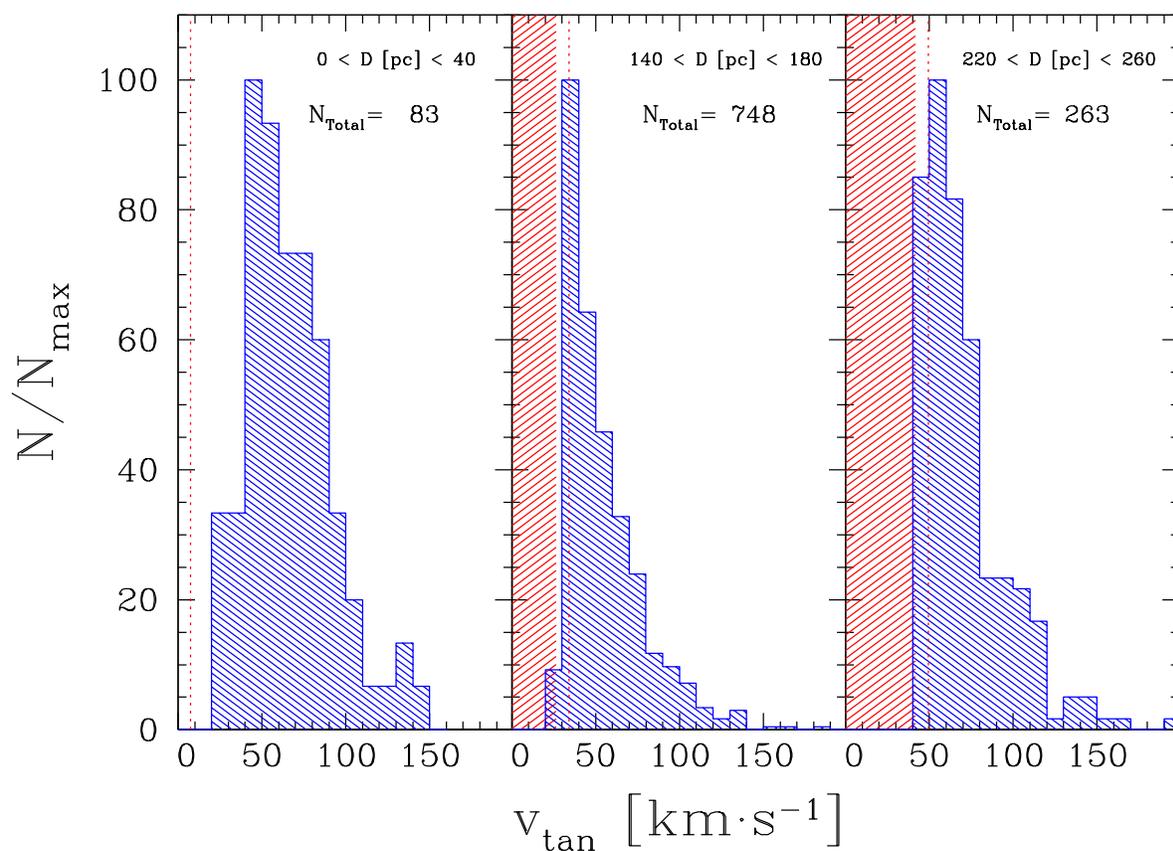


Figure 6.10 Histogrammes des vitesses tangentielles pour 3 échantillons de présumées naines blanches dans des volumes à 3 distances différentes. La zone hachurée en rouge représente la coupure due à la borne de distance inférieure ($v_{\text{tan}} > 4.74 \cdot D \cdot 40 \text{ mas} \cdot \text{année}^{-1}$) alors que la ligne rouge pointillée représente la coupure associée à la borne supérieure.

Bien que la vitesse tangentielle des candidates naines blanches ne soit pas liée à leur luminosité, celle-ci occasionne un biais lors du calcul en utilisant la méthode $1/v_{\text{max}}$. En effet, les étoiles ayant des magnitudes élevées ont très peu de poids dans le calcul

puisqu'elles sont visibles dans un très grand volume et donc, en très grand nombre. Or, c'est à ces grands volumes que la coupure en vitesse tangentielle entrera en compte. Il y aura ainsi une sous-estimation croissante selon la luminosité. Comme il a été mentionné à la section 4.2, pour que l'échantillon ne soit pas biaisé, la distribution des rapports v/v_{\max} doit être uniforme. Le test employé pour vérifier cette condition consiste simplement à prendre la moyenne de ceux-ci et de vérifier qu'elle est bien égale à 0.5. Or, ceci ne suffit pas. D'ailleurs, en étalant la distribution selon la vitesse tangentielle et la magnitude bolométrique, les biais statistiques deviennent évidents ; la figure 6.11 l'illustre bien. On peut y voir un effet apparaître abruptement vers $M_{\text{bol}} \sim 12.5$, abaissant la valeur de v/v_{\max} pour des magnitudes plus élevées. Notons ici que des valeurs bien en-dessous de 0.5 signifient que les objets se retrouvent globalement à des distances beaucoup trop petites par rapport au volume observable. C'est donc dire que dans la situation présente, un effet étranger à la magnitude agit sur les objets éloignés. La fenêtre de droite vient supporter l'idée que cet effet est expliqué par la coupure en vitesse tangentielle. En effet, on remarque que plus la vitesse est faible, plus les objets éloignés sont sous-représentés. En particulier, pour la vitesse de $40 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ sus-mentionnée alentour de laquelle la plupart des naines blanches devraient se situer, $\langle v/v_{\max} \rangle \simeq 35\%$.

La figure 6.12 illustre l'impact sur la fonction de luminosité de l'application de coupures en vitesses tangentielles à $40 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ et à $60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. On remarque que la partie chaude de la fonction prend de l'ampleur alors qu'un pic semble se dessiner pour M_{bol} entre 15 et 15.5 mag. Il est important de noter que cette figure donne une idée de l'effet sur la fonction de luminosité et non l'effet exact. Il serait possible d'éliminer pratiquement tout l'effet dû à la coupure en mouvement propre en sélectionnant une vitesse tangentielle minimale assez élevée. Cependant, l'échantillon deviendrait alors trop petit pour demeurer significatif.

Les travaux de Rowell & Hambly (2011), poursuivis par Lam et al. (2015), ont proposé une modification du calcul de la fonction de luminosité en tenant compte de la coupure en mouvement propre. La technique consiste à modifier le calcul du volume maximum pour un volume effectif donné par :

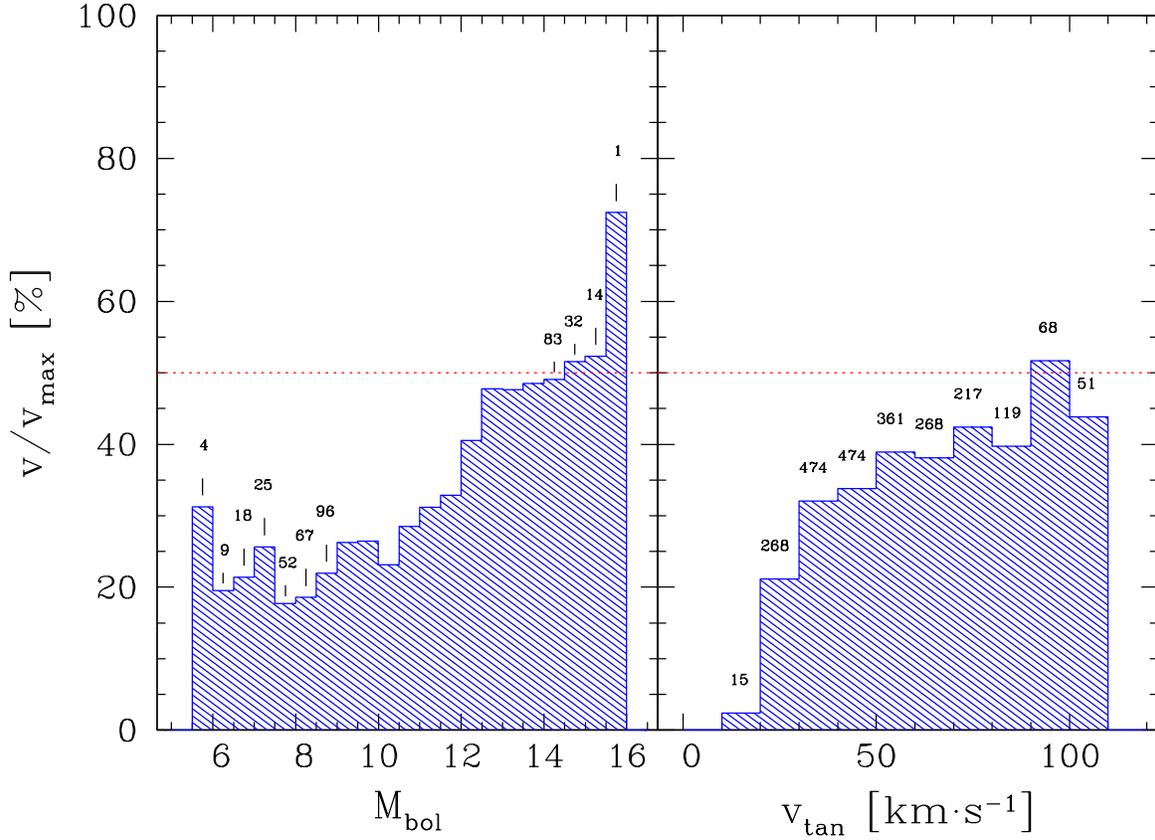


Figure 6.11 Distribution des moyennes des rapports v/v_{max} selon M_{bol} et v_{tan} avec des intervalles respectifs de 0.5 mag et de 10 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. La ligne rouge pointillée indique la valeur nécessaire à une distribution uniforme. Le nombre d'objets utilisés pour calculer les moyennes est inscrit au-dessus de chacune d'elles dans la fenêtre de droite. Dans le but d'alléger celle de gauche, seulement les nombres inférieurs à 100 ont été indiqués.

$$V_{\text{eff}} = \int_0^{d_{\text{max}}} e^{-z/z_0} 4\pi r^2 \left[\int_{a(r)}^{b(r)} P(v_{\text{tan}}) dv_{\text{tan}} \right] dr \quad (6.1)$$

où $P(v_{\text{tan}})$ est la distribution en vitesse tangentielle, et les bornes de l'intégrale sont données par :

$$a(r) = \max(v_{\text{min}}, 4.74 \mu_{\text{min}} r) \quad (6.2)$$

$$b(r) = \min(v_{\text{max}}, 4.74 \mu_{\text{max}} r) \quad (6.3)$$

v_{min} et v_{max} sont des limites étant fixées à une valeur choisie et μ_{min} et μ_{max} sont les

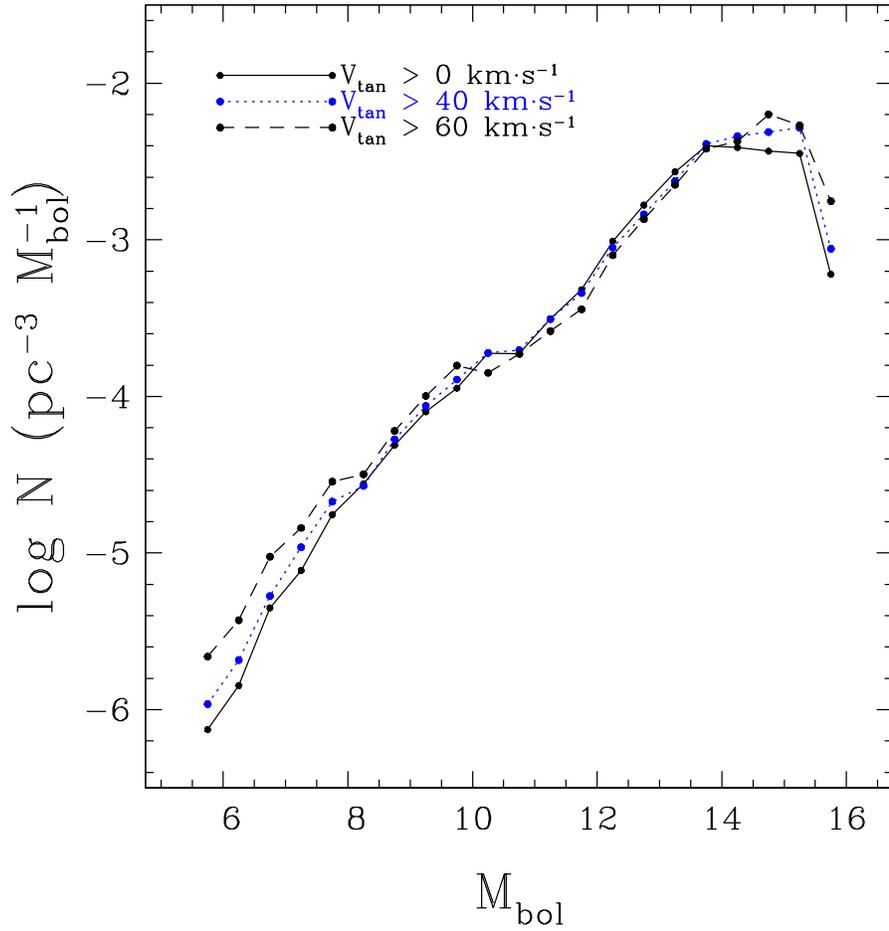


Figure 6.12 Effet des coupures en vitesse tangentielle sur la fonction de luminosité. L'effet du rougissement a été pris en compte dans le calcul ainsi que tous les critères établis précédemment. Les fonctions sont normalisées par rapport au nombre total d'objets pour le cas sans coupure (3006).

limites propres à l'échantillon utilisé. Dans notre cas, on a $\mu_{\min} = 40 \text{ mas} \cdot \text{année}^{-1}$ et $\mu_{\max} \rightarrow \infty$.

Ces corrections nécessitent de déterminer la fonction de distribution en v_{tan} ce qui n'a pas pu être fait dans le cadre de cette étude.

CHAPITRE 7

CONCLUSION

Les travaux présentés ici avaient pour but d'étudier la population de naines blanches se retrouvant dans le septième relevé du SDSS et ayant été identifiées par le catalogue de mouvements propres LSPM. Ceci est présenté dans le chapitre 6. L'identification de ces populations nécessite la détermination de critères de sélection efficaces et de bien les comprendre. C'est la principale raison d'être de la première partie du projet, présentée au chapitre 5. Celle-ci consiste à réutiliser les critères de sélection basés sur les diagrammes de mouvements propres réduits déjà établis par Limoges et al. (2013) en apportant quelques modifications. La méthode pour déterminer la distance a aussi du être modifiée. Le projet de relever les naines blanches à l'intérieur d'une distance de 40 pc du Soleil a aussi été relancé en y apportant ces modifications.

Plus précisément, le critère basé sur le système USNO-B1.0 a été modifié afin de réduire le nombre de contaminants pour les objets dont aucun autre système photométrique n'est disponible. Ensuite, au lieu de baser le calcul de la distance uniquement sur la magnitude V , celui-ci a été modifié pour tenir compte de l'ensemble des données photométriques disponibles pour un objet. Concrètement, une approche de moindres carrés non-linéaire est utilisée afin de comparer les flux observés aux flux théoriques, chacun moyenné selon les bandes passantes des magnitudes respectives. Cette méthode améliorée mènera à l'identification de 31 nouvelles naines blanches à l'aide du spectromètre de l'Observatoire du Mont-Mégantic, dont 20 DA, 2 DBA, une DA+dM et au moins une DQ. Cinq, potentiellement six, DC ont aussi été identifiées. Le taux de contamination se situe en-dessous de 29% si on ne considère pas les spectres trop bruyants pour être analysable. De ces 31 naines blanches, 11 se situent à l'intérieur de 40 pc. La plupart de leurs magnitudes bolométriques respectives se situent d'ailleurs dans la partie froide de la fonction de luminosité, très sensible à l'âge et à certains effets comme le mélange convectif (voir 4). Une liste de 340 candidates a aussi été dressée pour les observations futures. L'analyse des résultats du

recensement fait par Limoges et al. (2015) a aussi permis de confirmer le faible taux de contamination dû au critère de sélection basé sur le système photométrique *ugriz*. C'est ce qui a poussé à l'élaboration de la seconde partie du projet.

Le critère de sélection basé sur la photométrie *ugriz* permet de sélectionner 6519 naines blanches potentielles. L'application d'une limite sur la valeur du χ^2 de 50 permettra de retrancher les objets dont les données photométriques se comparent très mal aux modèles. Une première fonction de luminosité est obtenue à l'aide de la méthode $1/v_{\max}$ décrite à la section 4.2. Cependant, un fort excès apparaît dans la partie froide de la fonction ($M_{\text{bol}} > 10$). Les différents facteurs pouvant influencer le résultat sont étudiés. Premièrement, le $\log g$ ne semble pas avoir d'effet notable sur la fonction de luminosité. La comparaison est faite en utilisant les spectres des naines blanches identifiées dans le DR7 par Kleinman et al. (2013). Le $\log g$ est ensuite déterminé à l'aide de la méthode spectroscopique (section 3.3). Ensuite, le rougissement tend à améliorer l'accord pour la partie chaude ($M_{\text{bol}} < 11$) en formant une bosse aux alentours de 10 mag, mais ne suffit pas. Finalement, le facteur le plus susceptible de causer cet excès est la coupure en mouvement propre dû au catalogue LSPM. Celui-ci apparaît aux magnitudes correspondantes à celles où il y a surestimation. L'application de coupures en vitesse tangentielle tend à corriger la fonction, mais une nouvelle pondération basée sur la distribution en vitesse tangentielle est nécessaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., et al. 2009, ApJS, 182, 543
- Bergeron, P., Ruiz, M. T., & Leggett, S. K. 1997, ApJS, 108, 339
- Bergeron, P., Saffer, R. A., & Liebert, J. 1992, ApJ, 394, 228
- Bergeron, P., Wesemael, F., Lamontagne, R., et al. 1995, ApJ, 449, 258
- Bergeron, P., Wesemael, F., Dufour, P., et al. 2011, ApJ, 737, 28
- Bohlin, R. C., & Gilliland, R. L. 2004, AJ, 127, 3508
- Boyle, B. J. 1989, MNRAS, 240, 533
- Cohen, M., Wheaton, W. A., & Megeath, S. T. 2003, AJ, 126, 1090
- Cutri, R. M., Skrutskie, M. F., van Dyk, S., et al. 2003, VizieR Online Data Catalog, 2246
- Doi, M., Tanaka, M., Fukugita, M., et al. 2010, AJ, 139, 1628
- Eisenstein, D. J., Liebert, J., Harris, H. C., et al. 2006, ApJS, 167, 40
- Fontaine, G., Brassard, P., & Bergeron, P. 2001, PASP, 113, 409
- Genest-Beaulieu, C. 2014, Mémoire, Faculté des arts et des sciences, Université de Montréal, Montréal, Canada
- Giammichele, N., Bergeron, P., & Dufour, P. 2012, ApJS, 199, 29
- Gianninas, A., Bergeron, P., & Ruiz, M. T. 2011, ApJ, 743, 138
- Gil de Paz, A., Boissier, S., Madore, B. F., et al. 2009, VizieR Online Data Catalog, 217
- Gould, A. 2003, AJ, 126, 472
- Harris, H. C., Munn, J. A., Kilic, M., et al. 2006, AJ, 131, 571
- Høg, E., Fabricius, C., Makarov, V. V., et al. 2000, A&A, 355, L27

- Holberg, J. B., & Bergeron, P. 2006, AJ, 132, 1221
- Hummer, D. G., & Mihalas, D. 1988, ApJ, 331, 794
- Kawka, A., Vennes, S., & Thorstensen, J. R. 2004, AJ, 127, 1702
- Kharchenko, N. V. 2001, Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel, 17, 409
- Kilic, M., Munn, J. A., Harris, H. C., et al. 2006, AJ, 131, 582
- Kleinman, S. J., Kepler, S. O., Koester, D., et al. 2013, ApJS, 204, 5
- Kowalski, P. M., & Saumon, D. 2006, ApJ, 651, L137
- Lam, M. C., Rowell, N., & Hambly, N. C. 2015, MNRAS, 450, 4098
- Lépine, S., & Gaidos, E. 2011, AJ, 142, 138
- Lépine, S., & Shara, M. M. 2005, AJ, 129, 1483
- Lépine, S., Shara, M. M., & Rich, R. M. 2002, AJ, 124, 1190
- Liebert, J., Bergeron, P., & Holberg, J. B. 2005, ApJS, 156, 47
- Limoges, M.-M., Bergeron, P., & Lépine, S. 2015, ApJS, 219, 19
- Limoges, M.-M., Lépine, S., & Bergeron, P. 2013, AJ, 145, 136
- Monet, D. G., Levine, S. E., Canzian, B., et al. 2003, AJ, 125, 984
- Morrissey, P., & GALEX Science Team. 2004, in Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 36, American Astronomical Society Meeting Abstracts, 1385
- Padmanabhan, N., Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., et al. 2008, ApJ, 674, 1217
- Press, W. H., Flannery, B. P., & Teukolsky, S. A. 1986, Numerical recipes. The art of scientific computing
- Reid, I. N., Brewer, C., Brucato, R. J., et al. 1991, PASP, 103, 661

- Rowell, N., & Hambly, N. C. 2011, MNRAS, 417, 93
- Sayres, C., Subasavage, J. P., Bergeron, P., et al. 2012, AJ, 143, 103
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, ApJ, 500, 525
- Schmidt, M. 1968, ApJ, 151, 393
- Torres, S., & García-Berro, E. 2016, A&A, 588, A35
- Tremblay, P.-E., & Bergeron, P. 2009, in American Institute of Physics Conference Series, Vol. 1171, American Institute of Physics Conference Series, ed. I. Hubeny, J. M. Stone, K. MacGregor, & K. Werner, 101–108
- Tremblay, P.-E., Bergeron, P., & Gianninas, A. 2011, ApJ, 730, 128
- van Leeuwen, F. 2007, A&A, 474, 653
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, Jr., J. E., et al. 2000, AJ, 120, 1579