

Université de Montréal

Étude de l'influence de la composition du cœur des naines blanches sur le calcul des âges

par

Amélie Simon

Département de physique

Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures

en vue de l'obtention du grade de

Philosophiae Doctor (Ph.D.)

en physique

Août, 2017

©Amélie Simon, 2017

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :

Étude de l'influence de la composition du cœur des naines blanches sur le calcul des âges

présentée par :

Amélie Simon

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Pierre Bergeron,	Président-rapporteur
Gilles Fontaine,	Directeur de recherche
Nicole St-Louis,	Membre du jury
Agnès Bischoff-Kim,	Examineur externe
Radu Ion Iftimie,	Représentant du Doyen de la FES

Thèse acceptée le : \_\_\_\_\_

# Sommaire

Cette thèse étudie l'impact de l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches sur le calcul des âges par cosmochronologie de naines blanches. Pour ce faire, nous utilisons des séquences évolutives de naines blanches pour créer les fonctions de luminosité théoriques. Nous extrapolons les séquences évolutives de naines blanches à atmosphère d'hélium aux basses luminosités, où l'opacité de l'hélium est inconnue. Nous étudions l'impact sur le calcul des âges des incertitudes sur la composition du cœur des naines blanches, sur l'extrapolation des naines blanches à atmosphère d'hélium, sur la taille de l'enveloppe des naines blanches à atmosphère d'hydrogène, sur le choix de la relation que lie la masse de l'étoile parente à la masse de la naine blanche et de la relation qui lie temps passé par l'étoile sur la séquence principale à sa masse. Nous concluons que l'incertitude sur la composition du cœur domine l'incertitude sur les âges déterminés en utilisant les naines blanches. Nous utilisons la fonction de luminosité observée de l'amas M67, combinée à son âge connu précisément, pour déterminer la composition moyenne du cœur des naines blanches dans cet amas. Nous trouvons que la composition moyenne la plus probable du cœur des naines blanches dans M67 est de 70% de carbone et de 30% d'oxygène, mais les autres compositions de cœur restent plausibles. Nous déterminons l'âge du voisinage solaire en comparant les fonctions de luminosité observée et théorique, nous obtenons un âge de  $9.3_{-0.8}^{+1.1}$  Ga (erreurs à 68% de confiance statistique), où les incertitudes sont dominées par l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches et dans une moindre mesure, par la taille de l'échantillon. Nous déterminons ensuite les âges de quatre amas. Nous trouvons des âges cohérents avec ceux déterminés par d'autres équipes qui utilisent aussi les séquences évolutives de naines blanches. Les incertitudes que nous déterminons prennent en compte l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches,

qui dominent les incertitudes et celles sur la distance, qui ont aussi un impact non négligeable. Les âges déterminés par le point de décrochage de la séquence principale sont cohérents avec ceux que nous déterminons, excepté pour NGC 6791, cependant cet amas a une fonction de luminosité particulière qui suggère que son histoire n'est pas encore bien comprise. Nous concluons que la cosmochronologie de naines blanches est une technique très prometteuse mais que l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches fait présentement obstacle à l'obtention d'âges précis.

*Mots clés : Amas globulaires : individuel (47 Tucanae, M4, NGC 6397) — amas ouverts et associations : individuel (NGC 6791) — étoiles : évolution — étoiles : fonction de luminosité — étoiles : intérieur — étoiles : naines blanches — Galaxie : voisinage solaire*

# Abstract

The goal of this thesis is to quantify the impact of the uncertainty of white dwarf core composition on the computation of ages using white dwarf cosmochronology. To this end, we use white dwarf evolutionary sequences in order to build theoretical luminosity functions. We extrapolate the helium atmosphere white dwarf evolutionary sequences to low luminosity, where the helium opacity is unknown. We study the impact on the computed ages of the uncertainties associated with the white dwarf core composition, the extrapolation of the helium atmosphere evolutionary sequences, the thickness of the hydrogen envelope, the choice of the initial-final mass relation used and the choice of the relation used that links the time spent on the main sequence to the mass of the star. We come to the conclusion that the uncertainty on the core composition dominates the uncertainty on the ages when we use white dwarfs. We then use the observed luminosity function of the globular cluster M67, combined with a precise measurements of its age, in order to determine the mean core composition of white dwarfs in this cluster. We find that the most probable core composition is 70% carbon and 30% oxygen but we can not rule out other compositions. We determine the age of the solar neighbourhood by comparing its observed luminosity function to our theoretical ones. We obtain an age of  $9.3_{-0.8}^{+1.1}$  Gyr (errors at 68% of confidence level), where the uncertainty is dominated by the uncertainty on the core composition and to a lesser extent by the uncertainty on the size of the sample. We then determine the ages of four clusters. We find ages consistent with the ones determined by other teams that also use white dwarf evolutionary sequences. The uncertainty that we determine takes into account the uncertainty on the white dwarf core composition, that dominates the uncertainty on the inferred age, and the ones on distance, that also have a non-negligible impact. The ages determined by the main sequence turn-off are consistent

with the ones we find, except for NGC 6791. However, this cluster has a peculiar white dwarf luminosity function, suggesting its history is not well understood. We conclude that white dwarf cosmochronology is a very promising technique to infer ages but the uncertainty on core composition is an obstacle to obtaining precise ages.

*Subject headings: Galaxy: solar neighborhood — globular clusters: individual (47 Tucanae, M4, NGC 6397) — open clusters and associations: individual (NGC 6791) — stars: evolution — stars: interiors — stars: luminosity function — stars: white dwarfs*

# *Table des matières*

<b>Sommaire</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>v</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>xi</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>xvii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>xx</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Les naines blanches . . . . .	1
1.2 Codes évolutifs utilisés dans la littérature . . . . .	3
1.3 Rapport carbone sur oxygène dans le cœur des naines blanches . . . . .	5
1.4 Plan de la thèse . . . . .	9
1.5 Déclaration de l'étudiant . . . . .	10
<b>2 Fonctions de luminosité théoriques</b>	<b>11</b>
2.1 Code évolutif . . . . .	11
2.1.1 Équations d'états . . . . .	11
2.1.2 Opacités . . . . .	12

2.1.3	Autres données . . . . .	12
2.2	Résultats provenant des modèles évolutifs . . . . .	13
2.2.1	État de la matière au sein d'une naine blanche . . . . .	13
2.2.2	Le transport de l'énergie . . . . .	16
2.2.3	Tracés évolutifs dans le diagramme Hertzsprung-Russell . . . . .	18
2.2.4	Capacité calorifique . . . . .	22
2.2.5	Temps de refroidissement en fonction de la luminosité . . . . .	23
2.2.6	Dérivée du temps de refroidissement en fonction de la luminosité . . . . .	27
2.2.7	Fonctions de luminosité . . . . .	30
2.2.8	Masses des naines blanches qui contribuent aux fonctions de luminosité . . . . .	34
2.2.9	Naines blanches qui ont une atmosphère d'hélium . . . . .	36
2.2.10	Évolution des DAs comparées à celle des non-DAs . . . . .	40
2.2.11	Fonctions de luminosité qui incluent les DAs et les non-DAs . . . . .	47
2.3	Influence des différents paramètres libres sur les fonctions de luminosité théoriques . . . . .	48
2.3.1	Rapport carbone sur oxygène dans le cœur des naines blanches . . . . .	48
2.3.2	Tailles des couches d'hydrogène et d'hélium . . . . .	58
2.3.3	Relation masse initiale - masse finale . . . . .	64
2.3.4	Influence de l'équation que lie le temps sur la séquence principale avec la masse de l'étoile . . . . .	64
2.3.5	Conclusion sur l'importance des différents paramètres sur les fonctions de luminosité théoriques . . . . .	64
<b>3</b>	<b>Composition du cœur des naines blanches de M67</b>	<b>68</b>
3.1	Introduction . . . . .	68
3.2	Présentation de l'échantillon . . . . .	70
3.3	Modèles . . . . .	70
3.4	Résultats . . . . .	71
3.5	Discussion . . . . .	72
3.6	Conclusion . . . . .	77

<b>4</b>	<b>Naines blanches du voisinage solaire</b>	<b>80</b>
4.1	Présentation de l'échantillon . . . . .	80
4.2	Modèles . . . . .	82
4.3	Résultats . . . . .	82
4.3.1	Fonction de luminosité observée et calcul des erreurs . . . . .	82
4.3.2	Âge du disque galactique en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches . . . . .	83
4.3.3	Simulations Monte Carlo, distribution des âges obtenus . . . . .	84
4.4	Discussion . . . . .	90
4.5	Comparaison avec les résultats dans la littérature . . . . .	95
4.6	Conclusion . . . . .	101
<b>5</b>	<b>Amas stellaires</b>	<b>103</b>
5.1	Introduction . . . . .	103
5.2	Amas globulaire 47 Tucanae . . . . .	104
5.2.1	Présentation de l'échantillon . . . . .	104
5.2.2	Modèles . . . . .	105
5.2.3	Âge de l'amas 47 Tucanae en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches . . . . .	105
5.2.4	Simulations Monte Carlo et distribution des âges obtenus . . . . .	106
5.2.5	Discussion . . . . .	108
5.2.6	Comparaison avec les résultats dans la littérature . . . . .	117
5.2.7	Conclusion . . . . .	119
5.3	Amas globulaire NGC 6397 . . . . .	120
5.3.1	Présentation de l'échantillon . . . . .	120
5.3.2	Âge de l'amas NGC 6397 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches . . . . .	121
5.3.3	Simulations Monte Carlo et distribution des âges obtenus . . . . .	121
5.3.4	Discussion . . . . .	123
5.3.5	Comparaison avec les résultats dans la littérature . . . . .	133

5.3.6	Conclusion . . . . .	133
5.4	Amas ouvert NGC 6791 . . . . .	135
5.4.1	Présentation de l'échantillon . . . . .	135
5.4.2	Âge de l'amas NGC 6791 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches . . . . .	135
5.4.3	Discussion . . . . .	136
5.4.4	Comparaison avec les résultats dans la littérature . . . . .	138
5.4.5	Conclusion . . . . .	138
5.5	Amas globulaire M4 . . . . .	139
5.5.1	Présentation de l'échantillon . . . . .	139
5.5.2	Âge de l'amas M4 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches . . . . .	139
5.5.3	Simulations Monte Carlo et distribution des âges obtenus . . . . .	140
5.5.4	Discussion . . . . .	142
5.5.5	Comparaison avec les résultats dans la littérature . . . . .	150
5.5.6	Conclusion . . . . .	151
5.6	Conclusion . . . . .	152
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>155</b>
<b>A</b>	<b>Âge de la naine blanche HD11112b</b>	<b>158</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>160</b>

# *Liste des tableaux*

4.1	Âge du disque galactique en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches . . . . .	87
4.2	Distributions des âges obtenus pour chaque fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches . . . . .	90
4.3	Âge du disque galactique en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, pour des DAs seulement . . . . .	93
4.4	Distributions des âges obtenus pour chaque fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, pour des DAs seulement . . . . .	95
5.1	Âge de l'amas 47 Tucanae en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches . . . . .	106
5.2	Distributions des âges obtenus de 47 Tucanae pour chaque fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches . . . . .	108
5.3	Âge de l'amas 47 Tucanae en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, en utilisant des DAs seulement . . . . .	111
5.4	Âge de l'amas 47 Tucanae en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée : $\mu_0 = 13.16$ . . . . .	113
5.5	Âge de l'amas 47 Tucanae en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée : $\mu_0 = 13.38$ . . . . .	116
5.6	Âge de l'amas 47 Tucanae en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, incluant toutes les incertitudes calculées . . . . .	116

5.7	Âge de l'amas 47 Tucanae en fonction des différentes suppositions sur la composition du cœur des naines blanches, distance adoptée : $\mu_0 = 13.38$ . . . . .	120
5.8	Âge de NGC 6397 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches . . . . .	123
5.9	Distributions des âges obtenus de NGC 6397 pour chaque fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches . . . . .	126
5.10	Âge de l'amas NGC 6397 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, en utilisant des DAs seulement . . . . .	126
5.11	Âge de l'amas NGC 6397 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée : $\mu_0 = 11.97$ , rougissement adopté : $E(B - V) = 0.17$ . . . . .	128
5.12	Âge de l'amas NGC 6397 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée : $\mu_0 = 12.09$ , rougissement adopté : $E(B - V) = 0.19$ . . . . .	131
5.13	Âge de l'amas NGC 6397 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, incluant toutes les incertitudes calculées . . . . .	132
5.14	Âges de NGC 6397 dans la littérature . . . . .	133
5.15	Âge de l'amas NGC 6397 en fonction des différentes suppositions sur la composition du cœur des naines blanches . . . . .	134
5.16	Âge de NGC 6791 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches . . . . .	136
5.17	Âge de M4 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches . . . . .	140
5.18	Distributions des âges obtenus de M4 pour chaque fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches . . . . .	142
5.19	Âge de l'amas M4 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, en utilisant des DAs seulement, . . . . .	145
5.20	Âge de l'amas M4 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée : $\mu_V = 11.00$ . . . . .	148

5.21	Âge de l'amas M4 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée : $\mu_V = 11.36$ . . . . .	148
5.22	Âge de l'amas M4 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, incluant toutes les incertitudes calculées . . . . .	150
5.23	Âge de l'amas M4 en fonction des différentes suppositions sur la composition du cœur des naines blanches . . . . .	152

# *Liste des figures*

1.1	Figure 8 de l'article de Fields et al. (2016), facteur d'incertitude des taux de réaction en fonction de la température . . . . .	8
2.1	Structure d'un modèle de DA dans un diagramme de phase . . . . .	15
2.2	Figure 9 de l'article de Tremblay et al. (2015), énergie thermique intégrée en fonction de la profondeur . . . . .	19
2.3	Modèles évolutifs dans le plan $L$ - $T$ pour différentes masses . . . . .	20
2.4	Capacité calorifique centrale versus température centrale . . . . .	24
2.5	Temps de refroidissement en fonction de la luminosité . . . . .	25
2.6	Dérivées du temps de refroidissement en fonction de la luminosité, décalées en ordonnées . . . . .	29
2.7	Dérivées du temps de refroidissement en fonction de la luminosité . . . . .	31
2.8	Fonctions de luminosité . . . . .	33
2.9	Masses des naines blanches contribuant à la fonction de luminosité d'un amas .	35
2.10	Structure d'un modèle de non-DA dans un diagramme de phase . . . . .	37
2.11	Dérivées du temps de refroidissement en fonction de la luminosité des non-DAs	39
2.12	Dérivées extrapolées du temps de refroidissement en fonction de la luminosité des non-DAs . . . . .	41
2.13	Fonctions de luminosités des non-DAs extrapolées . . . . .	42
2.14	Temps de refroidissement en fonction de la luminosité pour des DAs et des non-DAs . . . . .	43
2.15	Dérivées du temps de refroidissement en fonction de la luminosité des non-DAs	45

2.16	Fonctions de luminosité des non-DAs, comparée à celles de DAs . . . . .	46
2.17	Fonctions de luminosité d'un échantillon de DAs et de non-DAs, comparées à celles de DAs seulement . . . . .	49
2.18	Temps de refroidissement pour différentes compositions de cœur . . . . .	50
2.19	Erreur relative sur l'âge en fonction de la composition du cœur . . . . .	51
2.20	Erreur relative sur l'âge en fonction de la composition du cœur, pour différentes masses . . . . .	54
2.21	Dérivées de la courbe de refroidissement pour différentes compositions de cœur, décalées en ordonnées . . . . .	55
2.22	Dérivées de la courbe de refroidissement pour différentes compositions de cœur	56
2.23	Fonctions de luminosité pour différentes compositions de cœur . . . . .	57
2.24	Temps de refroidissement pour différentes tailles de la couche d'hydrogène . . .	59
2.25	Dérivées de la courbe de refroidissement pour différentes tailles de la couche d'hydrogène . . . . .	60
2.26	Erreur relative sur l'âge en fonction de la taille de la couche d'hydrogène et de la composition du cœur . . . . .	61
2.27	Erreur relative sur l'âge en fonction de la taille de la couche d'hydrogène, pour différentes masses . . . . .	62
2.28	Fonctions de luminosité pour différentes tailles de la couche d'hydrogène . . . .	63
2.29	Influence de la relation masse initiale-masse finale sur la fonction de luminosité	65
2.30	Influence de l'équation que lie le temps sur la séquence principale avec la masse de l'étoile sur les fonctions de luminosité théoriques . . . . .	66
3.1	Fonction de luminosité observée des naines blanches de l'amas M67 comparée aux fonctions de luminosités théoriques d'un amas de 3.87 Ga . . . . .	73
3.2	Fonction de luminosité observée des naines blanches de l'amas M67 comparée aux fonctions de luminosités théoriques d'amas de 3.21 Ga et 4.42 Ga . . . . .	74
3.3	Fonction de luminosité observée des naines blanches de l'amas M67 comparée aux fonctions de luminosités théoriques pour différentes compositions de cœur .	75
3.4	Probabilités de la composition du cœur des naines blanches de M67 . . . . .	76

3.5	Probabilités de la composition du cœur des naines blanches de M67, avec des séquences de non-DAs extrapolées linéairement . . . . .	78
4.1	Âge du disque galactique en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches . . . . .	85
4.2	Âge du disque galactique et composition moyenne du cœur des naines blanches qui modélise le mieux la fonction de luminosité observée . . . . .	86
4.3	Simulations Monte Carlo : distributions de l'âge du disque pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% à 50% de carbone . . . . .	88
4.4	Simulations Monte Carlo : distributions de l'âge du disque pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 60% à 100% de carbone . . . . .	89
4.5	Figure 28 de l'article de Limoges et al. (2015), fonctions de luminosité théoriques constituées de DAs comparées à la fonction de luminosité observée . . . . .	92
4.6	Âge du disque galactique en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches, considérant seulement des DAs . . . . .	94
4.7	Simulations Monte Carlo : distributions de l'âge pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% à 50% de carbone . . . . .	96
4.8	Simulations Monte Carlo : distributions de l'âge pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 60% à 100% de carbone . . . . .	97
5.1	Âge de l'amas globulaire 47 Tucanae en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches . . . . .	107
5.2	Simulations Monte Carlo : distributions des âges obtenus de 47 Tuc pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% à 50% de carbone . . . . .	109
5.3	Simulations Monte Carlo : distributions des âges obtenus de 47 Tuc pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 60% à 100% de carbone . . . . .	110
5.4	Âge de l'amas globulaire 47 Tucanae en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches, en utilisant des DAs seulement . . . . .	112

5.5	Âge de l'amas globulaire 47 Tucanae en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches, pour une distance à l'amas de $\mu_0 = 13.16$ . . . . .	114
5.6	Âge de l'amas globulaire 47 Tucanae en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches, pour une distance à l'amas de $\mu_0 = 13.38$ . . . . .	115
5.7	Âge de l'amas globulaire NGC 6397 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches . . . . .	122
5.8	Simulations Monte Carlo : distributions des âges obtenus de NGC 6397 pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% à 50% de carbone . . . . .	124
5.9	Simulations Monte Carlo : distributions des âges obtenus de NGC 6397 pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 60% à 100% de carbone . . . . .	125
5.10	Âge de l'amas globulaire NGC 6397 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches, en utilisant des DAs seulement . . . . .	127
5.11	Âge de l'amas globulaire NGC 6397 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches, pour une distance à l'amas de $\mu_0 = 11.95$ . . . . .	129
5.12	Âge de l'amas globulaire NGC 6397 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches, pour une distance à l'amas de $\mu_0 = 12.09$ . . . . .	130
5.13	Âge de l'amas globulaire NGC 6791 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches . . . . .	137
5.14	Âge de l'amas globulaire M4 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches . . . . .	141
5.15	Simulations Monte Carlo : distributions des âges obtenus de M4 pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% à 50% de carbone	143
5.16	Simulations Monte Carlo : distributions des âges obtenus de M4 pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 60% à 100% de carbone	144
5.17	Âge de l'amas globulaire M4 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches, en utilisant des DAs seulement . . . . .	146

- 5.18 Âge de l'amas globulaire M4 en fonction de la composition moyenne du cœur  
des naines blanches, pour une distance à l'amas de  $\mu_V = 11.00$  . . . . . 147
- 5.19 Âge de l'amas globulaire M4 en fonction de la composition moyenne du cœur  
des naines blanches, pour une distance à l'amas de  $\mu_V = 11.36$  . . . . . 149

# Liste des sigles

47 Tuc	47 Tucanae
$A$	Nombre atomique
$C_V$	capacité calorifique à volume constant
$C_{Vc}$	capacité calorifique à volume constant au centre
DA	Naine blanche dont l'atmosphère est dominée par l'hydrogène
Diagramme HR	diagramme Hertzsprung-Russell
PDSP	Point de décrochage de la séquence principale
DSS	Digitized Sky Survey
$E$	Énergie
$k$	Constante de Boltzmann
$L$	Luminosité
$L_{\odot}$	Luminosité solaire
MESA	Modules for Experiments in Stellar Astrophysics
$M$	Masse
$m_{nb}$	Masse de la naine blanche
$M_{\star}$	Masse de l'étoile
$M_{\odot}$	Masse du soleil
$M_{bol}$	Magnitude bolométrique
NB	Naine blanche
non-DA	Naine blanche dont l'atmosphère est dominée par l'hélium

$q(\text{H})$	$M_{\text{H}}/M_{\star}$ , masse de l'enveloppe d'hydrogène sur masse de l'étoile
$q(\text{He})$	$M_{\text{He}}/M_{\star}$ , masse de l'enveloppe d'hélium sur masse de l'étoile
$r$	Distance radiale
SPAZ	Séquence principale d'âge zéro
$T$	Température
$T_{\text{c}}$	Température au centre
$T_{\text{eff}}$	Température effective
$t$	Temps
$t_{\text{refr}}$	Temps de refroidissement
$t_{\text{sp}}$	Temps de vie sur la séquence principale
$\alpha$	Particule $\alpha$ ( ${}^4\text{He}^{2+}$ )
$\eta$	Paramètre de dégénérescence
$\Gamma$	Paramètre de couplage de Coulomb
$\gamma$	Photon
$\mu_0$	Module de distance
$\nu$	Poids moléculaire moyen
$\nu_e$	Neutrino électronique
$\rho$	Densité
$\tau_R$	Opacité de Rosseland
$\Phi$	Fonction de masse initiale
$\Psi$	Taux de formation stellaire

À Jonathan

# Remerciements

Tout d'abord, merci Gilles de m'avoir donné l'opportunité de travailler avec vous. J'ai beaucoup appris à travers ces années, merci notamment de m'avoir aidée à garder une vision d'ensemble et de m'avoir retenue avant que je ne me perde dans des détails. Merci pour votre écoute, votre compréhension et votre patience. Merci aussi à Pierre Brassard pour le code évolutif et pour l'aide. Merci à tous ceux qui ont pris le temps de répondre à mes questions, notamment Nicole Saint-Louis, Loïc Albert, Étienne Artigau, Julien Rameau et David Lafrenière. Merci à ceux qui m'ont permis de m'impliquer dans le projet OPIOMM (merci à Lison de m'avoir formée!) et un merci tout particulier à tous ceux qui ont aidé pendant les moments de panique lorsqu'on manquait d'images! Merci à Luc Turbide pour les multiples débuggages et d'avoir toujours répondu "Non." à mes demandes d'aide pour finalement venir réparer le problème dans la journée sans me le dire. Un merci particulier à Anne Gosselin, Louis Lemay et Lynda Syvrais pour m'avoir aidée à de nombreuses reprises.

J'ai rencontré des personnes exceptionnelles pendant mes études graduées et je suis infiniment reconnaissante que vous soyez dans ma vie. Merci à Corinne pour tous les merveilleux moments passés ensemble, le cirque, la boxe et les spectacles fuckés, j'ai ben hâte de te voir plus souvent! Merci à Cassandra pour ton excellente écoute active, pour le Japon et pour tous les encouragements! Merci à Jean-François pour ta positivité naturellement contagieuse, pour ta présence virtuelle pendant ces années à DC! Merci à toi ainsi qu'à Chloé (et Ève!) pour votre accueil, je suis infiniment reconnaissante de pouvoir habiter chez vous. Merci à Patou, pour ta fiabilité, pour les nombreuses soirées GoT mais aussi pour les soirées passées à jaser, ça me manque qu'on soit plus voisins! Merci à Laura-Isabelle pour ta joie de vivre si communicative, merci à François-René pour ton authenticité, ta franchise et de brasser la cage

quand il y a besoin, merci à Delphine pour nos discussions que j'aimerais qu'elles ne finissent jamais, merci à Nico pour tes danses spontanées, merci à Noé pour apporter de l'imprévu et de la spontanéité, merci à Roxane pour ta simplicité et pour être toujours prête à avoir du fun, merci à Anne pour être toujours prête à aider. Merci Marie-Eve pour tes conseils, pour les encouragements, tu m'as souvent amenée à voir les choses différemment, merci à Marie-Michèle pour ton humour, pour ton aide sur les naines blanches pendant la thèse, merci à Sandie de m'avoir accompagnée à travers les interwebs pendant les moments difficiles de ma rémission et d'avoir joué les entremetteuses, merci Simon pour être un ami de la poussière, on va finalement graduer ensemble! Merci à Dorian pour tes jokes plates qui nous manquent ben gros. Merci à Noemi avec qui je me sens à l'aise d'être 100% moi-même, merci pour ton aide scientifique et morale pendant la thèse! Merci à tous ceux qui ont partagé mes bureaux et que je n'ai pas nommés plus haut, particulièrement Fabien, JF Cossette, Rémi, Mathieu, Antoine, Frédérique, Alexandre et Marie-Lou (merci pour le dépôt!).

I am incredibly thankful to DTM for letting me use a desk and office. I have worked so much better than I would have done alone from home! And it enabled me to meet great people : thanks to Jackie for helping me feel more at home in DC and Carnegie! The first thing you told me was "Are you Amélie? We're gonna be friends!" I'm glad you were right. Thanks a lot to Johanna who was such a great listener and thanks for the cheer-up! Miki thanks for the japanese treats and all the discussions, My thanks for the listening, Nick thanks for the Catan nights, I miss them! Mike Guerette thank you so much for picking up on with my bike problems even before I do and fixing them in the blink of an eye! Hélène merci pour l'écoute, les encouragements et pour ta positivité inébranlable! Merci Asmaa (superbe éclipse!), Thanks to Zack who is always happy, Serge (we just landed in DC and you were already there to help!), Jesse, Mike and the other beer hour fellows!

Merci à mes amis, qui ont notamment appris à ne plus me demander quand est-ce que je finissais mes études : Émilie, Élisabeth, Sylvain, Laurie, Anne-Laure (bonne chance pour la suite et merci pour le soutien)! Merci à Mélanie pour les nombreux brunchs et soupers!

Merci à ma famille, mes tantes et cousins Simon qui m'ont si bien accueillis en juin. J'ai

hâte de vous revoir. Merci à Mitsou et André qui m'ont ouverte à la culture. Merci à Kathy et Mick pour les nombreuses nuits d'hébergement, merci à Kathy pour ton sourire et ton naturel, merci à Mick pour les services rendus, merci à Louis et Joanne pour votre accueil dans votre maison et dans votre famille. Merci à ma tante Manon et mon oncle Pierre pour tous les soupers et le temps passé ensemble. Merci à mon oncle Robert, qui est toujours là quand on en a besoin. Merci grand-môman Denise pour ton humour. Merci tout particulier à Laetitia au grand cœur, qui m'a aidée un nombre incalculable de fois (et merci Machiko!). Ta spontanéité et ton humour sont tellement rafraichissants! Merci à mon cousin Marc, t'es une des personnes avec qui je me sens le plus à l'aise d'être moi-même et de jaser. Merci à Volny d'avoir toujours été là, même après tant d'années. Merci à mon père, qui m'a offert un livre interactif sur l'astronomie quand j'avais sept ans et qui m'a transmis le goût des étoiles et de la science. Si j'en suis là aujourd'hui c'est beaucoup grâce à lui, à son support et son écoute et j'aurais aimé qu'il soit encore présent pour me voir finir cette thèse, finalement. Merci à Patrick, pour les discussions sur les livres! Merci à ma mère pour son support, particulièrement pendant mes études à Lyon. Merci pour ton humour! Merci d'avoir été là pendant les moments difficiles. Merci à ma famille de cœur, les Ré Monteiro, vous me manquez beaucoup. Merci à ma sœur Lila, qui a toujours été présente même en étant si loin. Merci d'être dans ma vie, merci d'être ma sœur de coeur, merci pour toute ton aide et ton support.

Merci à Jonathan. Tu as été un soutien inestimable tout le long de cette thèse. Tu as été un support moral, scientifique et aussi un support littéral quand j'étais handicapée des hanches! Un grand merci de m'avoir autant aidée pendant le dernier rush intense de la fin de thèse, de m'avoir nourrie et de t'être occupé de l'appart et des minous! Merci pour ton aide sur les statistiques. Merci de m'avoir écoutée parler de mon projet lorsque j'avais juste besoin d'une écoute pour clarifier mes pensées. Et merci pour ton humour, pour ton authenticité, merci d'avoir la parfaite quantité de weird et d'incongru et de me faire découvrir plein de nouvelles choses, merci d'être qui tu es. Merci tout simplement de partager ma vie.

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Les naines blanches

Une étoile de la séquence principale fusionne en son cœur de l'hydrogène en hélium, suivant deux chaînes de réactions principales (Bahcall 1989) :

- Le cycle *ppI* :



- Le cycle CNO-I :



Un cœur d'hélium est ainsi créé par les cycles *ppI* et CNO. Le cœur d'hélium grandit avec l'âge et l'hydrogène va brûler dans une couche de plus en plus haute dans l'étoile. La température de la couche d'hydrogène diminue en s'éloignant du centre, jusqu'à un point critique où la fusion de l'hydrogène ne peut plus être soutenue. La force gravitationnelle va contracter l'étoile et la température en son cœur va augmenter.

La fusion de l'hélium se déclenche alors, lorsque la température atteint  $T \approx 10^8$  K. Le carbone est formé lors des réactions triple  $\alpha$  :



Puis, lorsqu'assez de carbone s'accumule, l'oxygène est formé lors de la réaction :



Les phases de brûlage de l'hélium s'accompagnent de forts vents qui vont éjecter les couches externes de l'étoile. La naine blanche est le produit final de cette évolution, pour des étoiles de plus de  $0.6 M_{\odot}$  et de moins de  $8-10 M_{\odot}$  (Ritossa et al. 1999). Ainsi, 97% des étoiles finissent leur vie en tant que naines blanches, qui sont essentiellement le cœur mis à nu de l'étoile parente. Elles sont formées des produits des réactions thermonucléaires de l'hélium : le carbone et l'oxygène. Une fine couche d'hydrogène, opaque, d'une taille entre  $q(\text{H}) \equiv M_{\text{H}}/M_{\star} = 10^{-4}$  et  $q(\text{H}) = 10^{-16}$  et une couche d'hélium d'une taille entre  $q(\text{He}) \equiv M_{\text{He}}/M_{\star} = 10^{-2}$  et  $q(\text{He}) = 10^{-4}$  couvrent le cœur de carbone et d'oxygène (Dantona & Mazzitelli 1979). Ces naines blanches sont nommées des naines blanches DAs. Environ 25% des naines blanches ne présentent pas d'hydrogène à leur surface et ont une atmosphère d'hélium (Limoges et al. 2015, nommées des non-DAs). Les naines blanches provenant des étoiles les plus massives auraient aussi du Ne et du Mg en leur cœur, produits du brûlage d'une petite quantité d'oxygène (Doherty et al. 2015). Les naines blanches sont petites (environ le rayon de la Terre) et ont une masse d'environ  $0.6 M_{\odot}$ . Elles sont donc très denses et les éléments se sont séparés par

sédimentation gravitationnelle. La seule partie visible de la naine blanche est son enveloppe externe d'hydrogène, très opaque (ou d'hélium dans le cas d'une naine blanche à atmosphère d'hélium).

L'histoire de la galaxie et des différentes populations d'étoiles est inscrite dans les naines blanches, car elles sont le produit de la très grande majorité des étoiles de la séquence principale. Elles peuvent nous renseigner sur le taux de formation d'étoiles, l'âge du milieu et l'enrichissement en poussières du disque grâce à leurs forts vents présents pendant la phase de brûlage de l'hélium, par exemple. De plus, les conditions extrêmes de densité et de températures présentes dans les naines blanches ne peuvent pas être atteintes en laboratoire et ces dernières peuvent donc être utilisées pour tester les théories de la physique dans des conditions extrêmes. Leur cœur étant le produit final des réactions thermonucléaires de l'hydrogène et de l'hélium, épluché de ses couches externes, elles peuvent aussi nous renseigner sur l'efficacité des taux de réaction nucléaire et sur leurs vents.

## 1.2 Codes évolutifs utilisés dans la littérature

Les naines blanches n'ont plus de réactions thermonucléaires et donc de sources d'énergie (la contraction du cœur étant essentiellement terminée au moment où elles sont créées). Ainsi, elles ne font que se refroidir avec le temps. En principe, si nous connaissons la température effective et la masse d'une naine blanche nous avons accès à son âge, si nous avons des séquences évolutives précises.

Mestel (1952) propose une relation simple qui lie la luminosité d'une naine blanche à son âge. La possibilité que les naines blanches puissent être utilisées comme cosmochronomètres a alors été réalisée par Schmidt (1959). Il suggère que l'âge de la galaxie peut être déterminée en mesurant la luminosité de la naine blanche la plus froide, combinée à la théorie de Mestel (1952). Il serait alors possible de connaître le temps que cet objet a passé sur la phase naine blanche, auquel il faut ajouter le temps passé sur la séquence principale pour obtenir l'âge

total de l'objet et donc de la galaxie. Les naines blanches les plus froides ont de très faibles luminosités et la théorie de Mestel faisant plusieurs approximations grossières, il a fallu attendre plusieurs décennies avant que la première mesure précise de l'âge de la galaxie grâce aux naines blanches ait été établie.

La théorie de Mestel lie le temps de refroidissement d'une naine blanche à sa luminosité par l'équation :

$$t_{\text{refr}} \propto A^{-1} \nu^{-2/7} M^{5/7} L^{-5/7} \quad (1.13)$$

$\nu$  étant le poids moléculaire moyen du matériel dans l'enveloppe de la naine blanche,  $A$  le nombre atomique du matériel dans le cœur de la naine blanche,  $M$  la masse de la naine blanche et  $L$  la luminosité de la naine blanche. Bien que faisant des approximations grossières (van Horn 1971), cette équation illustre bien que le temps de refroidissement d'une naine blanche dépend de la composition chimique de son cœur, celle de son enveloppe, de sa masse et de sa luminosité.

Un code évolutif plus sophistiqué a été développé par Lamb & van Horn (1975). Ils ont modélisé le cœur dans le cadre de la thermodynamique d'un plasma ionisé, ainsi que la cristallisation du cœur et la chaleur latente subséquentement émise. Ils incorporent le code de Fontaine (1973) pour modéliser la structure de l'enveloppe. Il a cependant fallu plusieurs décennies pour pouvoir observer la chute du nombre de naines blanches à partir d'une certaine luminosité et donc de déterminer un âge pour la galaxie. Une fonction de luminosité compte le nombre de naines blanches par intervalle de luminosité, et caractérise l'histoire et l'âge d'un milieu donné. Ainsi, Winget et al. (1987) ont produit la première estimation de l'âge du disque galactique grâce aux naines blanches, en modélisant la fonction de luminosité observée des naines blanches de Liebert et al. (1988). Ils ont supposé que le cœur des naines blanches était composé de 100% de carbone. Wood (1990) a utilisé les mêmes modèles que Winget et al. (1987) mais il les a améliorés, notamment grâce à une stratification plus réaliste et un cœur pour lequel il a fait varier la composition. Il présente ses résultats dans Wood (1992) et Wood (1995).

Les processus de sédimentation ont par la suite été étudiés par plusieurs groupes dont les résultats ont été publiés dans : Stevenson (1980), Mochkovitch (1983), Garcia-Berro et al. (1988), Salaris et al. (1997), Chabrier et al. (2000), notamment. La composition du cœur des naines blanches, qui a une incidence sur les processus de sédimentation, a d’abord été étudiée par Mazzitelli & Dantona (1986a,b); Mazzitelli & D’Antona (1987) puis par Salaris et al. (1997). Puisque les taux de réactions nucléaires de brûlage de l’hélium sont encore mal contraints, la composition du cœur des naines blanches reste une inconnue (voir la section 1.3). Hansen (1999) a discuté de l’importance d’utiliser des modèles d’atmosphère détaillés comme condition à la surface, contrairement à ce qui a été utilisé jusqu’à maintenant, c’est-à-dire une atmosphère grise. L’effet est de déplacer la zone de convection, ce qui aura un impact lors du couplage convectif (voir la section 2.2.3.3). D’ailleurs, Fontaine et al. (2001) ont été les premiers à réaliser l’impact du couplage convectif sur l’évolution des naines blanches, qui a une signature visible sur les fonction de luminosité observées des naines blanches.

Grâce à ces avancées sur le front théorique, de nombreuses études ont utilisé les codes évolutifs de naines blanches afin de déterminer l’âge du disque (e.g. : Garcia-Berro et al. 1988; Wood 1992; Bergeron et al. 1997; Leggett et al. 1998; Kilic et al. 2017), l’âge des amas (e.g. : Richer et al. 1997, 1998; Hansen et al. 2007; Bedin et al. 2008a; Hansen et al. 2013; Torres et al. 2015) et le taux de formation stellaire (e.g. : Noh & Scalo 1990; Diaz-Pinto et al. 1994; Isern et al. 2001; Tremblay et al. 2014; Torres & García-Berro 2016), entre autres.

### **1.3 Rapport carbone sur oxygène dans le cœur des naines blanches**

Par le passé, compiler les taux de réactions nucléaires sans tenir compte des incertitudes étaient une pratique standard. Les besoins additionnels pour pouvoir explorer l’impact des incertitudes des taux de réaction nucléaires sur les modèles stellaires était trop grands com-

parés aux ressources de calculs disponibles et il n'était pas évident d'évaluer un nombre limité de modèles stellaires d'une façon statistiquement rigoureuse (Fields et al. 2016). Ainsi, plusieurs études ont été menées pour déterminer la composition du cœur des naines blanches (par exemple par Salaris et al. 1997) mais aucune ne présente un résultat statistiquement robuste (Fields et al. 2016).

Depuis, plusieurs études Monte Carlo ont été menées afin d'étudier l'incertitude sur la composition interne du cœur des naines blanches en fonction de l'incertitude sur les taux de réactions nucléaires (Iliadis et al. 2002; Stoesz & Herwig 2003; Roberts 2006; Parikh et al. 2008, 2013). Cependant, elles n'ont pas utilisé les fonctions de densités de probabilités des taux de réaction, provenant des expériences en physique nucléaire, pour faire l'exploration de paramètres dans leurs simulations Monte Carlo. Les incertitudes sur les taux de réactions dépendant fortement de la température, il est important que l'échantillonnage Monte Carlo en prenne compte correctement (Longland 2012). Bien que ces études représentent une première étape vers une connaissance de l'incertitude sur les compositions du cœur des naines blanches, leurs résultats n'utilisent pas en leur plein potentiel les fonctions de densités de probabilités des taux de réactions nucléaires déterminées par les expériences en physique nucléaire.

Aucune des bibliothèques des taux de réactions nucléaires couramment utilisées dans les articles, exceptée STARLIB (Sallaska et al. 2013), donnent une estimation des fonctions de densité de probabilité pour chaque taux de réaction nucléaire (Fields et al. 2016). Pourtant, il est essentiel de les connaître afin de déterminer les barres d'erreur théoriques sur la quantité de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches résultant des incertitudes des modèles évolutifs. Afin de produire une structure stellaire réaliste, il est nécessaire que les modèles stellaires utilisent une bibliothèque de taux de réactions nucléaires qui incorpore la fonction de densité de probabilité pour chaque taux de réaction.

Fields et al. (2016) sont les premiers à avoir utilisé les fonctions de densités de probabilité des taux de réactions nucléaires afin d'échantillonner correctement l'espace des paramètres

dans une simulation Monte Carlo. Pour ce faire, ils ont utilisé les fonctions de densités de probabilités des réactions nucléaires provenant de la librairie des taux de réaction STARLIB (voir la figure 8 de leur article, reproduite ici à la figure 1.1, qui représente le facteur d’incertitude de quatre taux de réactions nucléaires en fonction de la température de brûlage de l’hydrogène et de l’hélium). En combinant ces fonctions de densités de probabilité des taux de réactions nucléaires avec le code évolutif MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics, Paxton et al. 2011, 2013, 2015), ils ont pu investiguer les distributions de masses finales, d’âges, de températures centrales, de fractions d’électrons dans le cœur et de fractions de  $^{22}\text{Ne}$ , d’ $^{16}\text{O}$  et de  $^{12}\text{C}$  dans le cœur, au moment du premier pulse thermique. Ils ont modélisé l’évolution d’une étoile de  $3 M_{\odot}$  ayant une composition chimique solaire. Ils utilisent les fonctions de densité de probabilité de 26 réactions nucléaires mais notent que ce sont les incertitudes sur les taux de réaction triple- $\alpha$  (équation 1.11),  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  (équation 1.7) et particulièrement  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  (équation 1.12) qui empêchent de contraindre la composition du cœur des naines blanches. Ils concluent qu’il est pour l’instant presque impossible de connaître le rapport entre le carbone et l’oxygène dans le cœur des naines blanches en utilisant un code évolutif d’étoiles, à cause des incertitudes actuelles sur les taux de réaction nucléaires. Ils donnent toutefois une contrainte faible sur la quantité d’oxygène dans le cœur des naines blanches, qui doit être d’au moins 25% d’oxygène avec un confiance statistique de 95%.

Les naines blanches variables peuvent être étudiées par astérosismologie car leurs modes de pulsations dépendent des caractéristiques chimiques et thermodynamiques de l’étoile. Giammichele et al. (2016) ont fait une telle étude de l’étoile Ross 548, pour laquelle ils ont observé 11 modes de pulsation de 6 multiplets. Ils ont pu déterminer la composition de son cœur avec une grande précision. C’est une étoile de  $0.65 \pm 0.02 M_{\odot}$ , qui a une composition d’enveloppe de  $\log(M_{\text{H}}/M_{\star}) = -7.45 \pm 0.12$  d’hydrogène et de  $\log(M_{\text{He}}/M_{\star}) = -2.92 \pm 0.10$  d’hélium et une composition de cœur de  $70 \pm 6\%$  d’oxygène et de  $30 \pm 6\%$  de carbone. Ils ont combiné leurs résultats avec les résultats spectroscopiques pour lever la dégénérescence dans leurs modèles et s’assurer de la validité de leur résultat. Bischoff-Kim et al. (2008) et Romero et al. (2012) ont étudié la même étoile et ils obtiennent une composition de cœur similaire.

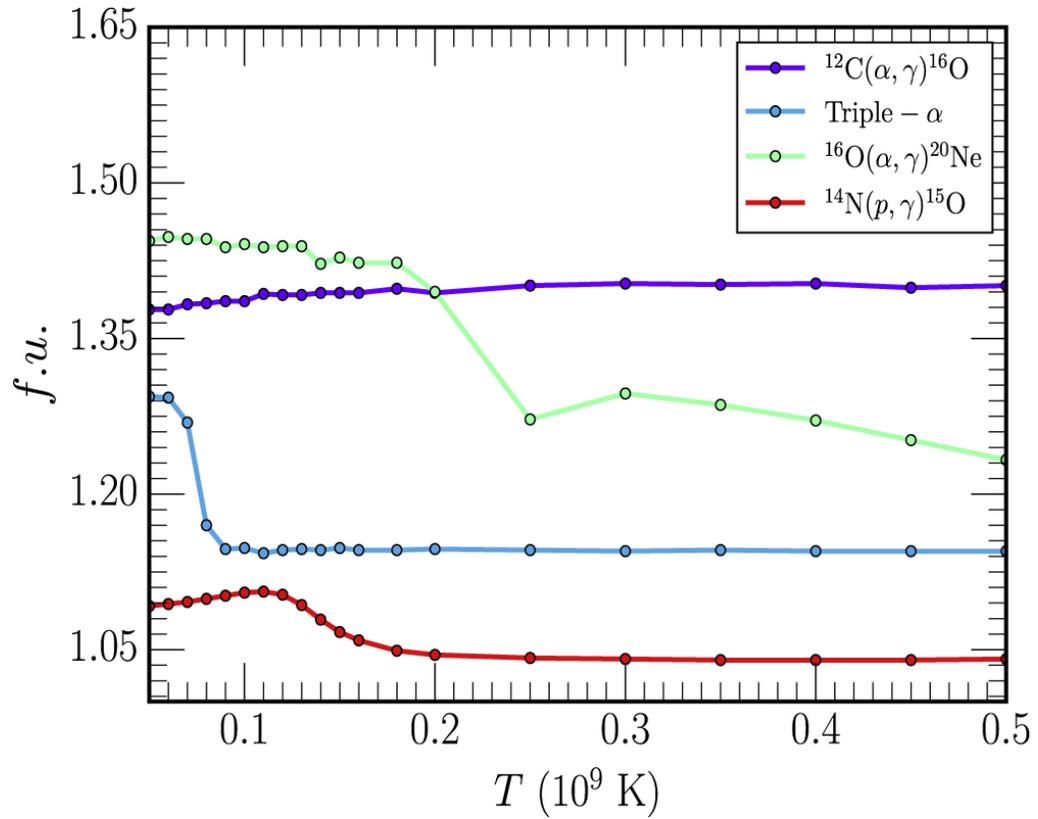


FIGURE 1.1 Figure 8 de l'article de Fields et al. (2016), facteur d'incertitude des taux de réactions triple- $\alpha$ ,  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  et  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  sur l'échelle de températures de brûlage de l'hydrogène et l'hélium. Le facteur d'incertitude étant défini comme la somme de la valeur théorique et de l'incertitude divisée par la valeur théorique. Les points représentent les points de données de STARLIB. Les lignes pleines représentent l'interpolation entre les données.

## 1.4 Plan de la thèse

Au chapitre 2, nous présentons les modèles évolutifs que nous utilisons pour cette thèse. Nous intégrons les modèles évolutifs des non-DAs, que nous extrapolons aux petites luminosités, quand l'opacité de l'hélium devient indéterminée. Nous étudions l'impact sur les âges obtenus des incertitudes et suppositions que nous faisons en utilisant les modèles évolutifs de naines blanches, notamment l'impact des incertitudes sur la composition du cœur, de celles sur la taille de l'enveloppe d'hydrogène, des incertitudes associées à l'extrapolation des modèles évolutifs des non-DAs aux basses températures, du choix de la relation qui lie la masse initiale et la masse finale d'une étoile et de la fonction du temps de vie sur la séquence principale en fonction de sa masse. L'incertitude qui domine est celle sur la composition du cœur.

Les naines blanches présentent un grand potentiel en tant que cosmochronomètres, mais qui est pour l'instant limité par l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches. Dans un premier temps, nous allons donc chercher à contraindre le rapport carbone sur oxygène dans le cœur des naines blanches grâce à une méthode inusitée, qui utilise la fonction de luminosité observée de l'amas M67 combiné à un âge déterminé par une méthode indépendante, que l'on compare à nos fonctions de luminosité théoriques de naines blanches construites pour différentes compositions de cœur. Nos résultats sont présentés au chapitre 3.

Au chapitre 4, nous avons modélisé la fonction de luminosité observée de l'échantillon du voisinage solaire de Limoges et al. (2015) afin de déterminer l'âge du disque galactique. Nous faisons particulièrement attention à mesurer l'impact de l'incertitude de la composition du cœur des naines blanches sur l'âge déterminé.

Nous avons ensuite étudié les fonctions de luminosité de quatre amas au chapitre 5 afin de déterminer leurs âges. Nous avons mesuré les erreurs sur les âges déterminés qui découlent de l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches. Nous comparons les âges que

nous obtenons à ceux d'autres équipes pour vérifier qu'ils sont cohérents.

## 1.5 Déclaration de l'étudiant

J'ai rédigé la totalité des chapitres de cette thèse ainsi que l'annexe A et j'ai mené les travaux qui y sont présentés. J'ai également créé toutes les figures, excepté la figure 1.1 (figure 8 de l'article de Fields et al. 2016), la figure 2.2 (figure 9 de l'article de Tremblay et al. 2015), la figure 2.9 (figure 2 de Simon et al. 2013) et la figure 4.5 (figure 28 de l'article de Limoges et al. 2015). J'ai effectué et analysé plus de 1 500 séquences évolutives. Les séquences évolutives sont calculées grâce à un code évolutif créé par Gilles Fontaine et Pierre Brassard (Fontaine et al. 2001). La section 1.2 sur l'histoire de la création des séquences évolutives de naines blanches a été traduite et adaptée de la section 3.1 de la revue de littérature de Fontaine et al. (2001). De façon similaire, les sections 2.1.1 à 2.2.7, qui détaillent la structure du code évolutif ainsi que certains des résultats théoriques, sont une version traduite et adaptée de la section 3.2 de l'article de Fontaine et al. (2001, présentées dans cette thèse avec l'accord des co-auteurs). J'ai toutefois refait toutes les figures avec les nouvelles séquences évolutives que j'ai calculées.

## *Chapitre 2*

# Fonctions de luminosité théoriques de naines blanches

### 2.1 Code évolutif

Il est nécessaire de modéliser l'évolution des naines blanches au cours du temps pour construire leurs fonctions de luminosité théoriques. Le code évolutif utilisé à cette fin est une version améliorée de celui décrit par Fontaine et al. (2001). Nous allons détailler son fonctionnement ci-dessous.

#### 2.1.1 Équations d'états

Afin de modéliser le refroidissement d'une naine blanche au cours du temps, il faut tout d'abord connaître l'équation d'état pour les éléments principaux qui la constituent, soient l'hydrogène, l'hélium, le carbone et l'oxygène. Le code inclut ces données thermodynamiques sous forme de tables qui présentent l'équation d'état de l'élément en question dans le plan densité ( $\rho$ ) versus température ( $T$ ). Chaque table est composée de trois parties qui décrivent trois régions spécifiques du plan densité  $\rho$ - $T$ . La première région correspond à l'atmosphère et à la haute enveloppe superficielle des modèles à haute température. Les données thermodynamiques sont obtenues en résolvant une grille d'équations de Saha appropriées, qui incluent

une petite correction pour tenir compte de l'interaction de Coulomb. La deuxième partie correspond à la zone partiellement ionisée et partiellement dégénérée de l'étoile, ce qui couvre la région de l'enveloppe. Pour l'hydrogène et l'hélium, les données de Saumon et al. (1995) ont été utilisées. Pour ce qui est du carbone, une version améliorée de l'équation d'état de Fontaine et al. (1977) a été utilisée. L'équation d'état de l'oxygène est tirée d'Eggleton et al. (1973), c'est l'équation de Saha à laquelle s'ajoutent un terme de Coulomb et un terme de pression d'ionisation. Finalement, dans la dernière région qui correspond à un environnement complètement ionisé, ce sont les données thermodynamiques de Lamb (1974) qui ont été utilisées, hormis quelques améliorations numériques développées par Pierre Brassard et Gilles Fontaine. Le code de Lamb (1974) donne une description complète des phases solide et liquide, incluant les calculs de chaleur latente associée à la cristallisation.

### 2.1.2 Opacités

Les opacités radiatives des substances pures proviennent d'OPAL 1995 (Iglesias & Rogers 1996). Lorsque les températures sont trop basses et que les données OPAL n'existent pas, les opacités de Rosseland de l'hydrogène et de l'hélium purs ont été utilisées. Elles ont été calculées grâce à l'équation d'état utilisée dans Bergeron et al. (1995). Ces calculs prennent en compte les processus d'absorption, incluant l'opacité quasi-moléculaire d'Allard et al. (1994), ainsi qu'un nombre de collisions induites par des processus d'absorption décrites par Bergeron et al. (1995, 1997, 2001). L'opacité conductive utilisée inclut les données de Hubbard & Lampe (1969) et d'Itoh et al. (1983, 1984, 1993) pour les basses densités et celles d'Itoh & Kohyama (1993) pour les hautes densités, lesquelles couvrent les phases liquides et solides. Les données sont disponibles pour des substances pures et pour des mélanges contenant de faibles traces d'éléments lourds.

### 2.1.3 Autres données

Le diagramme de phase qui a été utilisé pour les processus de sédimentation du C/O dûs à la cristallisation est donné par Segretain & Chabrier (1993). Les coefficients de dif-

fusion employés sont ceux déterminés par Paquette et al. (1986) et l'émissivité neutrinique est donnée dans l'article d'Itoh et al. (1996). Finalement, la convection est traitée dans le cadre général de la théorie de la longueur de mélange. Cependant, les incertitudes associées au traitement théorique de la convection n'ont pas d'impact sur le taux de refroidissement des naines blanches, puisqu'au moment où la convection débute, la stratification dans la zone de convection superficielle est devenue complètement adiabatique.

La structure de base des naines blanches est comparable à celle utilisée par Wood (1995). Aucun métal n'est inclus (autre que le carbone et l'oxygène dans leur cœur). Comme dans l'étude de Wood (1995), une atmosphère grise a été utilisée comme condition limite à la surface et il y a équilibre de diffusivité dans les zones de transition H/He et He/(C/O). Il est à noter que la stratification dans le cœur des naines blanches n'est pas modélisée, c'est-à-dire que le cœur d'une naine blanche qui possède du carbone et de l'oxygène est modélisé comme un mélange uniforme de carbone et d'oxygène qui ne dépend pas de la profondeur. Les processus de diffusion n'ont pas été traités dans le modèle. Aucune réaction nucléaire résiduelle n'a été incluse, afin de pouvoir conserver la même quantité d'hydrogène tout au long de l'évolution. Le refroidissement par émission de neutrinos a été inclus, mais s'applique seulement aux luminosités élevées.

## 2.2 Résultats provenant des modèles évolutifs

### 2.2.1 État de la matière au sein d'une naine blanche

Un diagramme de phase d'un modèle représentatif du refroidissement d'une naine blanche est donné à la figure 2.1. Celle-ci illustre comment la relation qui lie la densité à la température d'un modèle d'une DA typique de  $0.6 M_{\odot}$ , possédant un cœur de carbone, change avec le refroidissement d'une température effective de 35 000 K jusqu'à une température de 2 000 K. Ici, l'échelle logarithmique met en valeur les régions de l'atmosphère et de l'enveloppe qui sont minces mais opaques.

Les courbes verticales en tirets définissent les zones de transition entre l'hydrogène et l'hélium ainsi qu'entre l'hélium et le carbone. Même si le cœur de carbone couvre seulement une petite portion de la courbe, il contient néanmoins 99% de la masse totale de la naine blanche.

Nous pouvons définir que les électrons d'un milieu sont dégénérés lorsque la valeur de leur paramètre de dégénérescence  $\eta$  est égal à zéro ( $\eta kT$  étant le potentiel chimique des électrons libres, où  $k$  est la constante de Boltzmann). Dans le graphique 2.1, la limite de dégénérescence est donnée par les cercles pleins sur chaque courbe. À droite de ceux-ci, la valeur de  $\eta$  est positive et croît avec la profondeur. La transition entre les états liquide et gazeux au sein d'une naine blanche peut être décrite de façon approximative par le paramètre de couplage de Coulomb  $\Gamma$ . Ce dernier décrit le rapport entre le potentiel énergétique de Coulomb d'un ion et de son énergie cinétique moyenne  $kT$ . La limite  $\Gamma = 1$  définit la transition entre les phases gazeuse et liquide, telle que représentée par un cercle ouvert sur chaque courbe de la figure 2.1.

Un des effets du refroidissement de la naine blanche sera de déplacer la frontière de dégénérescence et la frontière entre les milieux gazeux et liquide vers la surface de l'étoile, à un tel point que, pour les modèles les plus froids, le transport conductif et la physique des fluides deviennent pertinents pour décrire les couches atmosphériques. Nous pouvons aussi noter que, même pour les modèles les plus chauds considérés ici ( $T_{\text{eff}} = 35\,000\text{ K}$ ), le cœur entier de carbone se trouve dans un état liquide, traiter sa thermodynamique comme un gaz parfait (comme il est fait dans la théorie de Mestel par exemple) est une approximation trop simpliste. Les ions deviennent de plus en plus corrélés à mesure que le refroidissement s'opère, et à partir du moment où  $\Gamma$  a une valeur d'environ 180, la cristallisation débute (valeur dérivée de simulations Monte Carlo). Les portions où la courbe est épaisse représentent la partie cristallisée de la naine blanche, qui est présente seulement dans les trois modèles les plus froids. Cela illustre bien comment le noyau cristallisé croît du centre vers l'extérieur. Nous constatons qu'à la fin de la séquence évolutive, lorsque la naine blanche a atteint une température de 2 000 K, plus de 99% de la masse de l'étoile se trouve sous forme solide.

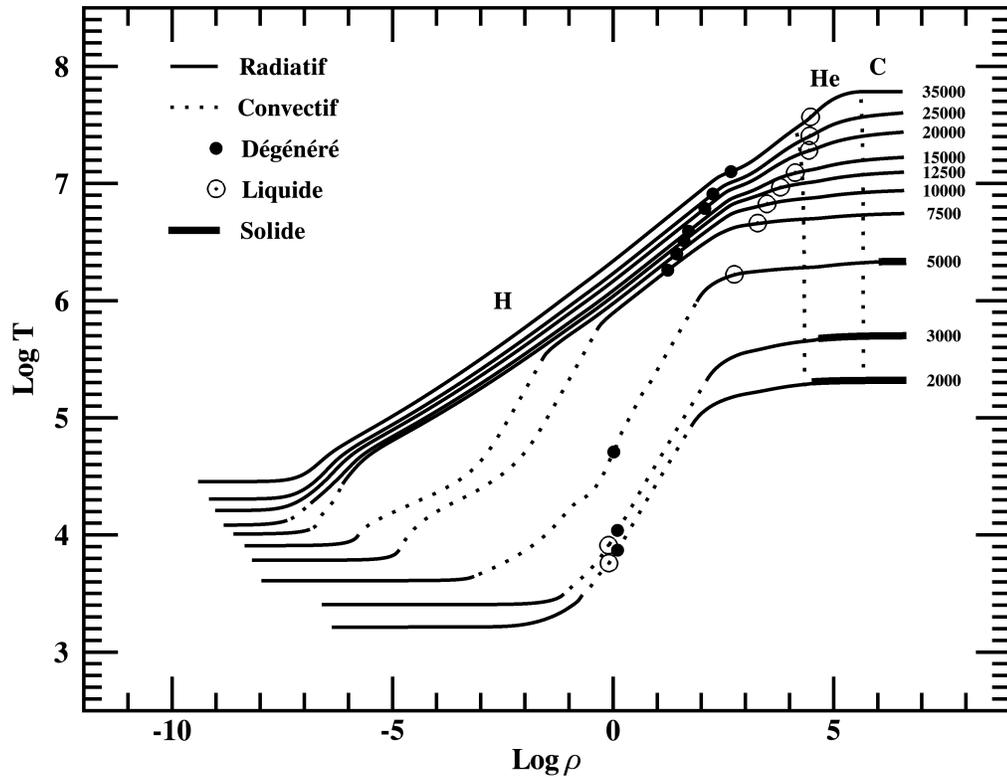


FIGURE 2.1 Structures du modèle d'une DA dans un diagramme de phase, pour dix températures effectives de 35 000 K à 2 000 K. Le modèle évolutif a été calculé pour une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$ , qui possède un cœur de carbone. La température est donnée de la surface (définie par le lieu où la profondeur optique est donnée par l'opacité de Rosseland,  $\tau_R = 10^{-8}$ ) jusqu'au centre de l'étoile, pour une température effective donnée par les chiffres à côté de chaque courbe. Les portions de courbes solides, pointillées et épaisses de chaque courbe indiquent les régions conductive-radiative, convective et cristallisée, respectivement. Le haut de la zone de convection se trouve toujours dans les couches photosphériques. Les électrons deviennent dégénérés à droite du cercle plein. Les cercles ouverts indiquent l'endroit à droite duquel les ions deviennent fortement corrélés (phase fluide). Les courbes verticales en pointillées définissent les zones de transition de la composition, soit la transition entre l'hydrogène et l'hélium à plus petite densité et entre l'hélium et le cœur de carbone à plus grande densité.

## 2.2.2 Le transport de l'énergie

Le transport de l'énergie dans une naine blanche se produit via au moins trois modes : la conduction, la radiation et la convection. Celles-ci sont décrites dans les sections 2.2.2.1 à 2.2.2.3.

### 2.2.2.1 La conduction

La conduction est le mode dominant dans le cœur dégénéré qui, comme nous l'avons vu à la figure 2.1, croît avec le refroidissement. La conduction est un mode de transport d'énergie très efficace. Cependant, le cœur de la naine blanche n'est pas strictement isotherme (voir la figure 2.1), une description précise des opacités de conduction et des phases liquide et solide est ainsi un ingrédient essentiel pour modéliser le refroidissement des naines blanches.

### 2.2.2.2 La radiation

La radiation est le transport d'énergie dominant dans l'enveloppe non-dégénérée des étoiles chaudes. Par ailleurs, les couches externes sont complètement ionisées et radiatives aux grandes températures effectives. L'évolution des naines blanches au cours du temps est complètement indépendante des couches les plus externes, qui incluent en particulier l'atmosphère. Par contre, comme il est discuté dans Tassoul et al. (1990), une connaissance précise des opacités radiatives dans l'enveloppe plus profonde est tout de même nécessaire, étant donné que la conduction et la radiation y ont des efficacités équivalentes.

### 2.2.2.3 La convection

Lors du refroidissement, l'hydrogène et l'hélium des couches superficielles se recombinaient, ce qui augmente considérablement l'opacité du milieu. En conséquence, le gradient de température augmente et la convection s'amorce car elle devient alors plus efficace que la radiation pour transporter la chaleur. Ainsi, une zone superficielle de convection se développe, comme nous pouvons le remarquer à la figure 2.1. Les zones de convection sont représentées par les segments de courbes pointillées et sont présentes dans les modèles aux températures effectives de moins de 15 000 K. La convection atmosphérique laisse alors une signature observable sur

le flux émergent et devient ainsi un ingrédient essentiel à l'interprétation du spectre observé et de ses couleurs photométriques. Cependant, la convection n'a pas d'influence significative sur l'évolution temporelle de la structure de la naine blanche jusqu'au moment critique où la zone de convection atteint le réservoir thermique qui correspond à peu près à la frontière du cœur dégénéré. Ce phénomène, nommé couplage convectif, apparaît pour une température effective entre 5 000 K et 7 500 K, pour le modèle présenté à la figure 2.1. Dès que la surface devient couplée au réservoir thermique grâce à la convection, l'évolution de la naine blanche ne dépend plus de ses couches atmosphériques, étant donné que la stratification convective devient adiabatique. Cependant, une connaissance précise de l'opacité radiative est encore essentielle afin de déterminer la taille de la zone de convection et ses limites supérieure et inférieure.

La figure 9 de l'article de Tremblay et al. (2015) illustre bien la non-dépendance entre le taux de refroidissement et la convection. Nous la présentons ici à la figure 2.2. L'intégrale de l'énergie thermique jusqu'à une certaine profondeur est représentée par la courbe en pointillés. Nous pouvons noter que l'enveloppe, délimitée par l'endroit où  $\eta = 0$ , c'est-à-dire à droite de la base du triangle bleu à la figure 2.2, ne contribue presque pas à l'énergie thermique (la courbe en pointillée forme un plateau). Cette énergie thermique est très bien isolée par la grande opacité qui existe à la base de l'enveloppe, la force de l'opacité est proportionnelle à la hauteur des triangles bleus sur cette figure. Elle est plus grande à la base de l'enveloppe puisque l'opacité y est dépendante de la densité. Le triangle bleu s'arrête là où le milieu ne contribue plus à l'opacité, c'est-à-dire dans l'enveloppe superficielle. Nous notons que la base du triangle bleu se déplace vers la surface de l'étoile, car le cœur dégénéré grandit à mesure que l'étoile se refroidit. La zone de convection qui apparaît dans les couches superficielles de l'étoile participe de manière négligeable au transport de l'énergie, qui est fortement régulé par la très grande opacité des couches plus profondes. Même avant que la convection perce la barrière d'opacité, c'est-à-dire pour un modèle à 5 585 K, l'opacité dans les couches profondes reste importante et régule encore le transport de l'énergie thermique du cœur vers la surface. Ainsi, le détail du traitement de la convection n'influence pas l'évolution de la naine blanche

au cours du temps. C'est lorsque la couche convective devient assez profonde et rentre en contact avec le cœur dégénéré que les conditions qui caractérisent l'enveloppe superficielle et les couches atmosphériques vont avoir une influence notable sur l'évolution de la naine blanche.

### 2.2.3 Tracés évolutifs dans le diagramme Hertzsprung-Russell

#### 2.2.3.1 Relation Masse-Rayon

La figure 2.3 illustre les tracés évolutifs dans le diagramme Hertzsprung-Russell (HR) de cinq DAs ayant un cœur de carbone et différentes masses, ainsi que cinq isochrones (les lignes pleines épaisses). Étant donnée la relation masse-rayon particulière qui caractérisent les étoiles dégénérées, donc les naines blanches, les étoiles les plus massives sont aussi les plus petites, et ceci est visible sur les tracés évolutifs de la figure 2.3. Ces tracés suivent presque des droites à rayons constants (avec une pente de -4 dans cette version log-log du diagramme HR). Ceci est particulièrement vrai pour les objets plus massifs et pour des faibles luminosités où la contraction gravitationnelle résiduelle a pratiquement cessé. Il est indiqué, le long de chaque tracé, trois époques importantes dans l'histoire du refroidissement des naines blanches (voir la légende).

#### 2.2.3.2 Refroidissement par neutrinos

Les cercles ouverts à haute luminosité de la figure 2.3 définissent la transition entre la phase de refroidissement par neutrinos à haute luminosité et la phase de refroidissement thermique aux plus faibles luminosités. Dans la phase évolutive précoce et rapide qui suit immédiatement la phase de nébuleuse planétaire, l'intérieur des naines blanches est assez chaud pour que des neutrinos puissent se former en grandes quantités à travers un processus impliquant l'interaction électro-faible. La vaste majorité des neutrinos s'échappent dans l'espace directement à partir des régions centrales où ils sont créés, ce qui contribue grandement à la perte d'énergie des naines blanches pour des hautes luminosités. La luminosité des neutrinos peut être jusqu'à deux fois plus grandes que la luminosité des photons. L'évolution d'une naine blanche jeune et très chaude est ainsi dominée par le refroidissement par neutrinos. Ce sont

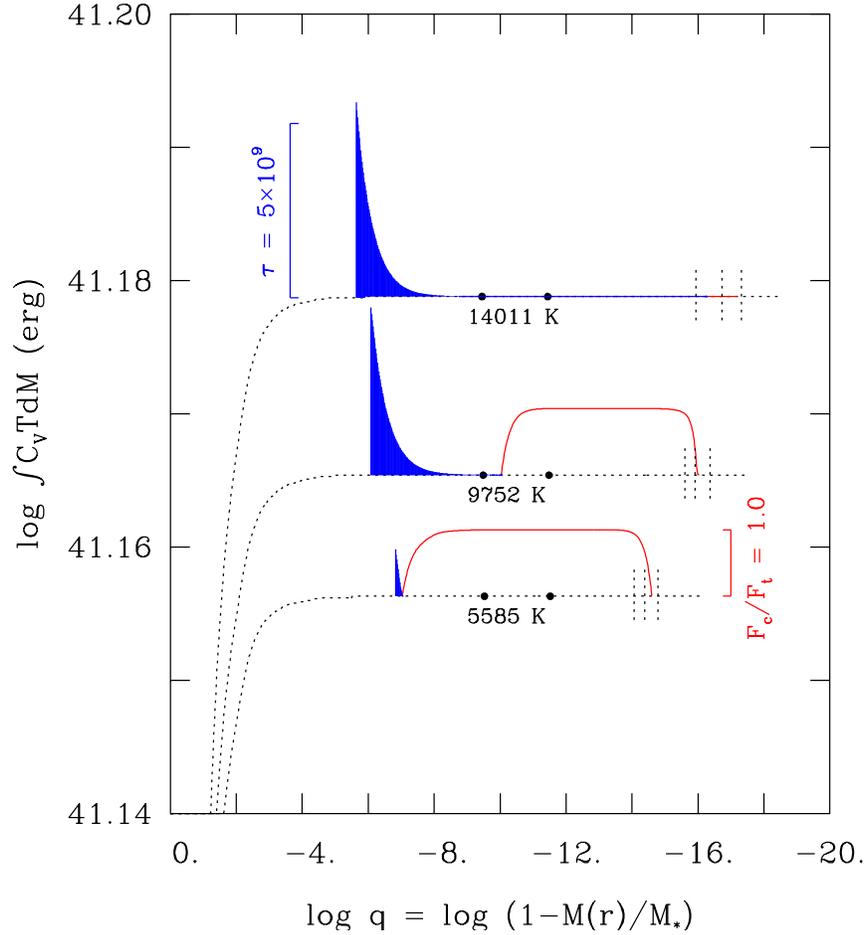


FIGURE 2.2 Figure 9 de l'article de Tremblay et al. (2015) qui présente le logarithme de l'énergie thermique disponible intégrée du centre jusqu'à une certaine valeur de  $\log(1 - m(r)/M)$ , portée en abscisse. Cette valeur est calculée pour trois époques différentes d'un modèle évolutif d'une DA de  $0.6 M_{\odot}$  composée de 100% de carbone en son cœur. Les trois époques correspondent à des températures effectives de  $T_{\text{eff}} = 14011$  K,  $9752$  K et  $5585$  K, comme identifié sur les courbes. L'endroit où  $\eta = 0$ , qui représente la frontière de dégénérescence du cœur, se trouve là où il y a une chute drastique dans les courbes, à gauche des triangles bleus. Les triangles bleus correspondent à la profondeur optique intégrée de la base de la zone de convection à l'endroit où le paramètre de dégénérescence  $\eta = 0$ , sur une échelle représentée à la courbe du haut où  $\tau_R = 5 \times 10^9$ . La rapport entre le flux convectif et le flux radiatif est donné par les courbes rouges et les deux points noirs indiquent la profondeur où la pression magnétique est égale à la pression gazeuse en supposant un champ magnétique de 10 MG (point à gauche) et de 1 MG (point à droite). Les trois couches atmosphériques correspondant à  $\tau_R = 10, 1$  et  $0.1$  sont indiquées par les trois lignes transversales, de gauche à droite.

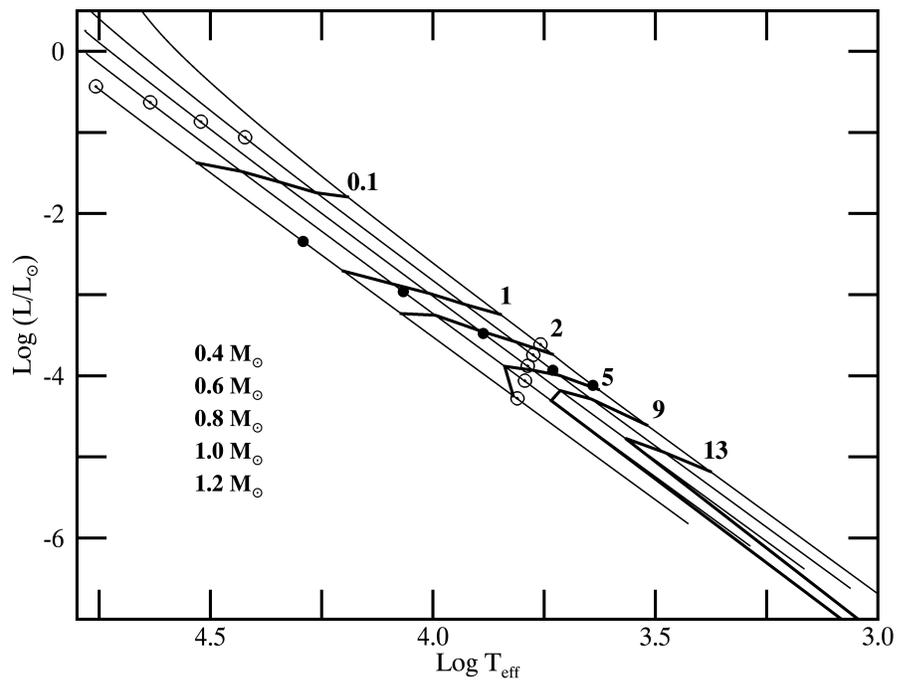


FIGURE 2.3 Tracés évolutifs de cinq de nos modèles de DA qui ont un cœur de carbone et des masses de 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 et 1.2  $M_{\odot}$ . Les lignes épaisses représentent des isochrones, le nombre à côté de chaque isochrone donne l'âge en milliards d'années. Les cercles pleins indiquent le début de la cristallisation. Les cercles à grandes luminosités représentent le moment où la luminosité radiative devient plus grande que la luminosité des neutrinos. Les cercles ouverts aux faibles luminosités correspondent au début du couplage convectif.

en grande partie eux qui déterminent le temps de refroidissement des naines blanches très chaudes. Les neutrinos s'échappent du cœur de l'étoile et il en découle une inversion de températures au cœur de l'étoile. Une telle inversion est encore visible dans le modèle à 35 000 K de la figure 2.1. Cependant, lorsque la naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$  a refroidi à une température de  $T_{\text{eff}} \sim 25\,000$  K, l'étoile a largement perdu la mémoire de sa phase de refroidissement par les neutrinos et rentre alors dans la phase de refroidissement thermique. Son évolution et sa structure subséquentes ne dépendent que des propriétés des électrons dégénérés et des ions thermiques.

### 2.2.3.3 Couplage convectif

Les cercles vides aux plus basses luminosités indiquent le moment où le couplage convectif débute, c'est-à-dire l'époque où la base de la zone de convection superficielle de l'hydrogène atteint pour la première fois la frontière supérieure du corps dégénéré (l'endroit où le paramètre de dégénérescence,  $\eta = 0$ ). À partir de ce moment, la convection affecte directement le taux de refroidissement du modèle, puisque le transport d'énergie à travers les couches isolantes de l'enveloppe devient beaucoup plus efficace que celui par transfert radiatif-convectif seulement.

### 2.2.3.4 Cristallisation

La troisième époque d'intérêt dans le refroidissement d'une naine blanche est la cristallisation, qui se produit dans le centre de la naine blanche. Le déclenchement de la cristallisation est indiqué par les cercles pleins à la figure 2.3. Du fait de leurs plus grandes masses et de leurs plus petits rayons, les naines blanches les plus massives sont aussi les plus denses, pour une température donnée. Ces dernières développent donc un cœur cristallisé plus tôt, à plus grande luminosité ou de manière équivalente, à plus grande température.

### 2.2.3.5 Naine noire

La figure 2.3 montre aussi que les modèles les plus massifs subissent une phase relativement rapide et finale de refroidissement et deviennent alors des naines noires à la fin de leur séquence évolutive, ce qui produit la forte courbure dans l'isochrone à neuf milliards d'années. Les

étoiles les plus massives atteignent plus rapidement l'état où la chaleur spécifique du régime solide plonge vers des petites valeurs. En effet, la matière sous ces conditions a perdu la plupart de sa capacité à garder son énergie thermique, le réservoir d'énergie est devenu presque vide et la naine blanche disparaît de la vue dans une phase relativement rapide, nommée le refroidissement de Debye.

### 2.2.3.6 Refroidissement en fonction de la masse de la naine blanche

La cristallisation et le refroidissement de Debye subséquent sont responsables de l'accélération de l'évolution des modèles des étoiles plus massives à des faibles luminosités. Par contre, aux plus grandes luminosités, avant que la cristallisation ait démarré mais après le refroidissement par neutrinos, un comportement plus ordinaire où une étoile plus massive prend plus de temps à refroidir qu'une étoile moins massive est illustré à la figure 2.3. Ceci est directement relié au fait que plus l'étoile est massive, plus elle possède d'ions carbone qui ont une énergie  $E=kT$  et donc plus elle possède un grand réservoir d'énergie thermique. Dans l'ensemble, les isochrones qui sont montrés à la figure 2.3 démontrent clairement que le temps de refroidissement d'une naine blanche est une fonction forte de sa luminosité (température effective) et de sa masse.

### 2.2.4 Capacité calorifique

Malgré l'utilisation généralisée du terme "refroidissement de Debye", la description thermodynamique utilisée pour modéliser l'intérieur des naines blanches est beaucoup plus sophistiquée que l'approche simple de Debye (voir par exemple les articles Lamb 1974 et Chabrier 1993). Dans ce contexte, la figure 2.4 illustre le comportement de la capacité calorifique (par gramme) au centre de cinq modèles évolutifs décrits dans le précédent diagramme HR de la figure 2.3. Chaque courbe montre la valeur de la capacité calorifique au centre ( $C_{Vc}$ ) pour un modèle donné d'une certaine masse, en fonction de sa température centrale. Ainsi, l'évolution procède de droite à gauche le long de chaque courbe. La densité centrale pour chaque modèle évolutif ne change pratiquement pas pendant l'évolution. Le cercle plein indique l'endroit où la transition entre la phase liquide et la phase solide a lieu, c'est-à-dire le moment où il y a

crystallisation. Une discontinuité dans  $C_{Vc}$ , particulièrement prononcée pour les modèles les plus massifs est associée à la transition de phase de premier ordre. Pour des température suffisamment grandes, la capacité calorifique d'un tel système simple est donnée par la loi Dulong-Petit, c'est-à-dire la valeur constante donnée par la courbe horizontale en tirets à la figure 2.4. Cependant, les effets quantiques deviennent importants aux plus basses températures, lorsque celles-ci deviennent beaucoup plus petites que la température de Debye (valeur caractéristique qui mesure la densité des ions), les mouvements thermiques des ions donnent alors un terme qui est proportionnel à  $T^3$ . Ce terme en  $T^3$  domine jusqu'à ce que la température descende à des valeurs si basses que le seul moyen que l'étoile a pour emmagasiner de l'énergie thermique est avec la contribution faible des électrons dégénérés relativistes ( $C_{Vc} \propto T$ ). Nous pouvons noter qu'il y a des différences quantitatives très grandes entre la capacité calorifique du modèle réel à  $1.2 M_{\odot}$  et celui prédit par la modèle de Debye, ce qui implique qu'un traitement détaillé de la thermodynamique du solide (et du liquide), est absolument nécessaire, comme il avait été réalisé par Lamb (1974).

### 2.2.5 Temps de refroidissement en fonction de la luminosité

Un graphique qui représente le temps de refroidissement  $t_{\text{refr}}$ , en fonction de la luminosité  $L$  met en valeur de manière encore plus évidente ces caractéristiques de l'évolution des naines blanches. À la figure 2.5, un modèle évolutif d'une naine blanche de  $1.2 M_{\odot}$  est présenté. La courbe montre clairement qu'il y a deux époques distinctes où un ralentissement dans le temps de refroidissement se produit (vers  $L/L_{\odot} \simeq 10^{-2.7}$  et  $L/L_{\odot} \simeq 10^{-4.2}$ ). Ces ralentissements sont associés aux deux événements majeurs dont nous avons discuté précédemment, à savoir la cristallisation et le couplage convectif. Ces phénomènes apparaissent dans tous les modèles, mais pour une masse typique de  $1.2 M_{\odot}$  la cristallisation et le couplage convectif émergent à des luminosités distinctes, et leurs effets peuvent donc être différenciés facilement dans la courbe de refroidissement car ils ne se chevauchent pas, ce qui n'est pas le cas pour une naine blanche de masse plus typique de  $\sim 0.6 M_{\odot}$ .

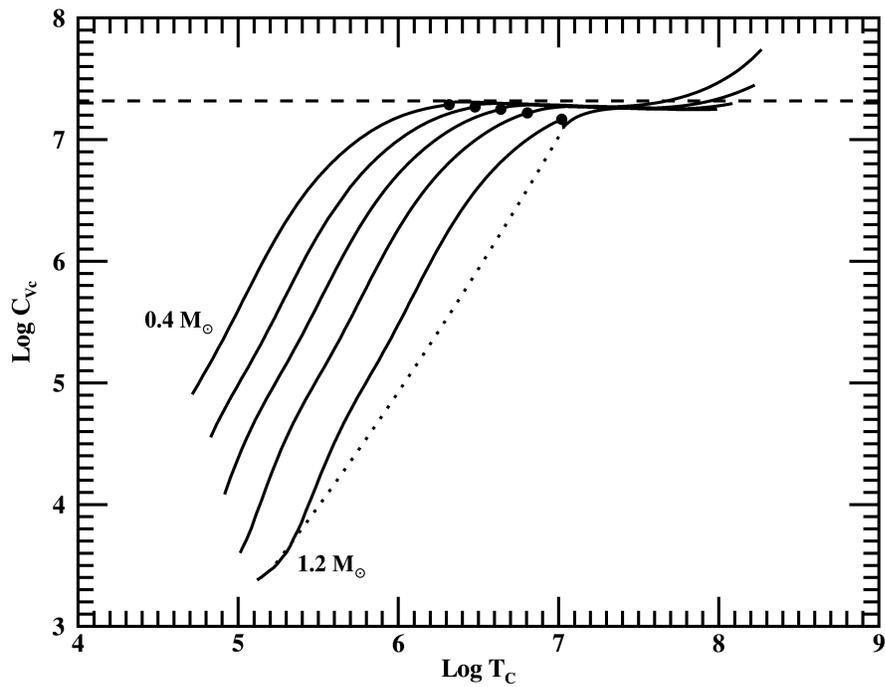


FIGURE 2.4 Les courbes en ligne pleine représentent le tracé évolutif de cinq DAs ayant un cœur de carbone et des masses  $M = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 M_{\odot}$  dans une figure représentant la capacité calorifique centrale en fonction de la température centrale. Les cercles pleins indiquent le début de la cristallisation. La ligne horizontale en tirets donne la valeur de la capacité calorifique d'un solide composé de carbone dans le régime classique. La ligne pointillée illustre le comportement de la capacité calorifique centrale en fonction de la température centrale lorsque le modèle est traité dans le cadre de la théorie de Debye des solides.

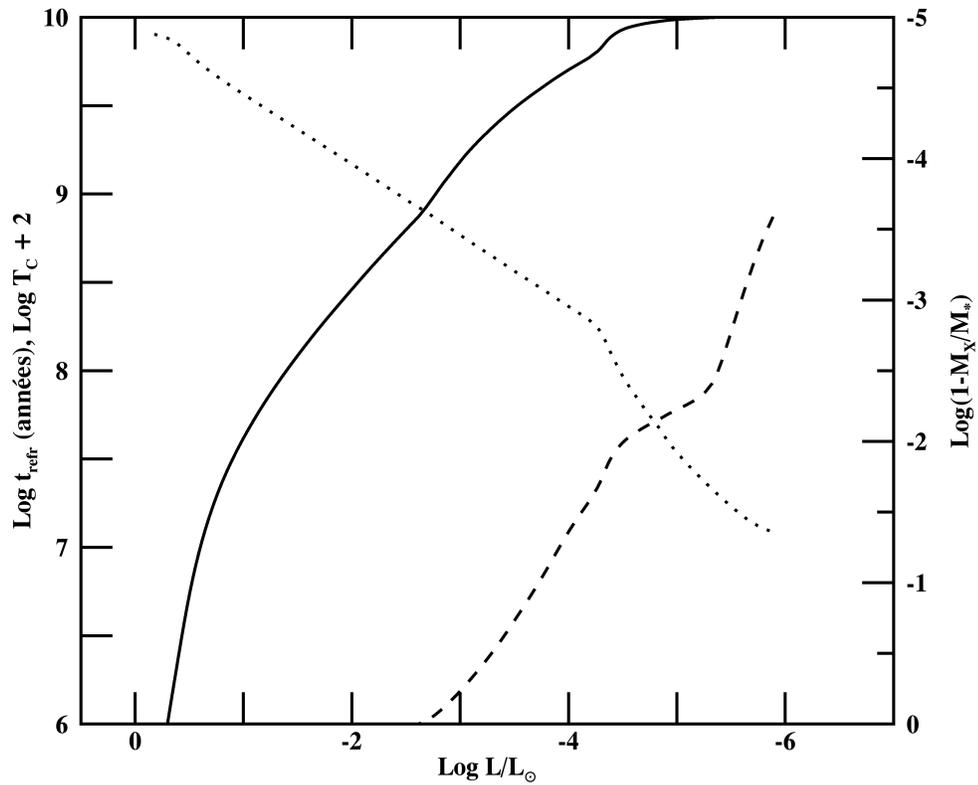


FIGURE 2.5 La courbe de refroidissement pour une naine blanche de  $1.2 M_{\odot}$  qui possède un cœur de carbone est représentée en ligne pleine ( $\log t_{\text{refr}}$  vs  $\log L/L_{\odot}$ ). La ligne en tirets suit la progression du front de cristallisation du cœur à la couche d'hydrogène. La position de ce front est représentée en fonction de la fraction de masse, qui est indiquée sur l'échelle à droite de la figure. La section en forme de plateau correspond à la transition de composition entre le carbone et l'hélium pour une valeur de  $\log(1 - M_X/M_{\star}) \simeq -4.4$ . La courbe en pointillée représente la relation  $L - T_c$ .

### 2.2.5.1 Cristallisation

Le premier ralentissement du refroidissement (ligne pleine) est corrélé avec le commencement de la cristallisation (ligne en tirets). Cette dernière montre la position de la frontière supérieure de la portion solidifiée grandissante de l'étoile. Le premier ralentissement du refroidissement est produite par la libération de la chaleur latente lors de la cristallisation, qui est une transition de phase liquide-solide de premier ordre. Naturellement, la libération de cette énergie est graduelle, elle commence immédiatement après que la cristallisation ait débuté au centre de l'étoile et continue d'être d'importance jusqu'à ce que la plupart de la masse ait solidifié. La figure 2.5, montre que l'effet net sur la courbe de refroidissement est significatif. En effet, le ralentissement du processus de refroidissement se manifeste à travers le changement de la pente de la courbe de refroidissement vers  $L/L_{\odot} \simeq 10^{-2.7}$ . Il est à noter que le code utilisé permet de suivre de manière réaliste le progrès du front de cristallisation. La portion en forme de plateau dans la courbe en tirets correspondent à un délai de la progression du front à travers une zone de transition de la composition. Les éléments plus légers étant moins chargés, il faut une température plus basse pour que la cristallisation démarre (le paramètre  $\Gamma$  est proportionnel à la charge au carré et inversement proportionnel à la température).

### 2.2.5.2 Couplage convectif

Le second délai observé dans le processus de refroidissement est de plus grande amplitude que le premier. Il est associé au changement de pente de la courbe de refroidissement pour une luminosité de  $L/L_{\odot} \simeq 10^{-4.5}$  et est dû au démarrage du couplage convectif. En effet, une bosse dans la structure de la courbe de refroidissement est étroitement corrélée avec un important changement dans la pente de la courbe en pointillée de la figure 2.5, cette dernière montre la température centrale en fonction de la luminosité. Le changement de la pente apparaît précisément quand l'enveloppe devient complètement convective, c'est-à-dire quand la convection perce pour la première fois le réservoir thermique. Avant ce moment crucial, le réservoir thermique reste relativement bien isolé par la portion inférieure de l'enveloppe non-dégénérée qui est encore radiative et opaque. Cependant, lorsque la convection perce finalement complètement cette barrière isolante, l'enveloppe au complet devient signi-

ficativement plus transparente et il y a, initialement, un excès d'énergie thermique dont la naine blanche doit se libérer. Cette libération d'énergie supplémentaire ralentit le processus de refroidissement pendant un moment, et produit un délai, une bosse, dans la courbe de refroidissement. Une fois que cet excès d'énergie est libérée, la convection a exactement l'effet inverse, c'est-à-dire qu'elle accélère le processus de refroidissement en comparaison avec des modèles qui auraient des enveloppes purement radiatives puisque le réservoir thermique est maintenant moins isolé qu'avant. Dans ce contexte, la courbe pointillée de la figure 2.5 illustre remarquablement bien la grande importance sur le refroidissement de la convection adiabatique sur les températures centrales une fois que le couplage convectif a démarré. Les modèles qui sont calculés dans le cadre d'un équilibre radiatif forcé vont prédire des valeurs de  $T_c$  significativement plus haute pour les étoiles à faibles luminosités, valeur qui vont donner une extension du segment à haute luminosité de la relation  $L - T_c$ , relation qui forme une droite avec une pente quasiment constante sur la figure.

### 2.2.6 Dérivée du temps de refroidissement en fonction de la luminosité

La figure 2.6 présente la dérivée du temps de refroidissement en fonction de la magnitude bolométrique  $M_{\text{bol}}$ , qui est un outil plus sensible pour illustrer les effets de la cristallisation et du couplage convectif sur le temps de refroidissement. À une constante près, cette quantité est la dérivée de la courbe de refroidissement, ou encore l'inverse du taux de refroidissement. Ainsi, une grande valeur de  $dt_{\text{refr}} / dM_{\text{bol}}$  correspond à un refroidissement lent et lorsque la pente de la courbe de  $dt_{\text{refr}} / dM_{\text{bol}}(L)$  est positive nous sommes en présence d'un ralentissement du taux de refroidissement. Ce choix est motivé par le fait que la dérivée  $dt_{\text{refr}} / dM_{\text{bol}}$  est directement utilisée dans le calcul de la fonction de luminosité théorique (voir l'équation 2.1 ci-après). Les courbes de la figure 2.6 illustrent le comportement de cette quantité pour 17 modèles de naines blanches de masses différentes, de  $0.4 M_{\odot}$  à  $1.2 M_{\odot}$ , par pas de  $0.05 M_{\odot}$ . Seuls les points de la courbe de  $0.4 M_{\odot}$  sont sur la bonne coordonnée, toutes les autres courbes ont été décalées de 0.5 dex pour chaque incrément de  $0.05 M_{\odot}$ , afin d'en faciliter la lecture. Le refroidissement se produit de gauche à droite et le comportement général avec la luminosité

décroissante est une augmentation initiale de  $dt_{\text{refr}} / dM_{\text{bol}}$ , culminant à un maximum associé à des processus qui retardent le refroidissement (quand le taux de refroidissement est à son minimum) et qui se poursuit par une décroissance due au refroidissement de Debye. Dans cette dernière phase, pour les étoiles plus massives, le taux de refroidissement peut atteindre des valeurs aussi grandes que celles obtenues pendant les phases à haute luminosité, pendant la courte phase de refroidissement par neutrinos.

Le premier cercle vide le long du tracé évolutif indique le démarrage de la cristallisation dans le cœur de l'étoile. Le délai dans le refroidissement de la naine blanche dû à la chaleur latente subséquentement émise se manifeste dans la structure évidente de la courbe. Quand 98% de la masse de l'étoile est cristallisée, une époque indiquée par le second cercle ouvert, la plupart de la chaleur latente a été émise. Nous confirmons grâce à la figure 2.3, que la cristallisation démarre pour des plus hautes luminosités pour les étoiles les plus massives. Le processus de libération de la chaleur latente couvre une vaste échelle de luminosités pour tous les modèles.

L'époque exacte du démarrage du couplage convectif est indiqué sur chaque courbe par le cercle plein qui précède immédiatement la structure associée à la soudaine disponibilité de l'énergie du cœur de la naine blanche. Le symbole identifie le modèle le long de la séquence pour lequel le bas de la zone de convection superficielle de l'hydrogène a atteint pour la première fois la limite supérieure du cœur dégénéré. En contraste avec la cristallisation, le délai du refroidissement associé au perçage du réservoir thermique par la convection se produit à des plus hautes luminosités pour les étoiles les moins massives et se produit sur une échelle de luminosités beaucoup plus petite. Ce qui produit aussi une structure dans la courbe de  $dt_{\text{refr}} / dM_{\text{bol}}$  versus  $L$  qui est généralement plus grande que celle produite par la libération de la chaleur latente. À la figure 2.7 les courbes de  $dt_{\text{refr}} / dM_{\text{bol}}$  sont mises en graphique et le modèle évolutif de l'étoile la plus massive est représentée en rouge et celui de la moins massive en noir. Nous voyons ainsi directement que le processus de libération de la chaleur latente produit un effet plus petit sur la courbe de refroidissement que celui dû au couplage convectif.

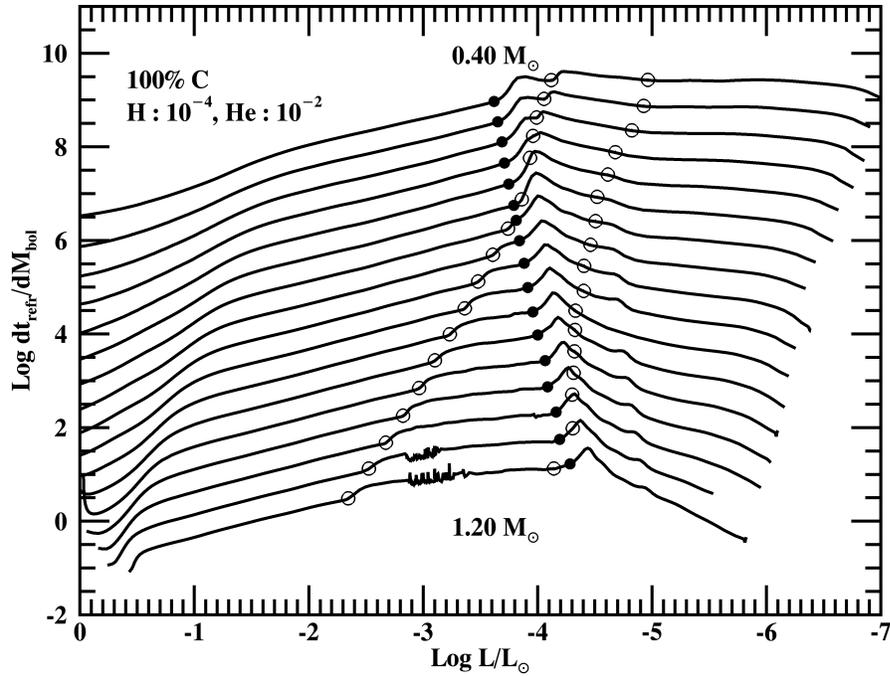


FIGURE 2.6 Tracés de la dérivée de la courbe de refroidissement (à une constante près) en fonction de la luminosité pour 17 séquences évolutives de naines blanches qui possèdent un cœur de carbone et des masses entre  $0.40 M_{\odot}$  et  $1.2 M_{\odot}$ , par pas de  $0.05 M_{\odot}$  (du haut vers le bas). Les premiers cercles ouverts aux grandes luminosités correspondent au démarrage de la cristallisation. Seuls les points de la courbe de  $0.4 M_{\odot}$  sont sur la bonne coordonnée, toutes les autres courbes ont été décalées de  $0.5 \text{ dex}$  pour chaque incrément de  $0.05 M_{\odot}$ , afin d'en faciliter la lecture. Les seconds cercles ouverts indiquent le moment où 98% de la masse de l'étoile est cristallisée. Les cercles pleins indiquent le démarrage du couplage convectif. La séquence à  $0.40 M_{\odot}$  est la seule qui est à la bonne échelle verticale, les autres sont décalées vers le bas afin d'en faciliter la lecture. Il est à noter que les structures présentes à  $\log L/L_{\odot} \approx -3$  pour les naines blanches de masses  $M = 1.10, 1.15$  et  $1.20 M_{\odot}$  sont dues à des difficultés numériques du code évolutif et non à une instabilité dans leur taux de refroidissement.

Par contre, il se produit sur une échelle de luminosités beaucoup plus restreinte, qui dépend peu de la masse de la naine blanche.

### 2.2.7 Fonctions de luminosité

Une des étapes essentielles pour faire de la cosmochronologie de naines blanches est l'évaluation de la fonction de luminosité théorique, que nous allons calculer maintenant. La fonction de luminosité différentielle d'une population de naines blanches dans un système stellaire ayant l'âge  $t$ , c'est-à-dire, le nombre attendu de naines blanches ayant une luminosité de  $L$  dans le système, par unité de magnitude bolométrique, par parsec au cube est donnée par (voir Noh & Scalo 1990) :

$$\int_{M_s}^{M_i} \frac{dt_{\text{refr}}}{dM_{\text{bol}}}(L, M[m_{\text{nb}}]) * \Psi[t - t_{\text{refr}}(L, M[m_{\text{nb}}]) - t_{\text{sp}}(M)] * \Phi(M) dM, \quad (2.1)$$

où l'intégration est effectuée sur la masse de l'étoile parente sur la séquence principale de la naine blanche,  $M$ . La masse supérieure,  $M_s$  est donnée par la masse limite que peut avoir une étoile sur la séquence principale et malgré tout devenir une naine blanche et non une étoile à neutrons. La limite inférieure,  $M_i$ , est une fonction de la luminosité et est obtenue en respectant la condition :

$$t_{\text{refr}}(L, M_i) + t_{\text{sp}}(M_i) = t, \quad (2.2)$$

où  $t_{\text{refr}}(L, M)$  est le temps de refroidissement jusqu'à la luminosité  $L$  de la naine blanche dont l'étoile parente sur la séquence principale avait une masse de  $M$ ,  $t_{\text{sp}}(M)$  est le temps de vie sur la séquence principale de ce progéniteur et  $M[m_{\text{nb}}]$  est la relation de masse initiale - masse finale qui lie une naine blanche de masse  $m_{\text{nb}}$  à son progéniteur sur la séquence principale de masse  $M$ . L'égalité 2.2 reflète le fait que la naine blanche la plus vieille ayant la luminosité  $L$  a un âge total égal à l'âge du système stellaire lui-même. Les progéniteurs qui ont une masse plus petite que  $M_i$  n'ont pas encore eu le temps de se refroidir jusqu'à une luminosité  $L$  dans un temps  $t$ . Dans l'équation 2.1,  $dt_{\text{refr}}/dM_{\text{bol}}$  est l'inverse du taux de refroidissement, d'ailleurs représenté à la figure 2.6,  $\Psi$  est le taux de formation stellaire qui dépend du temps et  $\Phi$  est la fonction de masse initiale. Comme il est approprié lorsqu'il s'agit d'une discussion

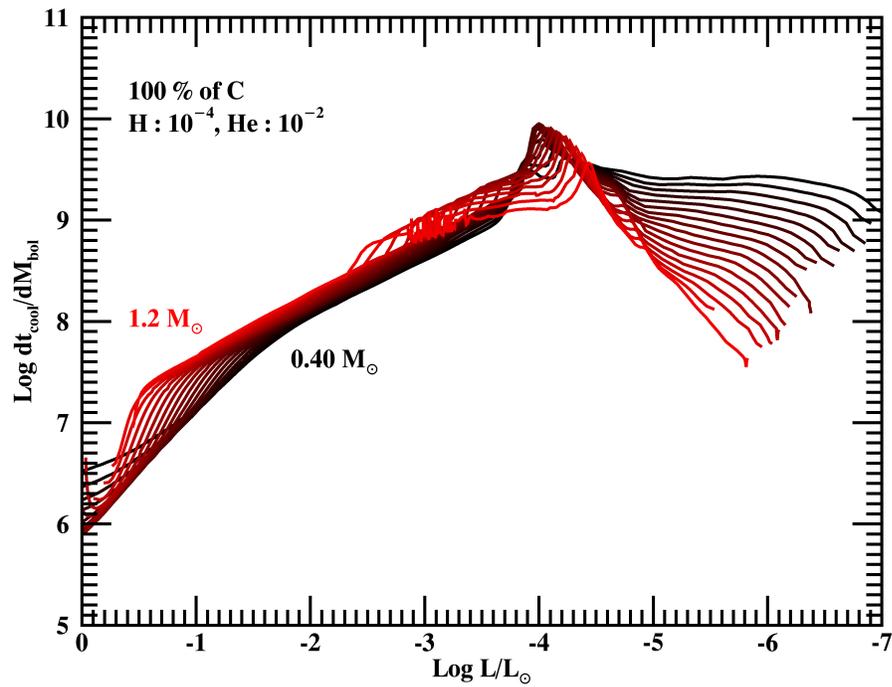


FIGURE 2.7 Tracés de la dérivée de la courbe de refroidissement (à une constante près) en fonction de la luminosité pour 17 séquences évolutives de naines blanches qui possèdent un cœur de carbone et des masses entre  $0.40 M_{\odot}$  et  $1.2 M_{\odot}$ , par pas de  $0.05 M_{\odot}$  (du noir vers le rouge). Il est à noter que les structures présentes à  $\log L/L_{\odot} \approx -3$  pour les naines blanches de masses  $M = 1.10, 1.15$  et  $1.20 M_{\odot}$  sont dues à des difficultés numériques du code évolutif et non à une instabilité dans leur taux de refroidissement.

concernant les populations de naines blanches du disque galactique, nous avons supposé un taux de formation stellaire constant,  $\Psi = \text{constante}$ . De plus, nous avons adopté un taux de formation stellaire classique de type Salpeter,  $\Phi = M^{-2.35}$ . La relation masse initiale-masse finale adoptée est celle de Kalirai (2013),  $M = 9.17 * m_{\text{nb}} - 3.93$ . Nous avons utilisé les résultats de Bertelli et al. (2008, 2009) pour déterminer la relation liant le temps de vie sur la séquence principale,  $t_{\text{sp}}$ , en fonction de la masse de l'étoile sur la séquence principale,  $M$ , c'est-à-dire,  $\log t_{\text{sp}} = 10.11 - 3.33 \log M + 0.59 (\log M)^2 + 0.09 (\log M)^3$ , en milliards d'années. Dans ces expressions, les masses  $M$  et  $m_{\text{nb}}$  sont exprimées en unités solaires. Nous avons calculé des séquences évolutives pour naines blanches jusqu'à une masse maximale de  $1.2 M_{\odot}$ , ce qui donne une masse sur la séquence principale de  $M_s = 7.083 M_{\odot}$ , en utilisant la relation masse initiale-masse finale adoptée. Finalement, nous avons utilisé une grille de nos séquences évolutives pour générer  $dt_{\text{refr}} / dM_{\text{bol}}$ .

Des exemples de fonctions de luminosité sont mis en graphique à la figure 2.8. Chaque courbe donne la dépendance du nombre de naines blanches en fonction de la luminosité,  $n(L)$ , pour chaque âge supposé du système stellaire d'intérêt (le disque galactique dans le cas présent). Les âges considérés vont de 2 à 13 milliards d'années, par pas d'un milliard d'années. Il est à noter que pour des grandes luminosités, la forme de la fonction de luminosité n'est pas sensible à l'âge du système. Il est donc courant de normaliser la fonction de luminosité théorique grâce à un point observationnel. En l'absence de tel point observationnel, nous avons normalisé toutes les fonctions de luminosité de la figure 2.8 grâce à un point arbitraire, soit  $L/L_{\odot} = 10^{-2}$  et  $n = 10^{-3.48}$  sur la branche ascendante. La figure montre qu'il y a de plus en plus de naines blanches à mesure que la luminosité décroît, jusqu'à ce que les étoiles les moins massives, plus nombreuses, commencent à diminuer en nombre parce qu'elles n'ont pas eu le temps de se refroidir jusqu'à une telle luminosité. Pour les échelles d'âges considérés dans notre exemple, cette diminution se produit à une luminosité de  $L/L_{\odot} \sim 10^{-4}$ . Le maximum de densité des naines blanches est ensuite suivi, à des luminosités plus faibles, par une chute drastique du nombre de naines blanches dans la fonction de luminosité. Contrairement à la branche ascendante, la forme de cette branche descendante est sensible à l'âge du système

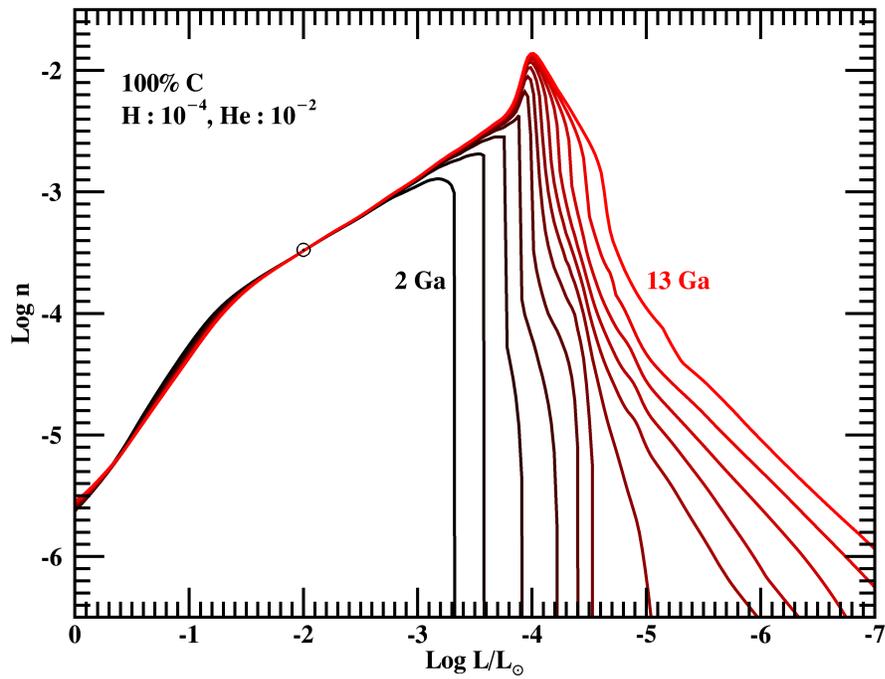


FIGURE 2.8 Exemples de fonctions de luminosité calculées pour le disque galactique. L'âge supposé du disque varie entre 2 et 13 milliards d'années, par pas d'un milliard d'années. Les courbes sont normalisées grâce à un point arbitraire donné par le cercle ouvert sur la figure. Sur la branche ascendante, jusqu'à une luminosité d'environ  $\log L/L_{\odot} \approx -3$ , il n'y a quasiment aucune dépendance sur l'âge du disque, mais une très forte dépendance à plus basse luminosité, sur la branche descendante.

stellaire, donc, c'est elle qui peut nous permettre de déduire les âges de diverses populations d'étoiles. La branche descendante à basse luminosité est peuplée des naines blanches plus massives, moins nombreuses et plus vieilles au sein d'une population en particulier. En effet, à cause du phénomène de refroidissement de Debye, les étoiles les plus massives atteignent des basses luminosités plus rapidement que les naines blanches moins massives et plus représentatives de la population de naines blanches.

Un trait intéressant des fonctions de luminosité à la figure 2.8 est la structure en pic centrée autour de  $L/L_{\odot} \sim 10^{-4}$  et qui correspond à un empilement de naines blanches plus important que ce qu'une simple extrapolation de la pente de la branche ascendante en-dessous de  $L/L_{\odot} \sim 10^{-3.7}$  aurait donné. De la discussion que nous avons eu à la figure 2.6 ci-dessus, il est clair que cette particularité est la signature combinée du couplage convectif et de la cristallisation. Cependant, la contribution de cette dernière est beaucoup moins importante que celle du couplage convectif, puisque la libération de la chaleur latente s'opère sur une échelle relativement grande de luminosités, et par conséquent, ses effets tendent à être moyennés sur un plus grand intervalle de luminosité. Nous remarquons donc que le couplage convectif laisse une empreinte plus forte sur la fonction de luminosité que celle laissée par la cristallisation. Cependant, la cristallisation a quand même des effets sur la queue de la courbe aux basses luminosités.

### 2.2.8 Masses des naines blanches qui contribuent aux fonctions de luminosité

Il est régulièrement approximé que les naines blanches qui contribuent à une fonction de luminosité ont une masse moyenne de  $0.6 M_{\odot}$ , cependant cette approximation n'est pas valide pour des faibles luminosités, comme nous pouvons le constater à la figure 2.9. Par exemple, pour une luminosité inférieure à  $L/L_{\odot} \sim 10^{-3.75}$ , la moyenne de la masse des naines blanches qui contribuent à l'intégrale de l'équation 2.1 est de plus de  $0.7 M_{\odot}$ .

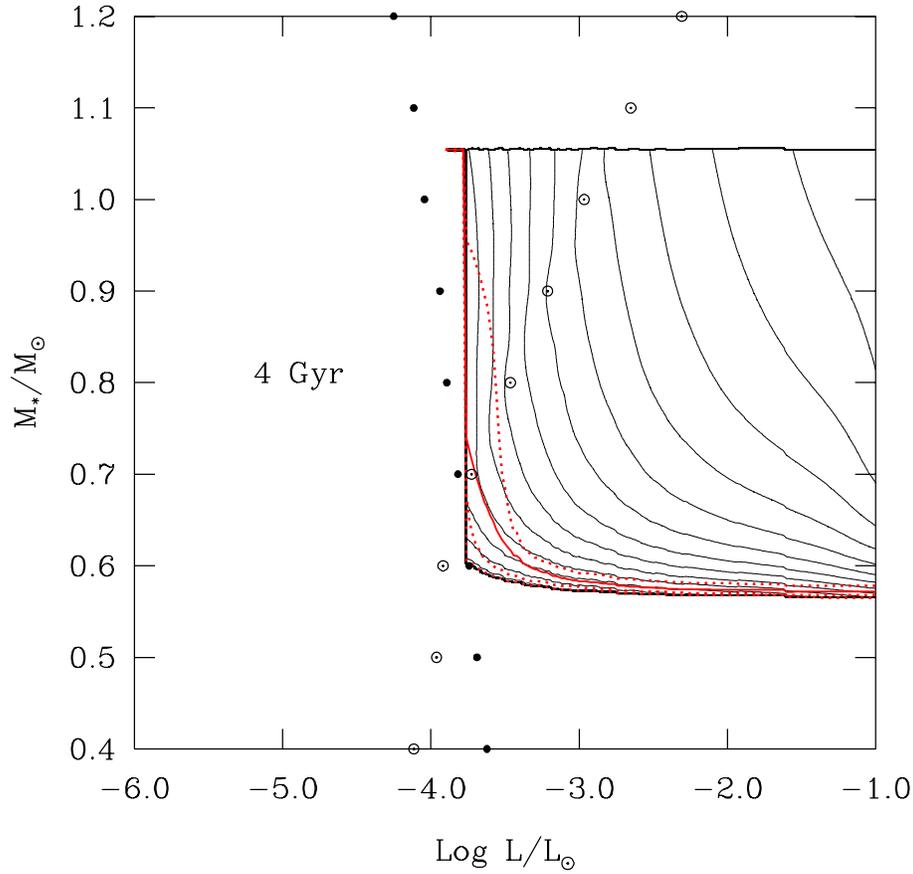


FIGURE 2.9 Contours de l'intégrand constituant l'intégrale de l'équation 2.1. Ils représentent le nombre de naines blanches qui ont une certaine masse qui contribuent à la fonction de luminosité. La première courbe à partir de la droite en pointillées représente l'endroit où 10% des naine blanches les plus légères contribuent à l'intégrale de l'équation 2.1, en d'autres termes, les 10% des naines blanches les plus légères qui contribuent à l'équation 2.1 sont sous cette courbe. La deuxième courbe en pointillées représente le contour où 50% des naines blanches contribuent à l'intégrale, la troisième courbe représente celle où 90% y contribuent. La courbe rouge correspond à la moyenne de la masse des naines blanches qui contribuent à l'intégrand, pour une certaine luminosité. Ces résultats ne dépendent pas de la cristallisation (désignée par les cercles ouverts), ou du couplage convectif (indiqué par les points) pour cet âge en particulier. Nous pouvons donc voir qu'en première approximation les naines blanches qui contribuent à une certaine luminosité ont une masse de  $0.6 M_{\odot}$  mais ça n'est pas le cas pour les luminosités plus basses. Figure adaptée de Simon et al. (2013).

### 2.2.9 Naines blanches qui ont une atmosphère d'hélium

Environ 25% des naines blanches ne possèdent pas d'hydrogène visible dans leur atmosphère (ces dernières sont appelées des non-DAs, voir par exemple l'étude du voisinage solaire de Limoges et al. 2015 pour le rapport DAs/non-DAs). Puisque les naines blanches ont une forte gravité de surface, il n'y a donc pas, ou peu, d'hydrogène dans ces objets, car s'il était présent, il resterait à la surface et serait ainsi détectable. Pour simuler leur évolution, nous avons choisi des naines blanches qui possèdent une couche d'hélium épaisse de  $10^{-2}$  fois la masse totale de l'étoile et aucun hydrogène.

#### 2.2.9.1 Diagramme de phase

Un diagramme de phase d'un modèle représentatif du refroidissement d'une non-DA possédant un cœur de carbone et de  $0.6 M_{\odot}$  est donné à la figure 2.10. Dix modèles qui ont des températures entre 35 000 K et 5 000 K sont mis en graphique, l'échelle logarithmique met en valeur les régions de l'atmosphère et de l'enveloppe qui sont minces mais opaques. La courbe verticale en pointillés définit la zone de transition entre l'hélium et le carbone. Les portions des courbes en traits pointillés représentent des régions où la convection est le mode de transfert d'énergie dominant. La limite de dégénérescence est donnée par les cercles pleins sur chaque courbe. On remarque que le couplage convectif apparaît beaucoup plus tôt pour les non-DAs (entre 20 000 K et 15 000 K) que pour les DAs (entre 7 500 K et 5 000 K, voir la figure 2.1 pour le diagramme de phase des DAs). Le cercle ouvert sur chaque courbe représente la transition entre les phases gazeuse et liquide. Un des effets du refroidissement de la naine blanche sera de déplacer vers la surface de l'étoile la frontière de dégénérescence et la frontière entre les milieux gazeux. Les portions où la courbe est épaisse représentent la partie cristallisée de la naine blanche, qui est présente seulement dans les deux modèles les plus froids.

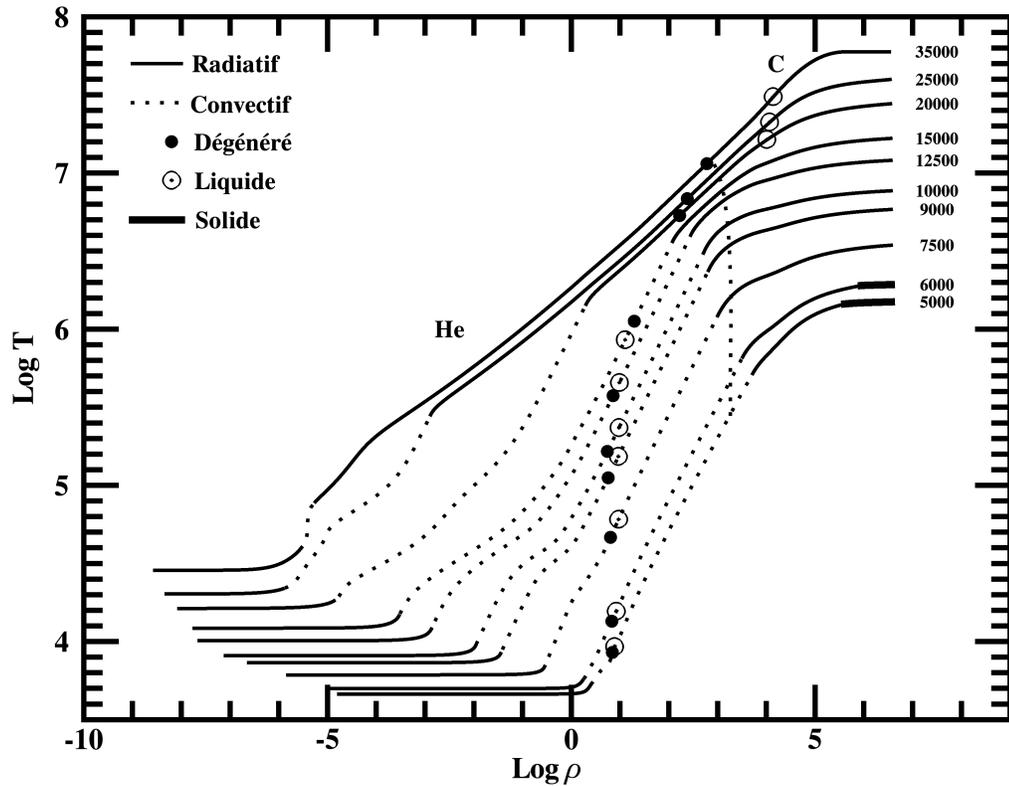


FIGURE 2.10 Structures du modèle d'une non-DA dans un diagramme de phase, pour plusieurs températures effectives. Ce modèle a été calculé pour une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$ , qui possède un cœur de carbone et qui n'a pas d'hydrogène dans son enveloppe. Chaque courbe correspond à la distribution de la densité versus la température. La température va de la surface (définie par le lieu où la profondeur optique est donnée par l'opacité de Rosseland  $\tau_R = 10^{-8}$ ) jusqu'au centre de l'étoile, pour une température effective donnée par les chiffres à côté de chaque courbe. Les portions solides, pointillées et épaisses de chaque courbe indiquent les régions conductive-radiative, convective et cristallisée, respectivement. Le haut de la zone de convection se trouve toujours dans les couches photosphériques. Les électrons deviennent dégénérés à droite du cercle plein. Les cercles ouverts indiquent l'endroit à droite duquel les ions deviennent fortement corrélés (phase fluide). La courbe verticale en pointillée définit la zone de transition de la composition, soit la transition entre l'hélium et le cœur de carbone.

### 2.2.9.2 Dérivée du temps de refroidissement en fonction de la luminosité

La principale difficulté rencontrée pour modéliser l'évolution des naines blanches riches en hélium et qui ne possèdent pas d'hydrogène dans leur atmosphère est que l'opacité de l'hélium n'est pas connue pour les températures inférieures à environ 5 000 K, température effective atteinte pour un âge d'environ 4 milliards d'années pour une naine blanche dont la masse est de  $0.6 M_{\odot}$ . Les calculs évolutifs s'arrêtent lorsque l'opacité de l'hélium n'est plus connu (voir la figure 2.11). Construire une fonction de luminosité incluant les non-DAs nécessite donc de faire une extrapolation du comportement de leur refroidissement aux plus basses températures, d'autant plus que c'est aux faibles luminosités, donc aux faibles températures, que les fonctions de luminosité sont sensibles à l'âge du milieu.

### 2.2.9.3 Extrapolation basée sur la pente des naines blanches DAs

Lorsque le cœur de la naine blanche est cristallisée et qu'il y a couplage convectif, le taux de refroidissement ne dépend plus des couches externes de la naine blanche et est presque linéaire (voir la figure 2.6). Une naine blanche DA et une naine blanche non-DA vont alors refroidir avec le même taux de refroidissement car la seule différence entre les deux types de naines blanches est la quantité d'hydrogène à leur surface. C'est pourquoi nous avons extrapolé les séquences évolutives des naines blanches non-DAs aux basses températures en utilisant les séquences évolutives des DAs ayant une même masse et une même composition de cœur. Les courbes de refroidissement des DAs à la figure 2.6 indiquent que le ralentissement passé du taux de refroidissement dû au couplage convectif se termine pour une luminosité d'environ  $\log L/L_{\odot} \approx -4.3$ . Cependant, c'est seulement pour une luminosité inférieure à  $\log L/L_{\odot} = -5$  que 98% de la masse de l'étoile est cristallisée, peu importe la masse de la naine blanche. Ainsi, pour extrapoler le taux de refroidissement des non-DAs, nous avons joint la séquence évolutive à partir d'une luminosité de  $\log L/L_{\odot} = -5$  de la DA de même masse et même composition de cœur à la séquence évolutive de la non-DA correspondante. La principale erreur due à cette extrapolation vient du fait que les séquences évolutives de non-DAs s'interrompent avant que le cœur de la naine blanche ait totalement cristallisé (voir

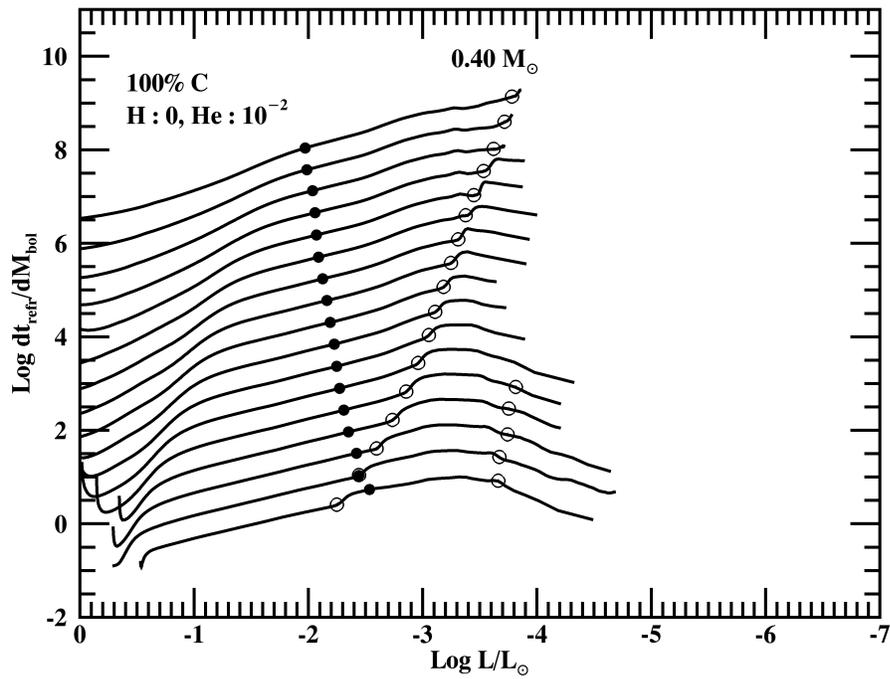


FIGURE 2.11 Tracés de la dérivée de la courbe de refroidissement (à une constante près) en fonction de la luminosité pour 17 séquences évolutives de naines blanches qui ne possèdent pas d'hydrogène et qui ont un cœur de carbone, pour différentes masses (de  $0.40 M_{\odot}$  à  $1.2 M_{\odot}$ , par pas de  $0.05 M_{\odot}$ ). Les séquences évolutives s'interrompent pour une température d'environ  $T = 5500$  K. La séquence à  $0.40 M_{\odot}$  est la seule qui est à la bonne échelle verticale, les autres sont décalées vers le bas afin d'en faciliter la lecture.

la figure 2.11). Lorsque l'on joint à la séquence évolutive interrompue de la non-DA la séquence évolutive de la DA, nous ignorons l'effet de la cristallisation du reste du cœur et par conséquent nous accélérons légèrement le refroidissement des non-DAs en utilisant cette extrapolation. Cependant, l'erreur causée par l'extrapolation se trouve "diluée" par le fait que les naines blanches à atmosphère d'hélium ne représentent qu'environ 25% de la population totale de naines blanches, rapport que nous respectons lorsque nous contruisons une fonction de luminosité théorique d'un échantillon complet de naines blanches.

À la figure 2.12 est mis en graphique les courbes de  $dt_{\text{refr}} / dM_{\text{bol}}$  extrapolées en fonction de  $\log L / L_{\odot}$ . Le point rouge représente la luminosité à partir de laquelle nous avons joint la séquence évolutive de DA à celle de non-DA. Nous avons extrapolé linéairement aux plus basses luminosités (à droite des points bleus).

Les fonctions de luminosité théoriques, construites à partir des non-DAs sont présentées à la figure 2.13. Nous avons construit ces fonctions de luminosité dans un intérêt purement théorique, car il n'existe pas d'échantillons de naines blanches composés uniquement de non-DAs.

### 2.2.10 Évolution des DAs comparées à celle des non-DAs

Les courbes de refroidissement d'une DA et d'une non-DA de  $0.6 M_{\odot}$  ainsi que d'une DA et d'une non-DA de  $1.2 M_{\odot}$  sont présentées à la figure 2.14. Au-delà de quelques millions d'années, les DAs de  $0.6 M_{\odot}$  se refroidissent plus rapidement que les non-DAs de mêmes masses. Pour des étoiles plus massives, de  $1.2 M_{\odot}$ , les deux types d'étoiles refroidissent presque au même taux pendant environ 3 milliards d'années, après quoi les étoiles non-DAs refroidissent plus rapidement, ceci est expliqué par les époques où la cristallisation et le couplage convectif démarrent.

À la figure 2.15 où nous comparons les dérivées des courbes de refroidissement en fonction

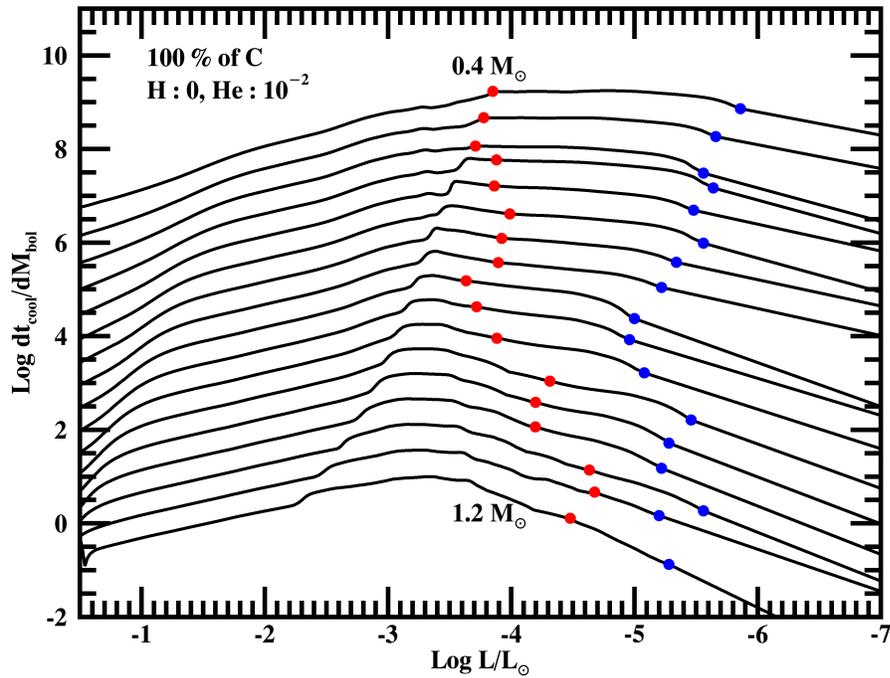


FIGURE 2.12 Tracés de la dérivée de la courbe de refroidissement en fonction de la luminosité pour des non-DAs, extrapolée aux basses températures en utilisant les séquences évolutives des DAs. Les points rouges représentent l'endroit où les séquences évolutives des non-DAs se sont interrompues et à partir duquel on a joint la fin des séquences évolutives des DAs (nous avons pris les points des séquences évolutives des DAs ayant une luminosité  $\log L/L_{\odot} < -5$ ). Nous avons utilisé les séquences évolutives des DAs de même masse et de même composition de cœur que les non-DAs auxquelles nous les avons jointes. Les points bleus correspondent aux luminosités à partir desquelles les séquences évolutives des DAs, qui ont été jointes à celles des non-DAs, s'interrompent. Nous avons ensuite fait une extrapolation linéaire aux basses luminosités en utilisant les paramètres de la pente des derniers points des séquences évolutives des DAs qui a été jointes. Les 17 séquences évolutives de naines blanches ne possèdent pas d'hydrogène et ont un cœur de carbone, elles couvrent les masses entre  $0.40 M_{\odot}$  et  $1.2 M_{\odot}$ , par pas de  $0.05 M_{\odot}$ . La séquence à  $0.40 M_{\odot}$  est la seule qui est à la bonne échelle verticale, les autres sont décalées vers le bas afin d'en faciliter la lecture.

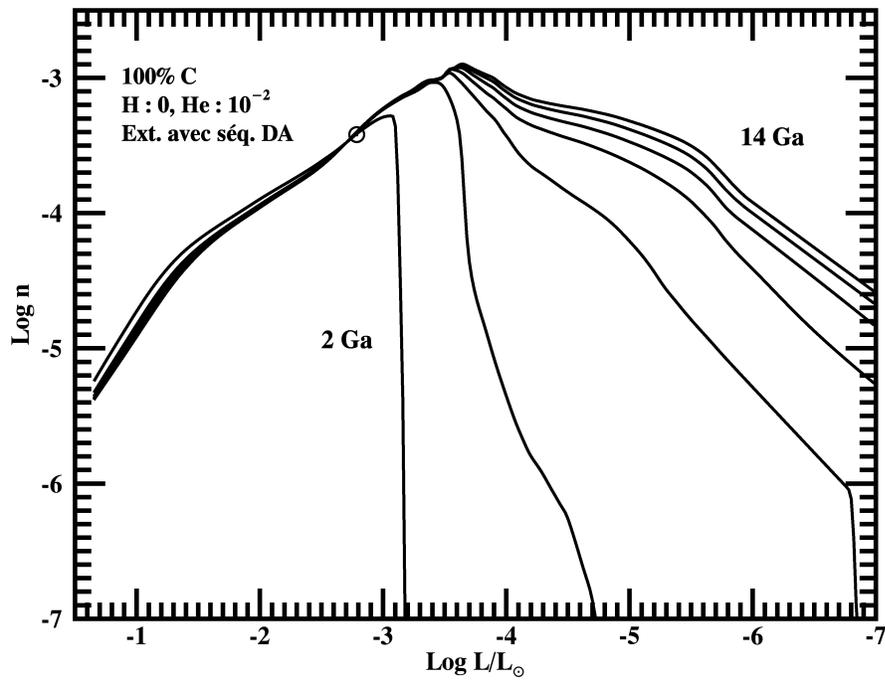


FIGURE 2.13 Fonctions de luminosité théoriques des non-DAs, construites à partir des séquences évolutives extrapolées des naines blanches ayant une atmosphère d'hélium.

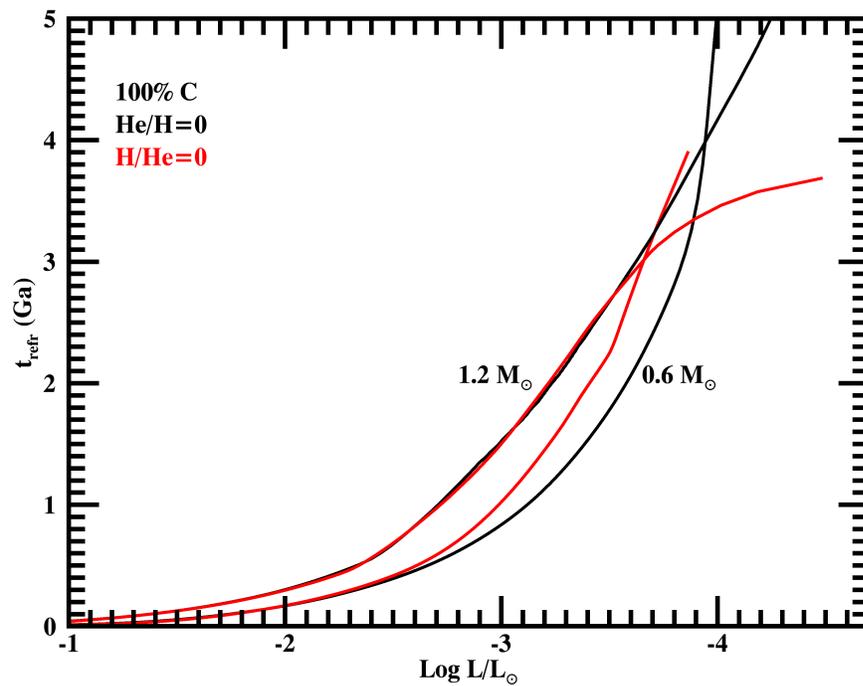


FIGURE 2.14 Courbes de refroidissement de naines blanches DAs (en noir) et de non-DAs (en rouge), pour deux différentes masses :  $0.6 M_{\odot}$  et  $1.2 M_{\odot}$ . Leur cœur est composé de 100% de carbone. La courbe de refroidissement des DAs va bien au-delà de  $\log L/L_{\odot} = -4.7$  (voir la figure 2.5), mais puisque les courbes de refroidissement des non-DAs s'interrompent à beaucoup plus faible luminosité nous avons donc zoomé le graphique entre  $\log L/L_{\odot} = -1$  et  $\log L/L_{\odot} = -4.7$ .

de la luminosité de DAs et de non-DAs, nous constatons que le couplage convectif commence beaucoup plus tôt pour les non-DAs que pour les DAs. Ceci explique pourquoi l'étoile DA de  $0.6 M_{\odot}$  se refroidit plus rapidement à partir d'une luminosité de  $\text{Log } L/L_{\odot} = -2.5$  que l'étoile non-DA, correspondant au moment où le ralentissement du refroidissement dû au couplage convectif dans les non-DAs est le plus important (voir la figure 2.15). Cependant, nous observons que le couplage convectif a un impact moins important sur le taux de refroidissement pour les non-DAs que pour les DAs.

Le démarrage de la cristallisation du cœur se produit aussi plus tôt pour les non-DAs que pour les DAs et le front de cristallisation se déplace plus rapidement. Pour les étoiles les plus massives, nous remarquons que lorsque 98% de l'étoile est cristallisée, l'inverse du taux de refroidissement plonge et l'étoile entre dans le régime de Debye, discuté à la section 2.2.3.5. La naine blanche a alors presque vidé son réservoir d'énergie, ceci explique que la non-DA de  $1.2 M_{\odot}$  de la figure 2.2.10 refroidit ainsi beaucoup plus rapidement que la DA de  $0.6 M_{\odot}$  à partir d'une luminosité de  $\log L/L_{\odot} = -3.8$ , car seulement les premières ont atteint le régime de Debye à cette luminosité.

Même si nous pouvons voir la présence de deux bosses distinctes dans la fonction de luminosité des non-DAs, la première (due au démarrage du couplage convectif) a une amplitude bien moindre que pour les DAs, car ce phénomène a moins d'impact sur le refroidissement des non-DAs que sur celui des DAs (voir la figure 2.15). La deuxième bosse dans les fonctions de luminosité des non-DAs est due au démarrage de la cristallisation, mais son amplitude est amoindrie car les séquences évolutives s'interrompent avant que le cœur ait complètement cristallisé et on y joint les séquences évolutives de DAs après que ces dernières ait cristallisé. Une partie de l'effet de la cristallisation du cœur des non-DAs n'est ainsi pas pris en compte dans leur modélisation et dans le calcul des fonctions de luminosité théoriques.

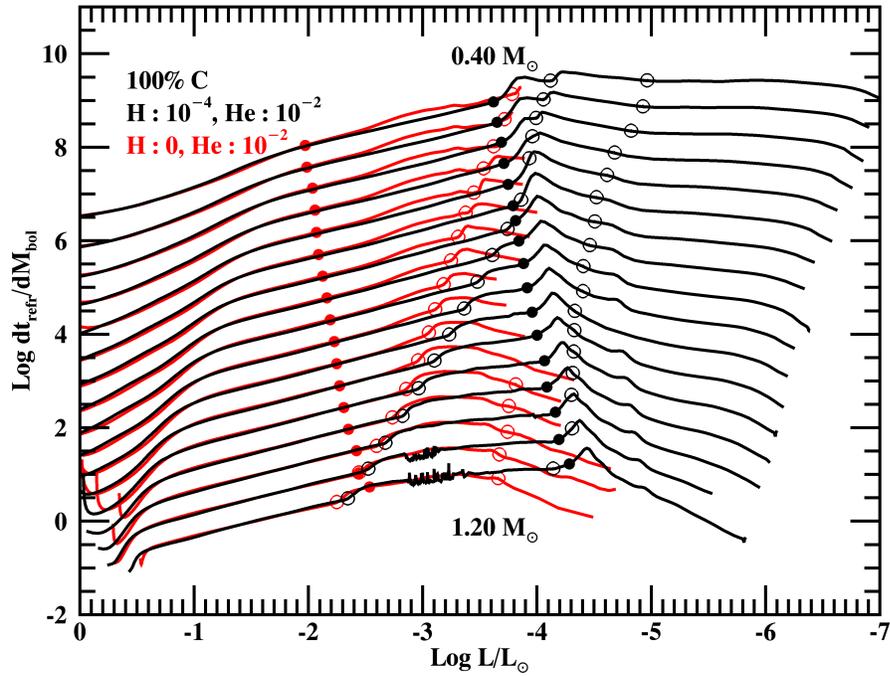


FIGURE 2.15 Tracés de la dérivée de la courbe de refroidissement (à une constante près) en fonction de la luminosité pour 17 séquences évolutives de naines blanches ayant un cœur de carbone et différentes masses (de  $0.40 M_{\odot}$  à  $1.2 M_{\odot}$ , par pas de  $0.05 M_{\odot}$ ). Les cercles pleins représentent le démarrage du couplage convectif. Le premier cercle vide représente le moment où la cristallisation du cœur démarre et le deuxième cercle vide (quand présent) représente le moment où 98% de la masse de l'étoile est cristallisée. La séquence à  $0.40 M_{\odot}$  est la seule qui est à la bonne échelle verticale, les autres sont décalées vers le bas afin d'en faciliter la lecture. Il est à noter que les structures présentent à  $\text{log } L/L_{\odot} = -3$  pour les DAs de masses  $M = 1.10, 1.15$  et  $1.20 M_{\odot}$  sont dues à des difficultés numériques du code évolutif et non à une instabilité dans leur taux de refroidissement.

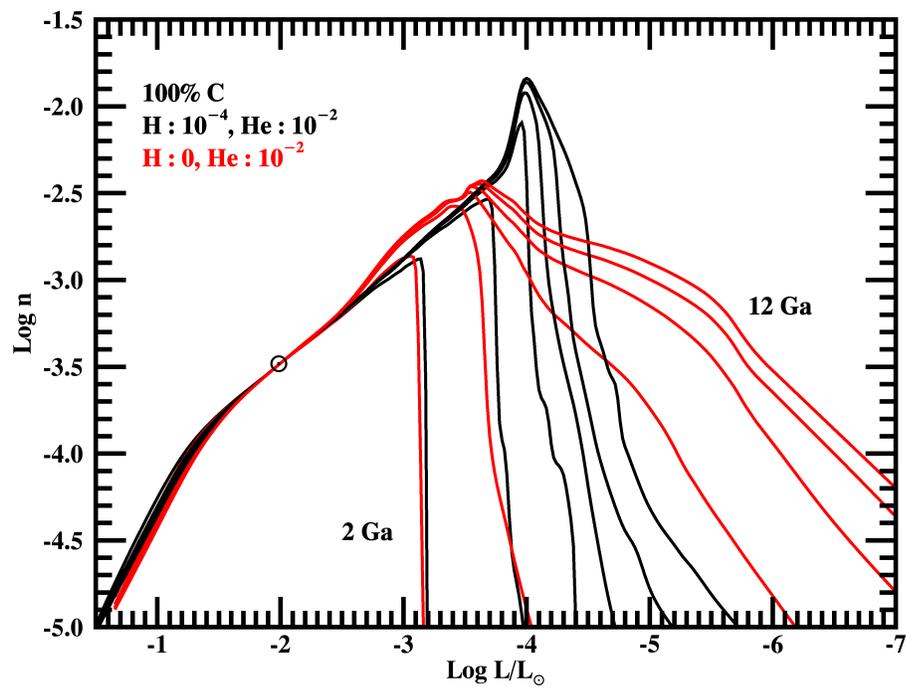


FIGURE 2.16 Fonctions de luminosité des DAs (en noir) comparées aux fonctions de luminosité des non-DAs (en rouge). Les fonctions de luminosité ont été calculées pour des échantillons d'étoiles qui ont un âge entre 2 et 12 milliards d'années, par pas de 2 milliards d'années. Nous avons supposé que le milieu possède un taux de formation d'étoiles continu en fonction du temps, comme c'est le cas par exemple pour le disque galactique (en première approximation).

### 2.2.11 Fonctions de luminosité qui incluent les DAs et les non-DAs

Le rapport DAs/non-DAs dépend de la température effective des naines blanches et donc de leur luminosité (Liebert et al. 1986, voir aussi la figure 3 du compte-rendu de conférence de Fontaine & Wesemael 1987). La figure 20 de l'étude du voisinage solaire à l'intérieur de 20 pc de Giammichele et al. (2012) présente le rapport DAs/non-DAs en fonction de la température, calculé à partir de leur échantillon de 166 étoiles, complet à 90%. Bien que nous soyons certain qu'il y ait une dépendance du rapport des DAs/non-DAs en fonction de la température effective, la forme de cette dépendance n'est malheureusement pas solidement contrainte; soit l'échantillon est presque complet (Giammichele et al. 2012) mais il ne contient pas assez d'objets dans chaque classe de températures effectives pour être statistiquement significatif, soit l'échantillon contient assez d'objets mais son manque de complétude, particulièrement aux basses luminosités, ne permet pas de contraindre l'évolution de ce rapport aux basses températures effectives. Nous avons donc choisi d'utiliser le rapport de DAs/non-DAs moyen pour toutes les luminosités, déterminé par Limoges et al. (2015), qui est calculé grâce à un échantillon de naines blanches du voisinage solaire à l'intérieur de 40pc, qui représente un bon compromis entre la complétude de l'échantillon et sa taille. Les fonctions de luminosité que nous avons ainsi construites sont composées de 75% DAs et de 25% de non-DAs (figure 2.17).

Puisque le couplage convectif a un impact moins important sur le taux de refroidissement des non-DAs, la bosse associée à ce retardement dans la fonction de luminosité des non-DAs est beaucoup moins prononcée, comme discuté à la section précédente. Ceci se traduit par une plus petite bosse à  $\log L/L_{\odot} = -4$  dans les fonctions de luminosité de DAs plus non-DAs présentées en rouge à la figure 2.17 que pour les fonctions de luminosité construites à partir de DAs seulement (en noir sur la figure). À la figure 28 de l'article de Limoges et al. (2015), les auteurs présentent la fonction de luminosité observée de leur échantillon de naines blanches à moins de 40 pc comparée à des fonctions de luminosité théoriques pour différents âges du disque. Ils remarquent que la fonction de luminosité observée construite à partir de leur échantillon ne reproduit pas bien la bosse à  $\log L/L_{\odot} = -4$  de leurs fonctions de luminosité théoriques. Ces dernières sont seulement composées de naines blanches DAs. Cette

différence entre leurs résultats et leurs modèles pourrait donc être en partie expliquée par l'absence de naines blanches non-DAs dans les fonctions de luminosité théoriques présentées dans leur article. Nous allons d'ailleurs reconstruire au chapitre 4 des fonctions de luminosité théoriques du voisinage solaire qui prennent en compte tous les nouveaux paramètres présentés dans ce chapitre et qui comprendront 25% de non-DAs, comme observé dans l'échantillon de Limoges et al. (2015).

## 2.3 Influence des différents paramètres libres sur les fonctions de luminosité théoriques

### 2.3.1 Rapport carbone sur oxygène dans le cœur des naines blanches

Le rapport entre la quantité de carbone et la quantité d'oxygène qu'il y a dans le cœur d'une naine blanche n'est pas connu avec exactitude. Malheureusement, ce rapport a une grande influence sur le taux de refroidissement d'une naine blanche. Ainsi, il est difficile de déterminer l'âge d'une naine blanche avec précision, même lorsque l'on connaît sa masse et sa luminosité, comme nous pouvons d'ailleurs le constater grâce aux figures 2.18 et 2.19. Ceci est dû au fait que l'énergie qui fait rayonner une naine blanche est principalement l'énergie thermique emmagasinée par les ions du cœur. Pour une masse donnée, le cœur d'une naine blanche sera composée d'une plus grande quantité d'ions s'il est composé de carbone que s'il est composé d'oxygène, puisque la masse atomique du carbone est plus petite que celle de l'oxygène. Ainsi, la chaleur spécifique par gramme de carbone est plus grande que celle de l'oxygène. Étant donné que le temps de refroidissement est proportionnel à la chaleur spécifique par gramme, une naine blanche ayant un cœur de carbone va mettre plus longtemps à se refroidir qu'une naine blanche possédant un cœur d'oxygène.

On peut confirmer ces résultats grâce à la figure 2.18 où nous constatons que pour qu'une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$  refroidisse jusqu'à une luminosité de  $L/L_{\odot} \sim 10^{-5.5}$ , il lui faut environ 11.75 Ga si elle est composée d'un cœur d'oxygène mais 15.15 Ga pour un cœur de

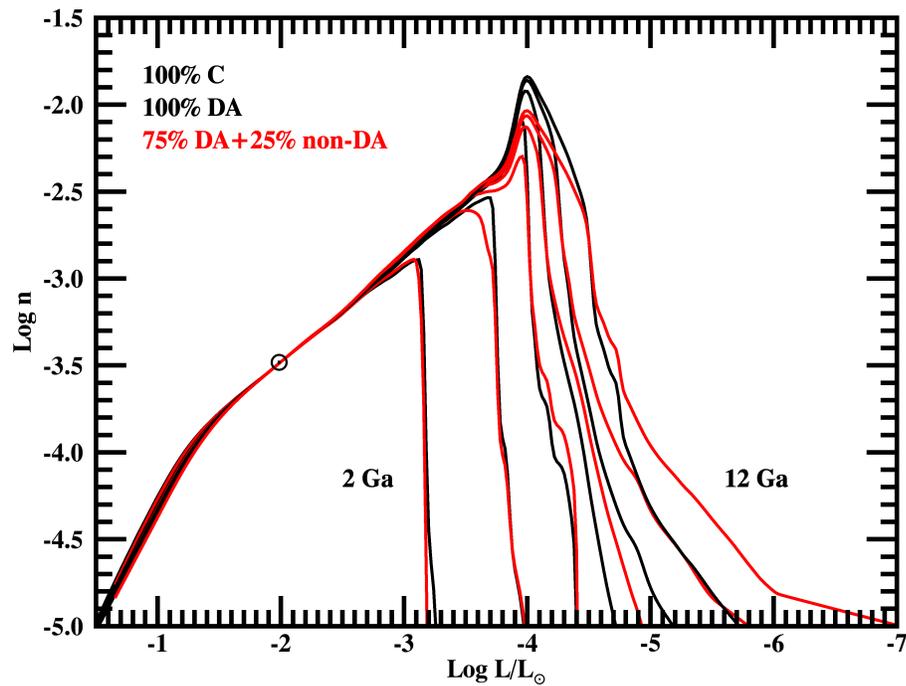


FIGURE 2.17 Fonctions de luminosité de DAs (en noir) comparées aux fonctions de luminosité d'un échantillon compris de 75% de DAs et de 25% de non-DAs (en rouge). Les fonctions de luminosité ont été calculées pour des échantillons d'étoiles qui ont un âge entre 2 et 14 milliards d'années, par pas de 2 milliards d'années. Nous avons supposé que le milieu possède un taux de formation d'étoiles continu en fonction du temps, comme c'est le cas par exemple pour le disque galactique (en première approximation).

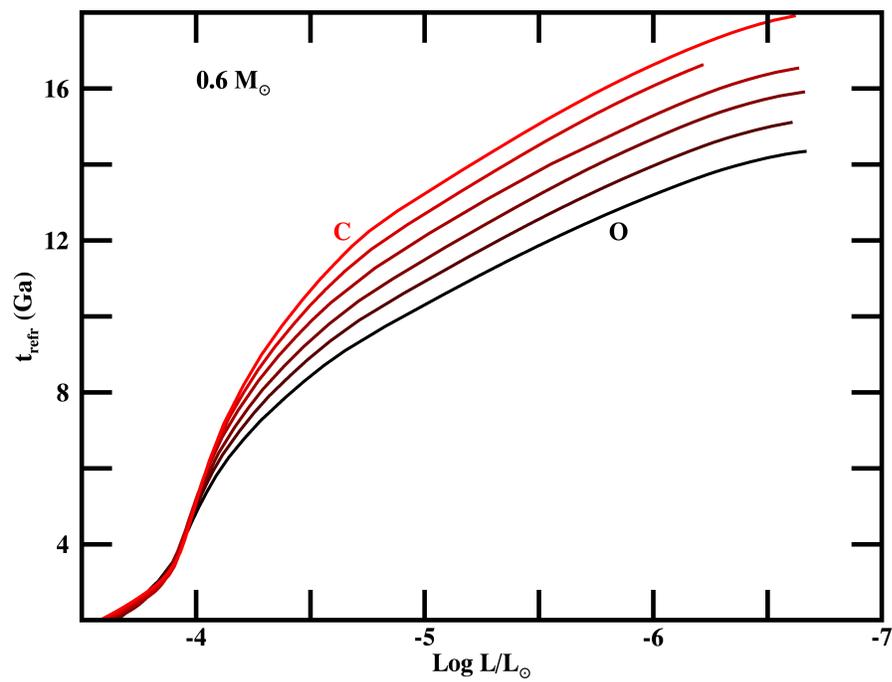


FIGURE 2.18 Âge d'une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$  en fonction de sa luminosité, pour différentes compositions chimiques en son cœur. La courbe du haut en rouge représente le temps de refroidissement d'une naine blanche possédant un cœur de carbone, celle du bas en noir un cœur d'oxygène et les courbes entre les deux des compositions de cœur intermédiaires, par pas de 20%.

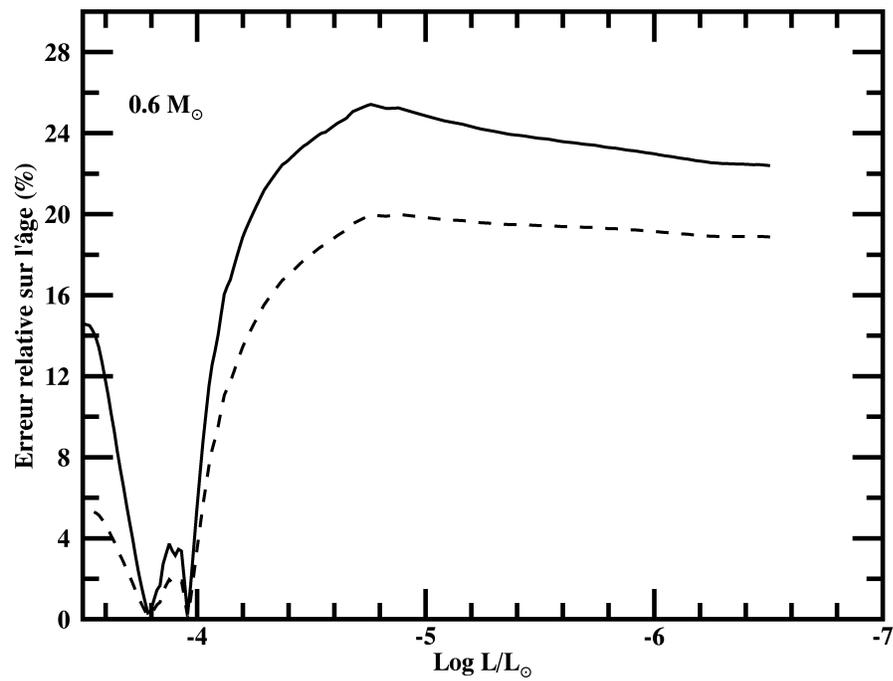


FIGURE 2.19 En trait plein : erreur relative sur la détermination de l'âge d'une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$ , en fonction de sa luminosité. En tirets : erreur relative sur la détermination de l'âge total de l'étoile (temps passé sur la séquence principale de l'étoile parente plus le temps passé sur la courbe de refroidissement pendant la phase naine blanche). Les courbes représentent ainsi la différence relative entre l'âge déterminé lorsque le cœur de la naine blanche est composée de carbone, par rapport à l'âge déterminé lorsqu'il est composé d'oxygène.

carbone. Ce qui représente tout de même 3.4 Ga de différence, soit 25%. La figure 2.19 rapporte l'erreur relative maximale faite lorsque l'on détermine l'âge d'une naine blanche en fonction de sa luminosité pour les deux compositions extrêmes du cœur : seulement du carbone par rapport à seulement de l'oxygène. L'erreur relative sur l'âge de la naine blanche est grande pour une naine blanche jeune ( $L/L_{\odot} > 10^{-3.7}$ ) et vieille ( $L/L_{\odot} < 10^{-4}$ ). Cependant, lorsqu'on ajoute l'âge que l'étoile parente a passé sur la séquence principale (traits pointillés de la figure 2.19) nous constatons que l'erreur relative est importante surtout pour des luminosités de  $L/L_{\odot} > 10^{-4}$ , donc un âge supérieur à environ 5 Ga, pour une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$ .

Il est intéressant de remarquer qu'une inversion de courte durée des courbes de refroidissement a lieu pour un âge de  $t_{\text{refr}} \sim 3.5$  Ga et pour une luminosité de  $L/L_{\odot} \sim 10^{-3.75}$ . À cette luminosité particulière, une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$  composée d'un cœur de carbone paraîtra plus jeune qu'une naine blanche composée d'un cœur d'oxygène. La cristallisation s'amorce lorsque le paramètre  $\Gamma \sim 180$ . Ce paramètre est le rapport entre le potentiel énergétique de Coulomb d'un ion et de son énergie cinétique moyenne  $kT$ . Le potentiel énergétique de Coulomb d'un ion est proportionnel à sa charge, donc est plus grand pour l'oxygène, qui a un plus grand numéro atomique, que pour le carbone. La cristallisation va donc se produire pour une plus petite température pour l'oxygène que pour le carbone. Nous avons vu précédemment que la cristallisation crée un délai dans le refroidissement de la naine blanche et ainsi, une naine blanche composée d'un cœur d'oxygène va subir un retard dans son refroidissement plus tôt que celle qui possède un cœur de carbone. C'est pourquoi, pour un court instant, la naine blanche qui a une luminosité d'environ  $L/L_{\odot} \sim 10^{-3.75}$  sera plus jeune si elle est composée d'un cœur carbone que si elle est composée d'un cœur d'oxygène, ce qui est l'inverse du résultat habituel.

L'importance de la dépendance de l'âge en fonction de la composition du cœur d'une naine blanche dépend aussi de la masse de la naine blanche (voir la figure 2.20), plus la naine blanche est massive, plus l'erreur sur l'âge peut être grande en fonction de la supposition que l'on fait sur la composition de son cœur. Pour une naine blanche de  $1 M_{\odot}$ , l'erreur peut atteindre jusqu'à 34%. Tandis que pour une naine blanche de  $0.4 M_{\odot}$ , l'erreur n'atteint jamais les 1%

puisque l'âge total des étoiles peu massives va être dominé par le temps passé sur la séquence principale et non sur celui de la phase naine blanche. Bien que l'erreur dépende fortement de la masse d'une naine blanche, il est toutefois peu réaliste que les naines blanches les plus massives aient un cœur composé de 100% de carbone car les taux de réactions nucléaires de fusion de l'hélium dépendent de la température et donc de la masse de l'étoile parente. Ainsi, les erreurs présentées à la figure 2.20 doivent être vues comme des bornes supérieures à l'erreur effectuée lorsque l'on suppose une composition de cœur d'une naine blanche.

On peut voir plus en détails ces effets en regardant l'inverse du taux de refroidissement des naines blanches en fonction de la luminosité,  $dt_{\text{refr}}/dM_{\text{bol}}$ , pour différentes masses et différentes compositions, ce qui est donné à la figure 2.21. La courbe  $dt_{\text{refr}}/dM_{\text{bol}}$ , en fonction de  $L/L_{\odot}$  pour une naine blanche ayant un cœur de carbone est systématiquement plus haute que celle pour l'oxygène (sauf au moment où la cristallisation s'amorce). Comme  $dt_{\text{refr}}/dM_{\text{bol}}$  est l'inverse du taux de refroidissement, le taux de refroidissement d'une naine blanche ayant un cœur de carbone est plus petit que celui pour une naine blanche ayant un cœur d'oxygène, et donc cette dernière va se refroidir plus vite, comme nous le voyons à la figure 2.18. Nous remarquons que le couplage convectif se produit aux mêmes luminosités peu importe la composition chimique interne de la naine blanche. Rappelons que la valeur  $dt_{\text{refr}}/dM_{\text{bol}}$  est directement intégrée pour obtenir la fonction de luminosité.

Moins la naine blanche est lumineuse, plus il est difficile d'utiliser la cosmochronologie pour déterminer son âge, du fait de l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches (figures 2.21 et 2.22). Les fonctions de luminosité théoriques pour différentes compositions du cœur de la naine blanche et pour différents âges du milieu considéré, présentées à la figure 2.23, sont un outil pour l'instant imprécis pour des grands âges de naines blanches, tant que nous ne connaissons pas la composition du cœur des naines blanches avec exactitude.

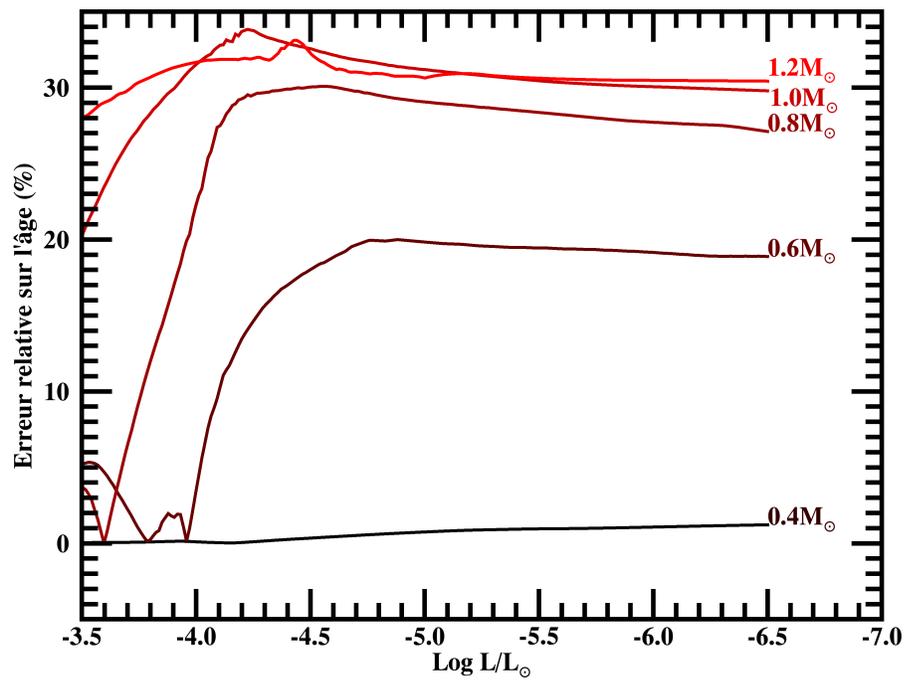


FIGURE 2.20 Erreur relative sur la détermination de l'âge total d'une étoile (temps passé sur la séquence principale de l'étoile parente plus le temps passé sur la courbe de refroidissement pendant la phase naine blanche) pour des masses allant de  $0.4 M_{\odot}$  à  $1.2 M_{\odot}$  par pas de  $0.2 M_{\odot}$ , du noir vers le rouge, en fonction de sa luminosité. Les courbes représentent ainsi la différence relative entre l'âge déterminé lorsque le cœur de la naine blanche est composée de carbone, par rapport à l'âge déterminé lorsqu'il est composé d'oxygène.

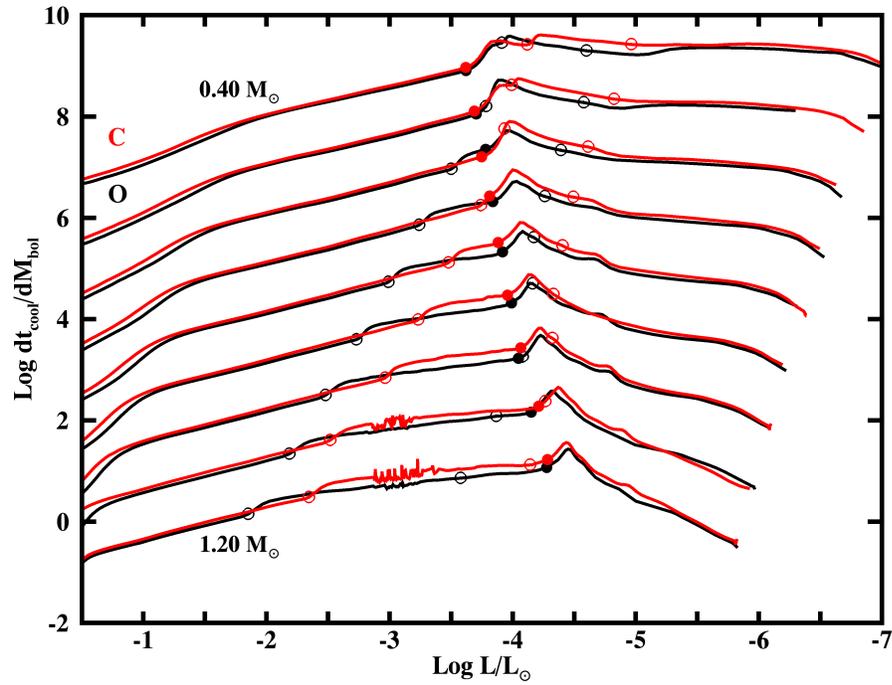


FIGURE 2.21 Tracés de la dérivée de la courbe de refroidissement (à une constante près) en fonction de la luminosité pour deux compositions de cœur différentes. En rouge les séquences évolutives pour les naines blanches ayant un cœur de carbone et en noir celle avec un cœur d'oxygène. Ces courbes sont calculées pour neuf séquences évolutives de différentes masses (de  $0.40 M_{\odot}$  et  $1.2 M_{\odot}$ , par pas de  $0.1 M_{\odot}$  du bas vers le haut). La séquence à  $0.40 M_{\odot}$  est la seule qui est sur son échelle verticale, les autres sont décalées vers le bas pour en faciliter la lecture. Les premiers cercles ouverts aux grandes luminosités correspondent au démarrage de la cristallisation. Les seconds cercles ouverts indiquent le moment où 98% de la masse de l'étoile est cristallisée. Les cercles pleins indiquent le démarrage du couplage convectif. Il est à noter que les structures présentent à  $\log L/L_{\odot} = -3$  pour les naines blanches de masses  $M = 1.10$  et  $1.20 M_{\odot}$  composées de carbone sont dues à des difficultés numériques du code évolutif et non à une instabilité dans leur taux de refroidissement.

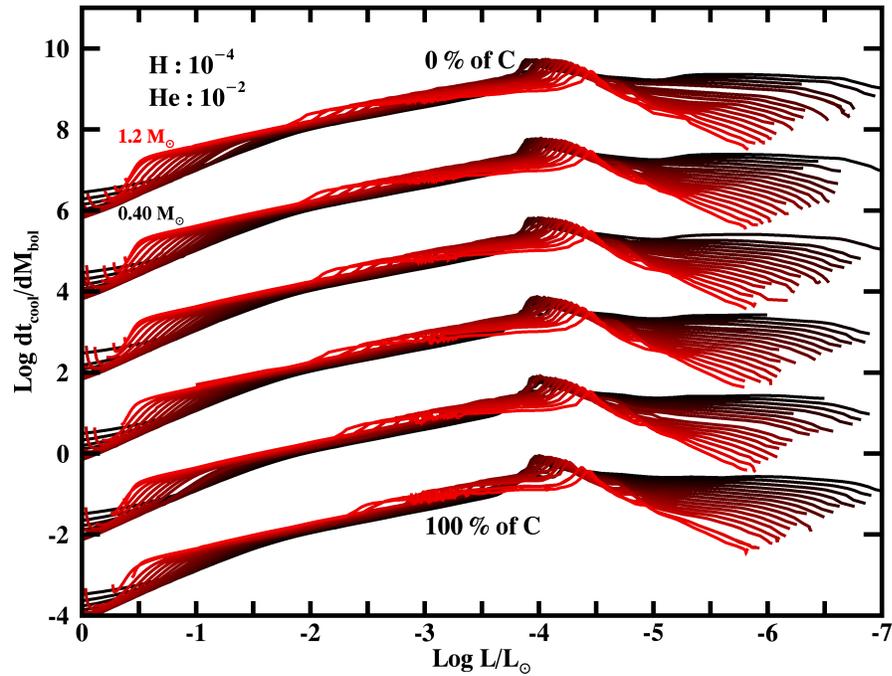


FIGURE 2.22 Tracés de la dérivée de la courbe de refroidissement (à une constante près) en fonction de la luminosité pour 17 séquences évolutives de naines blanches de différentes masses (de  $0.40 M_{\odot}$  à  $1.2 M_{\odot}$ , par pas de  $0.05 M_{\odot}$ , du noir vers le rouge). Les courbes du haut représentent les 17 séquences évolutives de naines blanches ayant un cœur de carbone, celles du bas un cœur d'oxygène et celles intermédiaires changent par pas de 20%. Seules les courbes du haut sont sur leurs bonnes coordonnées, les suivantes sont décalées pour en faciliter la lecture. Il est à noter que les structures présentent à  $\text{log } L/L_{\odot} = -3$  pour les naines blanches de grandes masses sont dues à des difficultés numériques du code évolutif et non à une instabilité dans leur taux de refroidissement.

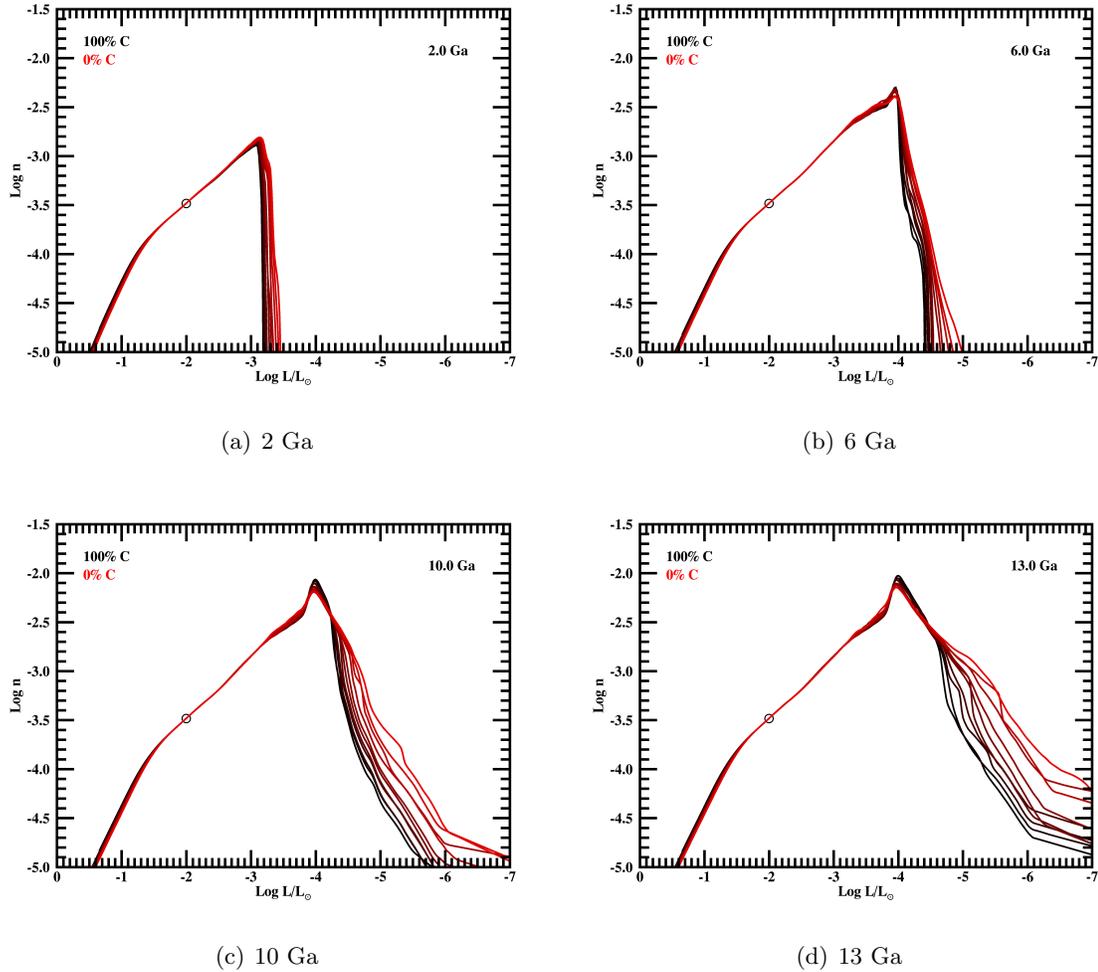


FIGURE 2.23 Fonctions de luminosité pour différentes compositions de cœur. La courbe en noir représente la fonction de luminosité pour des naines blanches possédant un cœur composé de 0% de carbone et de 100% d'oxygène, celle en rouge pour 100% de carbone et 0% d'oxygène. Les compositions intermédiaires sont représentées par les couleurs intermédiaires entre le rouge et le noir, par pas de 10%. Le graphique du panneau en haut à gauche représente les fonctions de luminosité d'un disque ayant un âge de 2 milliards d'années, celui en haut à droite 5 milliards d'années, celui en bas à gauche, 10 milliards d'années et celui en bas à droite, 13 milliards d'années. Toutes les courbes ont été normalisées grâce à un point arbitraire.

### 2.3.2 Tailles des couches d'hydrogène et d'hélium

La perte de l'énergie de l'étoile se fait majoritairement par les photons (l'échappement des neutrinos du cœur y contribuent seulement au début de la phase naine blanche). Plus la taille de la couche d'hydrogène est grande, plus le taux de refroidissement est petit, car le nombre d'interactions entre un photon et un atome d'hydrogène (ou un ion  $H^+$  ou  $H^-$ ) va augmenter, ainsi l'énergie emmagasinée dans l'étoile aura plus de difficulté à s'échapper et le refroidissement de l'étoile ralentit. La taille de la couche d'hydrogène a donc une influence sur le taux de refroidissement, ce qui est confirmé à la figure 2.24. Cependant, l'influence de la taille de la couche d'hydrogène sur le taux de refroidissement est un peu plus faible que celle due à la composition du cœur, comme nous pouvons le constater aux figures 2.24 et 2.18, qui présentent les temps de refroidissement en fonction de la luminosité pour différentes tailles de la couche d'hydrogène et pour différentes compositions du cœur des naines blanches. La figure 2.25 présente  $dt_{\text{refr}} / dM_{\text{bol}}$  en fonction de la luminosité pour différentes masses et différentes tailles de la couche d'hydrogène, en la comparant à la figure 2.22 nous pouvons constater que les taux de refroidissement sont moins influencés par la taille de la couche d'hydrogène que par la composition du cœur des naines blanches. Ainsi l'erreur relative maximale qui est faite sur l'âge d'une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$  est de  $\sim 15\%$  lorsque l'on prend en compte l'incertitude sur la taille de la couche d'hydrogène, contrairement à  $\sim 20\%$  pour la composition du cœur (voir la figure 2.26). À la figure 2.27 nous constatons que l'erreur relative maximale faite sur l'âge en fonction de la taille de la couche d'hydrogène dépend fortement de la masse, elle est de  $\sim 30\%$  pour une naine blanche de  $1.2 M_{\odot}$  mais de  $\sim 0\%$  pour une naine blanche de  $0.4 M_{\odot}$ .

Les fonctions de luminosité présentées à la figure 2.28 montrent que la taille de la couche d'hydrogène a une influence sur leur forme pour des luminosités plus basses que  $L/L_{\odot} \sim 10^{-4}$ . Cependant, cette influence est plus petite que celle due au rapport quantité de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches (voir la figure 2.23).

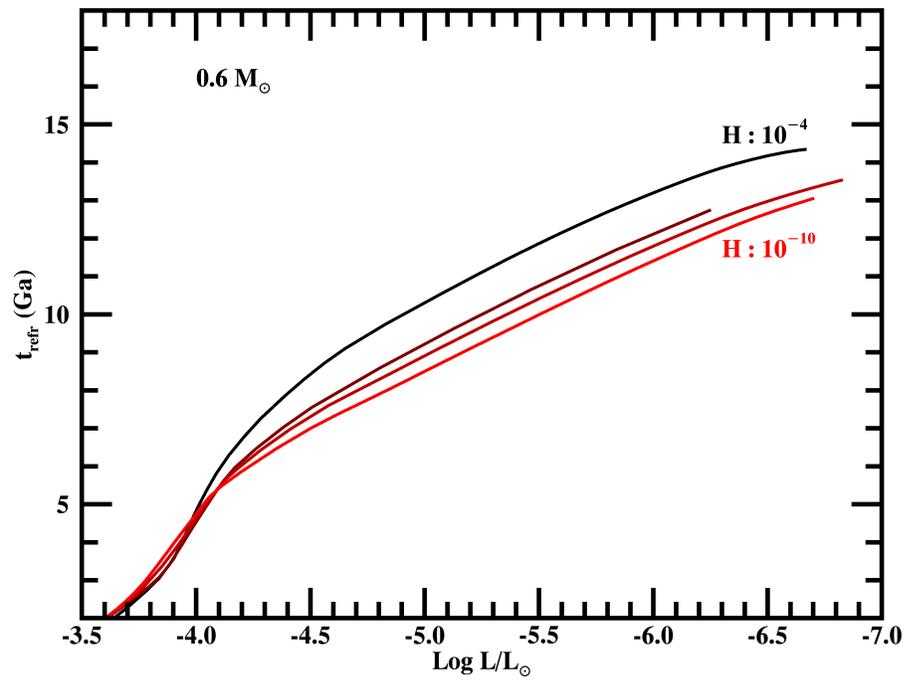


FIGURE 2.24 Âge d'une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$  en fonction de sa luminosité, pour différentes tailles de la couche d'hydrogène. La courbe du haut en noir représente le temps de refroidissement d'une naine blanche possédant une couche d'hydrogène d'une masse de  $10^{-4}$  fois la masse totale de l'étoile, celle en rouge,  $10^{-10}$  et les couleurs intermédiaires représentent des masses de couche d'hydrogène qui diminuent par pas de  $10^{-2}$ .

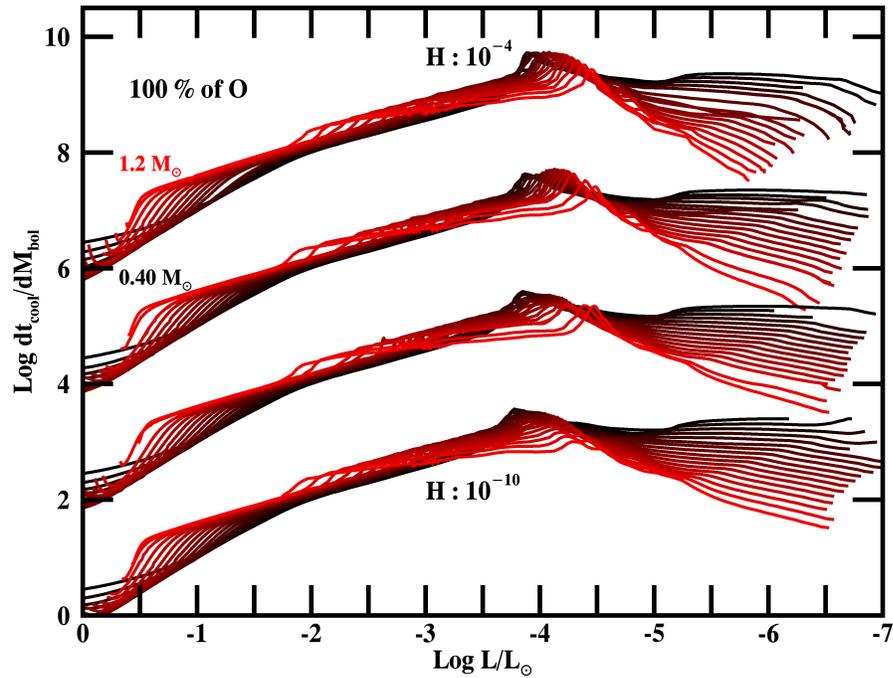


FIGURE 2.25 Tracés de la dérivée de la courbe de refroidissement (à une constante près) en fonction de la luminosité pour quatre paquets de 17 séquences évolutives de naines blanches de différentes masses (de  $0.40 M_{\odot}$  à  $1.2 M_{\odot}$ , par pas de  $0.05 M_{\odot}$ , du noir vers le rouge). Les quatre paquets de courbes représentent les 17 séquences évolutives de naines blanches ayant une couche d'hydrogène de  $10^{-4}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-8}$  et  $10^{-10}$  fois la masse totale de l'étoile, du haut vers le bas respectivement. Il est à noter que les structures présentes à  $\log L/L_{\odot} = -3$  pour les naines blanches de grandes masses sont dues à des difficultés numériques du code évolutif et non à une instabilité dans leur taux de refroidissement.

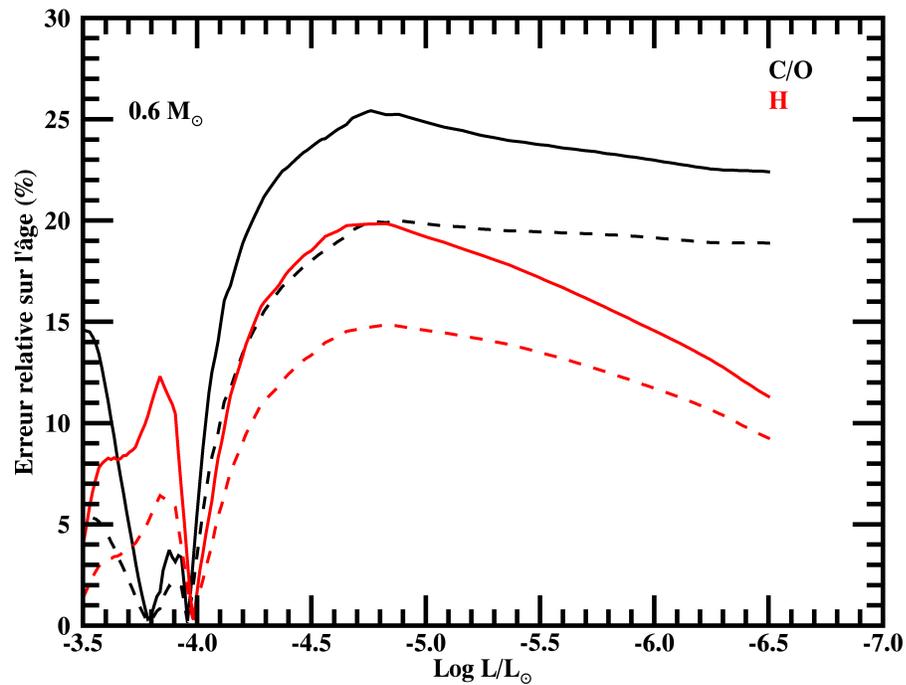


FIGURE 2.26 En trait plein : erreur relative sur la détermination de l'âge d'une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$ , en fonction de sa luminosité. En tirets : erreur relative sur la détermination de l'âge total de l'étoile (temps passé sur la séquence principale de l'étoile parente plus le temps passé sur la courbe de refroidissement pendant la phase naine blanche). Les courbes en noires correspondent à la différence relative entre l'âge déterminé lorsque le cœur de la naine blanche est composée de carbone, par rapport à l'âge déterminé lorsqu'il est composé d'oxygène. Celles en rouge la différence relative entre l'âge déterminé pour une naine blanche ayant une couche d'hydrogène de  $10^{-4}$  fois la masse totale de l'étoile versus une couche d'hydrogène de  $10^{-10}$  fois la masse totale de l'étoile.

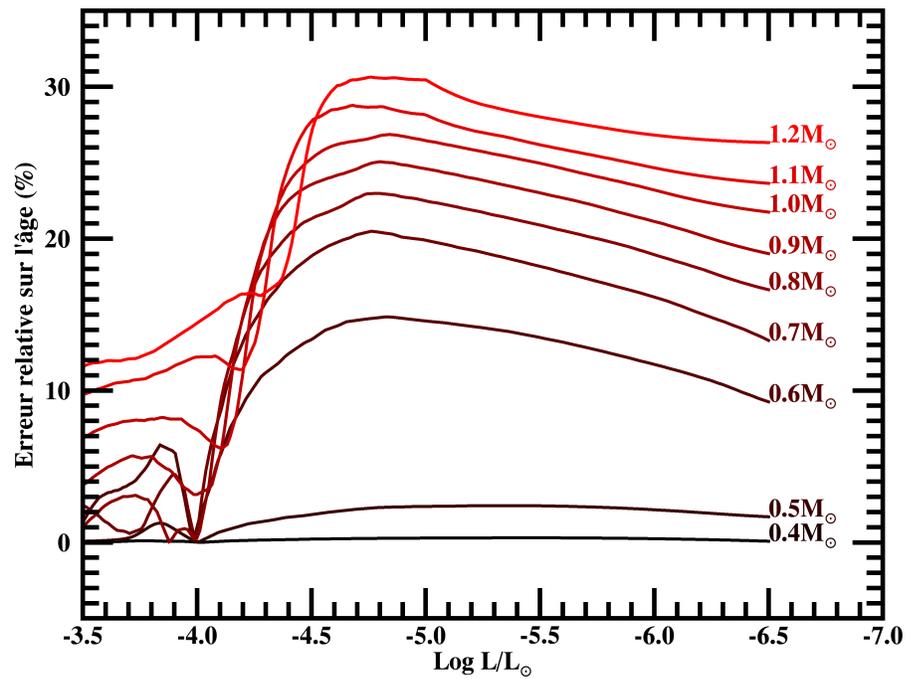


FIGURE 2.27 Erreur relative sur la détermination de l'âge total d'une naine blanche (temps passé sur la séquence principale de l'étoile parente plus le temps passé sur la courbe de refroidissement pendant la phase naine blanche) pour des masses allant de  $0.4 M_{\odot}$  à  $1.2 M_{\odot}$  par pas de  $0.1 M_{\odot}$ , du noir vers le rouge, en fonction de sa luminosité. Les courbes représentent ainsi la différence relative entre l'âge déterminé pour une naine blanche ayant une couche d'hydrogène de  $10^{-4}$  fois la masse totale de l'étoile, par rapport à l'âge déterminé pour une naine blanche ayant une couche d'hydrogène de  $10^{-10}$  fois la masse totale de l'étoile.

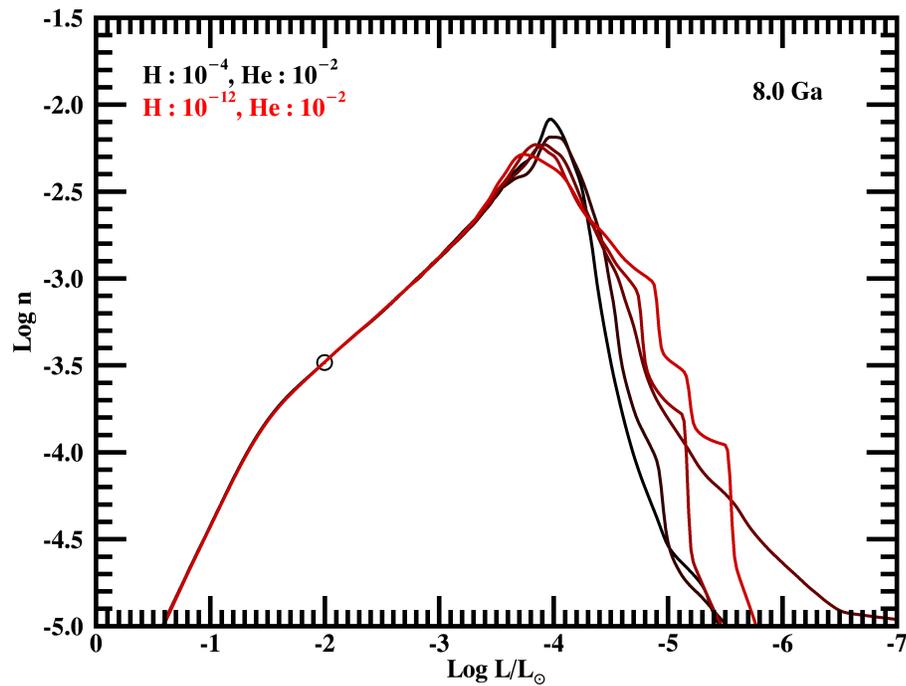


FIGURE 2.28 Fonctions de luminosité pour différentes tailles de la couche d'hydrogène, pour un milieu ayant un âge de 8 Ga. La courbe en noir représente la fonction de luminosité pour des naines blanches possédant une couche d'hydrogène ayant une masse de  $10^{-4}$  fois la masse totale de l'étoile, celle en rouge  $10^{-12}$  et les couleurs intermédiaires représentent des masses de couche d'hydrogène qui diminuent par pas de  $10^{-2}$ . Toutes les courbes ont été normalisées grâce à un point arbitraire (le même que dans la figure 2.8).

### 2.3.3 Relation masse initiale - masse finale

À la figure 2.29, nous avons mis en graphique les fonctions de luminosité calculées lorsque l'on utilise la relation masse initiale-masse finale de Kalirai (2013), utilisée pour cette thèse ( $M = 9.17 * m_{nb} - 3.93$ ) et celle utilisée par Fontaine et al. (2001), soit la relation de Wood (1990) :  $M = \log(m_{nb}/0.495)/0.0947$ . Nous constatons que le choix de la relation masse initiale-masse-finale n'a pas beaucoup d'impact sur la fonction de luminosité théorique calculée.

### 2.3.4 Influence de l'équation que lie le temps sur la séquence principale avec la masse de l'étoile

Nous avons utilisé les modèles évolutifs des étoiles sur la séquence principale de Bertelli et al. (2008) et de Bertelli et al. (2009) pour déterminer la relation adoptée liant le temps de vie sur la séquence principale,  $t_{sp}$ , en fonction de la masse de l'étoile sur la séquence principale,  $M$ , c'est-à-dire,  $\log t_{sp} = 10.11 - 3.33 \log M + 0.59 (\log M)^2 + 0.09 (\log M)^3$ , en milliards d'années. Nous étudions les effets du choix de cette relation sur les fonctions de luminosité théoriques à la figure 2.30 en comparant les fonctions de luminosité construites en utilisant la relation ci-dessus et celle utilisée dans l'article de Fontaine et al. (2001), soit celle utilisée par Wood (1990) :  $t_{sp} = 1.0^{10/M^{2.5}}$ . La relation utilisée dans Wood (1990) sous-estimerait très légèrement les âges inférés grâce aux fonctions de luminosité par rapport à la relation calculée grâce aux modèles évolutifs de Bertelli et al. (2008) et de Bertelli et al. (2009). Cependant, l'impact du choix de la relation qui lie le temps passé sur la séquence principale en fonction de la masse de l'étoile est petit et n'influence pas de manière significative l'âge d'un échantillon de naines blanches déduit grâce aux fonctions de luminosité théoriques.

### 2.3.5 Conclusion sur l'importance des différents paramètres sur les fonctions de luminosité théoriques

La forme des fonctions de luminosité théoriques construites avec des DAs et des non-DAs coïncide nettement mieux avec celle des fonctions de luminosité observées que lorsque

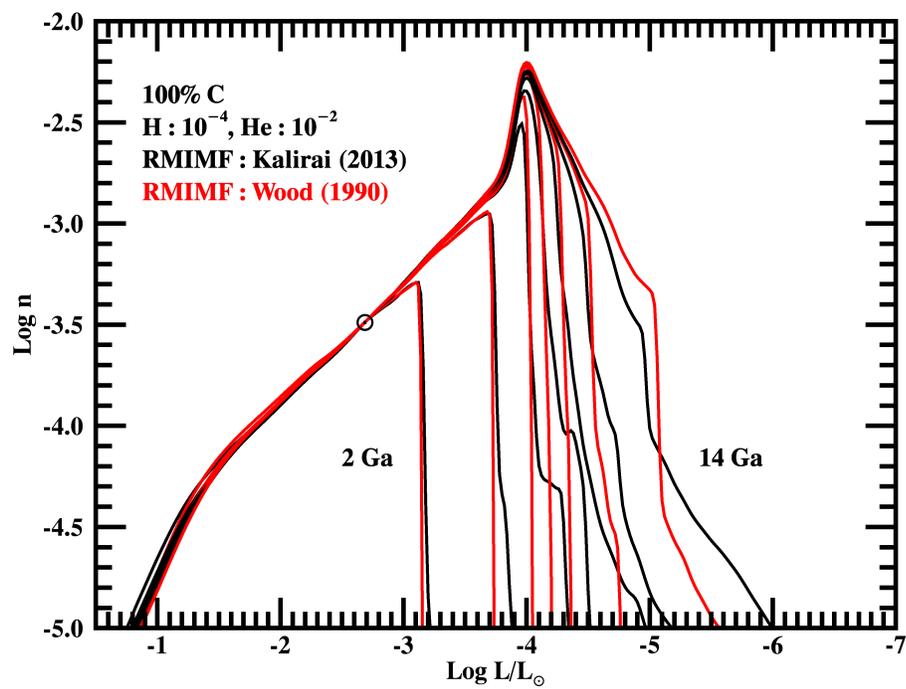


FIGURE 2.29 Fonctions de luminosité théoriques calculées en utilisant la relation masse initiale-masse finale de Kalirai (2013) (utilisée pour cette thèse), comparées à celles en utilisant la relation masse initiale-masse finale de Wood (1990).

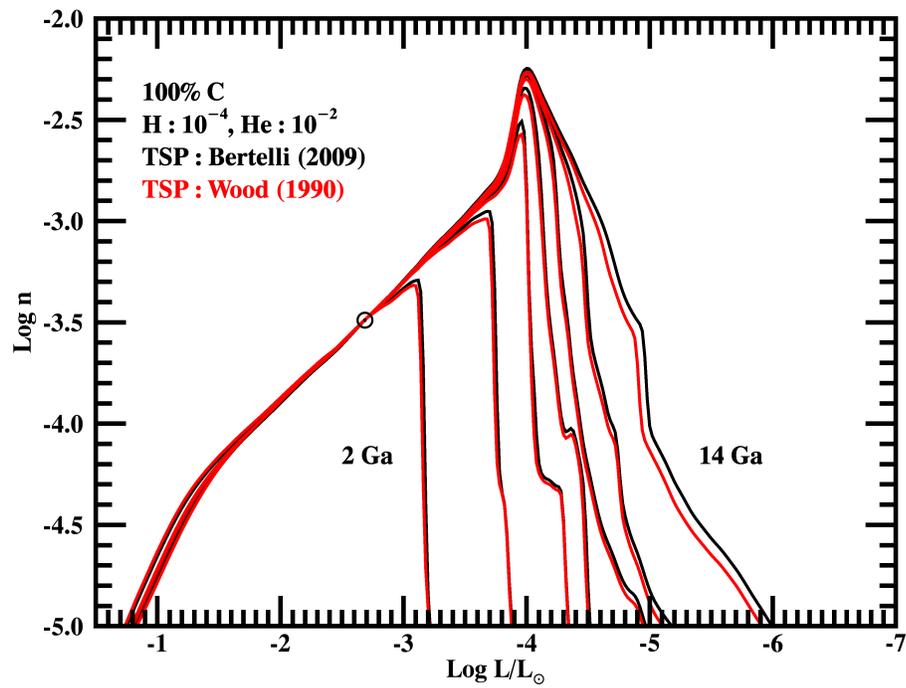


FIGURE 2.30 Fonctions de luminosité théoriques calculées en utilisant la relation qui lie le temps sur la séquence principale avec la masse de l'étoile qui utilise les résultats de Bertelli et al. (2008) et de Bertelli et al. (2009) (utilisée pour cette thèse, en noir sur la figure), comparées aux fonctions de luminosité théoriques qui utilisent la relation de Wood (1990), en rouge.

seulement des DAs sont utilisées pour construire les fonctions de luminosité théoriques (voir notamment l'étude de l'échantillon du voisinage solaire au chapitre 4). Mais nous sommes encore limités par l'incomplétude aux basses luminosités des fonctions de luminosité observées pour contraindre avec une plus grande précision l'âge du milieu.

Les paramètres les plus importants pour déterminer l'âge grâce aux fonctions de luminosité théoriques sont la composition du cœur, principalement pour des faibles luminosités et donc de grands âges, ainsi qu'un calcul précis de l'évolution des naines blanches grâce aux paramètres présentés dans la section 2.1, en particulier un traitement précis du couplage convectif, suivi par celui de la cristallisation. Les autres paramètres qui rentrent dans le calcul de la fonction de luminosité théorique ont un impact sur la forme de celle-ci, mais moindre que les erreurs attribuables au manque de complétude à basse luminosité des échantillons observés. Nous allons généralement ignorer l'impact des autres paramètres sur le calcul des âges grâce aux fonctions de luminosité et nous nous concentrons pour le reste de cette thèse sur l'impact de l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches sur la calcul des âges.

## *Chapitre 3*

# Étude de la composition moyenne du cœur des naines blanches de l'amas M67

### 3.1 Introduction

Puisque les taux de réactions nucléaires de brûlage de l'hélium ne sont pas bien contraints aux températures et pressions présentes dans le cœur des étoiles, la proportion exacte de carbone et d'oxygène dans le cœur d'une naine blanche n'est pas connu avec précision. Cependant, ce dernier a une influence non négligeable sur la détermination du temps de refroidissement d'une naine blanche en fonction de sa luminosité, surtout si elle est âgée de plus de 5 Ga (voir la section 2.3.1).

Plusieurs tentatives de détermination des quantités de carbone et d'oxygène présentent dans le cœur d'une naine blanche ont été produites, voir notamment Salaris et al. (1997) et Althaus et al. (2010). Plus récemment, Fields et al. (2016) ont complété des simulations Monte Carlo pour estimer la composition du cœur d'une naine blanche de  $0.64 M_{\odot}$ , produite d'une étoile de  $3 M_{\odot}$ , en tenant compte des incertitudes sur les taux de réaction de l'étoile. Ils ont utilisé la librairie des taux de réaction STARLIB et le code évolutif MESA. C'est

la première fois qu'une analyse prend en compte les incertitudes dans les taux de réactions nucléaires  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ , triple- $\alpha$  et  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ . Ils ont conclu qu'il est pratiquement impossible de déterminer avec précision la composition du cœur des naines blanches en utilisant des codes évolutifs, considérant les incertitudes actuelles sur les mesures des taux de réaction nucléaire. Cependant, ils ont montré que le cœur des naines blanches est constitué d'au moins 25% d'oxygène, avec une confiance statistique de 95%. Giammichele et al. (2016) ont quand à eux produit la seule mesure directe et fiable de la composition du cœur d'une naine blanche pulsante, en utilisant l'astérosismologie. Ils ont déduit que Ross 548, une naine blanche de  $0.65 M_{\odot}$ , a une fraction d'oxygène dans son cœur de  $X(\text{O}) = 0.70 \pm 0.06$ .

Fontaine et al. (2001) présentent une méthode pour contraindre la composition du cœur des naines blanches. Elle repose sur des observations aux faibles luminosités de l'amas M67 (Richer et al. 1998), dont on connaît l'âge avec précision, qui est de  $3.87 \text{ Ga}_{-0.66}^{+0.55}$  (Castro et al. 2011). Puisque l'âge des naines blanches dépend de la composition en leur cœur, il suffit de construire différentes fonctions de luminosité théoriques pour des naines blanches ayant différentes compositions internes afin de les comparer à la fonction de luminosité observée et ainsi déterminer laquelle s'accorde le mieux avec les observations.

Cependant, la composition moyenne du cœur déterminée grâce à cette technique pourrait dépendre de l'âge de l'amas et ne pas être applicable à un milieu donné ayant un âge différent. Le temps de vie sur la séquence principale dépend fortement de la masse de l'étoile. Plus celle-ci est massive, plus elle deviendra une naine blanche rapidement. Ainsi, plus le milieu est âgé, plus la distribution de masses des étoiles qui sont devenues des naines blanches se déplace vers des petites masses. Les taux de réaction du brûlage de l'hélium dépendent de la température dans le cœur de l'étoile, et donc de sa masse. Ainsi, la composition moyenne du cœur des naines blanches pourrait dépendre de l'âge du milieu et être composée de plus en plus de carbone avec l'âge. Mais puisque la dépendance des taux de réaction en fonction de la température est encore mal contrainte, nous allons supposer que la composition moyenne du cœur des naines blanches ne dépend pas de l'âge du milieu.

## 3.2 Présentation de l'échantillon

Richer et al. (1998) ont observé l'amas M67 pendant cinq nuits grâce à l'imageur mosaïque UHCam du télescope Canada-France-Hawaii. La taille de l'imageur est de  $8000 \times 8000$  pixels, son champ de vue est de  $28' \times 28'$ , couvrant complètement M67, son diamètre étant de  $23'$ . Ils ont obtenu 15 expositions en bande  $V$  et 11 dans la bande  $I$ , de 1200s chacune. Plus de détails sur leurs observations sont présentés dans la section 2 de leur article. Ils ont détecté 85 naines blanches de magnitudes absolues entre  $M_V = 10$  et 15.4. Ils estiment que la complétude de leur échantillon est de 90% jusqu'à une magnitude de 15.9 et est de 60% entre 15.9 et 16.4. Ils notent toutefois qu'il y a un nombre de naines blanches plus important que prévu aux grandes luminosités et ne trouvent pas d'explications à ce résultat (Richer et al. 2000).

Ils observent une chute drastique du nombre de naines blanches à partir d'une magnitude de  $M_V = 14.6$ . Puisque leur échantillon est presque complet jusqu'à la coupure observée dans la population de naines blanches, cette dernière n'est pas due à un biais observationnel mais bien à l'âge fini de l'amas. Ils déterminent d'ailleurs un âge de l'amas grâce à la courbe de refroidissement calculée pour une naine blanche ayant une luminosité égale à la luminosité où il y a coupure. Ils utilisent une séquence évolutive pour une DA composée d'un cœur de carbone et ayant une masse de  $0.7 M_\odot$ , ce qui leur donne un âge de 4.3 Ga. Dans l'article de Richer et al. (2000) ils utilisent le code évolutif d'Hansen & Phinney (1998) combinés aux modèles d'atmosphère d'Hansen (1998, 1999) pour construire trois fonctions de luminosité théorique d'un échantillon d'étoiles de 3 Ga, 4 Ga et 5 Ga. Ils en concluent que l'amas est âgé d'au moins 3 Ga mais de moins de 4 Ga, ce qui est cohérent avec l'âge mesuré par Castro et al. (2011).

## 3.3 Modèles

Nous avons utilisé plus de 600 séquences évolutives de naines blanches DAs et non-DAs, ayant les mêmes caractéristiques que celles décrites au chapitre 2 : elles ont une composition de cœur entre 0% et 100% de carbone par pas de 10%. Les masses des naines blanches

vont de  $0.4 M_{\odot}$  à  $1.2 M_{\odot}$  par pas de  $0.05 M_{\odot}$ . Les DAs ont une enveloppe d'hydrogène de  $10^{-4}$  fois la masse totale de l'étoile et d'hélium de  $10^{-2}$  fois sa masse. Les non-DAs n'ont pas d'hydrogène et une couche d'hélium de  $10^{-2}$  fois sa masse. Nous avons utilisé l'extrapolation des non-DAs telle que discutée à la sous-section 2.2.9.3. Nous avons adopté un taux de formation d'étoiles qui imite celui de la formation d'un amas, c'est-à-dire une formation d'étoiles soudaine, suivi d'un ralentissement exponentiel avec une constante de temps de 0.5 Ga ( $\text{TFS} \propto e^{-(t_{\text{milieu}} - t_{\text{refr}} - t_{\text{ms}})/(0.5 \text{ Ga})}$ ). Nous avons utilisé la même fonction reliant la masse initiale et la masse finale et la même fonction de masse initiale que celles adoptées à la section 2.2.7 pour créer les fonctions de luminosité théoriques.

### 3.4 Résultats

Les fonctions de luminosité théoriques construites grâce aux séquences évolutives des naines blanches d'un amas de 3.87 Ga (l'âge de M67 déterminé par Castro et al. 2011) sont présentées à la figure 3.1. Les bornes inférieures (3.21 Ga) et supérieures (4.42 Ga) de l'âge déterminées par Castro et al. 2011 sont utilisées pour construire la figure 3.2. La section en rouge représente l'intervalle de luminosité où on observe la coupure dans la fonction de luminosité de M67, sa largeur donnant l'incertitude sur la luminosité à laquelle se produit la coupure. Le nombre de naines blanches observées semblent légèrement trop grand pour des grandes luminosités et trop petit pour des petites luminosités, ce qui avait déjà été constaté par Richer et al. (1998). Cependant ces observations ont été effectuées par un télescope au sol, contrairement aux observations présentées au chapitre 5, ce qui rend les observations beaucoup plus difficiles et donc pourrait expliquer ces différences. Il est important de noter que l'âge ne dépend pas des premiers points mais seulement de la coupure dans la fonction de luminosité et que cette différence n'affecte pas les résultats présentés dans ce chapitre.

On constate que les compositions de cœur qui donnent une fonction de luminosité théorique qui coupe à une luminosité comprise dans la barre d'incertitude de la coupure de celle de M67 sont entre 70% et 100% de carbone (voir aussi la figure 3.3).

Nous avons calculé les distances entre la luminosité de la coupure de chaque fonction de luminosités théorique et du centre de la bande de luminosités de la coupure observée. Nous avons pondéré ces distances par la taille de l'erreur que l'on fait sur les coupures des fonctions de luminosité théoriques pour chaque composition du cœur (laquelle est due à l'erreur sur l'âge de l'amas déterminé par Castro et al. 2011). Nous avons alors transformé cette distance en probabilité :

$$P = e^{-\frac{n\sigma^2}{\sqrt{2\pi}\sigma}}, \quad (3.1)$$

où  $n\sigma$  représente la distance entre la coupure théorique et observée et  $\sigma$  est l'erreur sur la luminosité à laquelle il y a coupure de la fonction de luminosité théorique, qui est due à l'erreur sur l'âge de M67). Après avoir normalisé les probabilités nous les avons mises en graphique à la figure 3.4. Nous trouvons que les valeurs les plus probables pour la composition moyenne du cœur des naines blanches de M67 sont entre 60% et 100% de carbone. Toutefois il reste plausible, mais moins probable, que la composition moyenne du cœur soit de moins de 60% de carbone.

### 3.5 Discussion

Le type d'extrapolation utilisée pour extrapoler les séquences évolutives des non-DAs aux petites luminosités n'influence pas les résultats outre mesure. Pour le tester, nous avons extrapolé les séquences évolutives des non-DAs en utilisant une autre méthode que celle présentée à la section 2.2.9.3, cette dernière étant celle qui est adoptée pour les calculs de la section précédente. Nous avons utilisé la pente définie par les derniers points du taux de refroidissement  $dt_{\text{refr}} / dM_{\text{bol}}$  de la naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$  qui a une composition de 50% de carbone et 50% d'oxygène. Nous avons extrapolé linéairement les séquences évolutives de toutes les naines blanches, peu importe leur masse et leur composition de cœur, en utilisant les paramètres de cette pente. Nous avons choisi une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$  car les naines blanches de cette masse sont généralement les plus nombreuses, la distribution de la masse des naines blanches pouvant généralement être approximée par une gaussienne centrée sur  $0.6 M_{\odot}$  (Limoges et al. 2015). Nous avons utilisé les mêmes paramètres pour extrapoler les séquences évolutives, dé-

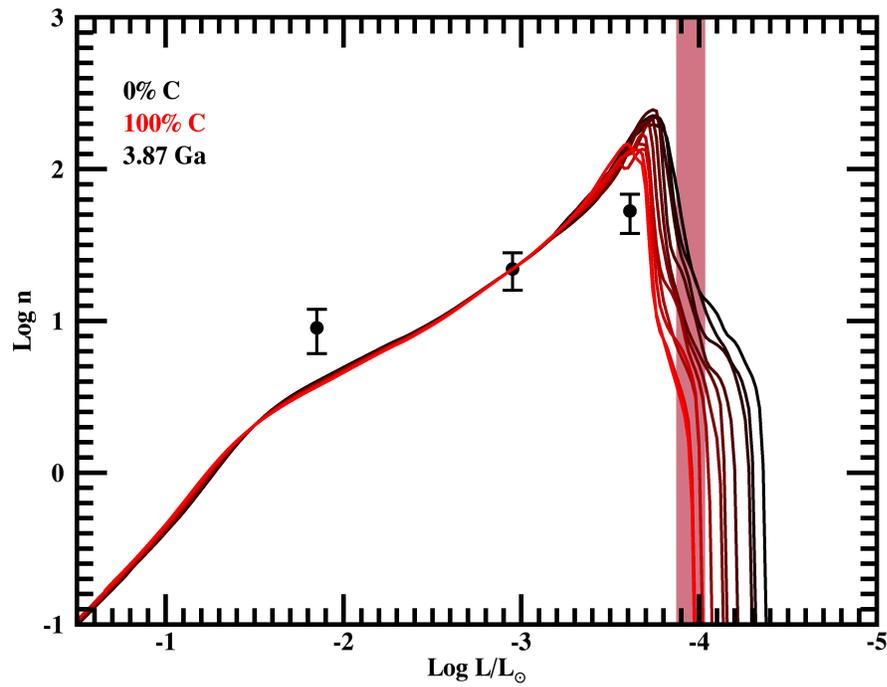
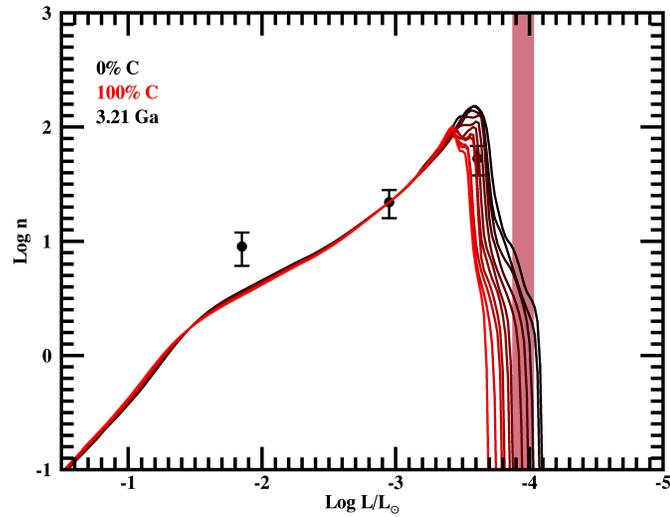
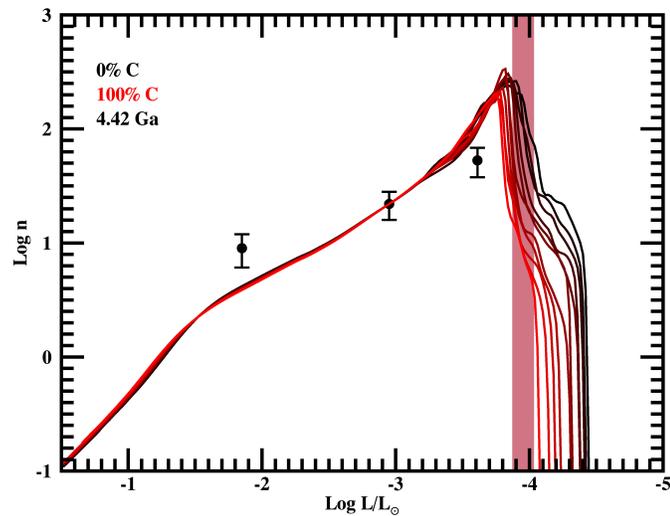


FIGURE 3.1 La fonction de luminosité observée de l'amas M67 est mise en graphique en points noirs. La coupure de la fonction de luminosité est représentée par le section en rouge, sa largeur étant proportionnelle à son incertitude. Les fonctions de luminosité théoriques pour un amas de 3.87 Ga (l'âge de M67 déterminé par Castro et al. 2011) sont représentées pour des compositions de cœur allant de 0% à 100% de carbone, par pas de 10%, du noir vers le rouge.



(a) 3.21 Ga



(b) 4.42 Ga

FIGURE 3.2 La fonction de luminosité observée de l'amas M67 est mise en graphique en points noirs. La coupure de la fonction de luminosité est représentée par le section en rouge, sa largeur étant proportionnelle à son incertitude. Les fonctions de luminosités théoriques pour un amas de 3.21 Ga (en haut, l'âge minimal de M67 déterminé par Castro et al. 2011) et 4.42 Ga (en bas, l'âge maximal de M67 déterminé par Castro et al. 2011) sont représentées pour des compositions de cœur allant de 0% à 100% de carbone, par pas de 10%, du noir vers le rouge.

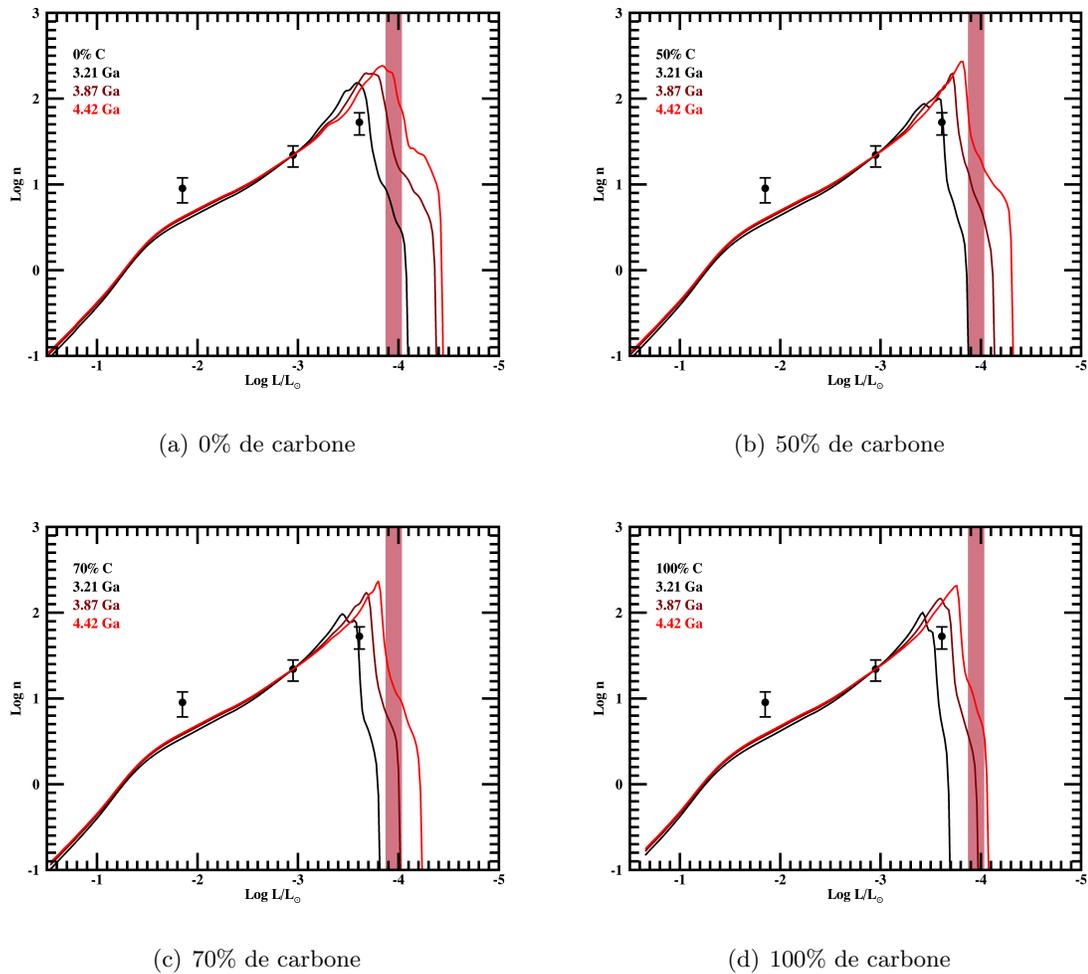


FIGURE 3.3 La fonction de luminosité observée de l'amas M67 est mise en graphique en points noirs. La coupure de la fonction de luminosité est représentée par le section en rouge, sa largeur étant proportionnelle à son incertitude. Les fonctions de luminosités théoriques pour un amas de 3.21 Ga, 3.87 Ga et 4.42 Ga sont représentées en lignes pleines, pour des compositions de cœur de 0% de carbone (en haut à gauche), 50% de carbone (en haut à droite), 70% de carbone (en bas à gauche) et 100% de carbone (en bas à droite).

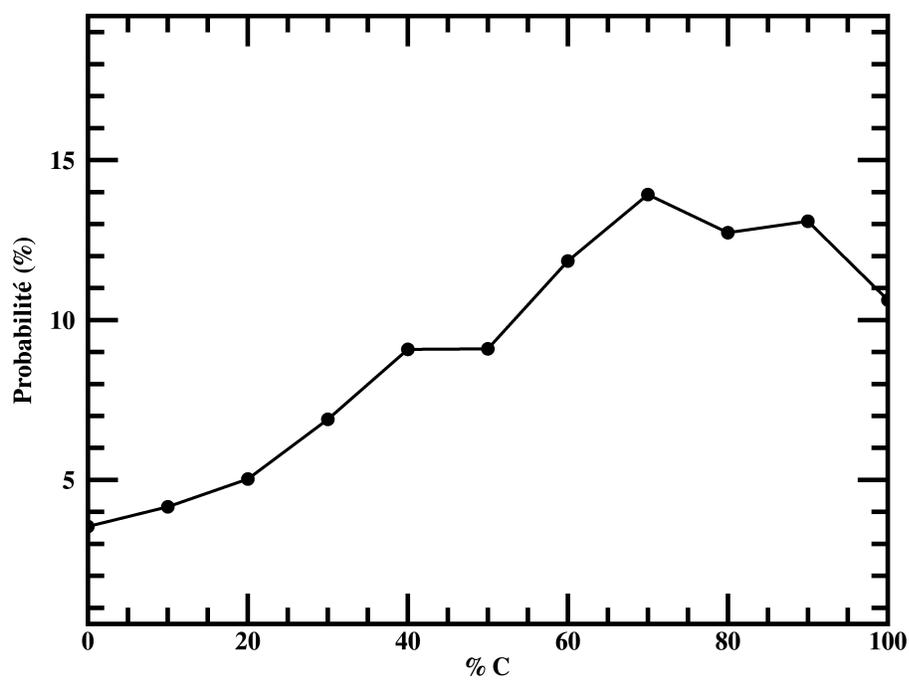


FIGURE 3.4 Probabilité que le cœur des naines blanches de l'amas M67 soit en moyenne composé d'une certaine proportion de carbone.

terminés pour une naine blanche composée de 50% de carbone et 50% d'oxygène, peu importe la quantité de carbone qui était présente dans la séquence évolutive de la non-DA tronquée. Nous procédons ainsi afin de ne pas injecter une erreur sur l'extrapolation qui dépendrait de la composition du cœur, puisque c'est ce paramètre que nous étudions. Nous présentons la probabilité de la composition moyenne du cœur des naines blanches que nous trouvons grâce à cette différente extrapolation des non-DAs à la figure 3.5. Le résultat est presque identique à celui résultant de l'extrapolation adoptée dans le reste de ce chapitre. Ceci est notamment dû au fait que les non-DAs sont diluées dans les fonctions de luminosité théoriques totales, puisqu'elles ne représentent que 25% de l'échantillon de naines blanches utilisée pour créer les fonctions de luminosité théoriques. Nous pouvons donc en déduire que le résultat présenté dans cette section ne dépend pas, ou peu, du type d'extrapolation utilisé pour prolonger les séquences évolutives des non-DAs aux faibles luminosités.

Ainsi, la faible contrainte que nous avons sur la composition du cœur est due, en premier lieu, au manque de certitude sur l'âge de l'amas M67. Le résultat pourrait aussi être affiné avec une meilleure contrainte empirique sur la luminosité à laquelle il y a coupure dans l'amas M67.

### 3.6 Conclusion

L'étude de la fonction de l'amas M67 présentée dans ce chapitre est la première à utiliser une fonction de luminosité observée pour calibrer la composition moyenne du cœur des naines blanches dans un milieu donné. La contrainte sur la composition du cœur, bien que faible, nous permet tout de même de cibler une composition de cœur plus probable (70% de carbone) et de déterminer que le cœur des naines blanches a vraisemblablement plus de 60% de carbone. En combinant ce résultat avec celui de Fields et al. (2016), qui trouvent que le cœur des naines blanches est composée d'au moins 25% d'oxygène, nous pouvons conclure que le cœur des naines blanches de l'amas M67 seraient sans doute composé d'une proportion de carbone allant de 60% à 75% en moyenne. Pour pouvoir calibrer la composition du cœur des naines blanches avec plus de précision, il nous faudrait mieux connaître l'âge de l'amas et avoir une

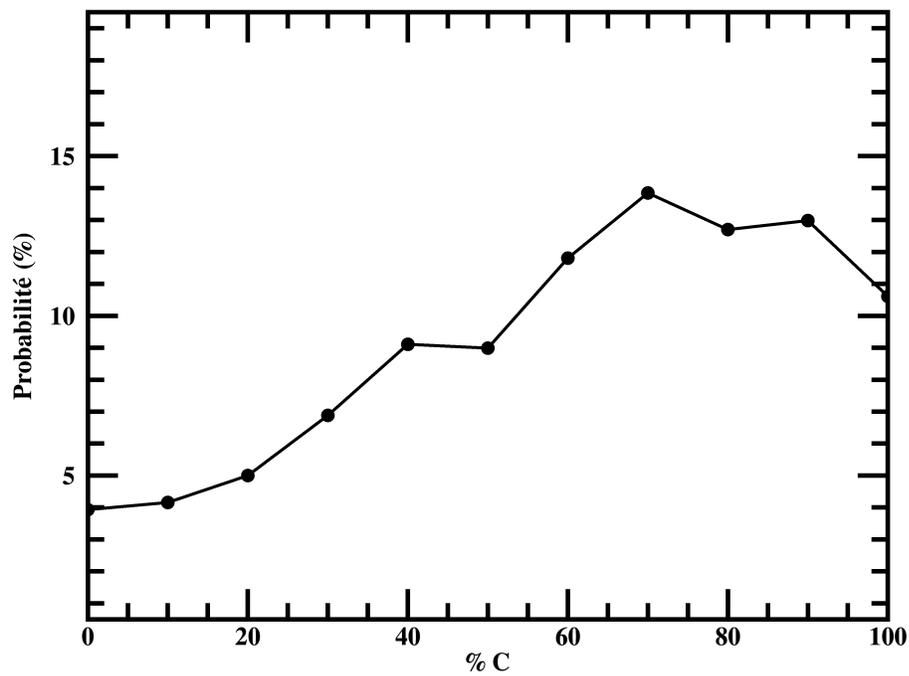


FIGURE 3.5 Probabilité que le cœur des naines blanches de l'amas M67 soit en moyenne composé d'une certaine proportion de carbone. Les non-DAs ont été extrapolées en utilisant la pente définie par les derniers points du taux de refroidissement  $dt_{\text{refr}} / dM_{\text{bol}}$  de la naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$  qui a une composition de 50% de carbone et 50% d'oxygène. Les résultats ainsi obtenus sont très similaires à ceux présentés à la figure 3.4.

meilleure contrainte sur la luminosité où il y a coupure dans la fonction de luminosité observée.

## *Chapitre 4*

# Fonction de luminosité de l'échantillon de naines blanches du voisinage solaire

### 4.1 Présentation de l'échantillon

Un sondage spectroscopique du voisinage solaire dans l'hémisphère nord, mené à bien par Limoges et al. (2015), a permis de recenser les naines blanches à moins de 40 pc du Soleil. La complétude de leur échantillon se situe entre 66% et 78% et tous les spectres de naines blanches connues et découvertes grâce à ce relevé ont été analysés de manière uniforme par Limoges et al. (2015), en utilisant la technique spectroscopique de Bergeron et al. (1995) et les améliorations discutées dans Tremblay & Bergeron (2009) et la méthode photométrique pour les étoiles trop froides pour la méthode spectroscopique.

Ils ont identifié des nouvelles naines blanches grâce au catalogue SUPERBLINK, qui recense les objets ayant un grand mouvement propre, donc en particulier ceux du voisinage solaire (Limoges et al. 2013). Ce catalogue est constitué des objets ayant un mouvement propre de plus de 40 mas par année, recensés dans le Digitized Sky Survey (DSS) (Lépine et al. 2002; Lépine & Shara 2005; Lépine & Gaidos 2011). Il est complet à 95% pour les

magnitudes  $V < 19$ , avec peu de fausses détections. Ils estiment que 90% des naines blanches devraient s’y trouver. Limoges et al. (2015) ont appliqué des coupures en couleur et dans le diagramme de mouvement propre réduit pour sélectionner des candidates naines blanches dans SUPERBLINK. Toutes les nouvelles candidates naines blanches ont ensuite été observées en spectroscopie pour les confirmer et pour déterminer leurs paramètres atmosphériques. Ils ont ainsi identifié 193 nouvelles naines blanches et leur échantillon, qu’ils combinent avec celles déjà connues dans la littérature, contient alors un total de 492 naines blanches à moins de 40 pc (lorsqu’on inclut les binaires naines blanches non résolues, ce nombre augmente à 501). Ils estiment la complétude en extrapolant le nombre d’étoiles qu’il y aurait à l’intérieur de 40 pc en considérant que l’échantillon de l’article de Holberg et al. (2008) des naines blanches à moins de 13 pc est complet, et donc en supposant que la densité de naines blanches dans l’espace est uniforme à  $(4.8 \pm 0.5) \times 10^{-3} \text{ pc}^{-3}$  (Holberg et al. 2008). Bien que moins complet que l’échantillon à 20 pc de Giammichele et al. (2012), qui est complet à 80%, l’échantillon de Limoges et al. (2015) contient un plus grand nombre d’étoiles (501 versus 135) et permet donc de mener une étude de la fonction de luminosité observée de naines blanches du disque plus robuste qu’en utilisant l’échantillon de Giammichele et al. (2012).

Torres & García-Berro (2016) ont produit des simulations Monte Carlo pour synthétiser la population de naines blanches à l’intérieur de 40 pc. Ils comparent les nombres de naines blanches dans les populations synthétiques et observées et estiment que l’échantillon de Limoges et al. (2015) est complet à 78%, ce qui se situe dans la marge supérieure de complétude estimée par Limoges et al. (2015). Ils notent toutefois que la complétude de l’échantillon tombe drastiquement et est de moins de 20% à partir d’une magnitude bolométrique de  $M_{\text{bol}} = 16$ . Cependant, puisque la coupure dans la fonction de luminosité observée est à une magnitude bolométrique de  $M_{\text{bol}} = 15$ , nous pouvons utiliser l’échantillon de Limoges et al. (2015) pour déterminer l’âge du disque galactique en toute confiance, peu importe sa complétude pour des magnitudes bolométriques au-delà de 16. Pour l’étude présentée dans ce chapitre, nous avons donc utilisé l’échantillon de Limoges et al. (2015), augmenté des neuf binaires spectroscopiques qu’ils ont découvertes, l’échantillon utilisé pour cette étude est donc constitué de 501 naines

blanches.

## 4.2 Modèles

Nous avons utilisé plus de 600 séquences évolutives de naines blanches DAs et non-DAs, ayant les mêmes caractéristiques que celles décrites au chapitre 2 : elles ont une composition de cœur entre 0% et 100% de carbone, par pas de 10%. Les masses des naines blanches simulées vont de  $0.4 M_{\odot}$  à  $1.2 M_{\odot}$ , par pas de  $0.05 M_{\odot}$ . Les DAs ont une enveloppe d'hydrogène de  $10^{-4}$  fois la masse totale de l'étoile et une enveloppe d'hélium de  $10^{-2}$  fois sa masse. Les non-DAs n'ont pas d'hydrogène et ont une couche d'hélium de  $10^{-2}$  fois la masse de la naine blanche. Nous avons utilisé l'extrapolation des non-DAs telle que discutée à la sous-section 2.2.9.3, celle qui utilise les séquences évolutives des DAs aux basses luminosité pour extrapoler celles des non-DAs aux basses luminosités. Nous avons adopté un taux de formation d'étoiles constant avec le temps, ce qui est compatible avec le taux de formation d'étoiles estimé pour le disque galactique. Nous avons utilisé la même fonction reliant la masse initiale et la masse finale et la même fonction de masse initiale que celles adoptées à la section 2.2.7. Nos fonctions de luminosité théoriques construites grâce à ces modèles ont des âges allant de 2 à 13 Ga par pas de 0.1 Ga.

## 4.3 Résultats

### 4.3.1 Fonction de luminosité observée et calcul des erreurs

La fonction de luminosité observée par Limoges et al. (2015) est donnée par les cercles pleins noirs à la figure 4.1. Nous avons construit un histogramme de 19 classes, par intervalles de  $0.5 M_{\text{bol}}$ , comme dans l'article de Limoges et al. (2015). Les barres d'erreur sont calculées à partir de la distribution de Poisson. Plus spécifiquement, nous avons utilisé la distribution de Poisson continue pour chaque classe de population  $N$  :

$$p(N) = \frac{N^x e^{-N}}{\Gamma(x+1)},$$

où  $x$  est un tableau de 10 000 valeurs, allant de 0 à  $N$  et  $\Gamma$  étant la fonction mathématique Gamma, en particulier  $\Gamma(x) = (x-1)!$ , si  $x$  est entier et positif. Nous avons ensuite calculé la largeur à mi-hauteur positive et négative de la distribution  $p(N)$  afin de déterminer l'erreur inhérente à la statistique de Poisson pour chaque intervalle de luminosité. Lorsque  $N > 35$ , nous avons utilisé l'approximation que l'erreur est symétrique et est donnée par  $\sqrt{N}$ , pour éviter des problèmes numériques dans le calcul de  $\Gamma(N)$ .

### 4.3.2 Âge du disque galactique en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches

On peut remarquer à la figure 4.1 qu'il semble y avoir deux composantes dans la partie ascendante de la fonction de luminosité observée, représentant probablement deux populations différentes de naines blanches qui n'ont pas exactement eu la même histoire de formation. La première composante, constituée des sept premiers points, possède une population de naines blanches plus nombreuses que si l'on faisait une simple extrapolation de la fonction de luminosité de la deuxième composante, qui commence à partir du huitième point. Cette disparité marquée dans la fonction de luminosité résulte probablement d'une augmentation récente du taux de formation d'étoiles (Torres & García-Berro 2016). Ces derniers déterminent que la fonction de luminosité observée est la mieux modélisée lorsque le taux de formation d'étoiles est  $\sim 5$  fois plus important dans les dernières  $\sim 0.6 \pm 0.2$  Ga. Ils soulignent toutefois qu'ils ne peuvent pour l'instant pas contraindre avec précision les caractéristiques de cette augmentation récente du taux de formation d'étoiles.

Nous avons utilisé les résultats de Torres & García-Berro (2016) pour la suite de notre étude, et nous avons ainsi considéré que seules les naines blanches ayant une magnitude bolo-

métrique  $M_{\text{bol}} > 11$  sont représentatives de l'âge du disque galactique et de son histoire avant le récent épisode de formation accrue d'étoiles. Ainsi, nous avons normalisé en ordonnée, en utilisant les points qui sont sensibles au taux de formation d'étoiles tel qu'il était au moment de sa création, c'est-à-dire les points qui ont une magnitude bolométrique  $M_{\text{bol}} > 11$  mais qui sont tout de même sur la partie qui n'est que peu sensible à l'âge du disque, donc avant la chute drastique du nombre de naines blanches, qui est à une magnitude bolométrique d'environ 15. Nous avons utilisé toutes les classes de l'histogramme qui sont à une magnitude bolométrique  $M_{\text{bol}} > 11$  pour calculer le  $\chi^2$  réduit et pour contraindre l'âge du disque. Ce sont celles qui représentent la population de naines blanches qui a un taux de formation tel qu'il était à la création du disque galactique.

Nous obtenons un âge moyen du disque de 9.4 Ga par minimisation du  $\chi^2$ . L'âge que nous déterminons dépend de la composition moyenne supposée dans le cœur des naines blanches; nous obtenons un âge du disque de 8.1 Ga pour une composition de cœur de 100% d'oxygène et un âge de 10.5 Ga pour une composition de 100% de carbone, soit un écart d'environ 25% (voir la figure 4.1). Les âges et les  $\chi^2$  réduits obtenus pour chaque composition moyenne du cœur sont donnés au tableau 4.1. Il est intéressant de noter que le  $\chi^2$  réduit le plus bas est obtenu pour une composition de cœur de 20% de carbone et 80% d'oxygène (mise en graphique à la figure 4.2), composition de cœur proche de celle trouvée par astérosismologie dans la naine blanche Ross 548 par Giammichele et al. (2016).

### 4.3.3 Simulations Monte Carlo, distribution des âges obtenus

Afin de mesurer la précision des âges estimés à la section précédente, nous avons réalisé une simulation Monte Carlo de 10 000 éléments, prenant en compte les erreurs sur la hauteur des intervalles de la fonction de luminosité observée de Limoges et al. (2015). Chaque essai de la simulation Monte Carlo a une fonction de luminosité observée légèrement différente. Elle a une hauteur aléatoire pour chacune des classes de sa fonction de luminosité, qui est tirée à partir d'une distribution Gaussienne dont le centre est la hauteur observée de la classe et la largeur à mi-hauteur est son incertitude. Ainsi, les 10 000 éléments de la simulation Monte

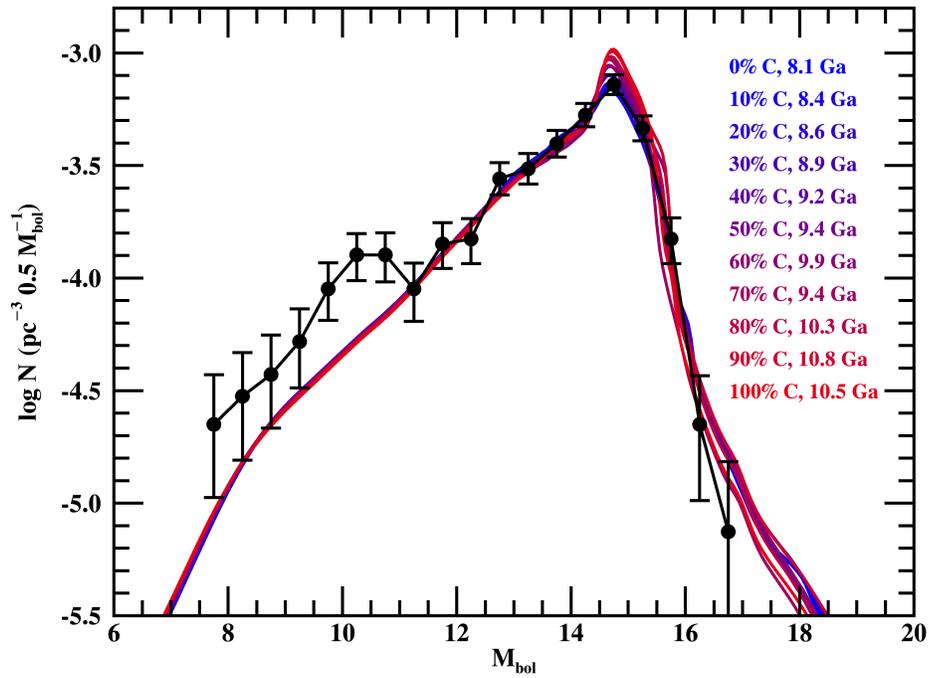


FIGURE 4.1 Fonction de luminosité des naines blanches du voisinage solaire, observée par Limoges et al. (2015), représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux points entre les magnitudes bolométriques allant de 11 à 15 (voir les explications à la section 4.3). L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit (calculée pour les points qui ont une magnitude bolométrique  $M_{\text{bol}} > 11$ ) en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à droite.

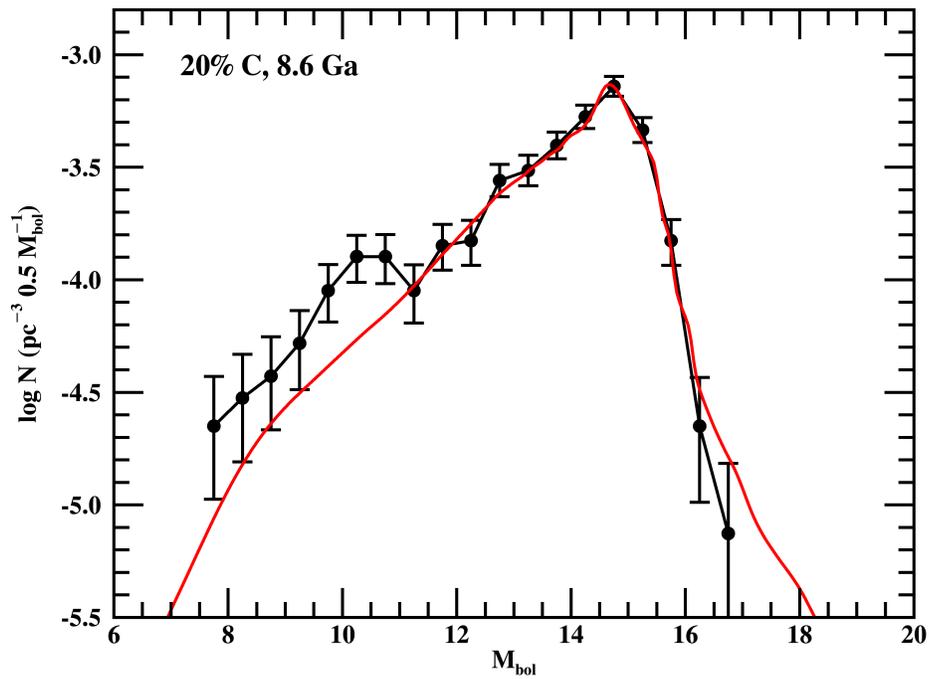


FIGURE 4.2 Fonction de luminosité des naines blanches du voisinage solaire observée par Limoges et al. (2015), représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. La fonction de luminosité théorique qui modélise le mieux les données est représentée par la ligne pleine rouge et a été calculée pour une composition moyenne du cœur des naines blanches de 20% de carbone et de 80% d'oxygène à un âge de 8.6 Ga. Elle a été normalisée en hauteur en utilisant les magnitudes bolométriques allant de 11 à 15 (voir les explications à la section 4.3).

TABLE 4.1 Âge du disque galactique en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	8.1	0.40
10	8.5	0.44
20	8.6	0.31
30	8.9	0.41
40	9.2	0.41
50	9.5	0.57
60	9.9	0.61
70	9.5	0.81
80	10.3	0.80
90	10.8	1.05
100	10.5	1.19

Carlo échantillonnent les hauteurs de classes selon une distribution Gaussienne centrée sur la hauteur observée de la classe et dont la largeur à mi-hauteur est son incertitude. Nous pouvons alors tester l’impact des incertitudes des hauteurs de classes sur les âges déterminés.

Les résultats sont donnés au tableau 4.2. L’écart type sur l’âge est le plus petit pour une composition moyenne de 100% d’oxygène, composition moyenne relativement proche de celle trouvée par astérosismologie (l’équipe de Giammichele et al. 2016 trouvent que le cœur de Ross 548 est composé d’environ 70% d’oxygène). La distribution des âges des 10 000 essais pour chaque composition du cœur est mise en graphique aux figures 4.3 et 4.4.

Les largeurs à mi-hauteur de la distribution des âges qui modélisent le mieux les fonctions de luminosité créées par simulations Monte Carlo se trouvent entre 0.2 et 1.2 Ga. Les âges déterminés pour chaque composition moyenne du cœur des naines blanches sont donc relativement précis, avec une erreur relative de 3% à 12%. On constate que la distribution des âges pour chaque composition du cœur peut avoir plusieurs pics, ou valeurs probables. Ceci est dû au fait que les classes aux faibles luminosités influencent fortement l’âge qui modélise le mieux la population de naines blanches. Cependant, les deux dernières classes ne possèdent

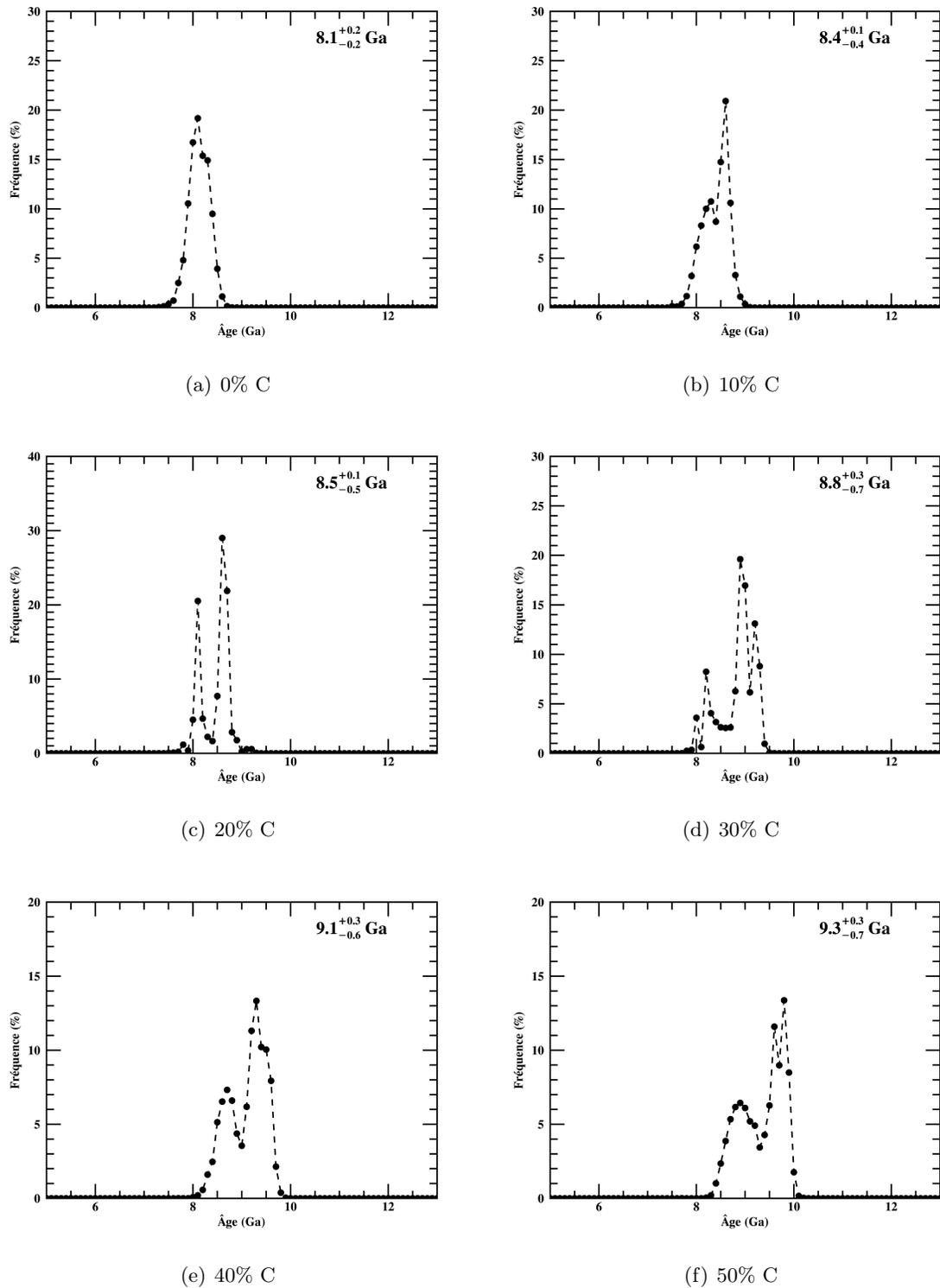


FIGURE 4.3 Distribution de l'âge du disque galactique le plus probable pour les 10 000 essais par simulations Monte Carlo, pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% à 50% de carbone de carbone. L'âge moyen obtenu avec les simulations Monte Carlo, ainsi que ses écarts types positive et négative, sont affichés en haut à droite de chaque sous-figure.

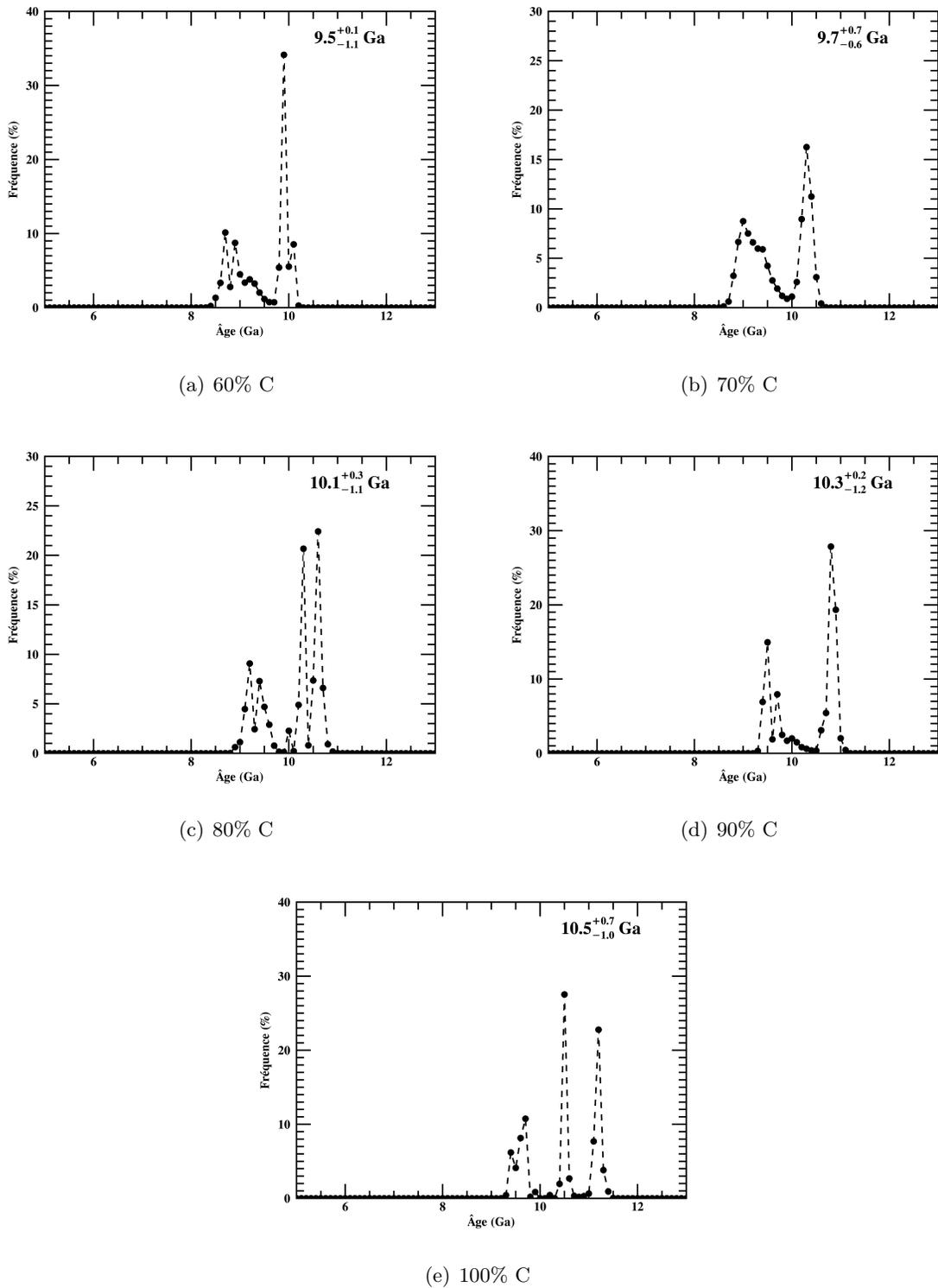


FIGURE 4.4 Distribution de l'âge du disque galactique le plus probable pour les 10 000 essais par simulations Monte Carlo, pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 60% à 100% de carbone. L'âge moyen obtenu avec les simulations Monte Carlo, ainsi que ses écarts types positive et négative, sont affichés en haut à droite de chaque sous-figure.

TABLE 4.2 Distributions des âges obtenus pour chaque fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches

C %	Âge médian (Ga)	Âge moyen (Ga)
0	8.1	$8.1^{+0.2}_{-0.2}$
10	8.5	$8.4^{+0.1}_{-0.4}$
20	8.6	$8.5^{+0.1}_{-0.5}$
30	8.9	$8.8^{+0.3}_{-0.7}$
40	9.2	$9.1^{+0.3}_{-0.6}$
50	9.5	$9.3^{+0.3}_{-0.7}$
60	9.8	$9.5^{+0.1}_{-1.1}$
70	9.6	$9.7^{+0.7}_{-0.6}$
80	10.3	$10.1^{+0.3}_{-1.1}$
90	10.7	$10.3^{+0.2}_{-1.2}$
100	10.5	$10.5^{+0.7}_{-1.0}$

que peu de naines blanches (une naine blanche pour la dernière et trois pour l'avant dernière) et ne peuvent changer que par des valeurs entières lors des essais Monte Carlo basés sur la distribution de Poisson. Ainsi, lorsqu'un essai donné de la simulation Monte Carlo change le nombre de la dernière classe, pour une valeur de 0 à la place de 1 par exemple, cela influencera fortement l'âge déterminé, qui sera toujours proche de certaines valeurs discrètes, peu importe le nombre de naines blanches dans les autres classes pour l'essai Monte Carlo en question. La distribution des âges présente ainsi plusieurs pics, qui sont le résultat direct du fait que le nombre de naines blanches dans les deux dernières classes est un nombre petit et discret mais affectant fortement l'âge estimé. Chaque pic correspond à un nombre de naines blanches différent dans les dernière et avant-dernière classes.

#### 4.4 Discussion

En ajoutant les naines blanches à atmosphère d'hélium dans la fonction de luminosité théorique, nous pouvons modéliser la fonction de luminosité observée de manière bien plus

précise, en particulier la bosse située à une magnitude bolométrique  $M_{\text{bol}} \approx 14.75$ , qui est due au démarrage du couplage convectif dans les DAs. Puisque ce dernier ne se manifeste pas aux mêmes luminosités pour les DAs que pour les non-DAs (voir la section 2.2.10), un trop grand empilement d’objets au moment du couplage convectif des naines blanches DAs se produira si seulement les DAs sont utilisées pour construire la fonction de luminosité théorique. Nous pouvons d’ailleurs comparer la figure 4.1 à la figure 28 de l’article de Limoges et al. (2015), reproduit ici à la figure 4.5, où sont présentées des fonctions de luminosité théoriques construites à partir de naines blanches à atmosphère d’hydrogène ayant une composition de cœur de 100% de carbone. La bosse est beaucoup plus prononcée dans ces dernières fonctions de luminosité théoriques que dans celle observée, ce qui est principalement due à l’absence de non-DAs dans la construction de leurs fonctions de luminosité théoriques. Il est à noter que cette bosse est aussi plus grande lorsque la fonction de luminosité théorique est constituée de naines blanches ayant un cœur de carbone, par rapport à une fonction de luminosité théorique composée de naines blanches ayant un cœur d’oxygène (voir le tableau 4.1, où le  $\chi^2$  réduit est plus grand pour des naines blanches ayant un cœur de carbone). Ceci explique aussi en partie la différence entre les fonctions de luminosité théoriques et observées à la magnitude bolométrique de  $M_{\text{bol}} \approx 14.75$  à la figure 4.5 puisque les naines blanches ont toutes un cœur de carbone dans les simulations utilisées pour construire leurs fonctions de luminosité théoriques.

Afin de tester plus en détail l’impact de l’ajout des non-DAs dans la construction des fonctions de luminosité théoriques et dans les âges ainsi déterminés, nous avons aussi construit des fonctions de luminosité constituées seulement de DAs. La figure 4.6 présente ces fonctions de luminosité et le tableau 4.3 présente les âges et les  $\chi^2$  réduits ainsi déterminés. Il est intéressant de noter que l’ajout des non-DAs dans les fonctions de luminosité théoriques de naines blanches change peu l’âge déterminé (entre 0% et 10% de différence selon la composition moyenne du cœur), mais que les  $\chi^2$  réduits s’améliorent considérablement, avec des valeurs de 1.5 à 5 fois plus petites, dépendant de la proportion de carbone dans le cœur.

Toutefois, on peut remarquer que lorsqu’on utilise seulement des DAs pour construire les

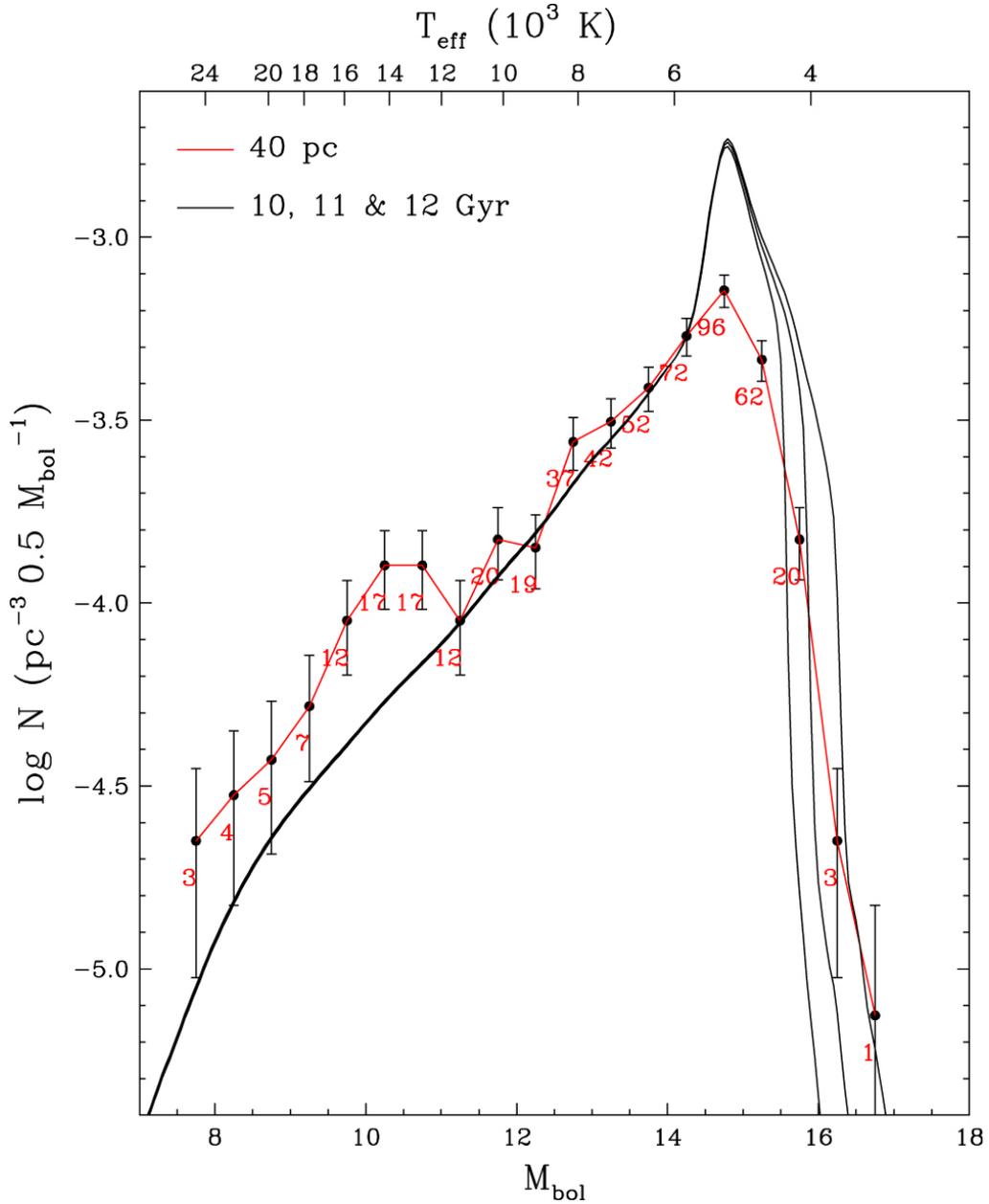


FIGURE 4.5 Figure 28 de l'article de Limoges et al. (2015), qui représente la fonction de luminosité observée de naines blanches à l'intérieur de 40 pc (en rouge), comparée à trois fonctions de luminosité théoriques de naines blanches, construites avec des DAs seulement, qui ont un cœur constitué de 100% de carbone et un âge entre 10 et 12 Ga. L'échelle de températures pour une naine blanche de  $0.6 M_{\odot}$  est donnée en haut de la figure.

TABLE 4.3 Âge du disque galactique en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, pour des DAs seulement

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	8.4	0.7
10	8.6	0.9
20	8.7	1.1
30	9.2	1.4
40	9.5	1.8
50	9.8	2.6
60	9.9	2.8
70	9.2	3.5
80	9.4	4.1
90	10.9	4.7
100	9.7	5.5

fonctions de luminosité théoriques, ces dernières représentent mieux la fonction de luminosité observée aux basses luminosités (les deux derniers points de la figure 4.6). Ceci peut être dû au fait que l’extrapolation des non-DAs aux basses luminosités injecte une erreur non-négligeable et représente donc mal l’évolution des non-DAs aux basses luminosités. Une autre possibilité est que les dernières classes de la fonction de luminosité théoriques sont à des magnitudes bolométriques où la complétude de l’échantillon est sensiblement plus basse, comme il est suggéré à la figure 2 de l’article de Torres & García-Berro (2016).

Quoiqu’il en soit, l’âge déterminé dépend aussi des classes de  $M_{\text{bol}} = 15.25$  et de  $M_{\text{bol}} = 15.75$ , et les barres d’erreurs sont beaucoup plus petites que dans celles de  $M_{\text{bol}} = 16.25$  et de  $M_{\text{bol}} = 16.75$ . Le comportement des DAs et des non-DAs étant similaires pour ces luminosités-là, l’âge déterminé à partir des fonctions de luminosité construites avec des DAs n’est pas significativement différent de celui déterminé à partir des fonctions de luminosité construites avec 75% de DAs et 25% de non-DAs.

Nous avons aussi fait une simulation Carlo avec un échantillon théorique composé seulement de naines blanches DAs. Les distributions des âges en fonction des essais de la simulation

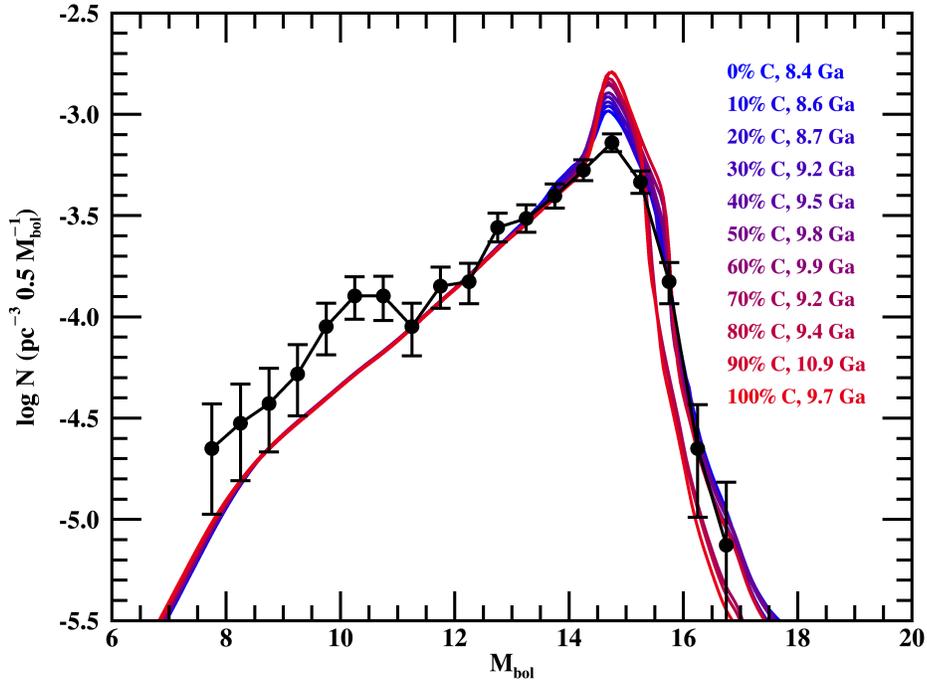


FIGURE 4.6 Fonction de luminosité des naines blanches du voisinage solaire obtenue par Li-moges et al. (2015) représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques, calculées pour des DAs seulement, sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches DAs allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux points entre les magnitudes bolométriques allant de 11 à 15 (voir les explications à la section 4.3). L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit (calculée pour les points qui ont une magnitude bolométrique  $M_{\text{bol}} > 11$ ) en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à droite.

TABLE 4.4 Distributions des âges obtenus pour chaque fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, pour des DAs seulement

C %	Âge médian (Ga)	Âge moyen (Ga)
0	8.4	$8.3^{+0.1}_{-0.4}$
10	8.6	$8.5^{+0.2}_{-0.7}$
20	8.7	$8.6^{+0.2}_{-0.7}$
30	9.2	$9.0^{+0.1}_{-1.0}$
40	9.5	$9.2^{+0.1}_{-1.0}$
50	9.8	$9.4^{+0.1}_{-1.1}$
60	9.9	$9.4^{+0.2}_{-1.2}$
70	9.3	$9.7^{+1.1}_{-0.3}$
80	10.3	$9.9^{+0.4}_{-1.1}$
90	10.8	$10.3^{+0.1}_{-1.3}$
100	9.7	$10.3^{+1.5}_{-0.2}$

Monte Carlo pour chaque composition de cœur est donné aux figures 4.7 et 4.8. Les résultats sont listés au tableau 4.4. La différence entre les âges déterminés à partir des deux échantillons (100% de DAs ou 25% de non-DAs et 75% de DAs) est de seulement 2% en moyenne.

## 4.5 Comparaison avec les résultats dans la littérature

Torres & García-Berro (2016) obtiennent un âge du disque de  $9.2 \pm 0.2$  Ga en utilisant la fonction de luminosité observée de Limoges et al. (2015). Ils produisent une distribution de l'âge en fonction du test de probabilité  $\chi^2$ , centrée sur 9.2 Ga et avec une largeur à mi-hauteur de 0.2 Ga (voir la figure 3 de leur article). Ils n'ont pas considéré les incertitudes inhérentes à leurs modèles pour calculer l'incertitude sur l'âge et ont seulement utilisé celles qui proviennent des observations. Nous obtenons un âge moyen de 9.3 Ga, cohérent avec leur résultat. Cependant, l'âge déterminé dépend fortement des quantités moyennes de carbone et d'oxygène supposées dans le cœur des naines blanches (nous trouvons un âge minimal de  $8.1^{+0.2}_{-0.2}$  Ga pour un cœur d'oxygène et de  $10.4^{+0.7}_{-1.0}$  Ga pour un cœur de carbone).

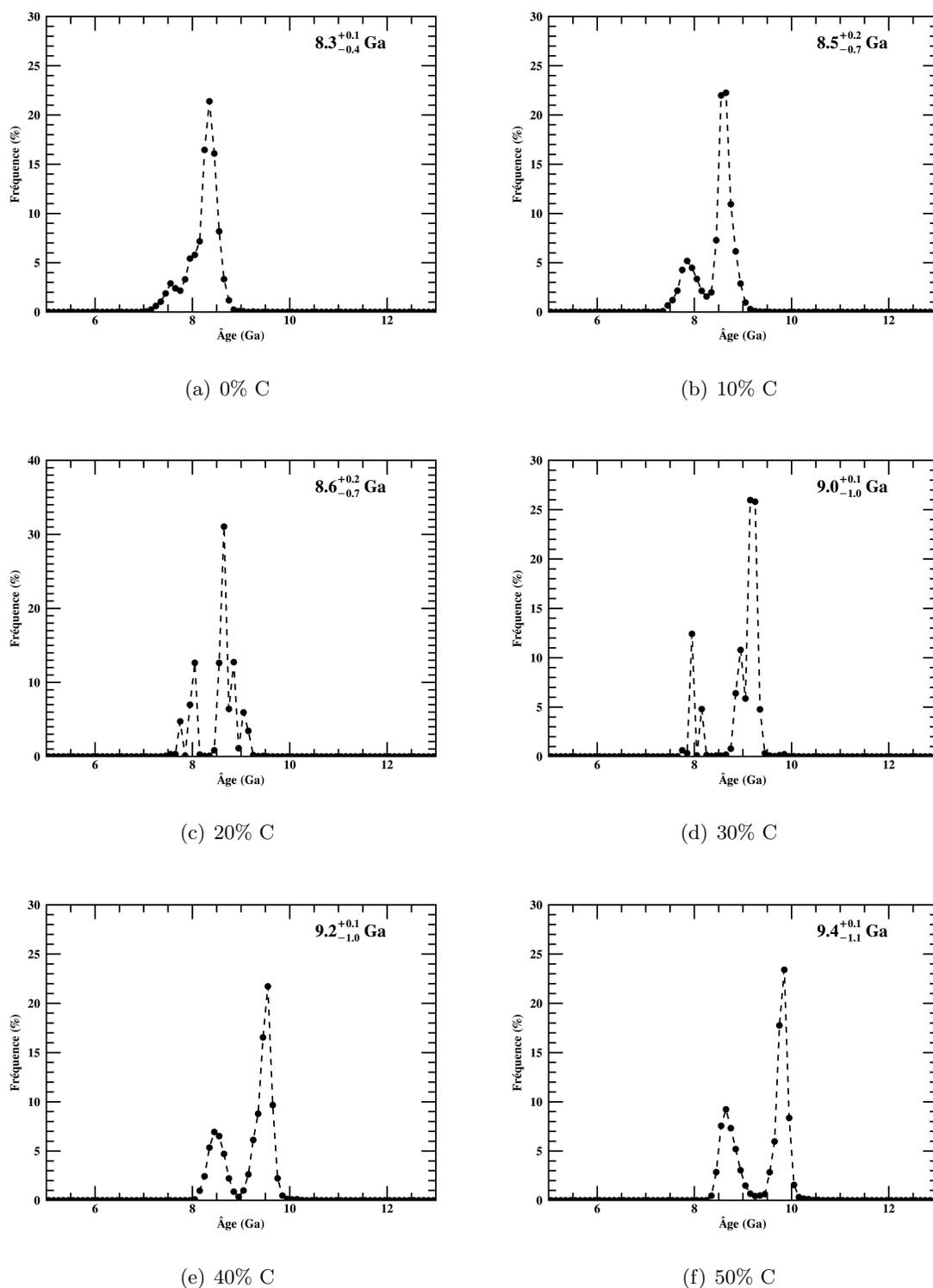


FIGURE 4.7 Distribution de l'âge le plus probable pour les 10 000 essais par simulations Monte Carlo, pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% à 50% de carbone, pour des DAs seulement. L'âge moyen obtenu avec les simulations Monte Carlo, ainsi que ses écarts types positive et négative, sont affichés en haut à droite de chaque sous-figure.

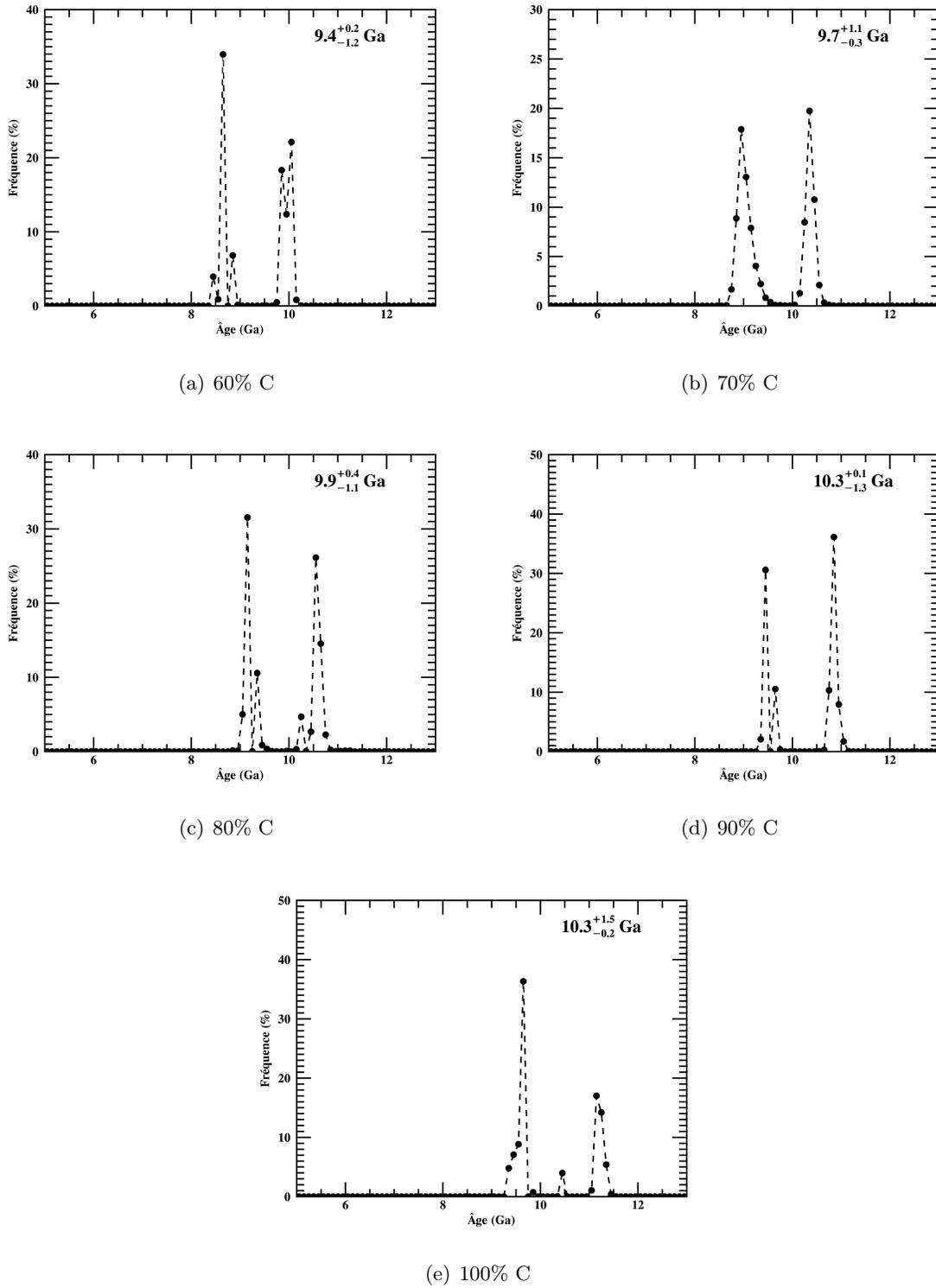


FIGURE 4.8 Distribution de l'âge le plus probable pour les 10 000 essais par simulations Monte Carlo, pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 60% à 100% de carbone, pour des DAs seulement. L'âge moyen obtenu avec les simulations Monte Carlo, ainsi que ses écarts types positive et négative, sont affichés en haut à droite de chaque sous-figure.

Torres & García-Berro (2016) ont utilisé les séquences évolutives de Benvenuto & Althaus (1997) pour modéliser les non-DAs. Ces derniers utilisent la composition du cœur finale qui est obtenue en évoluant une étoile d'âge zéro sur la séquence principale jusqu'à une naine blanche de  $0.55 M_{\odot}$ , de l'article de D'Antona & Mazzitelli (1989). Les séquences évolutives des non-DAs ont alors été calculées pour des naines blanches ayant toutes un cœur principalement composé d'oxygène. Pour ce qui est des DAs, Torres & García-Berro (2016) ont utilisé les séquences évolutives de naines blanches de Renedo et al. (2010). Renedo et al. (2010) ont calculé l'évolution des étoiles à partir d'une étoile d'âge zéro sur la séquence principale et ont utilisé entre autres le taux de réaction nucléaire d'Angulo et al. (1999) pour la réaction  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ . Or, cette dernière a un impact particulièrement important sur la quantité de carbone et d'oxygène finale se retrouvant dans le cœur des naines blanches. Le taux de réaction de  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  adopté par Angulo et al. (1999) est mal contraint, avec une incertitude relative de 40%. De plus, Renedo et al. (2010) ont dû extrapoler ce taux aux basses températures présentes dans le cœur des étoiles. Renedo et al. (2010) ne présentent pas les rapports de carbone sur oxygène finaux qu'ils obtiennent dans leurs naines blanches mais il est certain que ceux-ci sont mal contraints (voir aussi les résultats de Fields et al. 2016 sur le manque de contrainte sur cette quantité). Ce rapport a un grand impact sur les âges déterminés et il s'en suit que l'incertitude sur l'âge calculé par Torres & García-Berro (2016) devrait être plus grande que 0.2 Ga.

Lorsque la parallaxe des candidates naines blanches de Limoges et al. (2015) n'était pas connue, ils ont supposé que la masse de celles-ci étaient de  $0.6 M_{\odot}$ . Torres & García-Berro (2016) ont étudié l'impact de cette supposition sur le calcul des âges. Ils ont trouvé que l'incertitude dérivant de cette supposition est plus petite que 0.1 Ga et n'a donc pas un impact significatif sur le calcul des âges.

Les fonctions de luminosité de Torres & García-Berro (2016) surestiment le nombre de naines blanches à une magnitude bolométrique de  $M_{\text{bol}} \approx 15$ , alors qu'ils utilisent des non-DAs pour construire leur fonction de luminosité théoriques de naines blanches. La différence

est tout de même moins dramatique que pour les fonctions de luminosité théoriques utilisées par Limoges et al. (2015), où seules des DAs sont utilisées. Nous obtenons une meilleure représentation des données que Torres & García-Berro (2016) en ajoutant nos modèles de non-DAs. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que les séquences évolutives de naines blanches non-DAs utilisées par Torres & García-Berro (2016) ont une enveloppe d'hydrogène d'au moins  $10^{-8}$  fois la masse totale de l'étoile. On peut d'ailleurs voir, en comparant les figures 2.28 et 2.17 du chapitre 2, que la bosse dans les fonctions de luminosité théoriques, à  $L/L_{\odot} = 10^{-4}$ , est plus prononcée lorsqu'il reste de l'hydrogène dans l'enveloppe. Il pourrait donc être possible de calibrer la taille moyenne de la couche d'hydrogène dans les non-DAs en utilisant la taille de la bosse des fonctions de luminosité théoriques et en les comparant à des fonctions de luminosité observées. En comparant les résultats de Torres & García-Berro (2016) avec les nôtres, il apparaît qu'une couche très mince d'hydrogène modélise mieux la fonction de luminosité observée du voisinage solaire qu'une couche plus épaisse.

Kilic et al. (2017) ont modélisé la fonction de luminosité observée de Limoges et al. (2015). Pour ce faire, ils ont utilisé les séquences évolutives construites par Brassard P. et Fontaine G., disponibles sur : [www.astro.umontreal.ca/~bergeron/CoolingModels/](http://www.astro.umontreal.ca/~bergeron/CoolingModels/) (Fontaine et al. 2001). Ce sont des séquences évolutives construites pour des naines blanches composées d'un cœur de 50% de carbone et de 50% d'oxygène, les DAs ayant une enveloppe composée de  $10^{-4}$  fois la masse totale de l'étoile et d'hélium de  $10^{-2}$  fois sa masse et les non-DAs ayant une enveloppe composée de  $10^{-10}$  fois la masse totale de l'étoile et d'hélium de  $10^{-2}$  fois sa masse. Ils obtiennent un âge du disque de 8.7 Ga, ce qui est cohérent avec nos résultats (à  $1.5\sigma$  de l'âge que nous déterminons pour un cœur composé de 50% de carbone et 50% d'oxygène). Ils remarquent que l'âge déterminé ne dépend pas de l'intervalle de la classe de l'histogramme qui a été adoptée. Ils trouvent aussi que l'ajout de non-DAs dans leur échantillon théorique change peu l'âge déterminé, comme nous avons aussi trouvé à la section 4.4. Par contre, la bosse dans la fonction de luminosité observée est encore une fois surestimée par la fonction de luminosité théorique de Kilic et al. (2017), mais en moindre mesure que dans l'article de Limoges et al. (2015). Ils ont pourtant ajouté des non-DAs ayant une couche d'hydrogène de

$10^{-10}$  fois la masse totale de l'étoile à leur échantillon de naines blanches. Cette différence pourrait aussi être expliquée par la composition du cœur des naines blanches qu'ils utilisent, même si cette dernière a un plus petit impact sur la taille de la bosse. Une composition de cœur de 80% d'oxygène et 20% de carbone est celle qui modélise le mieux la bosse dans notre cas.

Les séquences évolutives utilisées par l'équipe de Kilic et al. (2017) sont sensiblement les mêmes que celles utilisées dans cette thèse. Ils obtiennent toutefois un âge de  $8.7 \pm 0.1$  Ga, où nous obtenons un âge plus grand, de  $9.3_{-0.6}^{+0.4}$  Ga (pour une composition de cœur de 50% de carbone et 50% d'oxygène). Les deux résultats sont cohérents (leur âge est à  $1.5\sigma$  du nôtre), mais il est surprenant que nous ne trouvions pas des âges plus similaires étant donné que nous utilisons les mêmes séquences évolutives, la même fonction de masse de Salpeter et le même taux de formation d'étoiles constant. Ils ont utilisé la relation que lie la masse initiale d'une étoile à sa masse naine blanche donnée par Kalirai et al. (2008) et nous avons plutôt utilisé celle de Kalirai (2013), qui est sensiblement la même. La différence pourrait provenir d'une combinaison de différents facteurs. Premièrement, ils ont moins de séquences évolutives en fonction de la masse des naines blanches, deuxièmement, ils utilisent 20% de non-DAs et nous 25%, troisièmement, les leurs ont une enveloppe d'hydrogène de  $10^{-10}$  fois la masse totale de l'étoile et nous n'incluons aucun hydrogène dans les nôtres. Enfin, ils utilisent les calculs évolutifs de Hurley et al. (2000) pour calculer le temps que les étoiles passent sur la séquence principale et nous utilisons plutôt les résultats de Bertelli et al. (2008, 2009).

Kilic et al. (2017) étudient l'influence des naines blanches provenant du disque épais sur les âges calculés. Ils estiment qu'environ 20% des naines blanches de l'échantillon du voisinage solaire devrait provenir du disque épais et que d'ignorer cette contribution biaise l'âge trouvé pour le disque mince galactique. Ainsi, lorsqu'ils modélisent le disque épais et le disque mince comme deux entités séparées, ils obtiennent un âge de 6.8 à 7.0 Ga pour le disque mince et de  $8.7 \pm 0.1$  Ga pour le disque épais. Ils contraignent la différence d'âge entre les disques épais et mince à  $1.6_{-0.4}^{+0.3}$  Ga. Les valeurs absolues qu'ils obtiennent ne tiennent pas compte de l'erreur

sur le rapport entre les quantités de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches. Si nous supposons que la différence d'âge entre les deux composantes du disque dépend peu de la composition du cœur des naines blanches, en appliquant la différence d'âge entre le disque épais et mince qu'ils obtiennent dans leur article à nos résultats, on obtient alors que le disque mince est âgé de  $6.5^{+0.4}_{-0.5}$  Ga pour un cœur d'oxygène et de  $7.9^{+0.8}_{-1.1}$  Ga pour un cœur de carbone (contrairement à  $8.1^{+0.2}_{-0.2}$  pour un cœur d'oxygène et  $10.4^{+0.7}_{-1.0}$  pour un cœur de carbone si on ne considère pas les deux composantes du disque). Les quatre dernières classes de luminosité de la fonction de luminosité observée de Limoges et al. (2015) ont une grande influence sur les âges déterminés. Cependant, les deux dernières n'ayant que très peu de naines blanches (trois pour l'avant-dernière et une pour la dernière), nous avons préféré nous concentrer sur l'influence de la quantité de carbone sur oxygène dans le cœur des naines blanches sur le calcul des âges avant de rajouter un paramètre libre additionnel. De plus, la proportion des naines blanches qui sont dans le disque épais, mince et halo est encore sujet à débat et Robin et al. (2012) déterminent que la proportion de naines blanches qui appartiennent au disque épais est de 2% plutôt que de 20% (Carrasco et al. 2014). Il est par ailleurs surprenant que leurs fonctions de luminosité théoriques semblent moins bien modéliser la fonction de luminosité observée que dans notre étude (voir leur figure 2), alors qu'ils disposent d'un paramètre libre additionnel pour la modéliser.

## 4.6 Conclusion

L'âge du disque galactique déterminé par la comparaison des fonctions de luminosité théoriques à la fonction de luminosité observée de l'échantillon proche et non biaisé de Limoges et al. (2015) dépend fortement de la composition moyenne supposée dans le cœur des naines blanches. Il varie entre  $8.1^{+0.2}_{-0.2}$  Ga pour une composition de 100% d'oxygène à  $10.4^{+0.7}_{-1.0}$  Ga pour une composition de 100% de carbone. Les âges déterminés dépendent peu de l'ajout de non-DAs dans l'échantillon théoriques mais le modèle représente beaucoup mieux les données lorsque les non-DAs sont utilisées pour construire la fonction de luminosité théorique. Il serait d'ailleurs possible de contraindre la taille moyenne de la couche d'hydrogène dans les non-DAs

grâce à la hauteur de la bosse dans la fonction de luminosité observée.

## *Chapitre 5*

# Amas stellaires

### 5.1 Introduction

Nous avons modélisé les fonctions de luminosité observées de trois amas globulaires, 47 Tucanae, NGC 6397, M4 et un amas ouvert, NGC 6791. Ces amas sont situés entre 2 et 4 kpc de la Terre. Étant plus éloignés que les naines blanches du voisinage solaire ou de M67, il est plus difficile d’observer la coupure aux faibles luminosités dans la fonction de luminosité de naines blanches qui est due à l’âge fini de l’amas. De plus, les incertitudes sur la magnitude observée sont plus grandes, ainsi que le nombre de contaminants potentiels puisque les objets sont sélectionnés seulement par coupures en couleurs et mouvement propre. Il est ainsi plus ardu de déterminer l’âge des amas stellaires grâce aux fonctions de luminosité de naines blanches que dans le cas du voisinage solaire, mais ce faisant, nous pouvons alors tester les modèles évolutifs pour des grands âges et vérifier les âges déterminés par le point de décrochage de la séquence principale, notamment puisque la détermination de l’âge est moins dépendante de la précision sur la distance lorsque nous utilisons les naines blanches (Woodley et al. 2012).

## 5.2 Amas globulaire 47 Tucanae

### 5.2.1 Présentation de l'échantillon

Hansen et al. (2013) ont observé l'amas globulaire 47 Tucanae avec le télescope Hubble et ont construit une fonction de luminosité des naines blanches de l'amas. Les détails des observations et de leur technique de caractérisation des membres sont présentés dans les informations supplémentaires à l'article. Ils ont construit une fonction de luminosité observée qui contient plus de 2000 naines blanches et observent clairement la coupure dans la fonction de luminosité due à l'âge fini de l'amas (voir la figure 5.1). Ils ont étudié la complétude de leur échantillon, ainsi que l'erreur sur la magnitude observée des étoiles et ont conclu que la coupure dans la fonction de luminosité observée est réelle et n'est pas due à un manque de complétude ou à un décalage entre les magnitudes observées et les magnitudes apparentes des étoiles (voir la figure S1 des informations supplémentaires d'Hansen et al. 2013). La complétude est de 70% à la luminosité où la coupure survient.

Les mesures de la distance à l'amas obtenues dans les différents articles vont de  $\mu_0 = 13.09 \pm 0.04$  (Watkins et al. 2015) à  $\mu_0 = 13.57 \pm 0.15$  (Reid 1998). L'incertitude sur la distance ayant un impact non négligeable sur l'âge que nous déterminons, nous avons combiné les distances obtenues dans 26 articles, mesurées selon sept méthodes différentes. Nous avons calculé la distance moyenne pondérée, où les poids sont définis comme l'inverse de la barre d'erreur au carré, à partir des valeurs listées dans la table 1 de l'article de Woodley et al. (2012) (distances de Storm et al. 1994; Gratton et al. 1997; Salaris & Weiss 1998; Kaluzny et al. 1998; Reid 1998; Ferraro et al. 1999, 2000; Carretta et al. 2000; Zoccali et al. 2001; Grundahl et al. 2002; Percival et al. 2002; Gratton et al. 2003; McLaughlin et al. 2006; Salaris et al. 2007; Kalirai et al. 2007; Bono et al. 2008; Bertelli et al. 2009; Thompson et al. 2010 et Woodley et al. 2012) combinées à celles dans : Hansen et al. (2013); Richer et al. (2013); García-Berro et al. (2014); Hansen et al. (2015); Watkins et al. (2015); Correnti et al. (2016) et Brogaard et al. (2017). La distance moyenne pondérée que nous obtenons est de  $\mu_0 = 13.27 \pm 0.11$ . Nous avons défini l'erreur sur la distance moyenne à partir de l'écart type pondéré non biaisé, en utilisant

les mêmes poids.

### 5.2.2 Modèles

Nous avons utilisé plus de 600 séquences évolutives de naines blanches DAs et non-DAs, ayant les mêmes caractéristiques que celles décrites au chapitre 2 : elles ont une composition de cœur entre 0% et 100% de carbone par pas de 10%. Les masses des naines blanches vont de  $0.4 M_{\odot}$  à  $1.2 M_{\odot}$  par pas de  $0.05 M_{\odot}$ . Les DAs ont une enveloppe d'hydrogène de  $10^{-4}$  fois la masse totale de l'étoile et d'hélium de  $10^{-2}$  fois sa masse. Les non-DAs n'ont pas d'hydrogène et une couche d'hélium de  $10^{-2}$  fois sa masse. Nous avons utilisé l'extrapolation des non-DAs telle que discutée à la sous-section 2.2.9.3. Nous avons adopté un taux de formation d'étoiles qui reproduit celui de la formation d'un amas, c'est-à-dire une formation d'étoiles soudaine, suivi d'un ralentissement exponentiel avec une constante de temps de 0.5 Ga (taux de formation stellaire,  $\text{TFS} \propto e^{-(t_{\text{milieu}} - t_{\text{refr}} - t_{\text{ms}})/(0.5 \text{ Ga})}$ ). Nous avons utilisé la même fonction reliant la masse initiale et la masse finale et la même fonction de masse initiale que celles adoptées à la section 2.2.7 pour créer les fonctions de luminosité théoriques. Nos fonctions de luminosité théoriques construites grâce à ces modèles ont des âges allant de 2 à 15 Ga par pas de 0.1 Ga.

### 5.2.3 Âge de l'amas 47 Tucanae en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches

La fonction de luminosité observée par Hansen et al. (2013) est donnée par les cercles pleins noirs à la figure 5.1. Nous avons construit un histogramme de 21 classes, par intervalles de  $0.2 m_{\text{F606W}}$ , comme décrit dans l'article d'Hansen et al. (2013). Les barres d'erreur sont calculées à partir de la distribution de Poisson (nous avons utilisé la même technique qu'à la section 4.3.1). Nous avons normalisé les fonctions de luminosité théoriques grâce aux quatorze premiers points, c'est-à-dire les points qui sont dans la partie ascendante de la fonction de luminosité observée. Les âges qui modélisent le mieux la fonction de luminosité observée en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches de l'amas 47 Tucanae, ainsi que le  $\chi^2$  réduit moyen sont donnés au tableau 5.1. Nous avons ignoré les classes qui sont à

TABLE 5.1 Âge de l’amas 47 Tucanae en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	8.7	46
10	9.0	50
20	9.2	55
30	9.4	45
40	9.8	33
50	10.1	30
60	10.1	34
70	10.7	15
80	11.0	23
90	11.2	12
100	11.6	13

une luminosité  $\log L/L_{\odot} < -5$  dans le calcul du  $\chi^2$  car la complétude des observations est de moins de 50% (voir les informations supplémentaires d’Hansen et al. 2013). L’âge moyen que nous obtenons est de  $10.1^{+1.5}_{-1.4}$  Ga. Nous avons calculé l’âge en moyennant les âges estimés pour chaque composition, l’incertitude a été calculée de manière conservatrice, en calculant la différence entre l’âge moyen et les âges extrêmes. Les incertitudes citées ici proviennent donc seulement de l’incertitude sur la composition du cœur des naines blanches. L’âge minimal que nous obtenons est de 8.7 Ga, pour une composition moyenne de cœur de 100% d’oxygène, l’âge maximal est de 11.6 Ga, pour une composition moyenne de 100% de carbone.

#### 5.2.4 Simulations Monte Carlo et distribution des âges obtenus

Afin de mesurer la précision des âges estimés, nous avons réalisé une simulation Monte Carlo de 10 000 éléments, similaire à celle effectuée à la section 4.3.3, prenant en compte les erreurs sur la hauteur des intervalles de la fonction de luminosité observée d’Hansen et al. (2013).

L’âge déterminé pour chaque composition de cœur est extrêmement stable et ne change pas lorsque nous étudions l’impact des incertitudes sur la hauteur des intervalles, calculées à

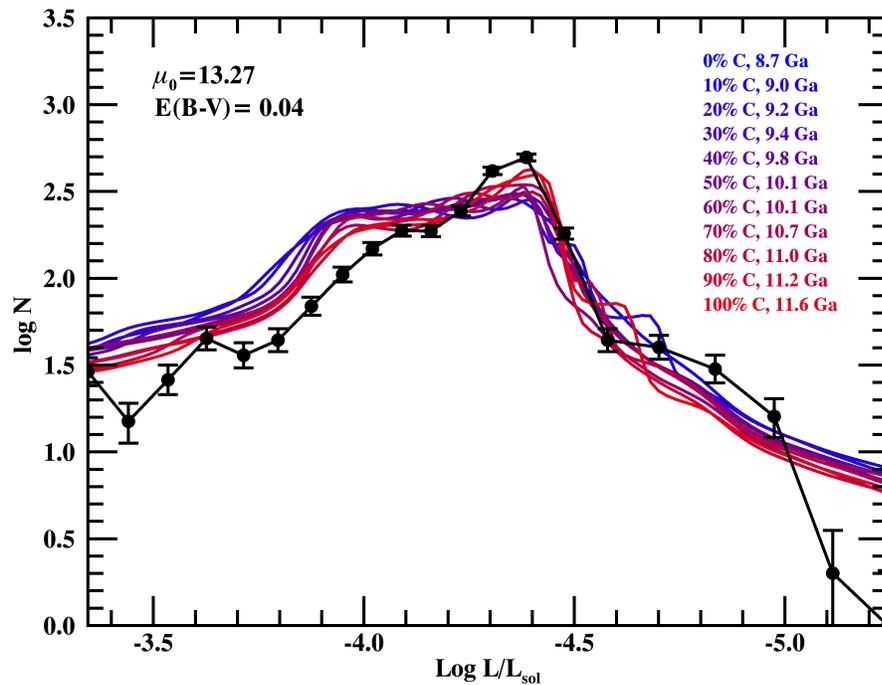


FIGURE 5.1 Fonction de luminosité de l'amas 47 Tucanae, représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 14 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à droite. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_0 = 13.27$ .

TABLE 5.2 Distributions des âges obtenus de 47 Tucanae pour chaque fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches

C %	Âge médian (Ga)	Âge moyen (Ga)
0	8.7	$8.7^{+0.05}_{-0.10}$
10	9.0	$9.0^{+0.05}_{-0.05}$
20	9.2	$9.2^{+0.05}_{-0.05}$
30	9.4	$9.4^{+0.05}_{-0.05}$
40	9.8	$9.8^{+0.05}_{-0.10}$
50	10.1	$10.1^{+0.05}_{-0.05}$
60	10.1	$10.1^{+0.10}_{-0.05}$
70	10.7	$10.7^{+0.05}_{-0.10}$
80	11.0	$11.0^{+0.05}_{-0.20}$
90	11.2	$11.2^{+0.05}_{-0.10}$
100	11.6	$11.6^{+0.05}_{-0.10}$

partir de la distribution de Poisson. Ceci est dû au fait que chaque intervalle possède un grand nombre de naines blanches. Ainsi, l'âge déterminé pour chaque essai par simulation Monte Carlo est presque toujours le même et l'écart type des âges déterminés est de moins de 0.2 Ga, voir les figures 5.2 et 5.3. Puisque nous avons créé des fonctions de luminosité théoriques pour des âges du milieu allant de 2 Ga à 15 Ga par incréments de 0.1 Ga, nous avons adopté une incertitude sur l'âge déterminé pour chaque composition de cœur d'au moins 0.05 Ga. Comme au chapitre 4, cette incertitude ne tient en compte que de la robustesse de la modélisation de l'âge du milieu par comparaison entre les fonctions de luminosité théoriques et la fonction de luminosité observée. Elle ne tient pas en compte les incertitudes dans nos modèles évolutifs.

## 5.2.5 Discussion

### 5.2.5.1 Influence de l'ajout des non-DAs sur le calcul des âges

Nous avons modélisé la fonction de luminosité observée de l'amas en utilisant des modèles évolutifs de DAs seulement, pour vérifier que l'âge ne dépend pas de l'ajout des non-DAs même

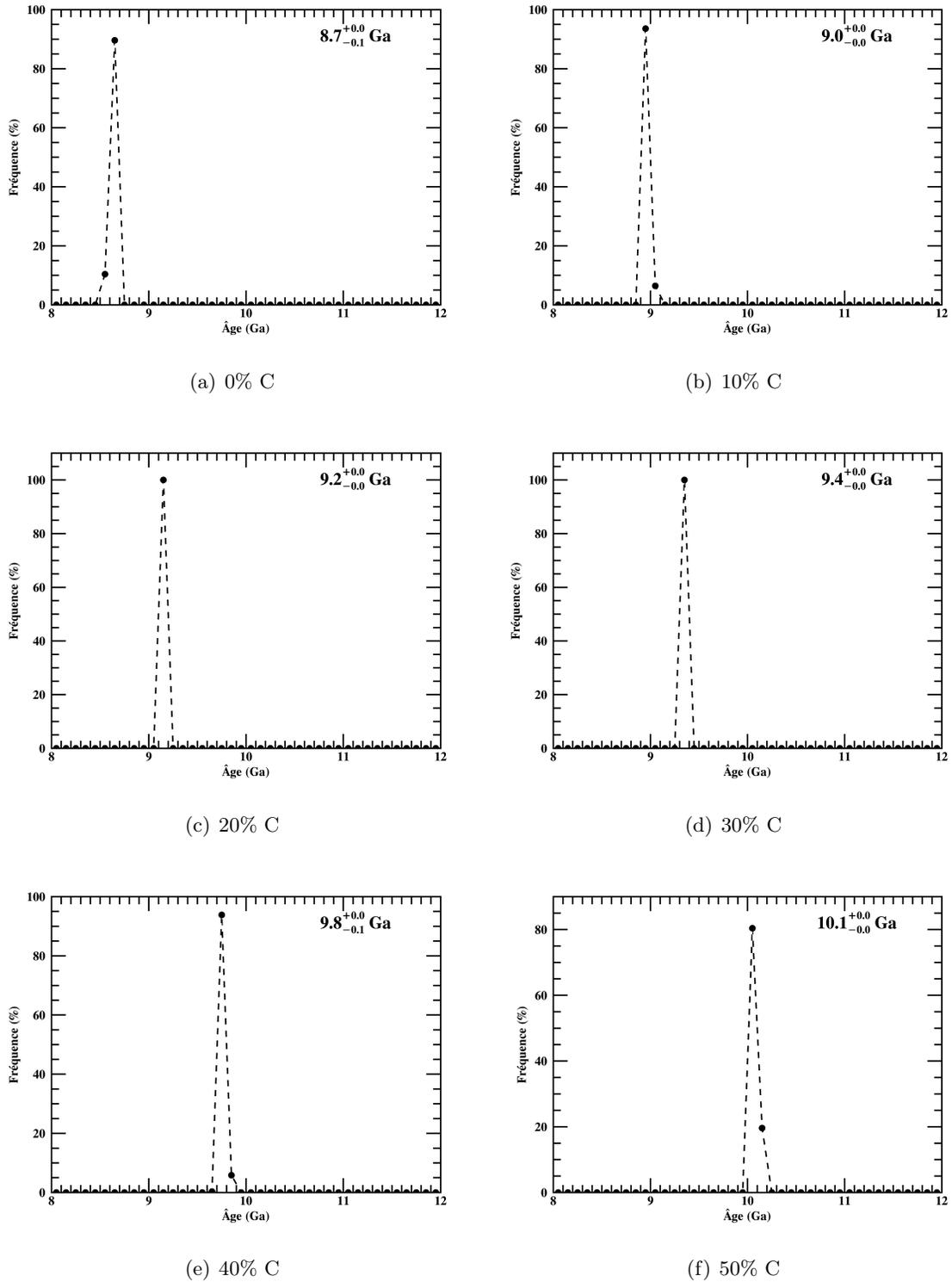


FIGURE 5.2 Distributions des âges obtenus de l'amas 47 Tucanae le plus probable pour les 10 000 essais par simulations Monte Carlo, pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% à 50% de carbone. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_0 = 13.27$ . L'âge moyen obtenu avec les simulations Monte Carlo, ainsi que ses écarts types positive et négative, sont affichés en haut à droite de chaque sous-figure.

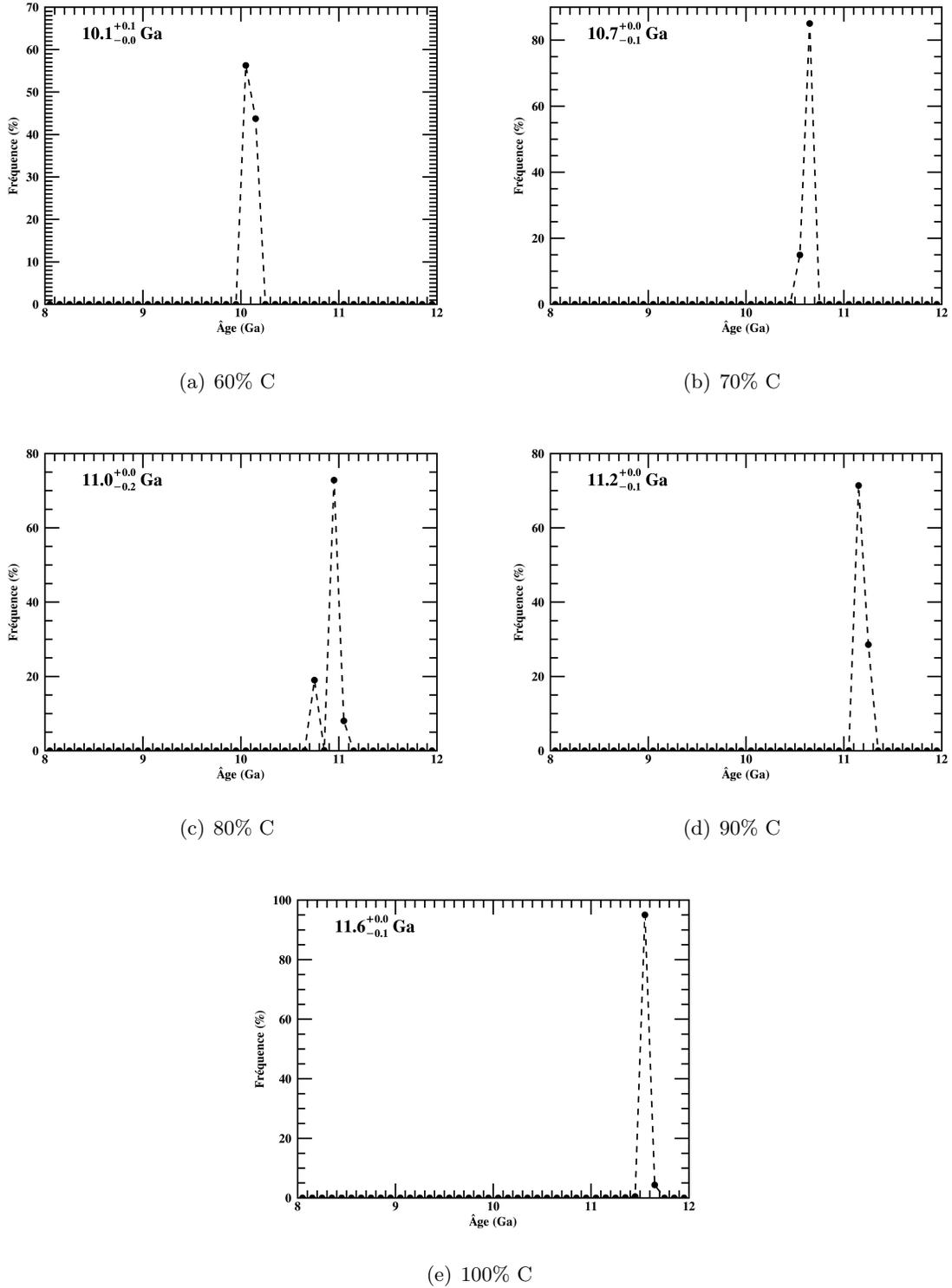


FIGURE 5.3 Distributions des âges obtenus de l'amas 47 Tucanae le plus probable pour les 10 000 essais par simulations Monte Carlo, pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 60% à 100% de carbone. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_0 = 13.27$ . L'âge moyen obtenu avec les simulations Monte Carlo, ainsi que ses écarts types positive et négative, sont affichés en haut à gauche de chaque sous-figure.

TABLE 5.3 Âge de l’amas 47 Tucanae en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, en utilisant des DAs seulement

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	8.7	33
10	9.1	32
20	9.2	38
30	9.4	35
40	9.9	21
50	10.2	21
60	10.2	28
70	10.7	9
80	11.1	16
90	11.3	7.6
100	11.6	5.8

lorsque nous sommes en présence d’un amas globulaire, comme c’est le cas pour l’amas M67. Nous pouvons voir à la figure 5.4 et au tableau 5.3 que les âges déterminés sont presque identiques à ceux déterminés lorsqu’il y a une combinaison de DAs et de non-DAs. La différence d’âge est de 0.2 Ga au maximum et est en moyenne de 0.07 Ga. Par contre, le  $\chi^2$  réduit est plus petit lorsqu’on inclut seulement des DAs (1.4 fois plus petit en moyenne). Il n’est pas clair pourquoi seulement des DAs modélisent mieux la fonction de luminosité observée.

### 5.2.5.2 Influence de la distance sur le calcul des âges

Nous avons calculé la moyenne pondérée des distances dans la littérature et nous avons obtenu une distance de  $\mu_0 = 13.27 \pm 0.11$  avec la méthode décrite à la section 5.2.1. Nous avons modélisé les fonctions de luminosité observée en utilisant les deux valeurs extrêmes de la distance à l’amas (13.16 et 13.38). Pour une distance minimale nous obtenons les résultats à la figure 5.5 et au tableau 5.4, pour une distance maximale ceux à la figure 5.6 et au tableau 5.5. L’incertitude sur la distance à l’amas se traduit en une incertitude supplémentaire sur l’âge de 0.3 Ga en moyenne. Nous avons testé l’impact de l’incertitude du rougissement sur le calcul des âges et avons trouvé que lorsque nous utilisons ses valeurs extrêmes  $E(B - V) = 0.04 \pm 0.01$ ,

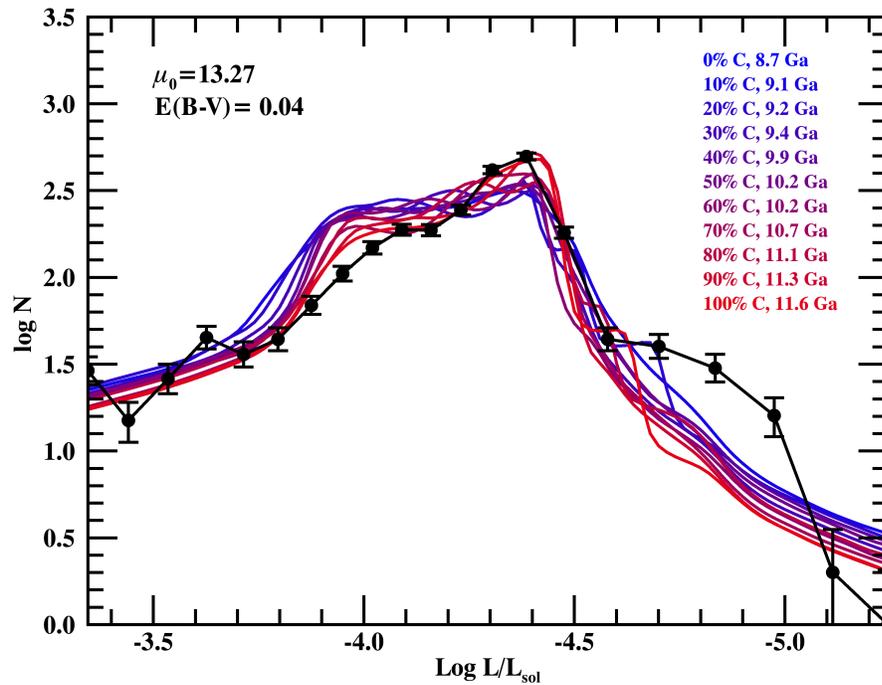


FIGURE 5.4 Fonction de luminosité de l'amas 47 Tucanae, représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques, calculées en utilisant des DAs seulement, sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches DAs allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 14 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches DAs est donnée à droite. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_0 = 13.27$ .

TABLE 5.4 Âge de l’amas 47 Tucanae en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée :  $\mu_0 = 13.16$

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	8.9	66
10	9.3	69
20	9.4	81
30	9.6	63
40	10.0	49
50	10.4	47
60	10.4	48
70	11.0	26
80	11.4	33
90	11.5	20
100	11.7	21

(Hansen et al. 2013), les âges déterminés ne changent pas.

Les incertitudes sur les âge obtenus pour chaque composition de cœur, prenant en compte l’erreur sur la distance, celle provenant de l’ajout des non-DAs et celle provenant de la statistique de Poisson sont présentées au tableau 5.6. Nous n’avons pas inclus les erreurs qui découlent de l’incomplétude des observations, des contaminants, des erreurs sur la valeur de la magnitude observée, ni celles associées aux incertitudes dans nos modèles évolutifs (exceptée l’incertitude qui est due à la composition du cœur des naines blanches).

### 5.2.5.3 Différence entre la fonction de luminosité observée et les fonctions de luminosité théoriques

Les fonctions de luminosité théoriques modélisent beaucoup moins bien la fonction de luminosité observée de 47 Tucanae que dans le cas de la fonction de luminosité du voisinage solaire (voir les figures 4.1 et 5.1). Les fonctions de luminosité théoriques surestiment le nombre de naines blanches jusqu’à des luminosités de  $\log L/L_\odot = -4$  mais les sous-estiment pour les points suivants. La chute du nombre de naines blanches est par contre très bien représentée

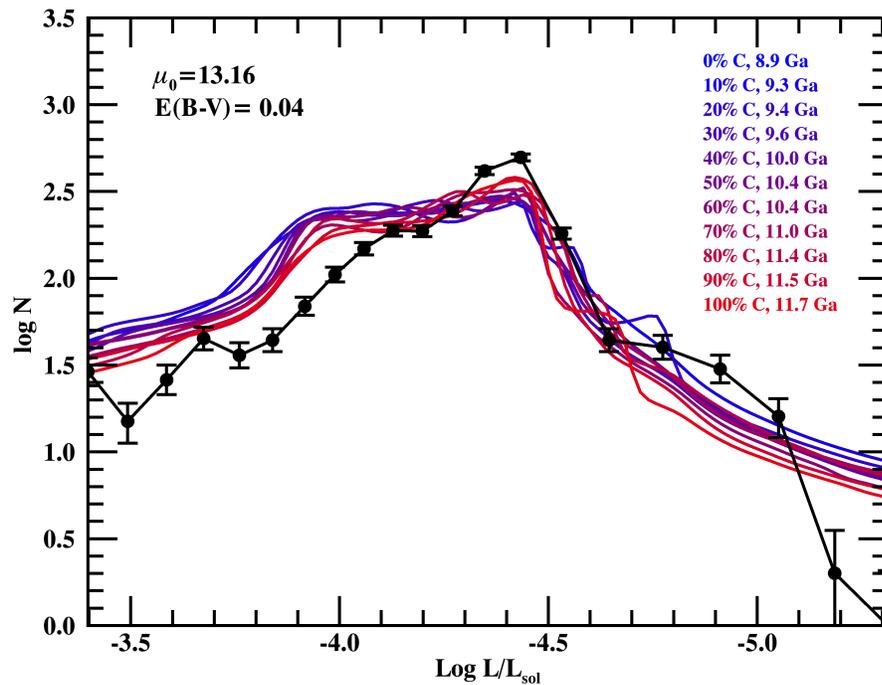


FIGURE 5.5 Fonction de luminosité de l'amas 47 Tucanae pour une distance à l'amas adoptée de  $\mu_0 = 13.16$ , représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 14 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à droite.

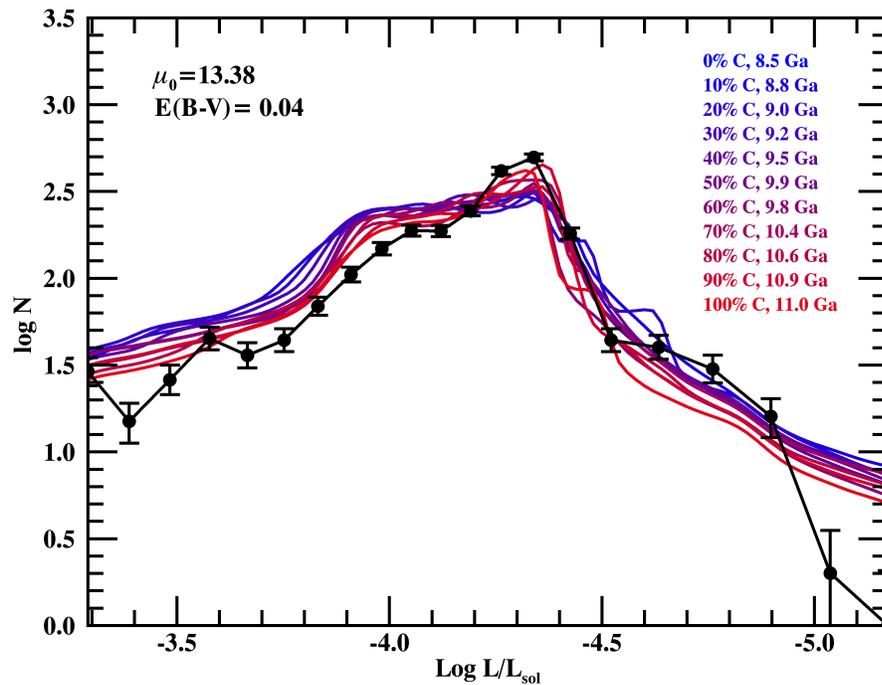


FIGURE 5.6 Fonction de luminosité de l'amas 47 Tucanae, pour distance à l'amas adoptée de  $\mu_0 = 13.38$ , représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 14 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à droite.

TABLE 5.5 Âge de l'amas 47 Tucanae en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée :  $\mu_0 = 13.38$

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	8.5	32
10	8.8	36
20	9.0	38
30	9.2	33
40	9.5	23
50	9.9	20
60	9.8	23
70	10.4	9.1
80	10.6	15
90	10.9	8.8
100	11.0	8.5

TABLE 5.6 Âge de l'amas 47 Tucanae en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, incluant toutes les incertitudes calculées

C (%)	Âge (Ga)
0	$8.7^{+0.2}_{-0.2}$
10	$9.0^{+0.3}_{-0.2}$
20	$9.2^{+0.2}_{-0.2}$
30	$9.4^{+0.2}_{-0.2}$
40	$9.8^{+0.2}_{-0.3}$
50	$10.1^{+0.3}_{-0.2}$
60	$10.1^{+0.3}_{-0.3}$
70	$10.7^{+0.3}_{-0.3}$
80	$11.0^{+0.4}_{-0.4}$
90	$11.2^{+0.3}_{-0.3}$
100	$11.6^{+0.1}_{-0.6}$

(le dernier point n'est pas pris en compte dans la modélisation car il a une complétude de moins de 50%).

Les luminosités où les fonctions de luminosité théoriques surestiment le nombre de naines blanches correspond à l'échelle de luminosités où il y a un ralentissement du taux de refroidissement dû à la cristallisation du cœur (voir la figure 2.2.6). Cependant ce phénomène est bien compris et est bien modélisé et il serait surprenant que cette différence provienne de la modélisation de la cristallisation, étant donné qu'elle semble très bien fonctionner dans le cas de la fonction de luminosité du voisinage solaire.

La bosse de la fonction de luminosité observée est sous-estimée par les fonctions de luminosité théoriques pour des luminosités où se passe le couplage convectif. Encore une fois, il serait surprenant que le couplage convectif cause un ralentissement dans le taux de refroidissement encore plus grand que celui modélisé jusqu'à maintenant, cette bosse étant notamment bien représentée pour la fonction de luminosité de voisinage solaire. La coupure à la fonction de luminosité est cependant bien modélisée et les âges déterminés étant indépendants de la partie ascendante de la fonction de luminosité, ils ne sont pas influencés par ces divergences. De plus, les âges que nous trouvons sont cohérents avec ceux trouvés par Hansen et al. (2013), voir la section suivante.

### 5.2.6 Comparaison avec les résultats dans la littérature

Hansen et al. (2013) obtiennent un âge de  $9.7 \pm 0.7$  Ga (avec un degré de confiance statistique de 95%). La composition du cœur des naines blanches qu'ils ont utilisé dans leurs modèles évolutifs est de  $X(O) = 55\%$  (voir la figure S6 des informations supplémentaires à leur article). Ils n'ont pas inclus l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches et leur incertitude est une combinaison de celles sur la métallicité du progéniteur, sur la fraction d'hélium et sur le critère de convection (voir les informations supplémentaires à leur article).

Ils affirment que leurs résultats ne dépendent pas des incertitudes sur le progéniteur puisque les compositions du cœur des naines blanches qu'ils obtiennent après avoir fait évoluer les différents versions de leurs étoiles sont très similaires, peu importe les paramètres de l'étoile progéniteur qu'ils ont utilisés. Ce résultat est en contradiction direct avec les résultats de Fields et al. (2016), qui ont utilisé le même code évolutif (MESA). Ces derniers trouvent que l'évolution d'une étoile de la séquence principale jusqu'à la phase naine blanche va avoir des compositions de cœur significativement différente si toutes les incertitudes sur les taux de réactions nucléaires sont prise en compte. Ainsi, Hansen et al. (2013) étudient l'impact de plusieurs paramètres sur la composition finale de la naine blanche (voir la figure S6 des informations supplémentaires à leur article) mais n'étudient pas en détails l'impact des incertitudes sur les taux de réactions nucléaires sur la composition finale du cœur des naines blanches, d'où la différence entre leur conclusion et celle de Fields et al. (2016).

Nous trouvons un âge de  $10.1_{-1.4}^{+1.5}$  Ga pour 47 Tucanae, l'incertitude comprenant l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches, celle sur la distance à l'amas et celle due à l'ajout des DAs (combinées en quadrature). L'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches est celle qui domine largement l'incertitude totale. Ainsi, si nous supposons une composition de cœur de 55% d'oxygène, comme celle utilisée par Hansen et al. (2013), nous trouvons un âge de  $9.9_{-0.3}^{+0.3}$  Ga, à  $0.3\sigma$  de celui déterminé par Hansen et al. (2013) ( $\sigma$  étant ici la somme en quadrature de l'erreur que nous avons déterminée et de celle déterminée par Hansen et al. (2013)). Nos résultats concordent très bien avec les leurs alors que nous utilisons des modèles évolutifs différents (ils utilisent le code évolutif MESA et nous utilisons des codes évolutifs qui partent de la phase naine blanche).

L'âge calculé par le point de décrochage de la séquence principale est entre 10 et 13 Ga (Gratton et al. 2003; VandenBerg 2000; Salaris & Weiss 2002; Salaris et al. 2007). L'âge le plus précis déterminé grâce à la binaire éclipsante V69 est de  $10.4 \pm 0.6$  Ga (Thompson et al. 2010; Hansen et al. 2013), âge qui concorde avec nos résultats, particulièrement pour des compositions de cœur entre 40% et 80% de carbone.

### 5.2.7 Conclusion

Nous trouvons que l'âge de l'amas 47 Tucanae est fortement dépendant de la composition du cœur des naines blanches. Nous trouvons un âge moyen de  $10.1_{-1.4}^{+1.5}$  Ga (l'impact de l'incertitude sur la distance, celui sur la composition moyenne du cœur des naines blanches et celui sur l'ajout des non-DAs dans les fonctions de luminosité théoriques sont inclus). L'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches domine l'incertitude sur l'âge de 47 Tucanae que nous déterminons et ainsi, si nous ignorions l'impact de l'incertitude sur la composition moyenne du cœur des naines blanches, elle serait alors de seulement 0.1 à 0.6 Ga.

D'ailleurs, si nous supposons que la composition du cœur des naines blanches est d'au moins 25% d'oxygène, comme déterminé par Fields et al. (2016), nous avons alors que l'âge de 47 Tucanae est de  $9.4_{-0.2}^{+0.2}$  Ga. Si nous supposons que la mesure de Giammichele et al. (2016) s'applique à toutes les naines blanches, nous trouvons alors un âge de  $9.4_{-0.2}^{+0.2}$  Ga et si nous supposons que la composition la plus probable que nous déterminons au chapitre 3 s'applique à toutes les étoiles nous trouvons alors  $10.7_{-0.3}^{+0.3}$  Ga (voir la tableau 5.7).

La fonction de luminosité observée de l'amas 47 Tucanae est moins bien modélisée par nos fonctions de luminosité théoriques que dans le cas de celle du voisinage solaire. Ceci pourrait être dû au fait que l'histoire de formation des étoiles de l'amas est mal modélisée et au fait que l'observation des naines blanches dans les amas est beaucoup plus difficile que dans le cas de celles du voisinage solaire. L'échantillon du voisinage solaire est à moins de 40 pc de la Terre alors que l'amas 47 Tucanae est à 4000 pc, ceci résulte en une différence en magnitude de 13 dex. Cependant, ces différences n'affectent pas les âges déterminés, qui sont très robustes même lors d'une simulation Monte Carlo qui prend en compte l'incertitude sur la hauteur des classes calculée via la statistique de Poisson.

Nos résultats sont cohérents avec ceux trouvés par Hansen et al. (2013) alors qu'ils utilisent des codes évolutifs de naines blanches significativement différents et ils sont aussi similaires à ceux utilisant la méthode du point de décrochage de la séquence principale (Thompson et al.

TABLE 5.7 Âge de l'amas 47 Tucanae en fonction des différentes suppositions sur la composition du cœur des naines blanches, distance adoptée :  $\mu_0 = 13.38$ 

C (%)	Âge (Ga)	
0 à 100	$10.1^{+1.5}_{-1.4}$	Âge moyennée sur toutes les compositions
0 à 75	$9.8^{+1.1}_{-1.1}$	Âge moyennée sur les compositions déterminées par Fields et al. (2016)
30	$9.4^{+0.2}_{-0.2}$	Âge pour la composition déterminée par Giammichele et al. (2016)
70	$10.7^{+0.3}_{-0.3}$	Âge pour la composition la plus probable du chapitre 3
45	$9.9^{+0.3}_{-0.3}$	Âge pour la composition utilisée par Hansen et al. (2013) (pour comparaison seulement)

2010; Hansen et al. 2013). Les résultats obtenus lorsque l'on utilise les fonctions de luminosité de naines blanches sont précis et robustes, une fois que nous connaissons la distance de l'amas, son rougissement et la composition moyenne du cœur des naines blanches. Ce dernier paramètre est malheureusement encore mal connu mais c'est celui qui domine les incertitudes sur l'âge déterminé grâce aux naines blanches.

## 5.3 Amas globulaire NGC 6397

### 5.3.1 Présentation de l'échantillon

Hansen et al. (2007) ont observée l'amas globulaire NGC 6397 avec le télescope spatial Hubble. Ils se sont concentrés sur la détection de naines blanches dans l'amas pour construire une fonction de luminosité observée et ils observent la coupure due à l'âge fini de l'amas. Ils font une étude de la complétude des observations jusqu'à des luminosités où la coupure est observée et concluent que cette dernière est réelle et n'est pas due à un biais observationnel. La complétude de leur échantillon est entre 70 et 80% jusqu'à  $\log L/L_{\text{sol}} = -4.5$  et elle est de 65% là où il y a coupure. Ils incluent dans leurs incertitudes les erreurs systématiques et les erreurs calculées via la distribution de Poisson (voir leur section 2.4). Richer et al. (2008)

ont étudié les distances à l’amas dans la littérature récente et concluent que l’amas est à une distance de  $\mu_0 = 12.03 \pm 0.06$ , nous adoptons cette distance pour la suite de cette section et nous utilisons le rougissement obtenu par Richer et al. (2013) :  $E(B - V) = 0.18 \pm 0.01$ .

### 5.3.2 Âge de l’amas NGC 6397 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches

Nous avons utilisé les mêmes modèles qu’à la section précédente pour construire les fonctions de luminosité théoriques (voir la section 5.2.2). La fonction de luminosité observée par Hansen et al. (2007) est donnée par les cercles pleins noirs à la figure 5.7. Les barres d’erreur proviennent d’Hansen et al. (2007); elles ont été calculées en combinant l’incertitude calculée à partir de la distribution de Poisson et différentes incertitudes dues à des erreurs systématiques. Nous avons normalisé les fonctions de luminosité théoriques grâce aux 25 premiers points, c’est-à-dire les points qui sont dans la partie ascendante de la fonction de luminosité observée, indépendants de l’âge de l’amas et dont la complétude va de 70 à 80%. Les âges qui modélisent le mieux la fonction de luminosité observée en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches de l’amas NGC 6397, ainsi que le  $\chi^2$  réduit moyen sont donnés au tableau 5.8. L’âge moyen que nous trouvons est de  $10.7^{+1.6}_{-1.7}$  Ga, les incertitudes provenant seulement de l’incertitude sur la composition du cœur des naines blanches. L’âge minimal que nous obtenons est de 9.0 Ga, pour une composition moyenne de cœur de 100% d’oxygène, l’âge maximal est de 12.3 Ga, pour une composition moyenne de 100% de carbone.

### 5.3.3 Simulations Monte Carlo et distribution des âges obtenus

Afin de mesurer la précision des âges estimés, nous avons réalisé une simulation Monte Carlo de 10 000 éléments, similaire à celle faite pour 47 Tucanae à la section 5.2.4, prenant en compte les erreurs sur la hauteur des intervalles de la fonction de luminosité observée d’Hansen et al. (2007). L’âge déterminé pour chaque composition de cœur est très stable et change peu lorsque nous étudions l’impact des incertitudes sur la hauteur des intervalles. L’écart type des âges déterminés est de moins de 0.6 Ga (voir les figures 5.8 et 5.9). Puisque nous avons créé des fonctions de luminosité théoriques pour des âges du milieu allant de 2 Ga

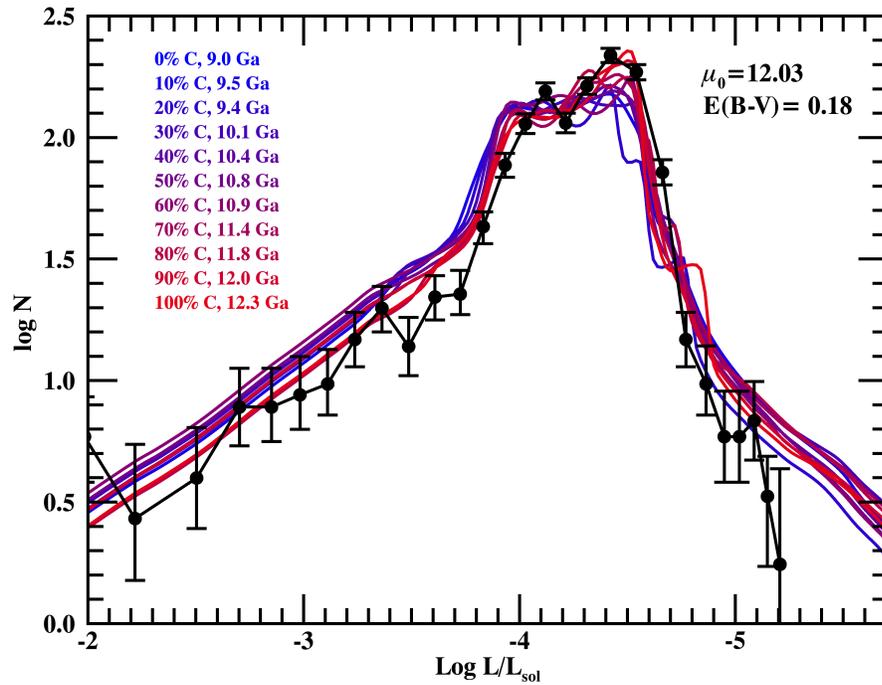


FIGURE 5.7 Fonction de luminosité de l'amas NGC 6397, représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur incluent les erreurs systématiques et celles calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 25 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à gauche. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_0 = 12.03$ , le rougissement de  $E(B - V) = 0.18$ .

TABLE 5.8 Âge de NGC 6397 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	9.0	6
10	9.5	6
20	9.4	7
30	10.1	5
40	10.4	4
50	10.8	4
60	10.9	5
70	11.4	3
80	11.8	3
90	12.0	2
100	12.3	2

à 15 Ga par incrément de 0.1 Ga, nous avons adopté une incertitude sur l'âge déterminé pour chaque composition de cœur d'au moins 0.05 Ga. Comme au chapitre 4, cette incertitude ne tient en compte que la robustesse de la modélisation de l'âge du milieu par comparaison entre les fonctions de luminosité théoriques et la fonction de luminosité observée. Elle ne tient pas compte des incertitudes sur nos modèles évolutifs.

### 5.3.4 Discussion

#### 5.3.4.1 Influence de l'ajout des non-DAs sur le calcul des âges

Nous avons modélisé la fonction de luminosité observée de l'amas en utilisant des modèles évolutifs de DAs seulement. Nous pouvons voir à la figure 5.10 et au tableau 5.10 que les âges déterminés sont presque identiques à ceux déterminés lorsqu'il y a une combinaison de DAs et de non-DAs. La différence d'âge est de 0.3 Ga au maximum et est en moyenne de 0.1 Ga. Par contre, le  $\chi^2$  réduit est plus petit lorsqu'on inclut seulement des DAs (1.6 fois plus petit en moyenne).

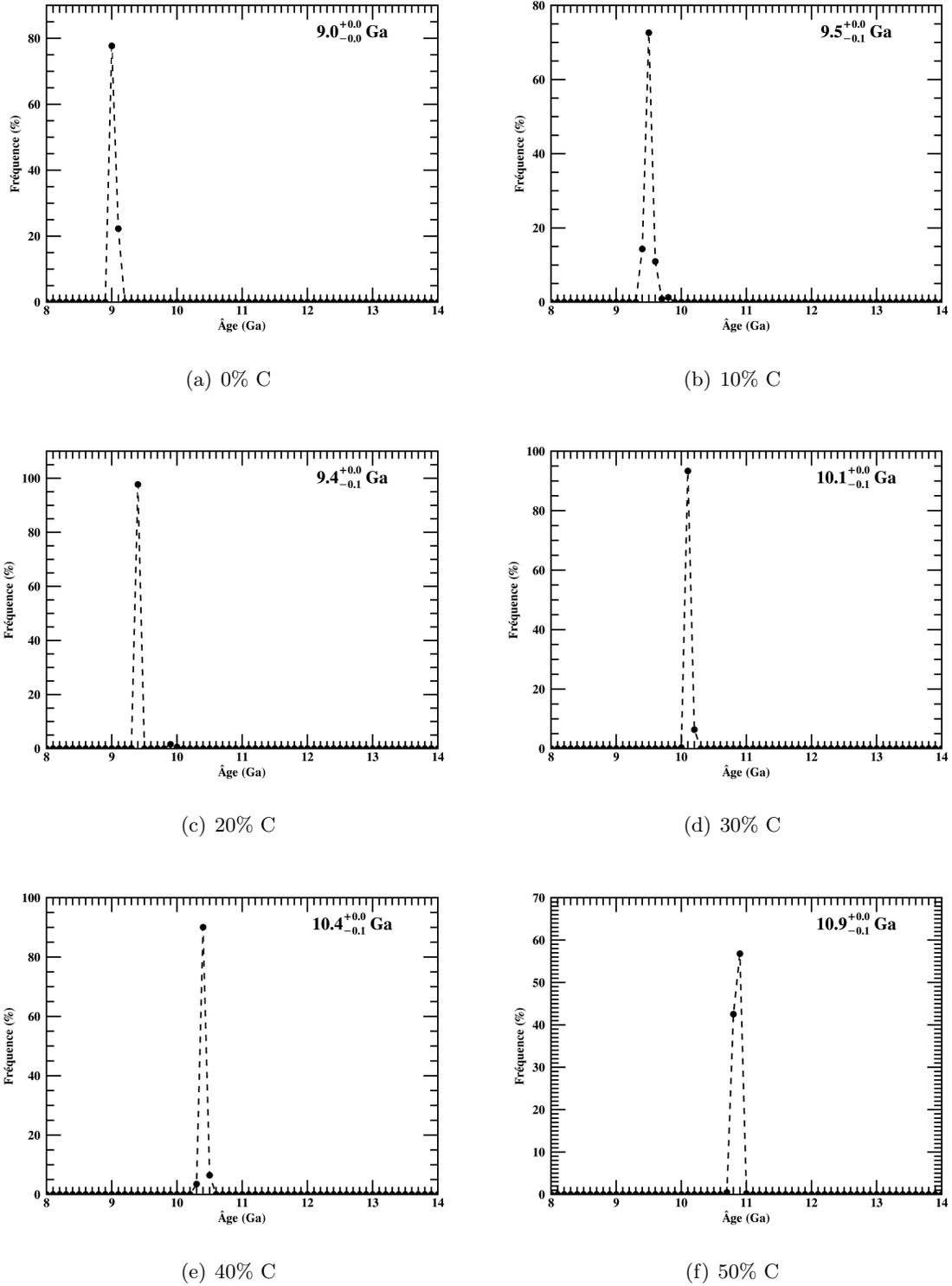


FIGURE 5.8 Distributions des âges obtenus de l’amas globulaire NGC 6397 probable pour les 10 000 essais par simulations Monte Carlo, pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% à 50% de carbone. La distance à l’amas adoptée est de  $\mu_0 = 12.03$ , le rougissement de  $E(B - V) = 0.18$ . L’âge moyen obtenu avec les simulations Monte Carlo, ainsi que ses écarts types positive et négative, sont affichés en haut à droite de chaque sous-figure.

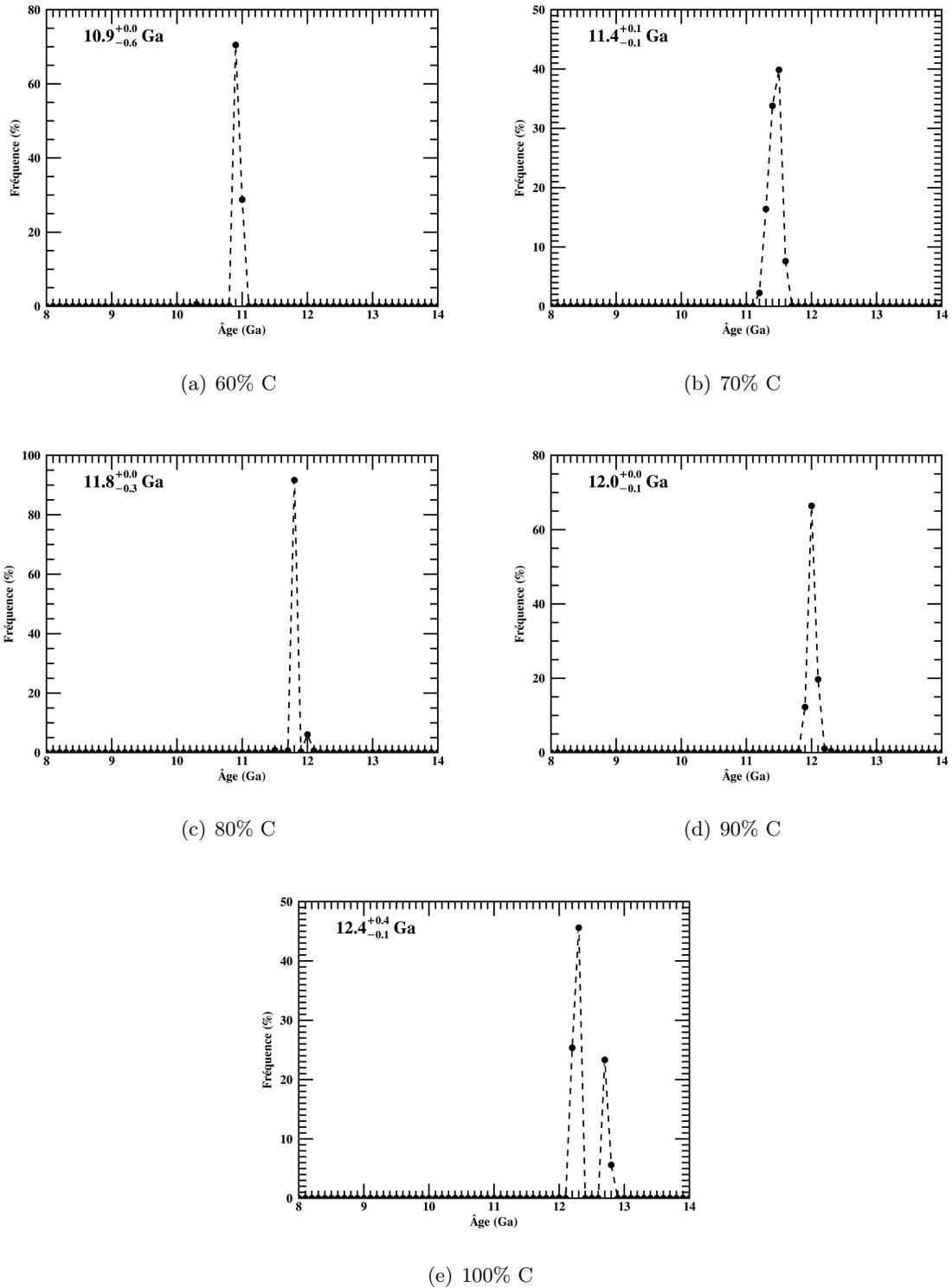


FIGURE 5.9 Distributions des âges obtenus de l'amas globulaire NGC 6397 le plus probable pour les 10 000 essais par simulations Monte Carlo, pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 60% à 100% de carbone. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_0 = 12.03$ , le rougissement de  $E(B - V) = 0.18$ . L'âge moyen obtenu avec les simulations Monte Carlo, ainsi que ses écarts types positive et négative, sont affichés en haut à gauche de chaque sous-figure.

TABLE 5.9 Distributions des âges obtenus de NGC 6397 pour chaque fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches

C %	Âge médian (Ga)	Âge moyen (Ga)
0	9.0	$9.0^{+0.05}_{-0.05}$
10	9.5	$9.5^{+0.05}_{-0.1}$
20	9.4	$9.4^{+0.05}_{-0.1}$
30	10.1	$10.1^{+0.05}_{-0.1}$
40	10.4	$10.4^{+0.05}_{-0.1}$
50	10.9	$10.9^{+0.05}_{-0.1}$
60	10.9	$10.9^{+0.05}_{-0.6}$
70	11.4	$11.4^{+0.1}_{-0.1}$
80	11.8	$11.8^{+0.05}_{-0.3}$
90	12.0	$12.0^{+0.05}_{-0.1}$
100	12.3	$12.4^{+0.4}_{-0.1}$

TABLE 5.10 Âge de l'amas NGC 6397 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, en utilisant des DAs seulement

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	9.1	4
10	9.8	3
20	9.4	5
30	10.2	3
40	10.5	2
50	10.9	3
60	10.9	4
70	11.6	2
80	12.1	2
90	12.0	1
100	12.3	2

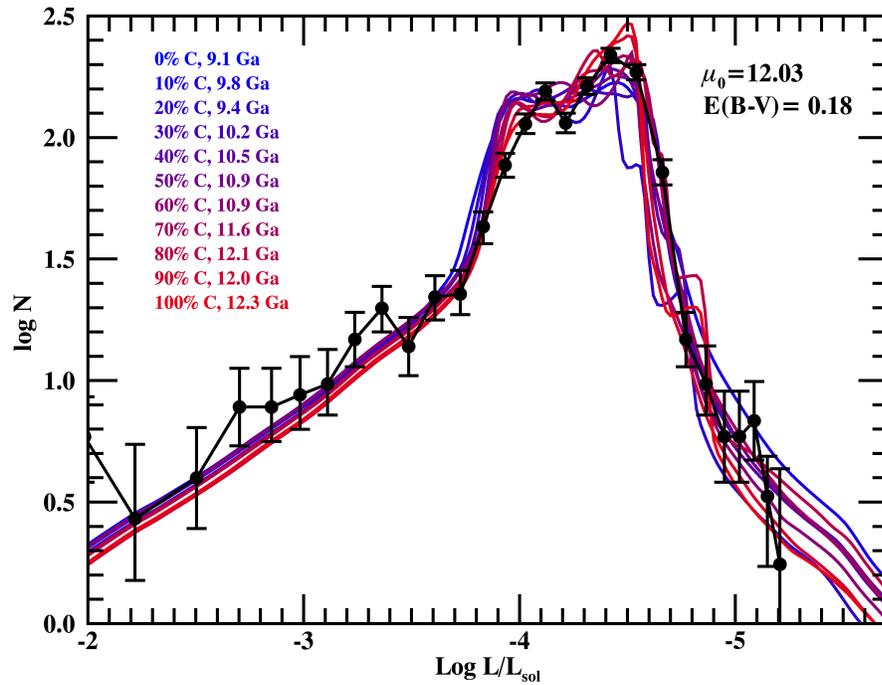


FIGURE 5.10 Fonction de luminosité de l'amas globulaire NGC 6397, représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques, calculées en utilisant des DAs seulement, sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches DAs allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 25 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches DAs est donnée à gauche. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_0 = 12.03$  et le rougissement adopté est de  $E(B - V) = 0.18$ .

TABLE 5.11 Âge de l'amas NGC 6397 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée :  $\mu_0 = 11.97$ , rougissement adopté :  $E(B-V) = 0.17$

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	9.2	8
10	9.7	9
20	9.6	10
30	10.3	8
40	10.5	7
50	11.1	6
60	11.2	7
70	11.7	4
80	11.8	4
90	12.3	3
100	12.9	4

#### 5.3.4.2 Influence de la distance sur le calcul des âges

Richer et al. (2008) ont utilisé les résultats dans la littérature récente pour obtenir une distance à l'amas de  $\mu_0 = 12.06 \pm 0.03$  (ils ont utilisé les résultats de Reid 1998, Gratton et al. 2003 et Hansen et al. 2007) et un rougissement de  $E(B-V) = 0.18 \pm 0.01$  (Reid 1998; Gratton et al. 2003). Nous avons fait la même étude de l'impact des incertitudes des distances sur l'âge qu'à la section 5.3.2 mais en utilisant l'incertitude sur les distances et les rougissements extrêmes déterminée pour NGC 6397. Nous avons utilisé une combinaison de DAs et de non-DAs pour construire nos fonctions de luminosité théoriques. Pour une distance et un rougissement minimaux nous trouvons les résultats à la figure 5.11 et au tableau 5.11, pour une distance et rougissement maximaux ceux à la figure 5.12 et au tableau 5.12. L'incertitude sur la distance à l'amas se traduit en une incertitude supplémentaire sur l'âge de 0.2 Ga en moyenne et d'un maximum de 0.6 Ga. La fonction de luminosité observée est particulièrement bien modélisée par les fonctions de luminosité théoriques lorsqu'on adopte une distance de  $\mu_0 = 12.09$  et d'un rougissement de  $E(B-V) = 0.19$ .

Les incertitudes sur les âge obtenus pour chaque composition de cœur, prenant en compte l'erreur sur la distance, celle provenant de l'ajout des non-DAs et celle provenant de la sta-

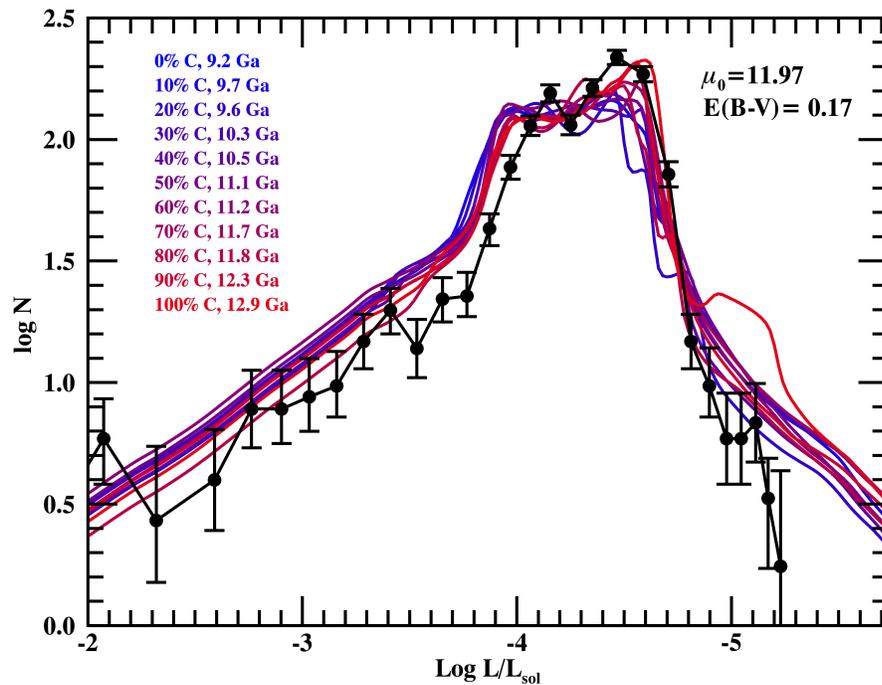


FIGURE 5.11 Fonction de luminosité de l'amas NGC 6397, pour une distance à l'amas adoptée de  $\mu_0 = 11.95$  et le rougissement de  $E(B - V) = 0.17$ , représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 25 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à droite.

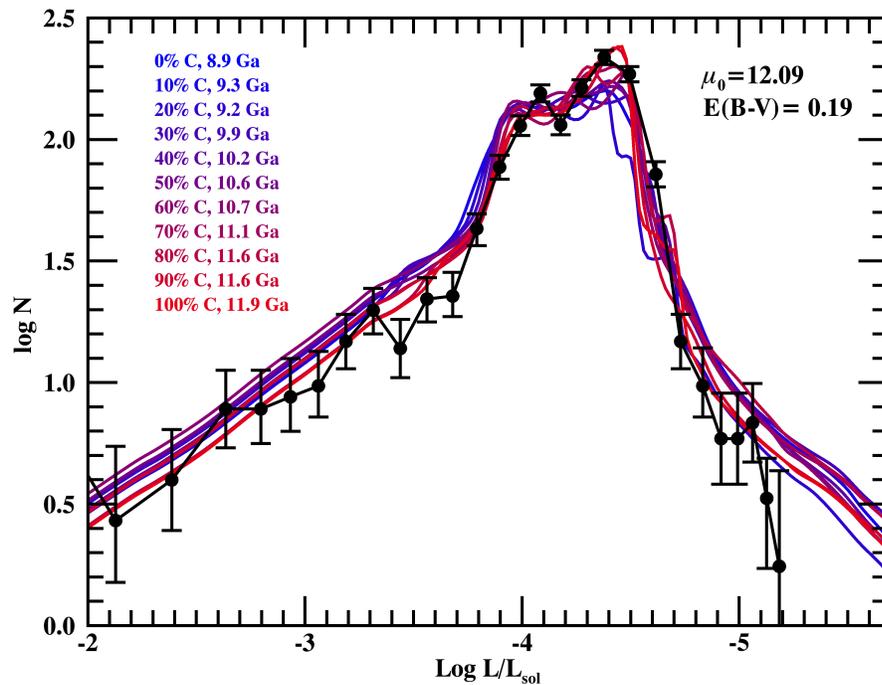


FIGURE 5.12 Fonction de luminosité de l'amas globulaire NGC 6397, pour une distance à l'amas adoptée de  $\mu_0 = 12.09$  et le rougissement de  $E(B - V) = 0.19$ , représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 25 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à droite.

TABLE 5.12 Âge de l’amas NGC 6397 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée :  $\mu_0 = 12.09$ , rougissement adopté :  $E(B-V) = 0.19$

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	8.9	4
10	9.3	4
20	9.2	5
30	9.9	4
40	10.2	2
50	10.6	2
60	10.7	4
70	11.1	1
80	11.6	2
90	11.6	1
100	11.9	1

tistique de Poisson sont présentées au tableau 5.13. Nous n’avons pas inclus les erreurs qui découlent de l’incomplétude des observations, des contaminants, des erreurs sur la valeur de la magnitude observée, ni celles associées aux incertitudes dans nos modèles évolutifs (exceptée l’incertitude qui est due à la composition du cœur des naines blanches).

### 5.3.4.3 Différence entre la fonction de luminosité observée et les fonctions de luminosité théoriques

Contrairement à l’amas 47 Tucanae, les fonctions de luminosité théoriques modélisent bien la fonction de luminosité observée, nous voyons la même tendance d’un plateau entre  $\log(L/L_\odot) = -4$  et  $\log(L/L_\odot) = -4.5$  où le nombre de naines blanches croît légèrement avec la magnitude. Ce plateau est dû au fait que plus le milieu est âgé, plus la masse des naines blanches qui ont eu le temps de se refroidir jusqu’à subir le couplage convectif est petite. Or lorsque le couplage convectif apparaît, cela entraîne un ralentissement du taux de refroidissement de la naine blanche et donc un empilement de naines blanches dans la fonction de luminosité à la luminosité où il y a couplage convectif. Puisque le couplage convectif apparaît pour des plus grandes luminosités pour les naines blanches moins massives que pour

TABLE 5.13 Âge de l'amas NGC 6397 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, incluant toutes les incertitudes calculées

C (%)	Âge (Ga)
0	$9.0^{+0.2}_{-0.1}$
10	$9.5^{+0.4}_{-0.2}$
20	$9.4^{+0.2}_{-0.2}$
30	$10.1^{+0.2}_{-0.2}$
40	$10.4^{+0.1}_{-0.2}$
50	$10.9^{+0.3}_{-0.2}$
60	$10.9^{+0.3}_{-0.6}$
70	$11.4^{+0.4}_{-0.3}$
80	$11.8^{+0.3}_{-0.4}$
90	$12.0^{+0.3}_{-0.4}$
100	$12.4^{+0.7}_{-0.4}$

des naines blanches plus massives, la bosse va avoir tendance à s'élargir et se transformer en plateau avec l'âge du milieu. Ce plateau correspond à la plage de luminosités pour laquelle les naines blanches de masses différentes subissent un ralentissement dans leur refroidissement dû au couplage convectif.

Les fonctions de luminosité théoriques modélisent toutefois moins bien celle observée que dans le cas du voisinage solaire. Sachant que les observations sont beaucoup plus ardues et moins complètes pour les amas, nous pouvons conclure que les fonctions de luminosité théoriques modélisent de manière satisfaisante les observations dans le cas de NGC 6397. Nous n'observons d'ailleurs pas le même désaccord entre les luminosité observées et théoriques que dans le cas de l'amas 47 Tucanae, ce qui renforce l'hypothèse que les différences observées pour l'amas 47 Tucanae ne sont pas dues à des erreurs dans nos modèles évolutifs mais plutôt à des incertitudes associées aux observations ou à la distance à l'amas.

Nous pouvons toutefois remarquer que si nous supposons une distance maximale à l'amas

Table 5.14. Âges de NGC 6397 dans la littérature

Âge (Ga)	Référence	Technique utilisée
$12.0 \pm 0.8$	Anthony-Twarog & Twarog (2000)	PDSP
$13.4 \pm 0.8$	Chaboyer et al. (2001)	PDSP
$13.9 \pm 1.1$	Gratton et al. (2003)	PDSP
$11.47 \pm 0.47$	Hansen et al. (2007)	NB
$12.0^{+0.5}_{-1.0}$	Winget et al. (2009)	NB
$13.5 \pm 0.5$	Dotter et al. (2010)	PDSP
$13.0 \pm 0.25$	VandenBerg et al. (2013)	PDSP
$11.7 \pm 0.3$	Hansen et al. (2013)	NB
$12.8^{+0.5}_{-0.75}$	Torres et al. (2015)	NB
$10.7^{+1.6}_{-1.7}$	Cette étude	NB

Note. — PDSP : Point de décrochage de la séquence principale, NB : Naines blanches.

NGC 6397 de  $\mu_0 = 12.09$ , les modèles représentent mieux la fonction de luminosité observée (voir la figure 5.12).

### 5.3.5 Comparaison avec les résultats dans la littérature

Les âges obtenus en utilisant les fonctions de luminosité théoriques de naines blanches sont de  $11.47 \pm 0.47$  Ga (Hansen et al. 2007), de  $12.0^{+0.5}_{-1.0}$  Ga (Winget et al. 2009), de  $11.7 \pm 0.3$  Ga (Hansen et al. 2013) et de  $12.8^{+0.5}_{-0.75}$  Ga (Torres et al. 2015) et ceux par le point de décrochage de la séquence principale se situent entre 12 et 13.9 Ga (voir le tableau 5.14, tiré de l'article de Torres et al. 2015). Nous trouvons un âge de  $10.7^{+1.6}_{-1.7}$  Ga, cohérent avec la plupart des autres études mais qui est plutôt dans la limite inférieure des âges déterminés par les autres équipes.

### 5.3.6 Conclusion

Nous trouvons que l'âge de l'amas NGC 6397 est fortement dépendant de la composition du cœur des naines blanches. Nous trouvons un âge moyen de  $10.7^{+1.6}_{-1.7}$  Ga (l'impact de l'incertitude sur la distance, celui sur la composition moyenne du cœur des naines blanches et celui sur l'ajout des non-DAs dans les fonctions de luminosité théoriques sont inclus). Si nous

TABLE 5.15 Âge de l'amas NGC 6397 en fonction des différentes suppositions sur la composition du cœur des naines blanches

C (%)	Âge (Ga)	Commentaires
0 à 100	$10.7^{+1.6}_{-1.7}$	Âge moyennée sur toutes les compositions
0 à 75	$10.4^{+1.3}_{-1.4}$	Âge moyennée sur les compositions déterminées par Fields et al. (2016)
30	$10.1^{+0.2}_{-0.2}$	Âge pour la composition déterminée par Giammichele et al. (2016)
70	$11.4^{+0.4}_{-0.3}$	Âge pour la composition la plus probable du chapitre 3

ignorons l'incertitude sur la composition moyenne du cœur des naines blanches et si nous considérons seulement l'incertitude sur la distance à l'amas, celle due à l'ajout des non-DAs et celle calculée via la statistique de Poisson, elle serait alors de 0.1 à 0.7 Ga.

Si nous supposons que la composition du cœur des naines blanches est d'au moins 25% d'oxygène, comme déterminé par Fields et al. (2016), nous avons alors que l'âge de NGC 6397 est de  $10.4^{+1.3}_{-1.4}$  Ga. Si nous supposons que la mesure de Giammichele et al. (2016) s'applique à toutes les naines blanches, nous trouvons alors un âge de  $10.1^{+0.2}_{-0.2}$  Ga et si nous supposons que la composition la plus probable que nous déterminons au chapitre 3 s'applique à toutes les étoiles nous trouvons alors un âge de  $11.4^{+0.4}_{-0.3}$  Ga (voir le tableau 5.15).

Nos résultats sont cohérents avec ceux trouvés par Hansen et al. (2007), Winget et al. (2009), Hansen et al. (2013) et Torres et al. (2015) mais sont dans la limite inférieure des âges qu'ils ont obtenus. Les âges obtenus par modélisation de la fonction de luminosité observée de naines blanches sont en général plus bas que ceux obtenus par le point de décrochage de la séquence principale mais les deux méthodes donnent des âges qui sont tout de même cohérents. L'âge que nous avons obtenu a une grande incertitude, qui est principalement due à l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches.

## 5.4 Amas ouvert NGC 6791

### 5.4.1 Présentation de l'échantillon

Bedin et al. (2005, 2008a) ont observé l'amas ouvert NGC 6791 avec le télescope spatial Hubble afin de caractériser la coupure à la fonction de luminosité observée des naines blanches due à l'âge fini de l'amas. Ils ont détecté près de 1000 naines blanches et ils observent la coupure dans la fonction de luminosité de l'amas à partir d'une magnitude de  $m_{F606W} = 28.25$ . Ils font une étude de la complétude en fonction de la magnitude et déterminent que leurs observations sont complètes à plus de 50% jusqu'à une magnitude apparente de  $m_{F606W} = 28.55$  et ils concluent que la coupure observée est réelle et n'est pas due à un biais observationnel. Ils ont calculé les barres d'erreur pour chaque classe de la fonction de luminosité via la distribution de Poisson. Nous adoptons la même distance à l'amas que dans l'article de García-Berro et al. (2010), qu'ils ont déterminé à partir des résultats de Bedin et al. (2005), Bedin et al. (2008a) et Grundahl et al. (2008) :  $\mu_{F606W} = 13.44 \pm 0.01$ .

### 5.4.2 Âge de l'amas NGC 6791 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches

La fonction de luminosité observée de NGC 6791 a une forme unique, elle présente deux bosses distinctes. La cause de la première bosse est encore mal connue. Deux hypothèses ont été avancées : elle pourrait être due à une population de binaires non résolues (Bedin et al. 2008a) ou être le résultat de la présence d'une population de naines blanches ayant un cœur d'hélium (Kalirai et al. 2007). L'âge total de l'amas est contraint par la chute du nombre de naines blanches après le deuxième pic et nous nous concentrons ainsi seulement sur ce dernier.

Nous avons utilisé les mêmes modèles qu'aux sections précédentes pour construire les fonctions de luminosité théoriques (voir la section 5.2.2). La fonction de luminosité observée par Bedin et al. (2008a), où ils ont corrigé pour l'incomplétude, est donnée par les cercles pleins noirs à la figure 5.13. Nous avons normalisé les fonctions de luminosité théoriques grâce aux

TABLE 5.16 Âge de NGC 6791 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches

C	Âge	$\chi^2$
(%)	(Ga)	réduit
0	6.1	2.5
10	6.4	3.0
20	6.6	3.2
30	6.6	3.3
40	6.8	3.2
50	7.3	3.6
60	6.7	3.7
70	7.1	3.8
80	6.9	3.4
90	6.6	3.8
100	6.9	3.9

points entre les magnitudes  $m_{F606W} = 27.75$  à  $m_{F606W} = 28.15$ , c'est-à-dire les points qui sont sur la partie ascendante du deuxième pic. Le  $\chi^2$  réduit a été calculé en utilisant les points entre  $m_{F606W} = 27.75$  et  $m_{F606W} = 28.55$  (qui est le dernier point pour lequel la complétude est supérieure à 50%). Les âges qui modélisent le mieux la fonction de luminosité observée en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches de l'amas NGC 6791, ainsi que le  $\chi^2$  réduit, sont donnés au tableau 5.16. L'âge moyen que nous trouvons est de  $6.7 \pm 0.6$  Ga, les incertitudes provenant seulement de l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches et ont été calculées comme à la section 5.2.3. L'âge minimal que nous obtenons est de 6.1 Ga, pour une composition moyenne de cœur de 100% d'oxygène, l'âge maximal est de 7.3 Ga, pour une composition moyenne de 50% de carbone.

### 5.4.3 Discussion

Une mesure très précise de la distance à l'amas a été déterminée par Grundahl et al. (2008), il est à  $\mu_0 = 13.44 \pm 0.1$ . L'impact de l'incertitude sur l'âge est minime et est d'un maximum de 0.1 Ga. Considérant que nous ignorons le premier pic de la fonction de luminosité observée, cette dernière est bien représentée par les fonctions de luminosité théoriques que nous avons

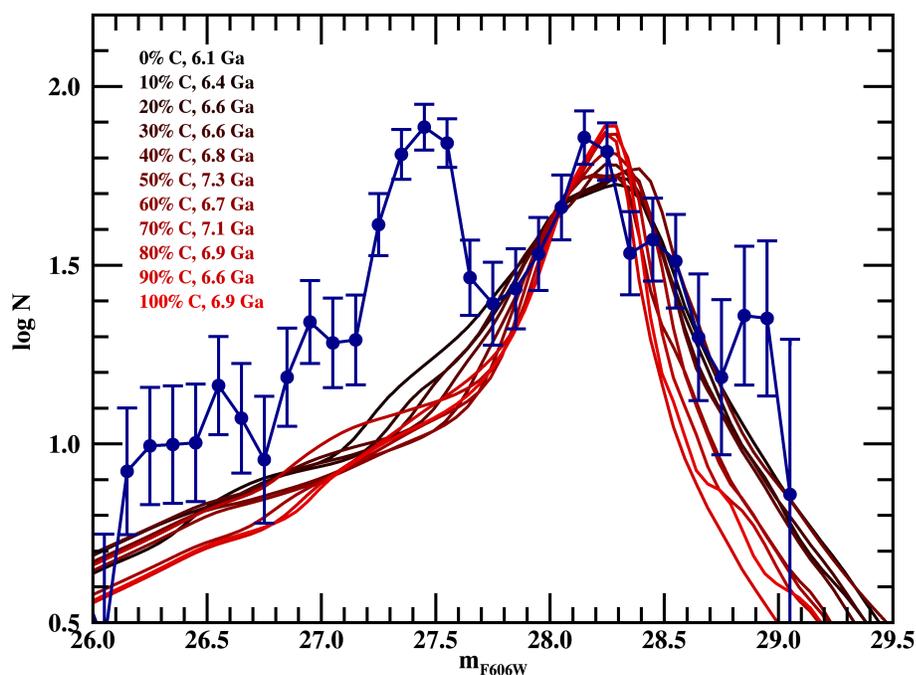


FIGURE 5.13 Fonction de luminosité observée de l'amas NGC 6791, dont le manque de complétude a été corrigé, est représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées grâce aux points entre les magnitudes  $m_{F606W} = 27.75$  à  $m_{F606W} = 28.15$ . L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à gauche. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_{F606W} = 13.44$ .

construites.

Puisque l'ajout des non-DAs n'influence que peu le calcul des âges pour le voisinage solaire, pour les amas M67, 47 Tucanae ou NGC 6397, nous n'avons pas fait l'étude de l'impact de l'ajout des non-DAs dans la calcul des âges de NGC 6791 et nous supposons qu'il est négligeable.

#### 5.4.4 Comparaison avec les résultats dans la littérature

Bedin et al. (2008a) détermine un âge de 6 Ga en modélisant la fonction de luminosité observée de naines blanches, similaire à l'âge de notre étude. Cependant, l'âge de NGC 6791 déterminé par le point de décrochage de la séquence principale est plutôt entre 8 et 9 Ga (Stetson et al. 2003; King et al. 2005). Vu que cet amas est un amas dont il est difficile de modéliser l'âge à cause de sa forme particulière, les résultats dans cette section ont surtout pour but de vérifier la cohérence entre nos résultats et celles des autres équipes qui utilisent des modèles évolutifs de naines blanches différents. La forme particulière de la fonction de luminosité de l'amas, ainsi que la coupure à une plus grande luminosité dans la fonction de luminosité des naines blanches par rapport à celle auquel on s'attendrait considérant l'âge obtenu par le point de décrochage de la séquence principale est signe que l'histoire de cet amas est particulier et n'est pas complètement compris.

#### 5.4.5 Conclusion

Nous trouvons un âge pour l'amas NGC 6791 de  $6.7 \pm 0.6$  Ga, compatible avec les autres études de fonction de luminosité de naines blanches. Cependant, cet âge est incompatible avec celui trouvé par le point de décrochage de la séquence principale. La fonction de luminosité observée de NGC 6791 a une forme unique et il a une métallicité particulièrement élevée ( $[Fe/H] \approx +0.4$ , Gratton et al. 2006; Carraro et al. 2006; Origlia et al. 2006), il se pourrait que cette forte métallicité ait des conséquences non négligeables dans les modèles évolutifs,

ce qui pourrait expliquer cette différence (Bedin et al. 2008a,b; García-Berro et al. 2010; Kalirai 2013). Les âges déterminés par modèles évolutifs de naines blanches et par le point de décrochage de la séquence principale ne sont pas compatibles dans le cas de NGC 6791 mais cela ne discrédite pas l'utilisation des naines blanches comme marqueur de l'âge, car pour d'autres amas dont la fonction de luminosité se comporte mieux et dont la métallicité est plus basse, les âges déterminés grâce aux différentes méthodes sont cohérents les uns avec les autres.

## 5.5 Amas globulaire M4

### 5.5.1 Présentation de l'échantillon

Richer et al. (2002) ont observé l'amas M4 avec l'instrument Wide Field Planetary Camera 2 du télescope spatial Hubble. Ils détectent plus de 250 naines blanches. Ils observent la coupure dans la fonction de luminosité de naines blanches due à l'âge fini de l'amas. Hansen et al. (2002) font une étude de la complétude des observations ainsi que de l'erreur effectuée sur la magnitude observée jusqu'à des luminosités où il y a coupure et concluent que cette dernière est réelle et n'est pas due à un biais observationnel. Nous avons en premier lieu utilisé ces observations pour déterminer l'âge de l'amas en fonction de la composition du cœur des naines blanches (voir la figure 5.14). Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Nous avons utilisé la mesure d'Hansen et al. (2004) correspondant à  $\mu_V = 11.18 \pm 0.18$ .

### 5.5.2 Âge de l'amas M4 en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches

Nous avons utilisé les mêmes modèles qu'à la section précédente (5.2.2) pour construire les fonctions de luminosité théoriques. La fonction de luminosité observée par Richer et al. (2002) est donnée par les cercles pleins noirs à la figure 5.14. Les barres d'erreur ont été calculées via la distribution de Poisson. Nous avons normalisé les fonctions de luminosité théoriques grâce aux 16 premiers points, c'est-à-dire les points qui sont dans la partie ascendante de la fonc-

TABLE 5.17 Âge de M4 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	10.7	23
10	11.0	22
20	11.3	26
30	11.5	24
40	12.1	19
50	12.5	18
60	12.6	18
70	13.0	14
80	13.5	18
90	13.7	14
100	14.0	13

tion de luminosité observée, indépendant de l'âge et dont la complétude est de 80 à 95%. Les âges qui modélisent le mieux la fonction de luminosité observée en fonction de la composition moyenne du cœur des naines blanches de l'amas M4 sont donné au tableau 5.17. L'âge moyen que nous trouvons est de  $12.4^{+1.6}_{-1.7}$  Ga, les incertitudes provenant seulement de l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches, calculée de la même façon qu'à la section 5.2.3. L'âge minimal que nous obtenons est de 10.7 Ga, pour une composition moyenne de cœur de 100% d'oxygène, l'âge maximal est de 14.0 Ga, pour une composition moyenne de 100% de carbone.

### 5.5.3 Simulations Monte Carlo et distribution des âges obtenus

Afin de mesurer la précision des âges estimés, nous avons réalisé une simulation Monte Carlo de 10 000 éléments, similaire à celle réalisée à la section 5.2.4, prenant en compte les erreurs sur la hauteur des intervalles de la fonction de luminosité observée de Richer et al. (2002). L'âge déterminé pour chaque composition de cœur est très stable et change peu lorsque nous étudions l'impact des incertitudes sur la hauteur des intervalles, calculées à partir de la distribution de Poisson. Ceci est dû au fait que chaque intervalle possède un grand nombre

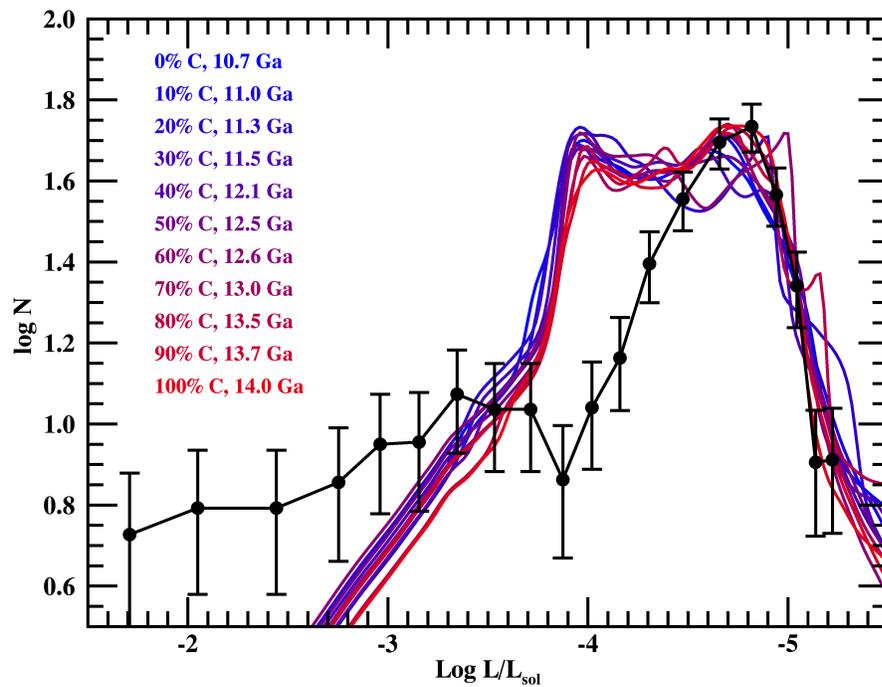


FIGURE 5.14 Fonction de luminosité de l'amas M4 déterminée par Richer et al. (2002), représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 16 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à gauche. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_V = 11.18$

TABLE 5.18 Distributions des âges obtenus de M4 pour chaque fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches

C %	Âge médian (Ga)	Âge moyen (Ga)
0	10.7	10.73 <sup>+0.2</sup> <sub>-0.1</sub>
10	11.0	11.05 <sup>+0.1</sup> <sub>-0.1</sub>
20	11.3	11.29 <sup>+0.1</sup> <sub>-0.3</sub>
30	11.5	11.52 <sup>+0.1</sup> <sub>-0.1</sub>
40	12.1	12.07 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.1</sub>
50	12.5	12.46 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.1</sub>
60	12.6	12.52 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.2</sub>
70	13.0	13.01 <sup>+0.1</sup> <sub>-0.1</sub>
80	13.5	13.45 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.2</sub>
90	13.7	13.68 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.1</sub>
100	14.0	13.99 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.1</sub>

de naines blanches. Ainsi, l'âge déterminé pour chaque essai par simulation Monte Carlo est presque toujours le même et l'écart type des âges déterminés est de moins de 0.3 Ga (voir les figures 5.15 et 5.16). Puisque nous avons créé des fonctions de luminosité théoriques pour des âges du milieu allant de 2 Ga à 15 Ga par incrément de 0.1 Ga, nous avons adopté une incertitude sur l'âge déterminé pour chaque composition de cœur d'au moins 0.05 Ga. Comme au chapitre 4, cette incertitude ne tient en compte que de la robustesse de la modélisation de l'âge du milieu par comparaison entre les fonctions de luminosité théoriques et la fonction de luminosité observée. Elle ne tient pas en compte les incertitudes dans nos modèles évolutifs.

## 5.5.4 Discussion

### 5.5.4.1 Influence de l'ajout des non-DAs sur le calcul des âges

Nous avons modélisé la fonction de luminosité de l'amas M4 déterminée par Richer et al. (2002) avec des DAs seulement. Nous pouvons voir à la figure 5.17 et au tableau 5.19 que les âges déterminés sont presque identiques à ceux déterminés lorsqu'on utilise une combinaison

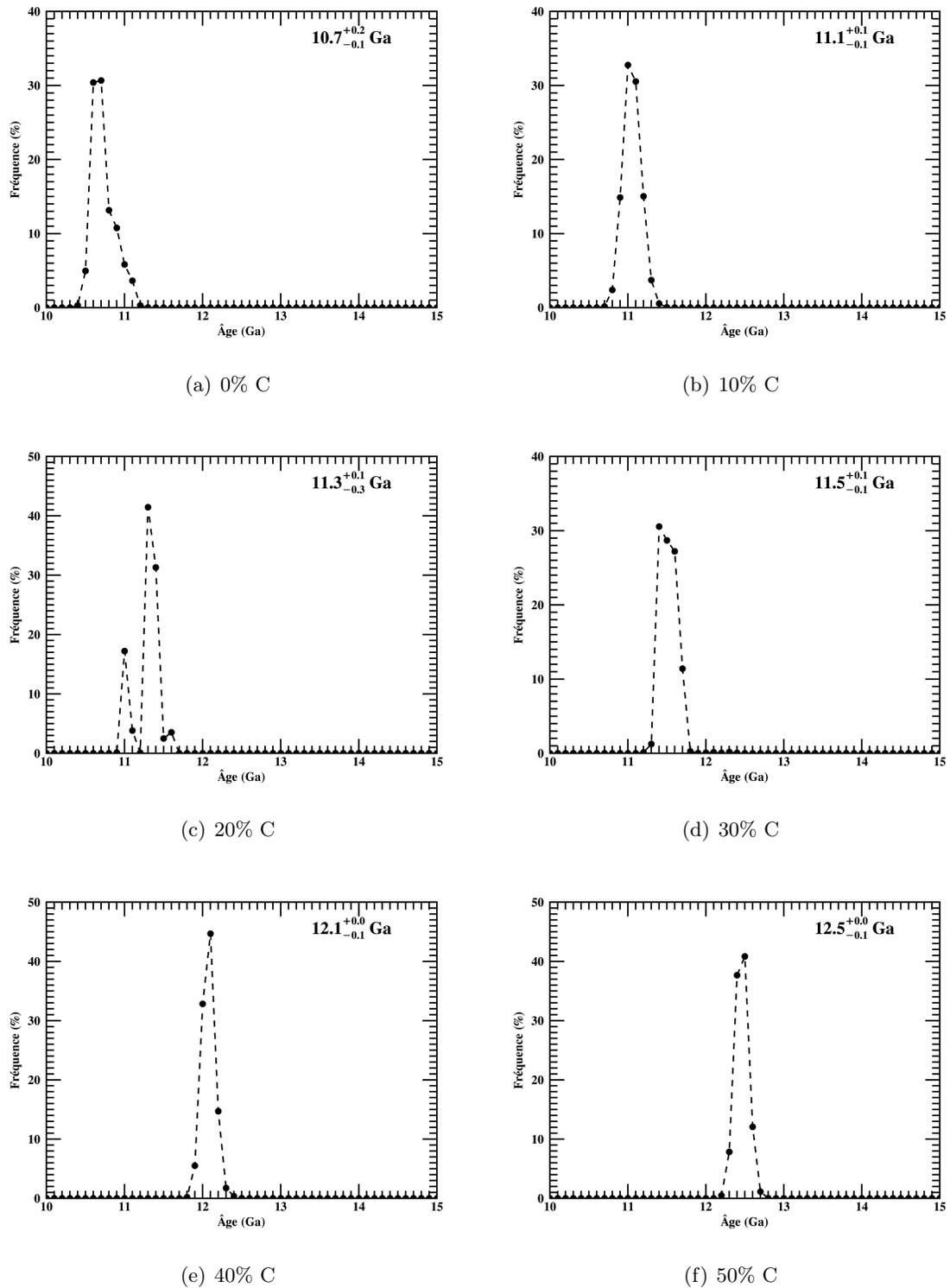


FIGURE 5.15 Distributions des âges obtenus de l'amas globulaire M4 le plus probable pour les 10000 essais par simulations Monte Carlo, pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% à 50% de carbone. L'âge moyen obtenu avec les simulations Monte Carlo, ainsi que ses écarts types positive et négative, sont affichés en haut à droite de chaque sous-figure. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_V = 11.18$ . Les observations utilisées proviennent de Richer et al. (2002).

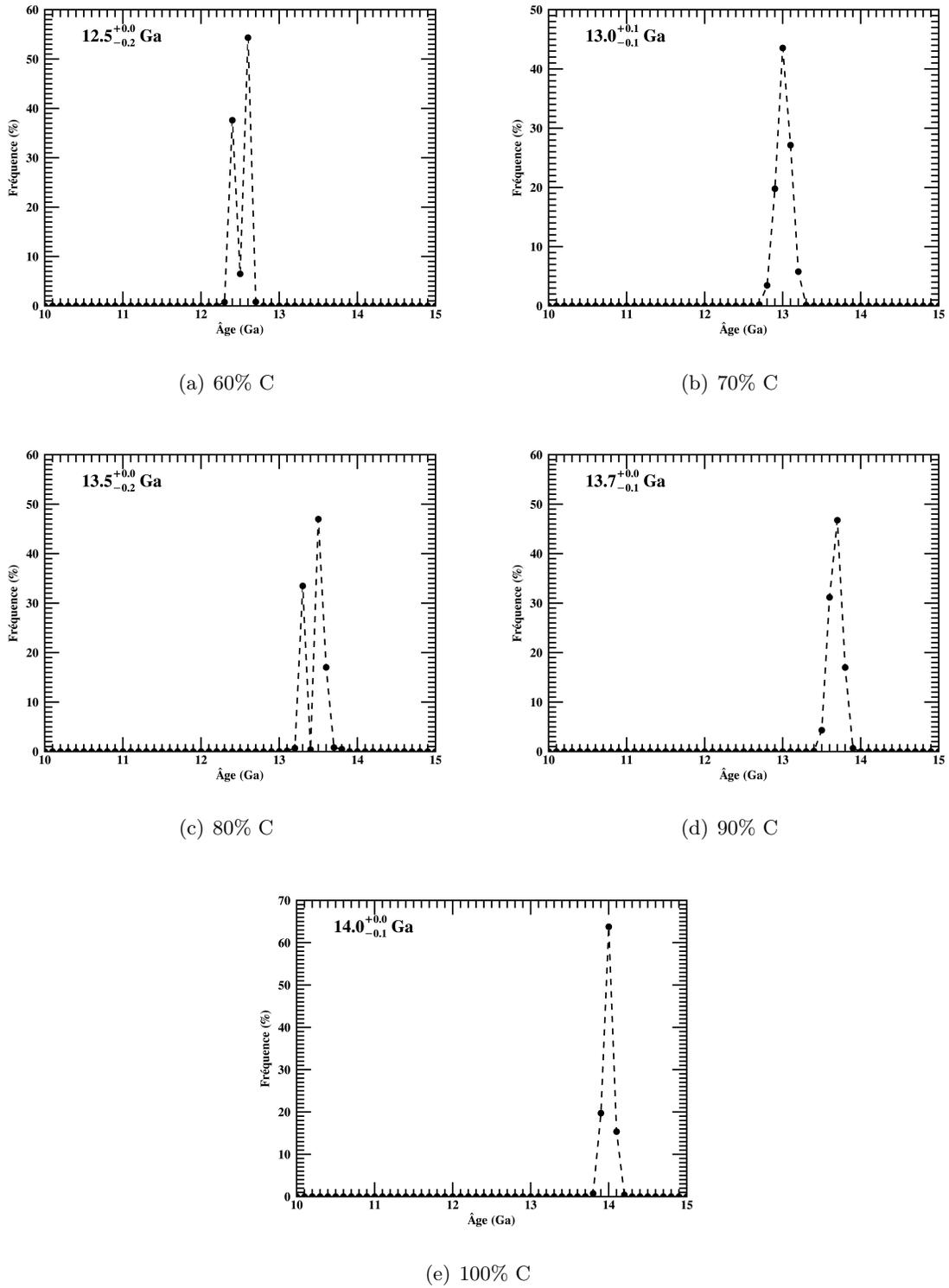


FIGURE 5.16 Distributions des âges obtenus de l'amas globulaire M4 le plus probable pour les 10 000 essais par simulations Monte Carlo, pour les compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 60% à 100% de carbone. L'âge moyen obtenu avec les simulations Monte Carlo, ainsi que ses écarts types positive et négative, sont affichés en haut à gauche de chaque sous-figure. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_V = 11.18$ . Les observations utilisées proviennent de Richer et al. (2002).

TABLE 5.19 Âge de l'amas M4 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, en utilisant des DAs seulement,

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	10.7	29
10	11.0	28
20	11.3	37
30	11.6	34
40	12.0	24
50	12.4	25
60	12.6	27
70	13.0	20
80	13.5	22
90	13.7	21
100	14.0	16

de DAs et de non-DAs. La différence d'âge est de 0.1 Ga au maximum. Par contre, le  $\chi^2$  réduit est plus petit lorsqu'on inclut seulement des DAs (deux fois plus petit en moyenne).

#### 5.5.4.2 Influence de la distance sur le calcul des âges

Nous avons modélisé les fonctions de luminosité observées en utilisant les valeurs minimales et maximales de la distance déterminée par Hansen et al. (2002) ( $\mu_V = 11.00$  et  $\mu_V = 11.36$ ). Pour une distance de  $\mu_V = 11.00$ , nous trouvons les résultats présentés à la figure 5.18 et au tableau 5.20 et pour une distance de  $\mu_V = 11.36$  nous trouvons les résultats présentés à la figure 5.19 et au tableau 5.21. L'incertitude sur la distance se traduit en une incertitude sur l'âge de 0.5 Ga en moyenne.

#### 5.5.4.3 Différence entre la fonction de luminosité observée et les fonctions de luminosité théoriques

Les observations de Richer et al. (2002) ne sont pas très bien reproduites par les fonctions de luminosité théoriques. Nous surestimons le nombre de naines blanches de la branche ascendante de la fonction de luminosité observée. Ceci est probablement dû à une combinaison

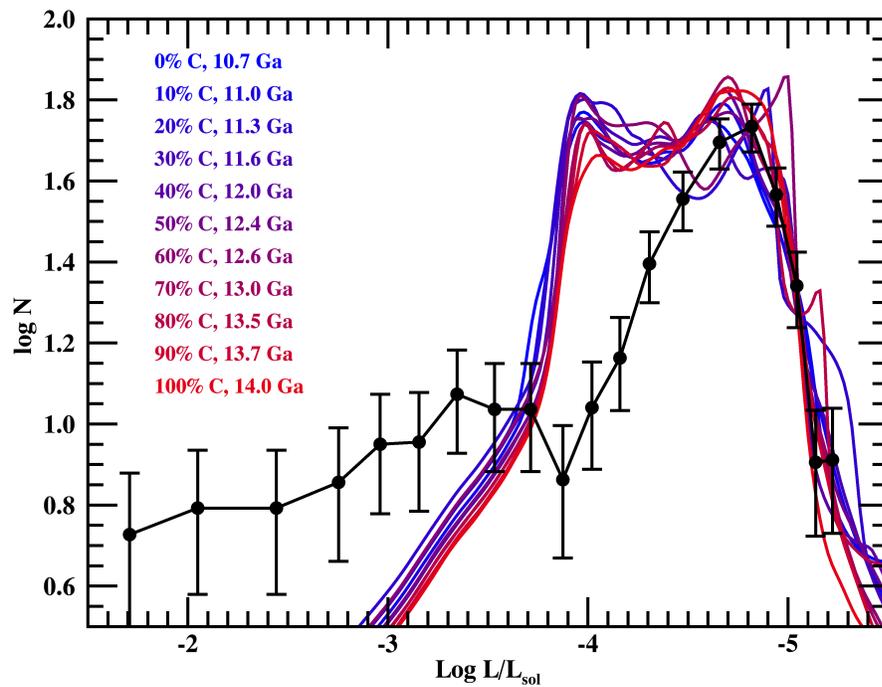


FIGURE 5.17 Fonction de luminosité de l'amas M4, déterminée par Richer et al. (2002), est représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques, calculées en utilisant des DAs seulement, sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches DAs allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 16 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches DAs est donnée à droite. La distance à l'amas adoptée est de  $\mu_V = 11.18$ .

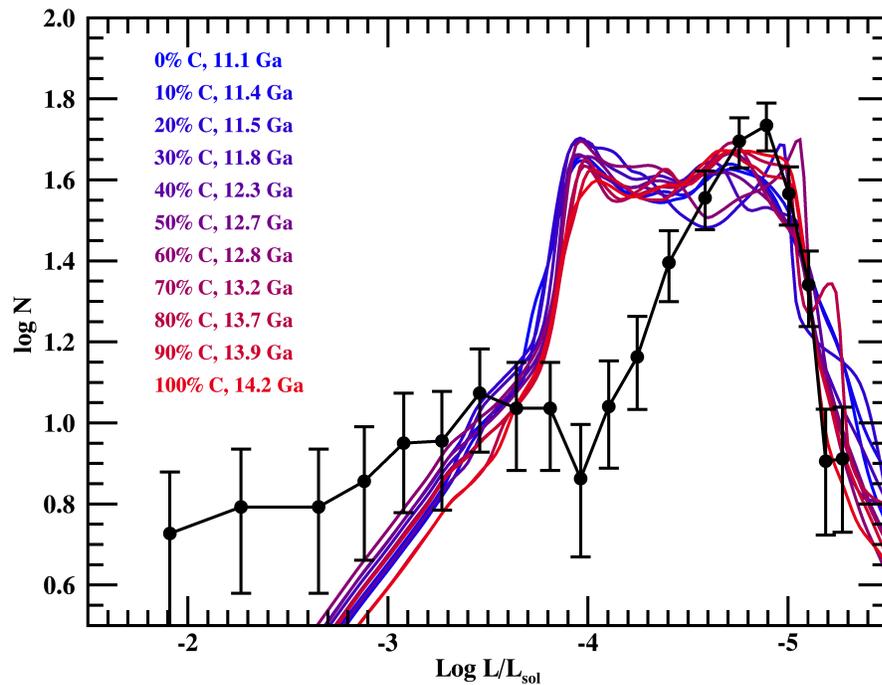


FIGURE 5.18 Fonction de luminosité de l'amas globulaire M4, pour une distance à l'amas de  $\mu_V = 11.00$ , représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 16 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à droite.

TABLE 5.20 Âge de l'amas M4 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée :  $\mu_V = 11.00$

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	11.1	23
10	11.4	22
20	11.5	27
30	11.8	27
40	12.3	22
50	12.7	22
60	12.8	24
70	13.2	18
80	13.7	20
90	13.9	16
100	14.2	15

TABLE 5.21 Âge de l'amas M4 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, distance adoptée :  $\mu_V = 11.36$

C (%)	Âge (Ga)	$\chi^2$ réduit
0	10.5	21
10	10.8	19
20	10.8	23
30	11.2	19
40	11.8	17
50	12.2	16
60	12.3	18
70	12.8	12
80	13.1	14
90	13.4	11
100	13.8	12

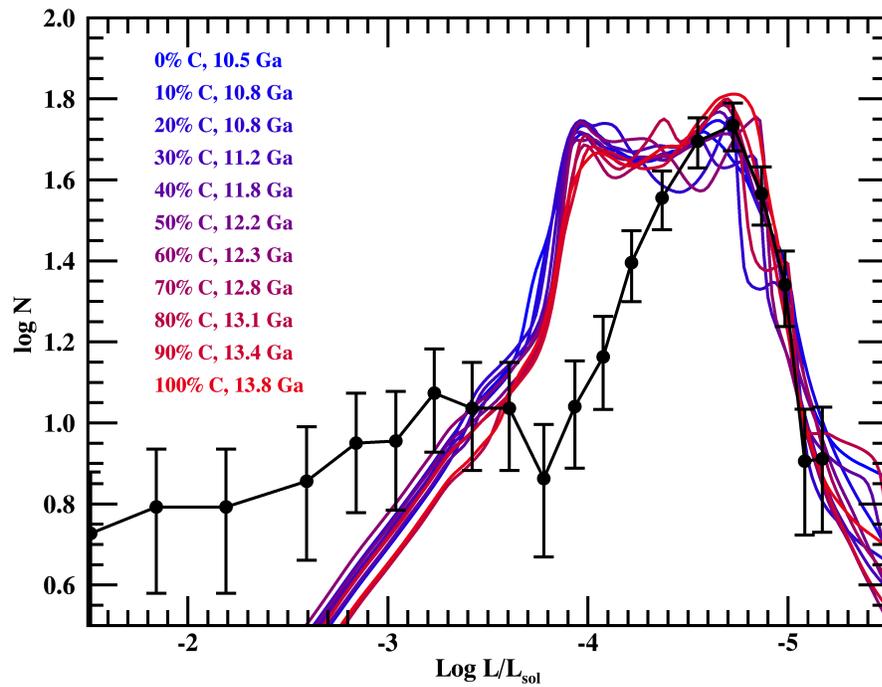


FIGURE 5.19 Fonction de luminosité de l'amas globulaire M4, pour une distance à l'amas de  $\mu_V = 11.36$ , représentée par les cercles pleins noirs. Les barres d'erreur sont calculées via la distribution de Poisson. Les fonctions de luminosité théoriques sont données par les courbes pleines, calculées pour des compositions moyennes du cœur des naines blanches allant de 0% de carbone et 100% d'oxygène à 100% de carbone et 0% d'oxygène, par pas de 10%, du bleu vers le rouge. Elles sont normalisées en hauteur grâce aux 16 premiers points. L'âge qui produit une fonction de luminosité minimisant le  $\chi^2$  réduit en fonction de la quantité moyenne de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches est donnée à droite.

TABLE 5.22 Âge de l'amas M4 en fonction de la fraction moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches, incluant toutes les incertitudes calculées

C	Âge
(%)	(Ga)
0	$10.7^{+0.4}_{-0.2}$
10	$11.0^{+0.4}_{-0.2}$
20	$11.2^{+0.4}_{-0.5}$
30	$11.5^{+0.3}_{-0.3}$
40	$12.0^{+0.2}_{-0.3}$
50	$12.4^{+0.2}_{-0.3}$
60	$12.5^{+0.3}_{-0.3}$
70	$13.0^{+0.2}_{-0.2}$
80	$13.4^{+0.3}_{-0.4}$
90	$13.6^{+0.2}_{-0.3}$
100	$13.9^{+0.2}_{-0.2}$

d'erreurs observationnelles et d'une mauvaise estimation de l'histoire de formation stellaire de l'amas. La coupure dans la fonction de luminosité est par contre bien représentée, or c'est la seule partie qui est sensible à l'âge de l'amas. L'âge que nous déterminons grâce aux fonctions de luminosité théoriques n'est donc pas sensible à la différence observée entre les observations et les modèles.

### 5.5.5 Comparaison avec les résultats dans la littérature

Hansen et al. (2002) utilisent la fonction de luminosité observée de Richer et al. (2002) pour estimer l'âge de M4 et ils obtiennent un âge de  $12.7 \pm 0.7$  Ga et Hansen et al. (2004) obtiennent un âge de 12.1 Ga, avec un âge minimum possible de 10.3 Ga (confiance statistique de 95%). Nous trouvons  $12.3^{+1.6}_{-1.6}$ , nos incertitudes prenant en compte l'impact de l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches (qui domine l'incertitude), sur la distance à l'amas et sur l'ajout des non-DAs. Hansen et al. (2002) utilisent les profils de cœur de Segretain & Chabrier (1993). Hansen et al. (2004) utilisent les modèles évolutifs de Hansen (1999) avec

deux profils de cœur différent, celui provenant de Hurley et al. (2000) et celui de Mazzitelli & Dantona (1986a). Malheureusement la quantité de carbone et d'oxygène dans le cœur des naines blanches n'étant pas présentée nous ne pouvons pas comparer les âges obtenus pour une composition de cœur donné, comme nous l'avons fait à la section 5.2.6.

Les âges déterminés par le point de décrochage de la séquence principale sont de  $12.6^{+3.4}_{-2.2}$  Ga (voir l'article de Krauss & Chaboyer 2003), cet âge est cohérent avec celui que nous trouvons en utilisant les séquences évolutives de naines blanches. Ceci indique que la technique d'utilisation des naines blanches pour déterminer l'âge des amas fonctionne, même pour des grands âges.

### 5.5.6 Conclusion

Nous trouvons que l'âge de M4 est de  $12.3^{+1.6}_{-1.6}$  Ga, il est fortement dépendant de la composition du cœur des naines blanches. Si nous ignorons l'incertitude due à la composition du cœur des naines blanches nous aurions une incertitude entre 0.2 et 0.5 Ga. Si nous supposons que la composition du cœur des naines blanches est d'au moins 25% d'oxygène, comme déterminé par Fields et al. (2016), nous avons alors que l'âge de M4 est de  $11.9^{+1.3}_{-1.3}$  Ga. Si nous supposons que la mesure de Giammichele et al. (2016) s'applique à toutes les naines blanches, nous trouvons alors un âge de  $11.5^{+0.3}_{-0.3}$  Ga et si nous supposons que la composition la plus probable que nous déterminons au chapitre 3 s'applique à toutes les étoiles nous trouvons alors  $13.0^{+0.2}_{-0.2}$  Ga (voir le tableau 5.23).

La fonction de luminosité observée de l'amas M4 est moins bien modélisée par nos fonctions de luminosité théoriques que dans le cas de celle du voisinage solaire. Cependant, cette différence n'affecte pas les âges déterminés, qui sont très robustes même lors d'une simulation Monte Carlo qui prend en compte l'incertitude sur la hauteur des classes calculée via la statistique de Poisson.

TABLE 5.23 Âge de l'amas M4 en fonction des différentes suppositions sur la composition du cœur des naines blanches

C (%)	Âge (Ga)	Commentaires
0 à 100	$12.3^{+1.6}_{-1.6}$	Âge moyennée sur toutes les compositions
0 à 75	$11.9^{+1.3}_{-1.3}$	Âge moyennée sur les compositions déterminées par Fields et al. (2016)
30	$11.5^{+0.3}_{-0.3}$	Âge pour la composition déterminée par Giammichele et al. (2016)
70	$13.0^{+0.2}_{-0.2}$	Âge pour la composition la plus probable du chapitre 3

Nos résultats sont cohérents avec ceux trouvés par Hansen et al. (2004) alors qu'ils utilisent des codes évolutifs de naines blanches significativement différents et ils sont aussi similaires à ceux utilisant la méthode du point de décrochage de la séquence principale (Krauss & Chaboyer 2003). Les résultats obtenus lorsque l'on utilise les fonctions de luminosité de naines blanches sont précis et robustes, une fois que nous connaissons la distance de l'amas, son rougissement et la composition moyenne du cœur des naines blanches. Ce dernier paramètre est malheureusement encore mal connu mais c'est celui qui domine les incertitudes sur l'âge déterminé grâce aux naines blanches.

## 5.6 Conclusion

Nous avons utilisé des séquences évolutives de naines blanches pour construire des fonctions de luminosité théoriques de naines blanches d'amas. Les âges que nous obtenons sont cohérents avec ceux obtenus par d'autres équipes qui utilisent des modèles évolutifs de naines blanches différents. Ils sont aussi cohérents avec ceux déterminés par le point de décrochage de la séquence principale, excepté pour l'amas ouvert NGC 6791 mais cette différence entre les deux méthodes pourraient provenir de conséquences de l'importante métallicité de cet amas dans les modèles évolutifs. Ainsi, il se pourrait que certains phénomènes puissent être ignorés pour la métallicité généralement observée dans les amas mais qu'ils auraient une influence

non négligeable pour une métallicité plus importante.

Les âges des amas déterminés par les séquences évolutives de naines blanches sont généralement plus bas que ceux déterminés par le point de décrochage de la séquence principale, même s'ils restent cohérents entre eux. Si cette différence obtenue sur l'âge est systématique et dépend réellement des méthodes utilisées, il se pourrait qu'elle provienne du fait que la composition moyenne du cœur des naines blanches change avec l'âge du milieu. Plus un milieu est âgé, plus la masse des étoiles qui ont eu le temps de devenir des naines blanches diminuent. Or, les taux de réaction nucléaire de brûlage de l'hélium dépendent de la température, plus elle est grande et plus la quantité d'oxygène dans le cœur de la naine blanche sera grande. Ainsi, plus un milieu est âgé, plus les masses des étoiles parentes aux naines blanches sont petites et plus la quantité moyenne de carbone dans le cœur des naines blanches est grande. Or pour une luminosité donnée, les naines blanches qui ont un cœur de carbone sont plus âgés que les naines blanches ayant un cœur d'oxygène. Ainsi, pour les amas, qui sont des milieux âgés, il se pourrait que la composition moyenne du cœur des naines blanches soient riche en carbone et donc que l'âge déterminé par nos séquences évolutives soient plutôt dans la borne supérieure que l'on obtient plutôt que dans la borne inférieure. Cependant, nous ne connaissons pas la force de la dépendance des taux de réactions nucléaires en fonction de la température et il n'est pas clair que cette tendance soit assez forte pour expliquer la différence d'âges généralement obtenus par cosmochronologie de naines blanches comparée à celle obtenue par le point de décrochage de la séquence principale.

Les séquences évolutives construites avec des DAs seulement modélisent mieux les fonctions de luminosité observées des amas. Cependant il se pourrait que cela soit dû à des erreurs systématiques dans les observations et dans les méthodes de sélection des naines blanches dans les amas, et une étude plus approfondie sera nécessaire pour vérifier ce résultat surprenant suggérant que les amas ont moins de non-DAs que le voisinage solaire. Les incertitudes sur les tailles de la couche d'hydrogène et d'hélium pourraient aussi induire des erreurs systématiques dans nos modèles évolutifs qui pourraient expliquer en partie ce résultat.

L'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches a un impact important sur l'âge déterminé par les modèles évolutifs de naines blanches. Cette incertitude est souvent ignorée, bien que la composition du cœur soit mal contrainte (Fields et al. 2016). L'incertitude sur l'âge obtenu est d'autant plus grande pour les amas car celle-ci augmente avec l'âge. Ainsi, pour un âge de plus de 5 Ga, les incertitudes associées à la composition indéterminée du cœur des naines blanches dominent les erreurs totales et elles ne devraient pas être ignorées.

Si nous supposons que la composition du cœur obtenue pour une étoile par Giammichele et al. (2016) ou la composition la plus probable déterminée au chapitre 3 s'appliquent à toutes les naines blanches, l'âge déterminé par les modèles évolutifs de naines blanches seraient alors bien plus précis que ceux déterminés par le point de décrochage de la séquence principale. Cependant, nous n'avons pour l'instant aucune garantie que nous pouvons faire ces suppositions et nous devons considérer que la composition du cœur des naines blanches est inconnue ou tout du moins qu'elle est d'au moins 25% d'oxygène, comme déterminé par Fields et al. (2016). Il est toutefois possible que même le rapport C/O déterminé par Fields et al. (2016) ne s'applique pas à toutes les naines blanches et qu'il dépende fortement de la masse de l'étoile sur la séquence principale.

## *Chapitre 6*

# Conclusion

Nous avons présenté les séquences évolutives de naines blanches que nous avons utilisées dans cette thèse. Puisque l'opacité de l'hélium n'est pas connue aux basses températures, nous avons extrapolé les séquences évolutives de non-DAs, en prenant soin qu'elles soient les plus réalistes possibles. Nous avons construit des fonctions de luminosité théoriques en utilisant des naines blanches DAs et non-DAs. Nous avons étudié l'impact des principales sources d'incertitudes sur les âges obtenus et nous avons conclu que l'incertitude qui domine les erreurs est celle associée à la composition du cœur des naines blanches.

Afin de palier à cette source d'incertitude, nous avons tenté de mesurer la composition moyenne du cœur des naines blanches de l'amas M67, en utilisant une fonction de luminosité observée de l'amas, combinée à un âge déterminé par une méthode indépendante aux modèles évolutifs de naines blanches. La contrainte que nous avons obtenue sur la composition du cœur des naines blanches de M67 est faible : nous trouvons que le cœur des naines blanches possèdent probablement en moyenne plus de 60% de carbone et que la composition la plus probable est de 70% de carbone.

Nous avons ensuite utilisé les séquences évolutives de naines blanches afin de déterminer l'âge du voisinage solaire. Nous trouvons un âge de  $9.3_{-0.8}^{+1.1}$  Ga (erreurs à 68% de confiance statistique), résultat qui est cohérent avec la littérature. Les incertitudes proviennent princi-

palement de l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches et, dans une moindre mesure, du petit nombre de naines blanches dans les classes aux luminosités les plus faibles de la fonction de luminosité. Les fonctions de luminosité construites avec des DAs seulement modélisent moins bien la fonction de luminosité observée du voisinage solaire, particulièrement le pic associé au couplage convectif, par rapport à une combinaison de DAs et de non-DAs. Nous observons que la taille moyenne de la couche d'hydrogène des DAs pourrait potentiellement être contrainte grâce à la hauteur du pic de la fonction de luminosité observée.

Finalement, nous avons modélisé les fonctions de luminosité de quatre amas stellaires afin de déterminer leurs âges : 47 Tucanae ( $10.1^{+1.5}_{-1.4}$  Ga), NGC 6397 ( $10.7^{+1.6}_{-1.7}$  Ga), NGC 6791 ( $6.7 \pm 0.6$  Ga) et M4 ( $12.3 \pm 1.6$  Ga). L'incertitude sur l'âge est dominée par celle sur la composition du cœur des naines blanches, d'autant plus qu'elle est de plus en plus grande avec l'âge. Les âges que nous obtenons sont cohérents avec ceux déterminés par les séquences évolutives de naines blanches développées par d'autres équipes, même pour ces grands âges. Ils sont aussi cohérents avec les âges déterminés par le point de décrochage de la séquence principale.

Les résultats récents sur la composition du cœur des naines blanches grâce à l'astérosismologie sont très prometteurs. Cependant, le nombre de naines blanches que l'on peut étudier grâce à l'astérosismologie est limité et il est difficile d'en faire une étude statistique. La venue de Gaia, qui va notamment mesurer les distances par parallaxes d'un milliard d'objets, va détecter plus de 200 000 nouvelles naines blanches (Carrasco et al. 2014; le nombre de naines blanches connu à ce jour étant d'environ 40 000, voir Kepler et al. 2016). Nous pourrions utiliser la technique novatrice du chapitre 3 pour déterminer la composition moyenne du cœur des naines blanches avec un résultat bien plus probant, puisque la technique utilisée par Castro et al. (2011) pour déterminer l'âge de l'amas dépend de la distance, qui a une incertitude non négligeable. Un âge bien plus précis pourra être atteint grâce à des distances bien plus précises et ainsi nous pourrions avoir une meilleure contrainte sur la composition moyenne du cœur des naines blanches dans l'amas M67. De plus, la distance à laquelle la complétude sera assez grande pour faire une étude détaillée de la population de naines blanches du voisi-

nage solaire va augmenter de 20 pc à 50 pc, augmentant d'environ 15 fois le nombre de naines blanches dans l'échantillon complet (Carrasco et al. 2014). La fonction de luminosité observée du voisinage solaire sera alors bien plus complète et il sera par exemple possible d'étudier : le taux de formation stellaire en fonction du temps (déjà tenté par Tremblay et al. 2014 et Torres & García-Berro 2016), le rapport DAs/non-DAs en fonction de la luminosité, l'âge du milieu et la taille de la bosse associée au démarrage du couplage convectif. Nous pourrions aussi contraindre la densité spatiale de naines blanches dans les différentes populations de la galaxie : le disque mince, le disque épais et le halo, ce qui permettra d'en déterminer les âges grâce à la fonction de luminosité observée du voisinage solaire, comme il a déjà été tenté par Kilic et al. (2017). De plus, les distances aux amas seront connues avec une grande précision, les naines blanches les plus brillantes de certains amas y seront même découvertes puisque Gaia pourra détecter les naines blanches les plus brillantes jusqu'à 1.5 kpc. Il sera alors possible de déterminer leurs âges grâce aux naines blanches d'une manière beaucoup plus précise puisque les âges dépendent des distances. La combinaison des résultats très précis sur la composition du cœur des naines blanches individuelles obtenues par astérosismologie à une étude statistique de la composition moyenne du cœur des naines blanches d'un milieu donné grâce à Gaia devrait grandement diminuer l'incertitude sur la composition du cœur des naines blanches et ainsi, nous affranchir de la plus grande source d'incertitude sur le calcul des âges grâce aux naines blanches.

## *Annexe A*

# Paragraphe dans l'article de Rodigas et al. (2016), sur l'étoile HD11112b

J'ai calculé l'âge de la naine blanche HD11112b grâce au modèles évolutifs de Fontaine et al. (2001). J'ai écrit un paragraphe de l'article de Rodigas et al. (2016), que voici :

"Determining the age of a white dwarf by fitting its observed mass, atmospheric composition and temperature using evolutionary sequences requires making an assumption on its core composition; the effect of this assumption is most pronounced in the case of older white dwarfs (Fontaine et al. 2001). As the thermonuclear burning rate of He is uncertain, the exact core compositions of white dwarfs are generally unknown. Attempts to obtain such measurements have been made, and have shown that white dwarf cores must at least be partly composed of oxygen and are perhaps even dominated by it (e.g., see Salaris et al. 1997 and Althaus et al. 2010). More recently, Fields et al. (2016) have performed a Monte Carlo simulation to estimate the core composition of a  $0.64 M_{\odot}$  white dwarf, its parent star having a mass of  $3 M_{\odot}$ , using the STARLIB reaction rate library and the MESA evolutionary code. It is the first time that such an analysis accounted for uncertainties in the  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ , the triple- $\alpha$  and the  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  nuclear reaction rates. They found that it is practically impossible to precisely infer the core composition of white dwarfs given the current uncertainties on the

best available measurements for the aforementioned nuclear reaction rates. However, they were able to show that the core composition of their simulated white dwarfs was of at least 25% of Oxygen at a 95% statistical confidence. Giammichele et al. (2016) have produced the only reliable direct measurement of the core composition of a white dwarf to date, by using asteroseismology to deduce that the white dwarf Ross 548, a  $0.65 M_{\odot}$  star, has a fractional oxygen core composition of  $X(\text{O}) = 0.70 \pm 0.06$ .

Considering that only few such measurements have been obtained yet, the core composition of HD11112b was assumed to be 50%C and 50%O. The resulting age estimate ( $2.43_{-0.70}^{+1.03}$  Gyr for a pure hydrogen atmosphere white dwarf and the measurements of epoch two) was found to be much smaller than the suggested age of the main-sequence host star. Assuming a core composition of 100%C instead yielded an age estimate of  $2.65_{-1.04}^{+1.43}$  Gyr but as expected for a white dwarf younger than 6 Gyr, the age estimate does not strongly depends on the assumed core composition.”

# *Bibliographie*

- Allard, N. F., Koester, D., Feautrier, N., & Spielfiedel, A. 1994, *A&AS*, 108, 417
- Althaus, L. G., Córscico, A. H., Isern, J., & García-Berro, E. 2010, *A&A Rev.*, 18, 471
- Angulo, C., Arnould, M., Rayet, M., Descouvemont, P., Baye, D., Leclercq-Willain, C., Coc, A., Barhoumi, S., Aguer, P., Rolfs, C., Kunz, R., Hammer, J. W., Mayer, A., Paradellis, T., Kossionides, S., Chronidou, C., Spyrou, K., degl’Innocenti, S., Fiorentini, G., Ricci, B., Zavatarelli, S., Providencia, C., Wolters, H., Soares, J., Grama, C., Rahighi, J., Shotter, A., & Laméhi Rachti, M. 1999, *Nuclear Physics A*, 656, 3
- Anthony-Twarog, B. J. & Twarog, B. A. 2000, *AJ*, 120, 3111
- Bahcall, J. N. 1989, *Neutrino astrophysics*
- Bedin, L. R., King, I. R., Anderson, J., Piotto, G., Salaris, M., Cassisi, S., & Serenelli, A. 2008a, *ApJ*, 678, 1279
- Bedin, L. R., Salaris, M., Piotto, G., Cassisi, S., Milone, A. P., Anderson, J., & King, I. R. 2008b, *ApJ*, 679, L29
- Bedin, L. R., Salaris, M., Piotto, G., King, I. R., Anderson, J., Cassisi, S., & Momany, Y. 2005, *ApJ*, 624, L45
- Benvenuto, O. G. & Althaus, L. G. 1997, *MNRAS*, 288, 1004
- Bergeron, P., Leggett, S. K., & Ruiz, M. T. 2001, *ApJS*, 133, 413
- Bergeron, P., Ruiz, M. T., & Leggett, S. K. 1997, *ApJS*, 108, 339
- Bergeron, P., Saumon, D., & Wesemael, F. 1995, *ApJ*, 443, 764
- Bertelli, G., Girardi, L., Marigo, P., & Nasi, E. 2008, *A&A*, 484, 815

- Bertelli, G., Nasi, E., Girardi, L., & Marigo, P. 2009, *A&A*, 508, 355
- Bischoff-Kim, A., Montgomery, M. H., & Winget, D. E. 2008, *ApJ*, 675, 1505
- Bono, G., Stetson, P. B., Sanna, N., Piersimoni, A., Freyhammer, L. M., Bouzid, Y., Buonanno, R., Calamida, A., Caputo, F., Corsi, C. E., Di Cecco, A., Dall'Ora, M., Ferraro, I., Iannicola, G., Monelli, M., Nonino, M., Pulone, L., Sterken, C., Storm, J., Tuvikene, T., & Walker, A. R. 2008, *ApJ*, 686, L87
- Brogaard, K., VandenBerg, D. A., Bedin, L. R., Milone, A. P., Thygesen, A., & Grundahl, F. 2017, *MNRAS*, 468, 645
- Carraro, G., Villanova, S., Demarque, P., McSwain, M. V., Piotto, G., & Bedin, L. R. 2006, *ApJ*, 643, 1151
- Carrasco, J. M., Catalán, S., Jordi, C., Tremblay, P.-E., Napiwotzki, R., Luri, X., Robin, A. C., & Kowalski, P. M. 2014, *A&A*, 565, A11
- Carretta, E., Gratton, R. G., Clementini, G., & Fusi Pecci, F. 2000, *ApJ*, 533, 215
- Castro, M., do Nascimento Jr., J., Biazzo, K., Meléndez, J., & De Medeiros, J. 2011, *A&A*, 526, 17
- Chaboyer, B., Fenton, W. H., Nelan, J. E., Patnaude, D. J., & Simon, F. E. 2001, *ApJ*, 562, 521
- Chabrier, G. 1993, *ApJ*, 414, 695
- Chabrier, G., Brassard, P., Fontaine, G., & Saumon, D. 2000, *ApJ*, 543, 216
- Correnti, M., Gennaro, M., Kalirai, J. S., Brown, T. M., & Calamida, A. 2016, *ApJ*, 823, 18
- Dantona, F. & Mazzitelli, I. 1979, *A&A*, 74, 161
- D'Antona, F. & Mazzitelli, I. 1989, *ApJ*, 347, 934
- Diaz-Pinto, A., Garcia-Berro, E., Hernanz, M., Isern, J., & Mochkovitch, R. 1994, *A&A*, 282, 86
- Doherty, C. L., Gil-Pons, P., Siess, L., Lattanzio, J. C., & Lau, H. H. B. 2015, *MNRAS*, 446, 2599

- Dotter, A., Sarajedini, A., Anderson, J., Aparicio, A., Bedin, L. R., Chaboyer, B., Majewski, S., Marín-Franch, A., Milone, A., Paust, N., Piotto, G., Reid, I. N., Rosenberg, A., & Siegel, M. 2010, *ApJ*, 708, 698
- Eggleton, P. P., Faulkner, J., & Flannery, B. P. 1973, *A&A*, 23, 325
- Ferraro, F. R., Messineo, M., Fusi Pecci, F., de Palo, M. A., Straniero, O., Chieffi, A., & Limongi, M. 1999, *AJ*, 118, 1738
- Ferraro, F. R., Montegriffo, P., Origlia, L., & Fusi Pecci, F. 2000, *AJ*, 119, 1282
- Fields, C. E., Farmer, R., Petermann, I., Iliadis, C., & Timmes, F. X. 2016, *ApJ*, 823, 46
- Fontaine, G. 1973, PhD thesis, Univ. Rochester
- Fontaine, G., Brassard, P., & Bergeron, P. 2001, *PASP*, 113, 409
- Fontaine, G., Graboske, Jr., H. C., & van Horn, H. M. 1977, *ApJS*, 35, 293
- Fontaine, G. & Wesemael, F. 1987, in *IAU Colloq. 95: Second Conference on Faint Blue Stars*, ed. A. G. D. Philip, D. S. Hayes, & J. W. Liebert, 319–326
- García-Berro, E., Hernanz, M., Mochkovitch, R., & Isern, J. 1988, *A&A*, 193, 141
- García-Berro, E., Torres, S., Althaus, L. G., & Miller Bertolami, M. M. 2014, *A&A*, 571, A56
- García-Berro, E., Torres, S., Althaus, L. G., Renedo, I., Lorén-Aguilar, P., Córscico, A. H., Rohrmann, R. D., Salaris, M., & Isern, J. 2010, *Nature*, 465, 194
- Giammichele, N., Bergeron, P., & Dufour, P. 2012, *ApJS*, 199, 29
- Giammichele, N., Fontaine, G., Brassard, P., & Charpinet, S. 2016, *ApJS*, 223, 10
- Gratton, R., Bragaglia, A., Carretta, E., & Tosi, M. 2006, *ApJ*, 642, 462
- Gratton, R. G., Bragaglia, A., Carretta, E., Clementini, G., Desidera, S., Grundahl, F., & Lucatello, S. 2003, *A&A*, 408, 529
- Gratton, R. G., Fusi Pecci, F., Carretta, E., Clementini, G., Corsi, C. E., & Lattanzi, M. 1997, *ApJ*, 491, 749
- Grundahl, F., Clausen, J. V., Hardis, S., & Frandsen, S. 2008, *A&A*, 492, 171
- Grundahl, F., Stetson, P. B., & Andersen, M. I. 2002, *A&A*, 395, 481

- Hansen, B. M. S. 1998, *Nature*, 394, 860
- . 1999, *ApJ*, 520, 680
- Hansen, B. M. S., Anderson, J., Brewer, J., Dotter, A., Fahlman, G. G., Hurley, J., Kalirai, J., King, I., Reitzel, D., Richer, H. B., Rich, R. M., Shara, M. M., & Stetson, P. B. 2007, *ApJ*, 671, 380
- Hansen, B. M. S., Brewer, J., Fahlman, G. G., Gibson, B. K., Ibata, R., Limongi, M., Rich, R. M., Richer, H. B., Shara, M. M., & Stetson, P. B. 2002, *ApJ*, 574, L155
- Hansen, B. M. S., Kalirai, J. S., Anderson, J., Dotter, A., Richer, H. B., Rich, R. M., Shara, M. M., Fahlman, G. G., Hurley, J. R., King, I. R., Reitzel, D., & Stetson, P. B. 2013, *Nature*, 500, 51
- Hansen, B. M. S. & Phinney, E. S. 1998, *MNRAS*, 294, 557
- Hansen, B. M. S., Richer, H., Kalirai, J., Goldsbury, R., Frewen, S., & Heyl, J. 2015, *ApJ*, 809, 141
- Hansen, B. M. S., Richer, H. B., Fahlman, G. G., Stetson, P. B., Brewer, J., Currie, T., Gibson, B. K., Ibata, R., Rich, R. M., & Shara, M. M. 2004, *ApJS*, 155, 551
- Holberg, J. B., Sion, E. M., Oswalt, T., McCook, G. P., Foran, S., & Subasavage, J. P. 2008, *AJ*, 135, 1225
- Hubbard, W. B. & Lampe, M. 1969, *ApJS*, 18, 297
- Hurley, J. R., Pols, O. R., & Tout, C. A. 2000, *MNRAS*, 315, 543
- Iglesias, C. A. & Rogers, F. J. 1996, *ApJ*, 464, 943
- Iliadis, C., Champagne, A., José, J., Starrfield, S., & Tupper, P. 2002, *ApJS*, 142, 105
- Isern, J., García-Berro, E., & Salaris, M. 2001, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 245, *Astrophysical Ages and Times Scales*, ed. T. von Hippel, C. Simpson, & N. Manset, 328
- Itoh, N., Hayashi, H., & Kohyama, Y. 1993, *ApJ*, 418, 405
- Itoh, N., Hayashi, H., Nishikawa, A., & Kohyama, Y. 1996, *ApJS*, 102, 411
- Itoh, N. & Kohyama, Y. 1993, *ApJ*, 404, 268

- Itoh, N., Kohyama, Y., Matsumoto, N., & Seki, M. 1984, *ApJ*, 285, 758
- Itoh, N., Mitake, S., Iyetomi, H., & Ichimaru, S. 1983, *ApJ*, 273, 774
- Kalirai, J. S. 2013, *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 84, 58
- Kalirai, J. S., Bergeron, P., Hansen, B. M. S., Kelson, D. D., Reitzel, D. B., Rich, R. M., & Richer, H. B. 2007, *ApJ*, 671, 748
- Kalirai, J. S., Hansen, B. M. S., Kelson, D. D., Reitzel, D. B., Rich, R. M., & Richer, H. B. 2008, *ApJ*, 676, 594
- Kaluzny, J., Wysocka, A., Stanek, K. Z., & Krzeminski, W. 1998, , 48, 439
- Kepler, S. O., Pelisoli, I., Koester, D., Ourique, G., Romero, A. D., Reindl, N., Kleinman, S. J., Eisenstein, D. J., Valois, A. D. M., & Amaral, L. A. 2016, *MNRAS*, 455, 3413
- Kilic, M., Munn, J. A., Harris, H. C., von Hippel, T., Liebert, J. W., Williams, K. A., Jeffery, E., & DeGennaro, S. 2017, *ApJ*, 837, 162
- King, I. R., Bedin, L. R., Piotto, G., Cassisi, S., & Anderson, J. 2005, *AJ*, 130, 626
- Krauss, L. M. & Chaboyer, B. 2003, *Science*, 299, 65
- Lamb, D. Q. & van Horn, H. M. 1975, *ApJ*, 200, 306
- Lamb, Jr., D. Q. 1974, PhD thesis, The University of Rochester
- Leggett, S. K., Ruiz, M. T., & Bergeron, P. 1998, *ApJ*, 497, 294
- 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., Dahn, C. C., & Monet, D. G. 1988, *ApJ*, 332, 891
- Liebert, J., Wesemael, F., Hansen, C. J., Fontaine, G., Shipman, H. L., Sion, E. M., Winget, D. E., & Green, R. F. 1986, *ApJ*, 309, 241
- Limoges, M.-M., Bergeron, P., & Lépine, S. 2015, *ApJS*, 219, 19
- Limoges, M.-M., Lépine, S., & Bergeron, P. 2013, *AJ*, 145, 136
- Longland, R. 2012, *A&A*, 548, A30

- Mazzitelli, I. & Dantona, F. 1986a, *ApJ*, 308, 706
- . 1986b, *ApJ*, 311, 762
- Mazzitelli, I. & D'Antona, F. 1987, in *IAU Colloq. 95: Second Conference on Faint Blue Stars*, ed. A. G. D. Philip, D. S. Hayes, & J. W. Liebert, 351–362
- McLaughlin, D. E., Anderson, J., Meylan, G., Gebhardt, K., Pryor, C., Minniti, D., & Phinney, S. 2006, *ApJS*, 166, 249
- Mestel, L. 1952, *MNRAS*, 112, 583
- Mochkovitch, R. 1983, *A&A*, 122, 212
- Noh, H.-R. & Scalo, J. 1990, *ApJ*, 352, 605
- Origlia, L., Valenti, E., Rich, R. M., & Ferraro, F. R. 2006, *ApJ*, 646, 499
- Paquette, C., Pelletier, C., Fontaine, G., & Michaud, G. 1986, *ApJS*, 61, 177
- Parikh, A., José, J., Moreno, F., & Iliadis, C. 2008, *ApJS*, 178, 110
- Parikh, A., José, J., Sala, G., & Iliadis, C. 2013, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 69, 225
- Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., Herwig, F., Lesaffre, P., & Timmes, F. 2011, *ApJS*, 192, 3
- Paxton, B., Cantiello, M., Arras, P., Bildsten, L., Brown, E. F., Dotter, A., Mankovich, C., Montgomery, M. H., Stello, D., Timmes, F. X., & Townsend, R. 2013, *ApJS*, 208, 4
- Paxton, B., Marchant, P., Schwab, J., Bauer, E. B., Bildsten, L., Cantiello, M., Dessart, L., Farmer, R., Hu, H., Langer, N., Townsend, R. H. D., Townsley, D. M., & Timmes, F. X. 2015, *ApJS*, 220, 15
- Percival, S. M., Salaris, M., van Wyk, F., & Kilkenney, D. 2002, *ApJ*, 573, 174
- Reid, N. 1998, *AJ*, 115, 204
- Renedo, I., Althaus, L. G., Miller Bertolami, M. M., Romero, A. D., Córscico, A. H., Rohrmann, R. D., & García-Berro, E. 2010, *ApJ*, 717, 183
- Richer, H., Falhman, G., Rosvick, J., & Ibata, R. 1998, *ApJ*, 504, L91

- Richer, H. B., Brewer, J., Fahlman, G. G., Gibson, B. K., Hansen, B. M., Ibata, R., Kalirai, J. S., Limongi, M., Rich, R. M., Saviane, I., Shara, M. M., & Stetson, P. B. 2002, *ApJ*, 574, L151
- Richer, H. B., Dotter, A., Hurley, J., Anderson, J., King, I., Davis, S., Fahlman, G. G., Hansen, B. M. S., Kalirai, J., Paust, N., Rich, R. M., & Shara, M. M. 2008, *AJ*, 135, 2141
- Richer, H. B., Fahlman, G. G., Ibata, R. A., Pryor, C., Bell, R. A., Bolte, M., Bond, H. E., Harris, W. E., Hesser, J. E., Holland, S., Ivanans, N., Mandushev, G., Stetson, P. B., & Wood, M. A. 1997, *ApJ*, 484, 741
- Richer, H. B., Goldsbury, R., Heyl, J., Hurley, J., Dotter, A., Kalirai, J. S., Woodley, K. A., Fahlman, G. G., Rich, R. M., & Shara, M. M. 2013, *ApJ*, 778, 104
- Richer, H. B., Hansen, B., Limongi, M., Chieffi, A., Straniero, O., & Fahlman, G. G. 2000, *ApJ*, 529, 318
- Ritossa, C., García-Berro, E., & Iben, Jr., I. 1999, *ApJ*, 515, 381
- Roberts, L. F. 2006, in *International Symposium on Nuclear Astrophysics - Nuclei in the Cosmos*, 202.1
- Robin, A. C., Luri, X., Reylé, C., Isasi, Y., Gruex, E., Blanco-Cuaresma, S., Arenou, F., Babusiaux, C., Belcheva, M., Drimmel, R., Jordi, C., Krone-Martins, A., Masana, E., Mauduit, J. C., Mignard, F., Mowlavi, N., Rocca-Volmerange, B., Sartoretti, P., Slezak, E., & Sozzetti, A. 2012, *A&A*, 543, A100
- Rodigas, T. J., Bergeron, P., Simon, A., Arriagada, P., Faherty, J. K., Anglada-Escudé, G., Mamajek, E. E., Weinberger, A., Butler, R. P., Males, J. R., Morzinski, K., Close, L. M., Hinz, P. M., Bailey, J., Carter, B., Jenkins, J. S., Jones, H., O'Toole, S., Tinney, C. G., Wittenmyer, R., & Debes, J. 2016, *ApJ*, 831, 177
- Romero, A. D., Córscico, A. H., Althaus, L. G., Kepler, S. O., Castanheira, B. G., & Miller Bertolami, M. M. 2012, *MNRAS*, 420, 1462
- Salaris, M., Dominguez, I., Garcia-Berro, E., Hernanz, M., Isern, J., & Mochkovitch, R. 1997, *ApJ*, 486, 413
- Salaris, M., Held, E. V., Ortolani, S., Gullieuszik, M., & Momany, Y. 2007, *A&A*, 476, 243

- Salaris, M. & Weiss, A. 1998, *A&A*, 335, 943
- . 2002, *A&A*, 388, 492
- Sallaska, A. L., Iliadis, C., Champange, A. E., Goriely, S., Starrfield, S., & Timmes, F. X. 2013, *ApJS*, 207, 18
- Saumon, D., Chabrier, G., & van Horn, H. M. 1995, *ApJS*, 99, 713
- Schmidt, M. 1959, *ApJ*, 129, 243
- Segretain, L. & Chabrier, G. 1993, *A&A*, 271, L13
- Simon, A., Fontaine, G., & Brassard, P. 2013, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 469, 18th European White Dwarf Workshop., 201
- Stetson, P. B., Bruntt, H., & Grundahl, F. 2003, *PASP*, 115, 413
- Stevenson, D. J. 1980, *Journal de Physique*, 41, C2
- Stoesz, J. A. & Herwig, F. 2003, *MNRAS*, 340, 763
- Storm, J., Nordstrom, B., Carney, B. W., & Anderson, J. 1994, *A&A*, 291, 121
- Tassoul, M., Fontaine, G., & Winget, D. E. 1990, *ApJS*, 72, 335
- Thompson, I. B., Kaluzny, J., Rucinski, S. M., Krzeminski, W., Pych, W., Dotter, A., & Burley, G. S. 2010, *AJ*, 139, 329
- Torres, S. & García-Berro, E. 2016, *A&A*, 588, A35
- Torres, S., García-Berro, E., Althaus, L. G., & Camisassa, M. E. 2015, *A&A*, 581, A90
- Tremblay, P.-E. & Bergeron, P. 2009, *ApJ*, 696, 1755
- Tremblay, P.-E., Fontaine, G., Freytag, B., Steiner, O., Ludwig, H.-G., Steffen, M., Wedemeyer, S., & Brassard, P. 2015, *ApJ*, 812, 19
- Tremblay, P.-E., Kalirai, J. S., Soderblom, D. R., Cignoni, M., & Cummings, J. 2014, *ApJ*, 791, 92
- van Horn, H. M. 1971, in *IAU Symposium*, Vol. 42, *White Dwarfs*, ed. W. J. Luyten, 97
- VandenBerg, D. A. 2000, *ApJS*, 129, 315
- VandenBerg, D. A., Brogaard, K., Leaman, R., & Casagrande, L. 2013, *ApJ*, 775, 134

- Watkins, L. L., van der Marel, R. P., Bellini, A., & Anderson, J. 2015, *ApJ*, 812, 149
- Winget, D. E., Hansen, C. J., Liebert, J., van Horn, H. M., Fontaine, G., Nather, R. E., Kepler, S. O., & Lamb, D. Q. 1987, *ApJ*, 315, L77
- Winget, D. E., Kepler, S. O., Campos, F., Montgomery, M. H., Girardi, L., Bergeron, P., & Williams, K. 2009, *ApJ*, 693, L6
- Wood, M. A. 1990, PhD thesis, Texas Univ., Austin.
- . 1992, *ApJ*, 386, 539
- Wood, M. A. 1995, in *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, Vol. 443, *White Dwarfs*, ed. D. Koester & K. Werner, 41
- Woodley, K. A., Goldsbury, R., Kalirai, J. S., Richer, H. B., Tremblay, P.-E., Anderson, J., Bergeron, P., Dotter, A., Esteves, L., Fahlman, G. G., Hansen, B. M. S., Heyl, J., Hurley, J., Rich, R. M., Shara, M. M., & Stetson, P. B. 2012, *AJ*, 143, 50
- Zoccali, M., Renzini, A., Ortolani, S., Bragaglia, A., Bohlin, R., Carretta, E., Ferraro, F. R., Gilmozzi, R., Holberg, J. B., Marconi, G., Rich, R. M., & Wesemael, F. 2001, *ApJ*, 553, 733