

2m11.2611.2

Université de Montréal

Les étoiles de la branche asymptotique rouge de Fornax

par

Benoit Frappier

Département de physique

Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures

en vue de l'obtention du grade de

Maître ès sciences (M.Sc.)

en physique

Mai, 1998

© Benoit Frappier, 1998



QC
3
U54
1998
U.011

Université de Montréal

Les études de la faculté d'éducation sont en français

par
Gauthier Tremblay
Département de psychologie
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des arts et des sciences
en vue de l'obtention du grade de
Maîtrise en psychologie (M.Sc.)
en psychologie

*

1998



© Bibliothèque de la Faculté de psychologie

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

Les étoiles de la branche asymptotique rouge de Fornax

présenté par:

Benoit Frappier

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

François Wesemael, président-rapporteur
Serge Demers, directeur de recherche
Anthony F.J. Moffat, membre du jury

Mémoire accepté le: 28.05.1998

SOMMAIRE

La galaxie naine sphéroïdale Fornax contient une importante population d'étoiles de carbone. Située très près de nous, à 132 kpc, elle subit peu de rougissement et les propriétés intrinsèques de ces étoiles de carbone sont accessibles. De plus, la faible métallicité du système en fait un endroit idéal de formation d'étoiles de carbone. Le but de ce travail est l'identification de nouvelles étoiles de carbone en utilisant des critères photométriques appliqués aux géantes rouges ayant déjà un type spectral connu.

Ce travail fournit, pour la première fois, les coordonnées exactes de 65 étoiles de carbone, 11 étoiles de type S (et SC) et 30 étoiles de types M, K et ctM. De nouvelles observations dans les bandes *BVIJHK* nous permettent d'établir des critères d'identification, et de faire un inventaire des géantes rouges de Fornax. Nous identifions 18 nouvelles étoiles de carbone pour porter le total dans cette galaxie à 68.

Nous ne pensons pas avoir détecté toutes les étoiles de carbone dans Fornax. Puisque nos critères ne sont valides qu'à partir d'une certaine valeur d'indice de couleur, ils sont inefficaces pour une région importante du diagramme couleur-couleur, où se côtoient les étoiles des différents types spectraux de la branche asymptotique. Le rapport d'étoiles S:C pour Fornax est loin d'être, pour l'instant, comparable à celui de l'environnement solaire; 1:9 versus 1:3. Nous n'excluons pas la possibilité que certaines de nos nouvelles étoiles de carbone soient en fait des étoiles de type S.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	viii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1: Structure et stage d'évolution des étoiles de carbone	4
CHAPITRE 2: Données et analyse	10
2.1 Les observations disponibles	10
2.1.1 Observations photographiques, un point de départ	10
2.1.2 De nouvelles observations	12
2.1.3 Une collaboration importante	14
2.1.4 Données infrarouges	16
2.2 Identification des étoiles rouges	16
CHAPITRE 3: Propriétés photométriques des étoiles de la branche asymptotique	20
3.1 Tableaux des magnitudes et couleurs	20

3.1.1	Étoiles avec classification spectrale	20
3.1.2	Les étoiles sans classification spectrale	27
3.2	Diagramme couleur-magnitude	33
3.3	Diagrammes couleur-couleur	35
3.4	Nouveaux candidats possibles	38
CHAPITRE 4: Propriétés des étoiles de carbone de Fornax		40
4.1	Fonction de luminosité	40
4.2	Températures de couleur	41
4.3	Distribution spatiale	46
CONCLUSION		48
RÉFÉRENCES		50
REMERCIEMENTS		xi

LISTE DES TABLEAUX

I	Observations photographiques	11
II	Nouvelles données	12
III	Coefficients de calibration	14
IV	Étoiles de type C et S confirmées par spectroscopie	21
IV	(Suite)	22
IV	(Suite)	23
V	Couleurs et magnitudes infrarouges des étoiles de type C et S .	24
VI	Échantillon d'étoiles de type M et K confirmées par spectroscopie	25
VI	(Suite)	26
VII	Couleurs et magnitudes infrarouges des étoiles de type K et M .	27
VIII	Étoiles rouges sans classification spectrale	28
VIII	(Suite)	29
VIII	(Suite)	30
IX	Couleurs et magnitudes infrarouges des étoiles sans classification spectrale	31
X	Nouvelles étoiles de carbone	39

XI	Températures de couleur des étoiles de type K et M	44
XII	Températures de couleur des étoiles de carbone et de type S . .	45
XIII	Valeurs de N_c/N_r	47

LISTE DES FIGURES

1	<i>Schéma de l'évolution d'une étoile de masse intermédiaire de la séquence principale jusqu'à la branche asymptotique.</i>	5
2	<i>Schéma de l'intérieur d'une étoile à son arrivée sur la branche asymptotique.</i>	6
3	<i>Graphique des images trouvées dans les deux champs mesurés par l'APM. À gauche: fornax1. À droite: fornax2. Nord en-haut, Est à gauche. Mille unités APM équivalent à 4.71 arcmin.</i>	11
4	<i>Mosaïque CCD de Demers et al.</i>	13
5	<i>Mosaïque CCD de Mateo et al.</i>	15
6	<i>Cartes de champ de l'étoile DK39.</i>	19
7	<i>Cartes de champ des trois étoiles qui, d'après nos critères, sont de nouvelles étoiles de carbone. Le champ mesure 1' × 1' arcmin. Symboles identiques à ceux de la figure 6.</i>	32
8	<i>Digramme couleur-magnitude du champ fnx1.</i>	33
9	<i>Diagramme couleur-magnitude des étoiles des quatre champs fnx. Les données proviennent des tableaux IV, VI et VIII.</i>	35
10	<i>Diagramme couleur-couleur dans le visible.</i>	36
11	<i>Diagramme couleur-couleur dans le proche infrarouge.</i>	37

12	<i>Fonction de luminosité de Fornax et des champs F3 et F4 de M31. Les valeurs des différentes médianes et variances sont indiqués pour chaque champ.</i>	41
13	<i>Diagramme de la transformation des couleurs $B - V$ en $J - K$.</i>	43
14	<i>Distribution spatiale des étoiles de carbone dans Fornax. Les unités sont en unités de l'APM.</i>	46

À la mémoire de Steve Mailloux

INTRODUCTION

Fornax ou l'outil idéal pour l'étude de la branche asymptotique

La galaxie Fornax est l'une des neuf naines sphéroïdales satellites de la Voie Lactée. Ayant une brillance de surface assez faible, l'étude de tels systèmes n'est pas chose facile. Ce n'est cependant pas le cas de Fornax. En effet, c'est la plus brillante et la plus massive de cette famille. Nous adoptons pour ce travail une distance de 132 kpc établie par Demers *et al.* (1990). Elle renferme, à ce jour, la population d'étoiles de carbone la plus importante parmi les naines sphéroïdales. De plus, Fornax étant à une latitude galactique $b = -67^\circ$, elle subit très peu de rougissement. Les propriétés intrinsèques de sa population d'étoiles sont donc accessibles. Une évolution stellaire complexe caractérise Fornax, comme en témoigne la présence de cinq amas globulaires de composition chimique et d'âge différents. Son diagramme couleur-magnitude (DCM) inusité reflète bien ce passé mouvementé: branche des géantes large, un *red clump* important...

Le choix de Fornax pour la présente étude n'est pas le fruit du hasard. De récentes observations CCD permettent de jeter un regard nouveau sur un objet unique pour l'étude de la branche asymptotique. Fornax possède trois atouts certains par rapport à d'autres systèmes contenant une population importante d'étoiles de carbone. Premièrement, étant un objet relativement compact, la faible dispersion de distances est un avantage considérable comparativement aux Nuages de Magellan. De plus, sa proximité nous assure une excellente résolution, ce qui n'est pas le cas des galaxies plus éloignées comme M31. Enfin, Fornax est un système de faible métallicité, $[Fe/H] = -1.5 \pm 0.37$ (Sagar *et al.*, 1990), un environnement idéal pour les étoiles de carbone. En effet, Brewer *et al.* (1995) emploient

le terme *mepephiles* (*lovers of METal-Poor Environments*) pour décrire ce type d'étoiles (voir chapitre 1). Donc la galaxie Fornax est une candidate idéale nous permettant de définir les propriétés photométriques de la branche asymptotique.

Historique des étoiles de carbone de Fornax

Demers et Kunkel (1979, par la suite DK) ont été les premiers à découvrir la présence d'étoiles très rouges dans Fornax. C'est en inspectant alternativement au microscope des plaques photographiques B et V qu'ils ont pu identifier 66 étoiles dont l'indice de couleur $B - V$ se situait entre 1.6 et 2.9. Même en l'absence de données spectroscopiques, ils postulèrent la présence certaine d'étoiles de carbone dans Fornax. Aaronson et Mould (1980, par la suite AM) confirmèrent cette hypothèse en publiant les spectres de cinq étoiles de carbone parmi la liste de Demers et Kunkel. La course aux étoiles de carbone de Fornax était alors lancée. Westerlund (1979) identifie, pour sa part, 34 étoiles de carbone avec un relevé systématique en infrarouge. Frogel et al. (1982, par la suite FBMC) aussi contribuent à la liste, toujours croissante, avec leur propre relevé systématique. Quelques années plus tard, Westerlund, Edvardsson et Lundgren (1987, par la suite WEL) ajoutent 21 nouvelles étoiles M ou C. Les observations de Lundgren (1990, par la suite L90) permettent d'élever le nombre d'étoiles de carbone de Fornax à plus de cinq douzaines.

But et stratégie

Le but de ce travail est de déterminer des critères photométriques permettant de différencier les étoiles de type M des étoiles de carbone. Il serait alors possible d'identifier, parmi les géantes déjà connues de Fornax, de nouvelles étoiles de carbone et de découvrir de nouvelles étoiles de carbone dans les régions non explorées de Fornax. Nous voulons aussi dresser une liste, la plus complète possible, des propriétés photométriques des étoiles de Fornax; leurs positions, les magnitudes B et V , leurs couleurs dans le visible et dans certains cas dans l'infrarouge.

Le projet est divisé en quatre étapes. Le chapitre 1 se veut un survol de la théorie de l'évolution stellaire d'une étoile quittant la séquence principale. Les mécanismes et conditions nécessaires à la naissance d'une étoile de carbone sont discutés. Le chapitre 2 énumère les différentes observations utilisées dans ce projet. Les observations photographiques et les observations CCD récentes (dans le visible et dans l'infrarouge) y sont présentées en détail. Nous discutons aussi de la méthode d'identification des étoiles connues de la littérature sur nos clichés. Les résultats de notre photométrie suivent dans le chapitre 3. C'est dans ce chapitre que sont déterminées les deux conditions photométriques permettant de trancher sur la nature des étoiles sans classification spectrale. Enfin, le chapitre 4 résume les différentes propriétés des étoiles de Fornax.

Nous savons que Fornax possède une imposante population d'étoiles d'âge intermédiaire comme le démontrent les nombreuses études faites dans le passé. Mais avons-nous recensé la totalité de ses étoiles de carbone? Comment expliquer qu'une galaxie de la taille de Fornax puisse transformer autant d'étoiles en étoiles de carbone? Voilà les questions qui ont motivé le présent projet et auxquelles nous tenterons de répondre.

CHAPITRE 1

Structure et stage d'évolution des étoiles de carbone

Le paramètre le plus important qui influence l'évolution d'une étoile est sans doute sa masse. Indépendamment de leurs compositions chimiques, les étoiles sont regroupées en trois catégories: les étoiles de faible masse, les étoiles de masse intermédiaire et les étoiles massives.

Les étoiles de faible masse sont celles qui, en quittant la séquence principale pour la branche des géantes rouges (RGB), développent un noyau dégénéré d'hélium. La masse initiale pour ces étoiles se situe entre 0.8 et $2.0M_{\odot}$. La distinction entre les deux autres catégories d'étoiles dépend de la façon dont est allumé le carbone dans le noyau. Une étoile est dite de masse intermédiaire ($M < 9M_{\odot}$) lorsqu'elle, suite à l'épuisement de l'hélium au centre, développe un noyau dégénéré de carbone-oxygène (C-O). Enfin, les étoiles qui ont une masse initiale supérieure à $9M_{\odot}$, allumant leur noyau de C-O de façon non-dégénérée, sont dites étoiles massives. La suite de ce chapitre est consacrée aux étoiles de masse intermédiaire, précurseurs des étoiles de carbone. La figure 1 représente l'évolution dans le diagramme Hertzsprung-Russell (H-R) d'une étoile de $5M_{\odot}$.

Pour une étoile de masse intermédiaire, le brûlage de l'hydrogène dans le noyau est caractérisé par la formation d'une zone convective, par une augmentation de luminosité et de rayon et par une diminution de la température effective. Ce séjour sur la branche principale varie entre 10^8 et 10^9 années. Une fois l'hydrogène épuisé (dans le noyau), l'étoile évolue rapidement vers la région des géantes rouges. Une mince coquille d'hydrogène entoure le noyau qui, composé

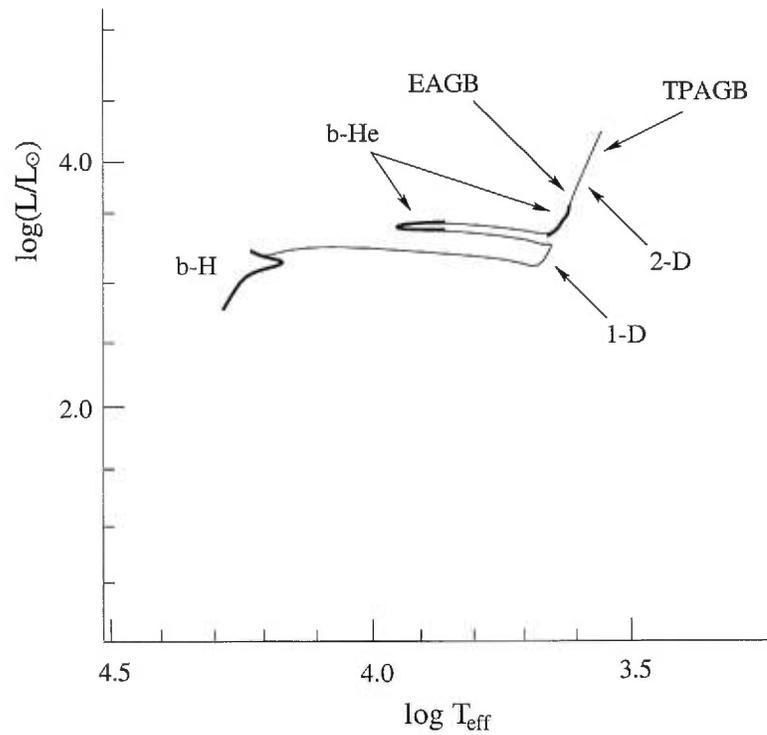


FIGURE 1. Schéma de l'évolution d'une étoile de masse intermédiaire de la séquence principale jusqu'à la branche asymptotique. Les endroits où se produisent les premiers (1-D) et deuxièmes (2-D) dragages ainsi que le brûlage de l'hydrogène (b-H) et de l'hélium (b-He) sont indiqués. Figure adaptée de Chiosi et al., page 239.

essentiellement d'hélium, se contracte et se réchauffe.

À l'approche de la RGB, l'enveloppe convective s'enfonce et atteint les couches où l'hydrogène a été transformé en hélium et le carbone en azote par le cycle CNO. L'abondance de surface de ces éléments varie de façon importante; c'est le premier dragage. La coquille d'hydrogène en fusion, en plus de produire la majorité de la luminosité de l'étoile, contribue à l'augmentation de la masse du noyau. Lorsque la température et la densité atteignent les valeurs critiques (10^8 K et 10^{-4} g cm $^{-3}$ respectivement), l'allumage de l'hélium se fait dans des conditions dégénérées.

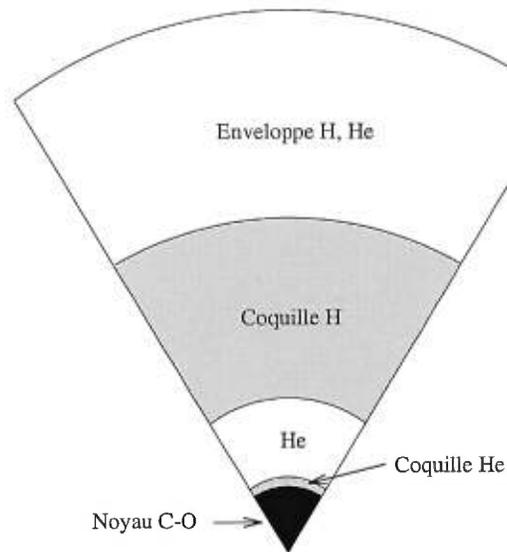


FIGURE 2. Schéma de l'intérieur d'une étoile à son arrivée sur la branche asymptotique. Cette configuration en couches successives est directement reliée au phénomène de pulsation thermique. Les rayons ne sont pas à l'échelle.

Le brûlage de l'hélium au centre se poursuit pendant une durée qui varie entre 20 et 30% du temps passé sur la séquence principale. Cette lente évolution se produit à deux endroits distincts dans le diagramme H-R: une première fois près de la RGB, la seconde à température et luminosité plus élevées. La fusion de l'hélium s'amorce dans la première région. Par la suite, lorsque la quantité d'énergie produite par le noyau (qui augmente) égale la quantité d'énergie produite par la coquille d'hydrogène (qui diminue), une rapide contraction de l'enveloppe survient. Les couches externes, auparavant convectives, redeviennent radiatives et l'étoile évolue vers la deuxième région où se poursuit le brûlage de l'hélium. Ces différentes étapes de combustion changent considérablement la configuration interne de l'étoile (voir figure 2). Une fois l'hélium au centre épuisé, le noyau de C-O est entouré d'une coquille d'hélium en fusion. Une autre coquille, celle-ci composée d'hydrogène, brûle à la base d'une enveloppe riche en hydrogène.

L'étoile évolue par la suite vers la branche asymptotique des géantes (AGB),

composée d'étoiles de types spectraux K, M, S, C et des deux types intermédiaires MS et MC. Cette classification indique la présence relative de carbone et d'oxygène dans l'atmosphère de l'étoile. Le type spectral M est dit riche en oxygène et présente un rapport $(C/O) < 1$. Le type C riche en carbone, à un rapport $(C/O) > 1$. Lorsque ce rapport est environ égale à l'unité, on dit que l'étoile est de type S (L90). Il est cependant dangereux d'interpréter directement la séquence M-MS-S-SC-C comme une phase évolutive stricte. Il n'y a pas que la masse qui influence la composition de l'atmosphère d'une étoile (i.e. son type spectral); la combinaison âge/masse/métallicité, bien que beaucoup plus complexe, est certainement plus juste (L90).

L'AGB est divisée en deux: le début de l'AGB (*early* AGB, ou EAGB) et l'étape de pulses thermiques (TPAGB). Pendant l'EAGB, le cœur de l'étoile se réchauffe par contraction tandis que l'enveloppe riche en hydrogène se refroidit par expansion. Le refroidissement dans les couches externes est tellement efficace que la température chute sous la limite nécessaire pour soutenir la fusion dans la coquille d'hydrogène. Dans le diagramme H-R, l'étoile se déplace presque parallèlement à la RGB et une fois de plus, l'enveloppe convective s'enfonce dans le cœur de l'étoile. Un deuxième dragage s'amorce, amenant à la surface de l'hélium et de l'azote transformés par le cycle CNO. Seules les étoiles dont la masse est supérieure à $4.6M_{\odot}$ (pour une abondance solaire) subiront un deuxième dragage (Iben et Renzini, 1983). L'enveloppe convective se refroidit peu à peu (sous l'effet de son expansion) et commence alors une étape de contraction; la luminosité diminue et la matière à la base de l'enveloppe convective se réchauffe. Cela a pour conséquence de réallumer la coquille d'hydrogène, forçant l'enveloppe convective à retraiter au-dessus de la coquille d'hydrogène.

Au cœur de l'étoile, le noyau de C-O atteint une densité si élevée que des conditions dégénérées apparaissent (pour un noyau de C-O de masse inférieure à $1.06M_{\odot}$). Le noyau devient isotherme (environ 10^8 K, température in-

suffisante pour amorcer la fusion du carbone) et l'énergie gravitationnelle, libérée par l'accumulation de matière dans le noyau, est émise sous forme de neutrinos. Les réactions nucléaires sont produites en alternance par les coquilles d'hydrogène et d'hélium. La principale source d'énergie, lorsque la coquille d'hélium est inactive (90% du temps), demeure la fusion dans la coquille d'hydrogène.

Ce scénario n'est pas sans conséquence pour la suite de l'évolution. La masse dans la zone riche en hélium, sous la coquille d'hydrogène, ne cesse d'augmenter. La température et la densité deviennent tellement favorable à la réaction triple alpha (transformation de trois atomes d'hélium en un atome de carbone) que la pression de radiation ne peut, à elle seule, libérer toute l'énergie ainsi produite; une zone de convection se forme au-dessus de la coquille d'hélium. Dans un premier temps, l'énergie libérée augmente la température de la matière environnante qui est expulsée radialement dans les deux directions. La matière à la base de la coquille d'hydrogène en fusion est repoussée; la diminution de température est si forte que la coquille d'hydrogène s'éteint. La coquille d'hélium aussi subit les conséquences de ce refroidissement; le taux de brûlage chute rapidement, faisant disparaître la zone convective. Puis, la matière retombe peu à peu vers les régions internes amorçant de nouveau la fusion dans la coquille d'hydrogène. La réaction triple alpha joue un rôle important pendant cette période mouvementée: le ^{12}C est l'élément le plus produit. En comparaison, la quantité de ^{16}O produite est environ un ordre de grandeur plus faible (Iben et Renzini, 1983).

Un troisième dragage accompagne le phénomène de pulses thermiques. L'enveloppe convective atteint la région entre les deux coquilles où se trouve une quantité importante de carbone. Chaque pulse amène cette matière riche en carbone de plus en plus près de la surface, transformant l'étoile en étoile de carbone. D'après Brewer *et al.* (1995), un environnement pauvre en élément lourd est l'endroit idéal pour le développement d'étoiles de carbone (les *mepephiles*). Les étoiles de la branche asymptotique pauvres en éléments lourds ont une enveloppe

moins importante et le processus de convection n'a pas à pénétrer aussi loin afin d'amorcer le troisième dragage. Aussi, une quantité moins importante de matière doit être amenée à la surface afin d'obtenir $C > O$.

La phase de l'AGB se termine soit par l'éjection des couches externes et la formation d'une naine blanche, soit par déflagration. Cet allumage violent du carbone nécessite une masse supérieure à $6M_{\odot}$. Mais ce scénario n'est pas observé pour les étoiles de masse intermédiaire; un mécanisme agissant sur une période très courte (10^3 années) serait responsable de la fin de la phase TPAGB. La perte de masse, causée par un super-vent, est l'hypothèse avancée par plusieurs auteurs (pour plus de détails, voir Chiosi *et al.*, 1992).

CHAPITRE 2

Données et analyse

2.1 Les observations disponibles

Ce travail est basé sur des observations photographiques publiées, de nouvelles observations CCD en B et V et des données plus anciennes non-publiées en v , i et JHK.

2.1.1 Observations photographiques, un point de départ

Les observations photographiques (Demers *et al.* 1994) ont été prises au télescope de 4 m de l'observatoire inter-Américain de Cerro Tololo (CTIO) il y a plus de vingt ans (voir figure 3). Le premier champ (fornax1) contient l'essentiel de Fornax tandis que le second (fornax2) est centré au nord de Fornax. Les deux champs ont un diamètre de 46 arcmin. Ces observations sont résumées dans le tableau I. Les plaques photographiques ont été numérisées par l'APM de l'université de Cambridge. Nous disposons donc des magnitudes V_{pg} et couleurs $(B - V)_{pg}$ qui constituent le point de départ du projet. En effet, on utilise ces observations pour effectuer une première identification des étoiles rouges parmi notre liste de référence (voir section 2.2).

Ces observations, moins précises que des observations CCD, procurent néanmoins une vue d'ensemble très utile. De plus, il est beaucoup plus facile de passer des coordonnées de l'APM aux ascensions droites et déclinaisons des étoiles que

de le faire avec le CCD puisque les coordonnées produites par l'APM sont déjà dans le système équatorial.

TABLEAU I.
Observations photographiques

Champ	Date	Centre (1950)
fornax1	20/12/1974	$2^h 37^m 21^s - 34^\circ 52' 47''$
fornax2	29/10/1975	$2^h 36^m 15^s - 34^\circ 22' 15''$

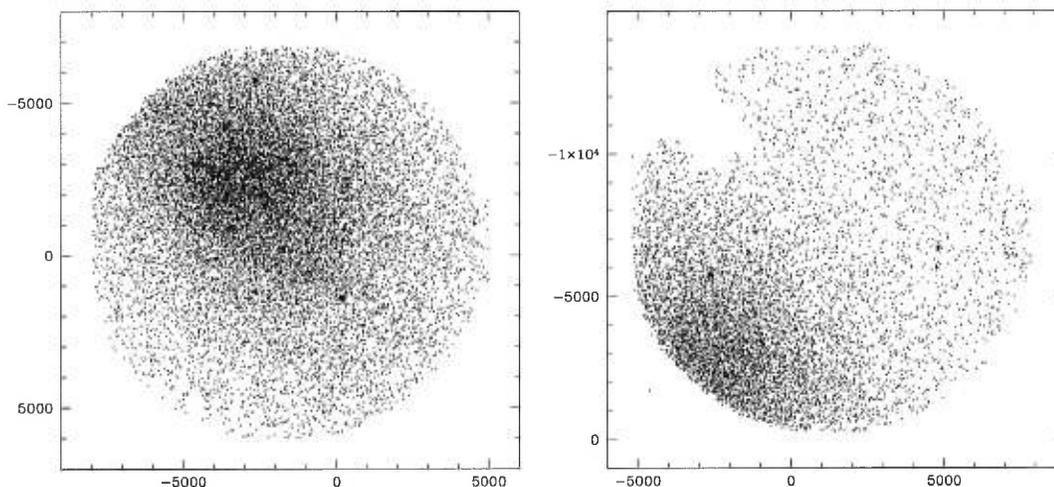


FIGURE 3. Graphique des images trouvées dans les deux champs mesurés par l'APM. À gauche: fornax1. À droite: fornax2. Nord en-haut, Est à gauche. Mille unités APM équivalent à 4.71 arcmin.

Une autre série de données photographiques est à notre disposition. Il s'agit d'une plaque du télescope UK Schmidt (UKST) centrée sur Fornax (Demers et Irwin, 1987) et elle aussi balayée par l'APM à Cambridge. Le champ de cette plaque est grand ($5^\circ.5 \times 5^\circ.5$) et nous utilisons ces observations pour une seule raison; les coordonnées des étoiles, ont été très bien déterminées. Le nombre de

standards de position est beaucoup plus important que pour les deux champs fornax1 et fornax2. Les coordonnées finales des étoiles rouges dans les tableaux du chapitre 3 proviennent de cette plaque.¹ La résolution du Schmidt étant moins bonne que celle du télescope de 4 m du CTIO, ces données ne sont pas utilisées pour la photométrie.

2.1.2 De nouvelles observations

TABLEAU II.

Nouvelles données

Champ	Centre du CCD (1950)	Nb. d'images	Filtre	Exposition
fnx1	$2^h38^m21^s -34^\circ37'51''$	{ 4	B	36 min
		4	V	34 min
fnx2	$2^h37^m13^s -34^\circ37'51''$	{ 3	B	24 min
		3	V	24 min
fnx3	$2^h37^m13^s -34^\circ51'51''$	{ 4	B	32 min
		4	V	32 min
fnx4	$2^h38^m21^s -34^\circ51'51''$	{ 4	B	32 min
		4	V	32 min

Les nouvelles observations qui ont motivé ce projet proviennent du télescope 1.5 m du CTIO. Elles consistent en une mosaïque de 4 poses CCD de 2048×2048 . Chaque CCD couvre une région de $14'.8 \times 14'.8$. Les 4 champs ont été observés en *V* et en *B* au mois d'octobre et novembre 1995. Les détails de ces différents champs sont illustrés au tableau II. Puisque les CCD se recoupent, la région effective est un carré de $27' \times 27'$. La figure 4 illustre ces champs superposés aux

¹UKST # V7369, 30 min d'exposition.

observations photographiques de fornax1.

Pour l'analyse des données, nous avons utilisé les logiciels DAOPHOT II et ALLFRAME développés par Peter B. Stetson. ALLFRAME est un outil fait sur mesure pour combiner des observations effectuées avec différents filtres. La préparation des images est assez simple. On doit tout d'abord uniformiser les données; chaque groupe (de 6 ou 8 images selon le champ) est corrigé pour les variations de position entre les poses, avec optimisation des paramètres tels que le ciel et le seuil. Ces manipulations, faites avec DAOPHOT II, procurent l'information nécessaire à ALLFRAME, qui analyse simultanément toutes les images B et V .

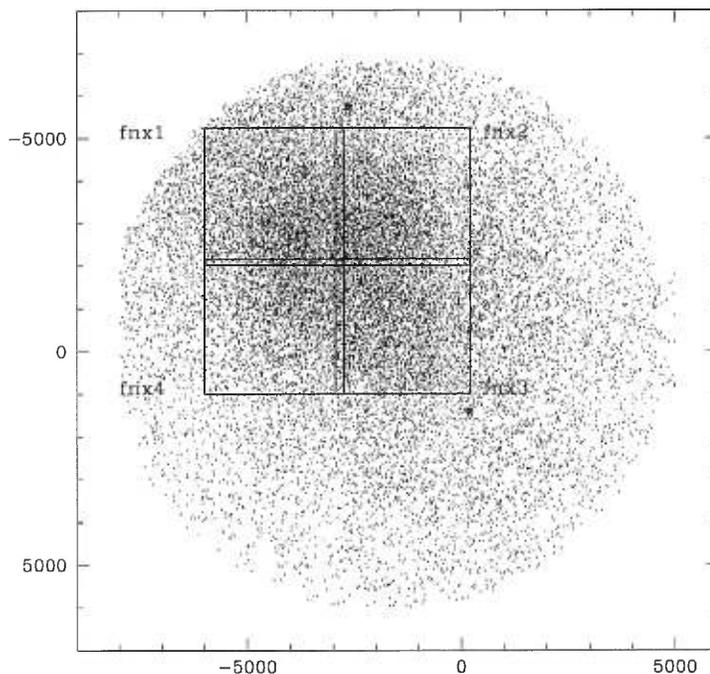


FIGURE 4. *Illustration du champ couvert par les nouvelles observations CCD de Demers et al.. On a superposé, aux observations photographiques de fornax1, la mosaïque CCD. Unités identiques à celles de la figure 3.*

La calibration au système standard BV a été faite en utilisant les standards équatoriaux de Landolt (1992), observés chaque nuit. Plusieurs champs

équatoriaux furent observés en plus du champ de T Phe situé près de Fornax, à une déclinaison de -46° . Les équations de transformation ainsi que les coefficients d’extinction² furent calculés par régressions multilinéaires. Le processus est similaire à celui énoncé par Grondin *et al.* (1990). Les équations de calibration employées, reliant les magnitudes instrumentales (v , b) aux magnitudes du système standard (B , V), sont les suivantes:

$$V = v - \alpha_1 - \beta_1(B - V) - k_1 X_v$$

$$B - V = \frac{1}{\beta_2} \left[\frac{(b - v) - k_2 X_{b-v}}{1 - k'' X_{b-v}} \right] - \frac{\alpha_2}{\beta_2}$$

Les X_i correspondent aux différentes masses d’air et les coefficients sont présentés au tableau III.

TABLEAU III.

Coefficients de calibration

Point zéro	Pente	Coefficient d’extinction
$\alpha_1 = -0.63 \pm 0.03$	$\beta_1 = -0.024 \pm 0.007$	$k_1 = 0.11 \pm 0.02$
$\alpha_2 = 0.04 \pm 0.02$	$\beta_2 = 1.105 \pm 0.006$	$k_2 = 0.18 \pm 0.02$

2.1.3 Une collaboration importante

Nous avons eu la chance d’obtenir des observations récentes dans les bandes V et I (que nous désignons v et i car ces magnitudes ne sont pas étalonnées) grâce à une collaboration avec Mario Mateo. Une imposante mosaïque de 23 images CCD couvre une région d’environ 90×90 arcmin (voir figure 5). Ces observations ont été prises au télescope Swope de 1 m à l’observatoire de Las Campanas (Mateo

²nous adoptons $k'' = -0.023$ (Landolt, 1992)

& Olszewski, communication privée). Bien que nous ne disposions que des magnitudes instrumentales, ces nouvelles données vont nous permettre de compiler une autre couleur (i.e. $v - i$) et ainsi d'approfondir notre étude de comparaison entre les étoiles de type M et C (voir chapitre 3).

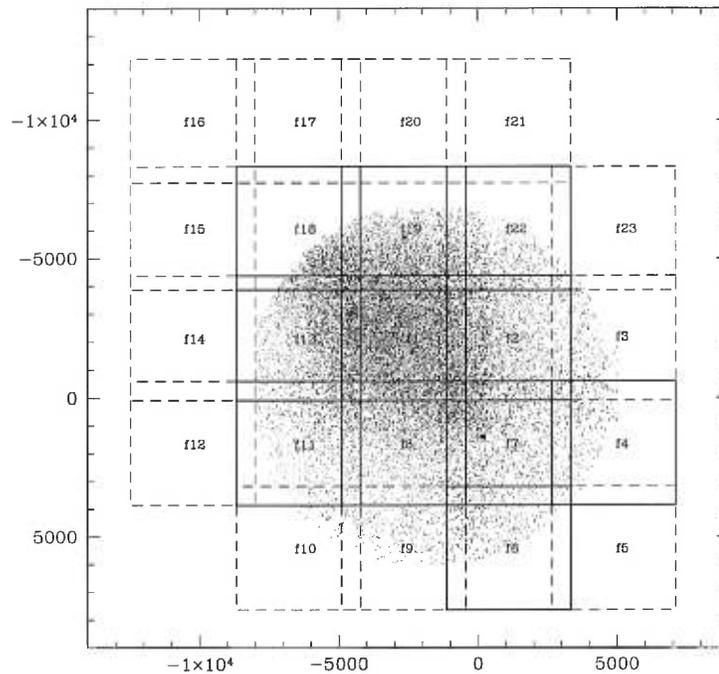


FIGURE 5. *Illustration du champ couvert par les nouvelles observations CCD de Mateo (superposé aux observations photographiques de Fornax 1). Les champs en pointillés n'ont pas servi dans le présent travail.*

Une relation a été établie en comparant les magnitudes de quelques douzaines d'étoiles identifiées sur nos clichés CCD et ceux de Mateo. Les magnitudes instrumentales v ont été transformées en magnitudes standard V' selon l'équation suivante:

$$V' = 0.967 \times v_{inst} + 4.60$$

2.1.4 Données infrarouges

Les observations JHK dans le proche infrarouge ont été obtenues en 1988 (Demers, communication privée) avec le photomètre InSb de Las Campanas attaché au télescope du Pont de 2.5 m. Le système de visualisation Quantex fut utilisé pour l'acquisition des étoiles; chaque étoile fut visuellement centrée dans le diaphragme. La course de l'oscillation du diaphragme ainsi que son diamètre ont été ajustés pour tenir compte des étoiles au voisinage des cibles. Les magnitudes instrumentales furent étalonnées en utilisant les standards d'Elias *et al.* (1982). Ces données, dont l'erreur moyenne est $\sigma = 0.05$ mag, sont présentées aux tableaux V (page 24) et IX (page 31).

2.2 Identification des étoiles rouges

L'identification d'astres particuliers dans une galaxie contenant des millions d'étoiles n'est pas chose facile. Heureusement, les étoiles de carbone sont parmi les plus brillantes étoiles des galaxies sphéroïdales. Au départ, nous ne disposions que d'une liste de géantes rouges de Fornax remontant à 1991. Cette liste provient d'un survol de la littérature depuis quelques décennies et de recherches non-publiées de Demers. Elle contient l'ascension droite, la déclinaison, la magnitude V , la couleur $B - V$ et, dans certains cas, le spectre et les magnitudes infrarouges. Il y a cependant deux lacunes importantes; certaines coordonnées sont erronées et un certain nombre d'indices de couleur sont absents. Cela complique évidemment les choses, mais la publication des cartes de champ des images photographiques a cependant permis de contourner le problème.

La première étape consiste à produire une carte de champ (de petite dimension) pour chacune des étoiles de la liste. Pour ce faire, nous utilisons le programme Fchart (de Demers) qui construit ces cartes à partir des observations photographiques de fornax1, c'est-à-dire des mesures de l'APM. Les paramètres

d'entrée sont: l'ascension droite et la déclinaison de l'étoile et la dimension (en arcmin) de la carte de champ. Pour la majorité des candidats, une carte de 1×1 arcmin est idéale. On peut aussi fixer une limite inférieure d'intensité permettant de réduire le nombre d'étoiles pour les champs très denses. Le programme produit ensuite la carte, numérote les étoiles et enregistre les données photographiques dans un fichier. On regarde ensuite la magnitude et la couleur des étoiles près du centre de la carte afin de trouver celle qui nous intéresse; l'étoile la plus rouge est habituellement le candidat recherché. On obtient les coordonnées en unités APM et cela nous indique dans quel champ CCD (fnx1, 2, 3 ou 4) on retrouvera notre candidat (voir figure 4).

En procédant par tâtonnement pour 5 ou 6 étoiles, une équation de transformation peut être déterminée; on passe des coordonnées APM aux coordonnées CCD du champ correspondant. Le choix d'une transformation linéaire en x et une en y s'est avéré suffisant. Il s'agit donc seulement d'un effet d'échelle simple. À titre d'exemple, l'équation du champ fnx1 est:

$$X_{CCD} = -0.6318 \times X_{pg} - 1749.4$$

$$Y_{CCD} = -0.6337 \times Y_{pg} - 1284.0$$

où X_{pg} et Y_{pg} sont les positions en x et y du candidat sur la plaque photographique (fornax1 ou fornax2) et X_{CCD} et Y_{CCD} sont les positions en x et y du candidat pour le CCD fnx1.

On se doit de recréer, avec les données CCD, le même environnement que les cartes de champ produites par Fchart. Pour cela, une macro de Super Mongo (par la suite SM) affichant un champ de dimension semblable fut utilisé. C'est par la correspondance des voisins immédiats de chaque candidat que l'on parvient à son identification. La figure 6 montre le résultat de la recherche pour l'étoile DK39. La figure du haut, faite à partir du programme Fchart, est celle de référence. Les unités sont en APM. La figure du bas, faite avec une macro SM, est le résultat final de la recherche de cette même étoile. Les unités sont en pixel du CCD. Les

trois séries d'étoiles marquées d'une croix sont facilement identifiables dans la figure du haut et confirment la bonne identification du candidat. C'est à dire l'étoile 22 de la plaque photographique est, sur le CCD, l'étoile 451.

Le numéro de l'étoile centrale nous renvoie au fichier contenant les données CCD. On obtient alors la magnitude V_{CCD} et la couleur $(B - V)_{CCD}$. Le même processus est répété pour les données de Mateo. Une nouvelle série d'équations relie maintenant les coordonnées APM aux coordonnées CCD de la mosaïque de Mateo. On veut évidemment compiler, pour chacun des candidats, les données CCD provenant de ces deux sources; i.e. deux magnitudes V et deux couleurs $B - V$ et $v - i$. Cependant, cela est impossible pour quelques étoiles de la liste de départ et cela pour différentes raisons. Puisque le champ couvert par les observations de Mateo est beaucoup plus grand que le nôtre, ce ne sont pas toutes les étoiles qui ont les quatre informations; une étoile située dans la partie supérieure du champ f19 est à l'extérieur des champs fnx (voir figures 4 et 5). Dans certains cas, un voisinage trop dense fait en sorte que le candidat recherché est tout simplement absent de la photométrie.

La dernière étape consiste à retrouver, à l'aide du matériel du UKST, les coordonnées précises de nos candidats. Encore une fois, nous avons recours à l'identification visuelle. Comme mentionné précédemment, le champ de la plaque est très grand et on perd beaucoup de détails. Donc, certaines coordonnées ne proviennent pas de cette identification; on adopte les coordonnées de la littérature dans ces cas.

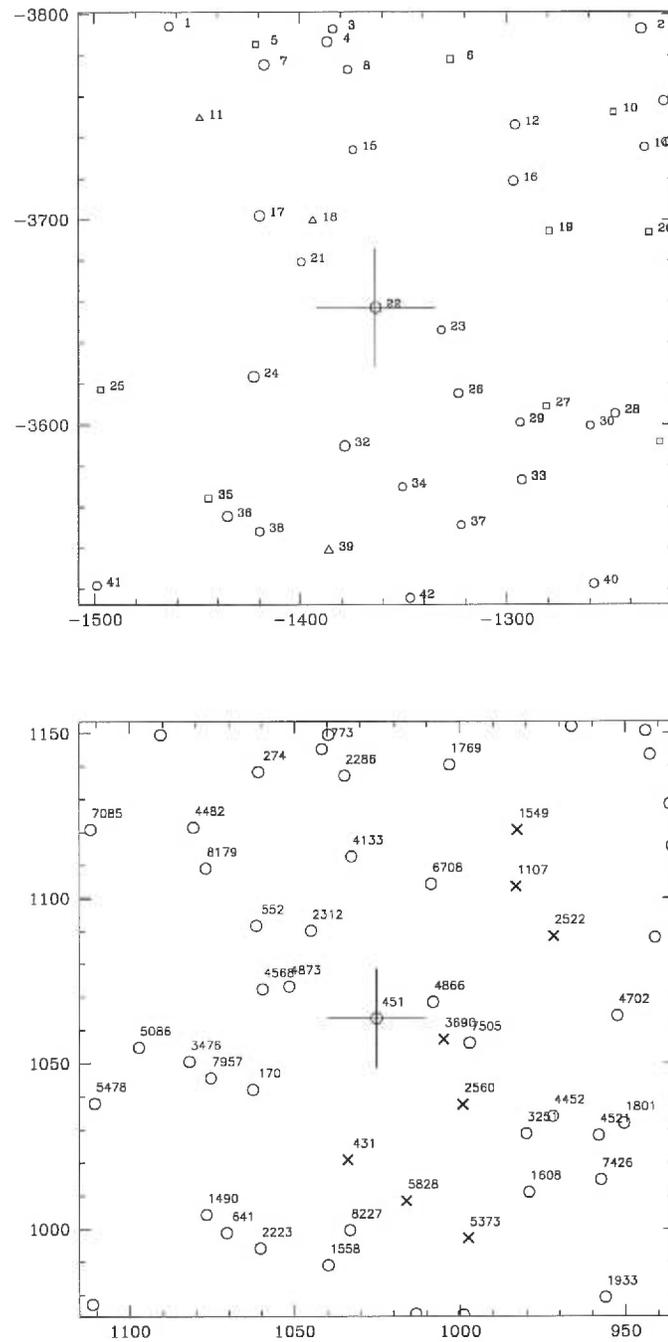


FIGURE 6. *Cartes de champ (1' × 1') de l'étoile DK39. Les symboles pour la plaque photographique (en haut) sont: ○ étoile, △ galaxies et □ galaxies diffuses et étoiles mixtes. Le symbole × pour le CCD (en bas) indique trois groupes d'étoiles permettant la bonne identification du candidat recherché.*

CHAPITRE 3

Propriétés photométriques des étoiles de la branche asymptotique

3.1 Tableaux des magnitudes et couleurs

3.1.1 Étoiles avec classification spectrale

Le tableau IV présente les magnitudes et couleurs visuelles des étoiles de carbone et de type S confirmées par spectroscopie. Les différentes abréviations pour le nom des étoiles sont:

DK	Demers et Kunkel (1979)
DKH	Demers, Kunkel et Hardy (1979)
V	Demers et Irwin (1987)
V(# > 30)	Demers et Irwin (non-publié)
BM	Frogel <i>et al.</i> (1982)
C, M et WEL	Westerlund <i>et al.</i> (1987)

Les colonnes deux et trois sont respectivement l'ascension droite et la déclinaison (exprimées en coordonnées de 1950). Cependant, certaines étoiles sont dans des régions très denses et n'ont pas été identifiées sur la plaque du UKST (notre fichier de référence pour les positions). Les ascensions droites et déclinaisons en italique sont soit celles de fornax1 soit celles de WEL. Les magnitudes et couleurs des colonnes quatre et cinq (V' et $v - i$) proviennent des observations de Mateo tandis que celles des colonnes six et sept (V et $B - V$) sont

le résultat de nos propres observations. Aussi, puisque les deux sondages CCD sont de différentes dimensions, certaines étoiles sont présentes dans le champ de Mateo mais situées à l'extérieur des champs fnx. Dans ce cas, les magnitudes et couleurs proviennent soit des données photographiques ou de WEL si elles sont connues et écrites en italique. Nous n'utilisons cependant pas ces données dans les sections qui suivent que ce soit dans les figures ou dans les différents calculs de propriétés. Ces valeurs sont présentées uniquement à titre indicatif. Les données photographiques sont trop imprécises; des différences de plus de 0.2 mag entre la couleur photographique et celle provenant des données CCD ne sont pas rares. Une telle variation, surtout pour les étoiles dont la couleur se situe au voisinage de $B - V = 2.0$, est beaucoup trop importante et risque de fausser nos conclusions sur la nature de l'étoile en question (voir section 3.4). Les colonnes huit et neuf indiquent le type spectral (T.Sp.) ainsi que la référence de la spectroscopie. Les erreurs moyennes des données CCD sont: $\sigma_{V'} = 0.04$, $\sigma_{vi} = 0.03$, $\sigma_V = 0.03$ et $\sigma_{BV} = 0.04$. Le tableau V contient les magnitudes et couleurs infrarouges de quelques étoiles de carbone.

TABLEAU IV.
Étoiles de type C et S confirmées par spectroscopie

Étoile	α	1950	δ	V'	$v - i$	V	$B - V$	T.Sp.	Réf.
C19	$2^h 38^m 16^s.05$	$-34^\circ 25' 32''.4$	18.46	1.32	<i>18.31</i>	<i>1.90</i>	C	1	
M19	2 38 14.55	-34 31 36.0	18.59	2.16	18.32	1.93	S3/2	2	
DK47	2 37 35.09	-34 32 43.7	18.37	1.69	17.97	2.39	C	1	
DK46 BM1	2 37 36.05	-34 33 05.9	17.70	2.04	18.21	2.86	C	3, 4	
DK48 V7	2 37 56.84	-34 33 09.0	18.83	2.03	18.83	2.61	C	1	
DK50	2 38 20.87	-34 33 29.9	18.58	1.37	18.63	1.83	SC2/8	2	
DK49	2 38 12.67	-34 35 01.4	18.25	1.60	18.13	2.08	SC4/8	2	
DK43 BM2	2 37 50.14	-34 35 33.3	18.29	1.85	18.61	2.58	C	1, 3	
DK44 BM3	2 37 56.51	-34 35 33.6	18.33	2.05	18.57	2.55	C	1, 3	

(Suite)

TABLEAU IV. (Suite)

Étoile	α	1950	δ	V'	$v-i$	V	$B-V$	T.Sp.	Réf.
DK52	$2^h 38^m 02^s .23$		$-34^\circ 36' 11''.9$	19.99	3.06	<i>19.97</i>	<i>2.09</i>	C	1
DK51	2 38	29.79	-34 36 39.2	18.24	1.45	18.51	2.24	C2/1	2
DK42 BM6	2 37	34.95	-34 37 49.1	18.60	1.83	18.77	2.43	C	1, 3
C13 BM5	2 37	50.71	-34 38 13.8	18.18	1.94	18.38	2.63	C	1, 3
C12	2 38	07.73	-34 39 15.1	—	—	<i>19.48</i>	<i>2.73</i>	C	1
WEL301	2 37	32.49	-34 40 31.0	18.24	1.05	18.34	1.77	SC1/8	2
DK55	2 37	58.10	-34 40 32.6	19.30	2.55	18.72	3.20	C	1
DK54	2 38	01.14	-34 40 32.9	18.22	1.80	18.34	2.41	S4/3	2
WEL143	2 38	07.28	-34 40 41.8	18.50	1.23	18.65	1.88	C2,2	2
C15 BM28	2 37	18.46	-34 41 01.9	18.14	1.62	18.27	2.20	C	1, 3
WEL34	2 37	40.20	-34 41 45.4	18.23	1.59	18.37	1.97	S2/3	2
DK56 V34	2 38	20.78	-34 41 47.5	19.33	2.21	18.51	2.71	C	1
DK59	2 38	07.96	-34 42 58.9	18.55	1.58	18.51	2.12	C	1
C11	2 38	03.60	-34 43 04.1	18.29	1.56	<i>18.44</i>	<i>1.86</i>	C	1
C18	<i>2 37 32.4</i>		<i>-34 43 17</i>	—	—	19.4:	3.4:	C	1
DK57	2 38	34.55	-34 44 11.1	18.31	1.32	18.39	1.66	C	1
DK37 BM15	2 37	44.80	-34 44 14.6	17.86	1.54	18.08	2.29	C	1
DK62	2 37	58.48	-34 44 39.0	19.13	2.52	19.3:	3.9:	C	1
C14	2 37	27.18	-34 44 42.7	18.01	1.44	18.15	1.85	C	1
DK36 BM31	2 36	53.86	-34 45 05.1	18.18	1.50	18.09	1.99	C	3
DK61 BM8	2 38	01.10	-34 45 08.1	18.46	2.25	19.08	2.97	C	3
DK60 BM7	2 38	07.56	-34 45 35.1	18.54	1.80	18.52	2.71	C	3, 4
WEL145	2 38	06.80	-34 45 50.4	18.26	1.32	18.37	1.87	S1/6	2
DK33 BM27	2 37	19.82	-34 45 54.2	18.14	1.48	18.53	2.40	C	3
C9 V19	2 38	15.74	-34 45 59.1	19.31	1.77	18.89	2.91	C	1
C5 BM14	2 37	47.75	-34 46 11.0	18.59	2.39	19.2:	4.3:	C	1, 3

(Suite)

TABLEAU IV. (Suite)

Étoile	α	1950	δ	V'	$v-i$	V	$B-V$	T.Sp.	Réf.
C10 V20	$2^h 38^m 05^s.95$		$-34^\circ 46' 11''.8$	19.46	2.68	19.5:	3.4:	C	1
C3 BM17	2 37 37.23		-34 46 31.9	18.61	1.68	18.72	2.22	C	1
DK65	2 38 11.42		-34 46 52.5	19.14	2.45	18.76	3.31	C	1
WEL200	2 38 19.26		-34 47 03.7	17.88	1.29	18.00	1.83	S0/6	2
C16	2 38 19.97		-34 47 07.2	18.14	1.59	18.45	2.26	C	1
C4 BM13	2 37 49.75		-34 47 14.9	17.91	1.60	17.81	2.10	C	1, 3
C7 BM9	2 38 04.88		-34 47 29.6	18.93	2.17	18.56	2.97	C	1, 3
DK64 BM10	2 38 00.07		-34 47 29.9	17.94	1.60	17.97	2.11	C	4
DK34	2 37 13.27		-34 47 30.1	18.31	1.58	18.36	2.12	SC3	2
C8	2 38 16.17		-34 47 44.2	18.64	1.81	18.64	1.80	C	1
C2	2 37 44.38		-34 48 00.0	18.95	2.50	18.6:	—	C	1
C6 V35	2 38 01.98		-34 48 17.8	18.21	1.36	18.31	2.05	C	1
DK32	2 36 47.17		-34 48 19.0	18.24	1.62	18.36	2.18	S2/5	2
DK22 BM12	2 37 54.18		-34 49 11.9	18.26	1.87	18.20	2.51	C	3, 4
DK21 BM18 ¹	2 37 33.11		-34 49 18.5	19.35	2.60	19.4:	4.6:	C	1, 4
BM33 DK19	2 37 27.51		-34 49 31.7	18.83	2.13	18.54	2.61	C	4
BM34 DK20	<i>2 37 30.4</i>		<i>-34 50 04</i>	17.98	1.77	18.25	2.43	C	4
DK29 BM23	2 37 19.92		-34 50 55.9	17.99	1.60	18.11	1.88	C, M1	3, 4
DK28 BM21	2 37 29.10		-34 51 22.0	18.36	1.56	18.38	1.93	C	1
DK17 BM20	2 37 30.50		-34 51 49.1	19.07	2.00	19.02	1.89	C	4
BM24	2 37 10.20		-34 52 34.3	18.48	2.07	18.54	1.98	S	2
C17	2 38 19.42		-34 56 11.9	18.36	1.88	18.33	2.49	C	1
DK10	<i>2 37 48.6</i>		<i>-34 58 51</i>	18.20	1.45	18.41	1.91	C	1
DK7 V29	2 36 52.90		-35 00 42.1	18.00	1.55	<i>18.30</i>	<i>2.30</i>	C	3
DK5	2 37 58.75		-35 01 16.1	18.45	1.44	<i>18.63</i>	<i>2.12</i>	C	1
DK2	2 38 10.48		-35 11 18.1	17.24	1.40	<i>17.70</i>	<i>2.14</i>	C	3

Réf: type spectral confirmé par (1) WEL, (2) Lundgren (1990), (3) FBMC et (4) AM. Magnitudes et couleurs avec (:) ont $\sigma > 0.1$. ¹Autre identification: C1.

TABLEAU V.

Couleurs et magnitudes infrarouges des étoiles de type C et S

Étoile	K	$J - K$	$J - H$	Réf.
M19	13.68	1.11	0.23	L90
DK47	13.90	1.46	1.00	†
DK46 BM1	12.50	1.26	0.88	FBMC
DK48 V7	13.48	1.54	1.08	†
DK43 BM2	13.88	1.28	0.82	FBMC
DK44 BM3	13.27	1.38	0.92	FBMC
DK42 BM6	13.48	1.64	1.06	†
C13 BM5	13.01	1.45	0.94	FBMC
DK54	13.64	1.16	0.92	L90
C15 BM28	13.45	1.11	0.88	FBMC
C11	14.27	0.86	0.66	FBMC
DK61 BM8	13.88	1.47	1.04	†
DK60 BM7	13.35	1.27	0.90	L90
C9 V19	14.41	1.03	0.78	†
C10 V20	12.77	2.02	1.24	†
C4 BM13	13.47	0.80	0.82	FBMC
C7 BM9	13.05	1.52	1.03	FBMC
DK64 BM10	13.25	1.05	0.78	FBMC
DK22 BM12	13.04	1.41	0.94	L90
BM24	13.70	1.27	1.00	L90
DK7 V29	13.65	1.48	0.91	†
DK2	13.29	1.18	0.78	AM

Réf: photométrie tirée de l'article indiqué. †= observations de Las Campanas décrites à la section 2.1.4.

Le tableau VI présente les propriétés photométriques des étoiles de type spectral M, K et ctm². Les colonnes sont identiques à celles du tableau IV expliquées plus-haut. Il ne s’agit ici que d’un échantillon des étoiles de ces différents types spectraux présentes dans Fornax. Nous n’avons choisi que les étoiles M et K (et ctm) les plus rouges et les plus brillantes afin de bien cibler, pour ces types d’étoiles, la région critique de $B - V \approx 2$ dans le diagramme couleur-couleur (voir figure 10, page 36). Les différences majeures entre ces étoiles et les étoiles de carbone apparaissent près de cette limite, et il n’était pas nécessaire d’inclure les étoiles de magnitude plus faible et de couleurs très différentes de la valeur critique. Pour une liste plus exhaustive des étoiles de type M et K, voir L90. Viennent ensuite, au tableau VII, les données infrarouges de ces étoiles.

TABLEAU VI.

Échantillon d’étoiles de type M et K confirmées par spectroscopie

Étoile	α	1950	δ	V'	$v - i$	V	$B - V$	T.Sp.	Réf.
M23	$2^h 37^m 41^s.66$	$-34^\circ 23' 07''.2$	18.90	2.14	<i>18.89</i>	<i>1.69</i>	M	1	
M22	2 38 19.12	-34 23 31.5	18.62	2.39	<i>18.44</i>	<i>1.84</i>	M	1	
M21	2 38 17.51	-34 28 23.0	19.65	2.50	<i>19.70</i>	<i>1.60</i>	ctm	1, 2	
M15	2 37 25.95	-34 28 37.0	18.07	1.97	<i>17.95</i>	<i>1.71</i>	dM2	1, 2	
M20	2 38 22.09	-34 29 55.5	19.58	2.83	<i>19.70</i>	<i>1.60</i>	M	1	
M18	2 38 13.94	-34 31 43.8	20.04	2.35	20.23	1.53	M,K	1, 2	
DK45	2 36 50.07	-34 33 44.1	18.67	1.24	18.63	1.68	K4	2	
M17	2 37 50.35	-34 33 50.7	19.89	2.85	20.17	1.81	M	1	
M10	2 37 59.88	-34 36 33.3	17.31	1.76	17.40	1.53	M	1	

(Suite)

²Le type ctm nous vient de la classification spectrale de Mould & Aaronson (1979). Les étoiles qui n’avaient ni le doublet C₂ (5636 et 5165 Å) caractéristique des étoiles de carbone ni celui de la molécule TiO (6162 et 5850 Å) des étoiles de type M furent assignées le type ctm pour “continu”.

TABLEAU VI. (Suite)

Étoile	α	1950	δ	V'	$v - i$	V	$B - V$	T.Sp.	Réf.
M9 BM4	$2^h 37^m 59^s.75$		$-34^\circ 37' 00''.8$	18.21	2.24	18.34	1.50	M4	1, 3
M11	2 37 54.21		-34 38 18.2	18.91	2.30	18.79	1.82	M2S	1, 2
M8	2 37 57.78		-34 40 25.3	17.12	1.58	17.20	1.49	M	1
WEL39	2 37 42.18		-34 40 28.2	19.43	0.90	19.42	1.23	ctm	1
DK38 BM29	2 37 18.46		-34 41 01.9	18.43	2.01	18.54	1.92	M	1, 3
WEL33	2 37 40.16		-34 41 47.3	18.17	1.34	18.00	1.78	ctm	2
M14	2 37 53.78		-34 41 50.8	17.71	1.34	17.84	1.44	M2S	1, 2
WEL305	2 37 59.56		-34 42 27.0	18.88	0.88	18.98	1.24	ctm	2
M7	2 38 10.01		-34 43 27.8	18.29	1.79	18.46	1.87	M	1, 2
M12 BM16	2 37 34.58		-34 45 12.4	18.68	2.63	18.63	1.65	M3d	1, 3
M2 BM26	2 37 14.91		-34 45 54.2	19.62	0.88	19.59	1.21	M2?	1, 3
WEL337	2 38 11.96		-34 46 04.7	19.50	0.77	19.67	1.25	ctm	2
BM32	<i>2 36 45.2</i>		<i>-34 46 08</i>	—	—	—	—	M1	3
M3	2 38 10.14		-34 47 03.1	18.24	1.61	18.31	1.95	M	1
BM22	2 37 25.21		-34 51 10.4	—	—	19.41	1.26	M	1, 3
DK27 BM19	2 37 40.66		-34 51 48.4	18.18	1.67	18.02	1.87	M2	1, 2, 3
BM25	2 36 44.20		-34 52 55.3	—	—	16.60	1.50	M2	1, 3
M25	2 37 18.42		-34 56 02.4	—	—	17.01	1.47	M	1
DK24	2 37 21.21		-34 57 27.5	18.36	1.88	18.26	1.80	M1S	1, 2
M27	2 38 00.07		-34 58 05.4	18.43	2.05	18.65	1.48	M	1
M26	2 37 26.29		-35 00 54.8	19.13	2.36	<i>19.09</i>	<i>1.74</i>	M	1
DK6	2 37 11.75		-35 01 13.4	17.76	1.34	<i>17.50</i>	<i>1.78</i>	K5	2

Même commentaire qu'au tableau IV.

TABLEAU VII.

Couleurs et magnitudes infrarouges des étoiles de type K et M

Étoile	K	$J - K$	$J - H$	Réf.
M10	13.02	1.06	0.70	L90
M11	13.69	1.14	0.94	L90
M8	13.22	0.87	0.68	L90
DK38 BM29	13.55	1.14	0.88	FBMC
M12 BM16	13.42	0.80	0.52	FBMC
BM32	12.29	0.72	0.51	FBMC
BM22	12.06	0.77	0.59	FBMC
DK6	13.80	0.89	0.67	L90

Réf: photométrie tirée de l'article indiqué.

3.1.2 Les étoiles sans classification spectrale

Pour fin de complétude, les propriétés photométriques des géantes rouges de notre liste de départ (voir section 2.2) dont le type spectral n'est pas connu sont regroupées dans le tableau VIII. Les trois dernières entrées du tableau VIII sont de nouvelles étoiles rouges (FCS pour *Fornax Carbon Star*). Les cartes de champ de ces trois nouvelles étoiles sont présentées à la figure 7, page 32. Nous avons trié les étoiles des quatre champs fnx afin d'isoler de nouvelles étoiles très rouges ($B - V > 2.0$). De cette liste, seulement trois étoiles n'avaient pas été identifiées auparavant. Il se peut cependant qu'il s'agisse d'étoiles découvertes par WEL, mais puisqu'ils n'ont pas publié de coordonnées, ces étoiles sont très difficiles à identifier. Les observations infrarouges de Las Campanas de quelques étoiles sans classification spectrale suivent dans le tableau IX.

TABLEAU VIII.
Étoiles rouges sans classification spectrale

Étoile	α	1950	δ	V'	$v - i$	V	$B - V$
V2	$2^h 38^m 04^s.71$	$-34^\circ 19' 15''.2$	—	—	—	18.30	3.40
V4	2 38 48.79	-34 25 00.9	—	—	—	18.63	2.92
R6	2 37 17.46	-34 25 05.6	18.37	1.40	18.30	2.00	
DK66 V6	2 37 10.60	-34 28 00.7	18.80	1.77	18.50	3.75	
M16	2 37 28.22	-34 29 54.2	—	—	17.72	1.89	
R9	2 37 59.65	-34 33 01.0	18.26	1.47	18.37	2.14	
V8	2 35 35.72	-34 33 05.0	—	—	19.10	2.10	
R11	2 35 59.17	-34 33 15.5	18.42	1.37	18.30	2.17	
V10	2 38 27.52	-34 33 37.5	—	—	18.70	1.60	
V11	2 39 22.74	-34 34 53.6	—	—	18.60	2.00	
R13	2 38 09.64	-34 36 21.3	17.95	1.51	18.39	1.95	
DK41 V31	2 37 26.15	-34 36 59.6	18.21	1.46	18.48	2.08	
DK39	2 37 15.11	-34 37 41.9	18.53	1.15	18.66	1.66	
DK53	2 38 01.37	-34 37 42.8	18.51	1.25	18.62	1.68	
V33	2 36 12.48	-34 38 43.5	—	—	—	—	
DK40	2 37 06.76	-34 39 19.4	—	—	18.30	1.86	
R17	2 38 51.12	-34 40 13.1	18.41	1.59	18.46	1.89	
V14	2 37 25.38	-34 40 14.9	18.18	1.67	18.26	2.01	
R18	2 37 21.90	-34 41 55.6	—	—	18.48	1.61	
V15	2 37 33.71	-34 43 45.3	19.11	0.87	19.23	1.44	
R20	2 38 45.81	-34 43 59.6	19.88	0.78	18.73	1.92	
DK63	2 38 07.44	-34 44 08.5	18.62	1.22	18.70	1.62	
DK58	2 38 35.65	-34 44 21.6	18.05	1.37	18.19	2.04	
V16	2 39 06.73	-34 44 38.8	18.30	1.74	18.6	1.6	

(Suite)

TABLEAU VIII. (Suite)

Étoile	α	1950	δ	V'	$v - i$	V	$B - V$
R24	$2^h 36^m 35^s .67$	$-34^\circ 45' 19''.6$	18.16	1.46	<i>18.59</i>	<i>2.01</i>	
R27	2 37 29.78	-34 46 01.2	18.56	1.15	18.61	1.59	
R28	2 36 18.74	-34 46 11.5	18.43	0.88	<i>18.42</i>	<i>2.09</i>	
DK35 V21	2 37 08.14	-34 46 51.3	18.28	1.62	18.35	1.92	
R33	2 38 11.77	-34 48 18.9	17.87	1.31	17.95	1.84	
V38	2 38 35.06	-34 48 21.9	18.09	1.08	18.36	1.59	
R35	2 38 44.29	-34 48 24.6	—	—	17.71	2.34	
R36	2 39 04.26	-34 48 39.7	18.36	2.00	<i>18.65</i>	<i>3.29</i>	
R37	2 37 52.99	-34 48 59.1	—	—	18.24	1.96	
R38	2 37 57.91	-34 49 22.9	18.56	1.17	18.70	1.74	
R39	2 38 27.47	-34 49 41.1	19.91	0.92	19.89	1.28	
R40	2 37 11.94	-34 49 53.1	18.40	1.25	18.47	1.73	
DK23	2 38 48.19	-34 50 11.3	—	—	18.93	2.94	
DK30 V24	2 37 07.72	-34 50 34.2	—	—	18.83	1.83	
DK15	2 36 18.28	-34 50 58.8	19.29	1.85	<i>18.42</i>	<i>2.3</i>	
DK18	2 37 50.02	-34 51 27.7	18.81	2.46	19.3:	3.2:	
DK16	2 36 15.36	-34 51 49.3	18.24	0.90	<i>18.42</i>	<i>2.0</i>	
DK31	2 37 01.38	-34 51 51.6	18.49	1.00	18.81	2.02	
V25	2 37 47.26	-34 52 03.5	18.41	1.57	18.06	1.76	
R44	2 38 18.62	-34 53 26.5	18.21	1.57	18.31	1.95	
R45	2 39 05.41	-34 54 34.4	18.12	1.21	<i>17.91</i>	<i>2.04</i>	
DK26	2 38 09.61	-34 56 12.0	17.98	1.49	18.15	1.90	
DK14	2 37 49.80	-34 56 53.2	18.98	2.09	19.3:	3.3:	
DK25	2 37 57.77	-34 56 54.1	18.05	1.35	18.45	1.85	

(Suite)

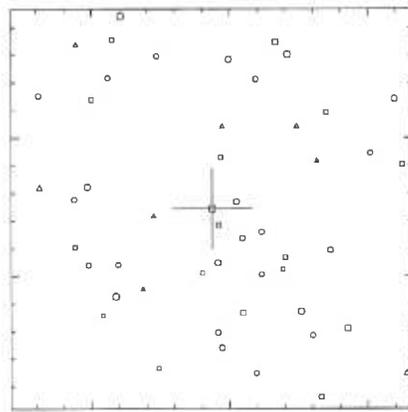
TABLEAU VIII. (Suite)

Étoile	α	1950	δ	V'	$v - i$	V	$B - V$
DK13	$2^h 36^m 48^s.07$	$-34^\circ 57' 48''.9$		17.99	1.24	18.12	1.75
R46	2 36 25.97	-34 57 57.5		18.17	1.32	<i>18.33</i>	<i>2.07</i>
V27	2 35 25.15	-34 57 59.2		18.03	1.28	<i>18.11</i>	<i>2.20</i>
DK11	2 36 55.72	-34 58 20.0		18.25	1.41	18.39	1.82
DK12	2 36 55.36	-34 58 29.5		18.34	1.17	18.50	1.67
V28	2 36 52.81	-34 59 27.3		19.19	2.54	19.6:	3.7:
DK9	2 36 38.00	-35 00 34.6		18.30	1.11	<i>18.47</i>	<i>1.71</i>
DKH11325	2 36 51.34	-35 02 10.0		17.62	1.72	<i>17.68</i>	<i>1.94</i>
DK8	2 36 48.97	-35 02 13.9		19.58	2.60	<i>19.4</i>	<i>2.60</i>
R49	2 35 24.99	-35 02 35.9		18.11	1.77	<i>18.35</i>	<i>2.67</i>
DK4	2 36 04.85	-35 04 02.7		18.42	1.14	<i>18.56</i>	<i>1.84</i>
R50	2 36 17.91	-35 05 08.9		17.94	1.14	<i>18.04</i>	<i>2.09</i>
DK3	2 37 16.76	-35 05 52.1		18.48	1.08	<i>18.42</i>	<i>1.84</i>
DKH6737	2 37 07.27	-35 05 55.0		17.81	1.20	<i>18.02</i>	<i>1.88</i>
DK1 V30	2 36 08.61	-35 09 02.2		18.20	1.62	<i>18.98</i>	<i>2.23</i>
R52	2 38 09.13	-35 09 47.1		18.96	1.82	<i>18.73</i>	<i>2.05</i>
DKH11179	2 36 26.94	-35 09 49.0		18.41	1.17	<i>18.56</i>	<i>1.66</i>
V36	2 36 20.66	-35 18 11.9		17.85	1.15	<i>17.93</i>	<i>2.29</i>
R55	2 36 38.81	-35 36 38.1		—	—	<i>18.46</i>	<i>2.05</i>
FCS01	2 38 45.77	-34 38 46.3		18.22	1.93	18.51	2.26
FCS02	2 38 11.68	-34 39 53.6		18.65	1.07	18.99	2.25
FCS03	2 38 11.39	-34 46 37.8		—	—	20.40	2.33

Même commentaire qu'au tableau IV. DKH de Demers, Kunkel et Hardy (1979).

TABLEAU IX.
Couleurs et magnitudes infrarouges des étoiles
sans classification spectrale

Étoile	K	$J - K$	$J - H$
V2	13.23	1.44	0.84
V4	13.13	2.09	1.43
DK66 V6	13.77	1.92	1.21
V8	14.00	2.03	1.55
V10	14.10	0.84	0.67
V11	13.62	1.18	0.71
V33	13.96	1.08	0.86
V14	13.70	1.10	0.95
DK35 V21	13.90	1.08	0.71
R36	13.39	1.44	1.05
DK23	13.47	1.42	1.04
DK30 V24	14.09	1.07	0.87
V25	14.25	0.88	0.87
V27	14.05	1.33	0.70
DK11	14.47	0.87	0.76
V28	12.97	1.67	0.98
DK8	13.15	2.13	1.17
DK3	14.69	1.19	0.86
DK1 V30	13.75	1.28	0.95
V36	13.79	1.22	0.45
R55	13.57	0.80	0.70

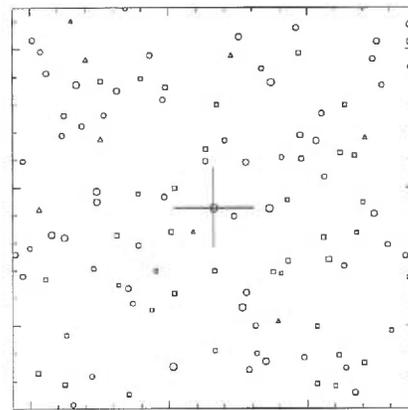


Étoile FCS01

α : $2^h 38^m 45^s.77$

δ : $-34^\circ 38' 46''.3$

$V = 18.51, B - V = 2.26$

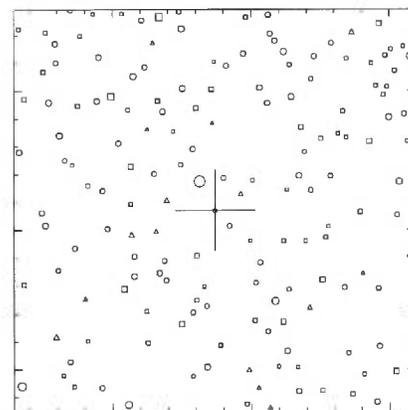


Étoile FCS02

α : $2^h 38^m 11^s.68$

δ : $-34^\circ 39' 53''.6$

$V = 18.99, B - V = 2.25$



Étoile FCS03

α : $2^h 38^m 11^s.39$

δ : $-34^\circ 46' 37''.8$

$V = 20.40, B - V = 2.33$

FIGURE 7. Cartes de champ des trois étoiles qui, d'après nos critères, sont de nouvelles étoiles de carbone. Le champ mesure $1' \times 1'$ arcmin. Symboles identiques à ceux de la figure 6.

3.2 Diagramme couleur-magnitude

La figure 8 montre le DCM du champ fnx1. La branche des géantes, occupant une région dont la magnitude varie entre $18.5 < V < 21.0$, présente une grande dispersion (de part et d'autre de la ligne pleine). Cela s'explique par une dispersion d'abondances et/ou d'âges. Sagar *et al.* (1990) ont déterminé qu'une variation de 0.31 ± 0.05 dex pour $[\text{Fe}/\text{H}]$ peut, à elle seule, expliquer cette dispersion. Sinon,

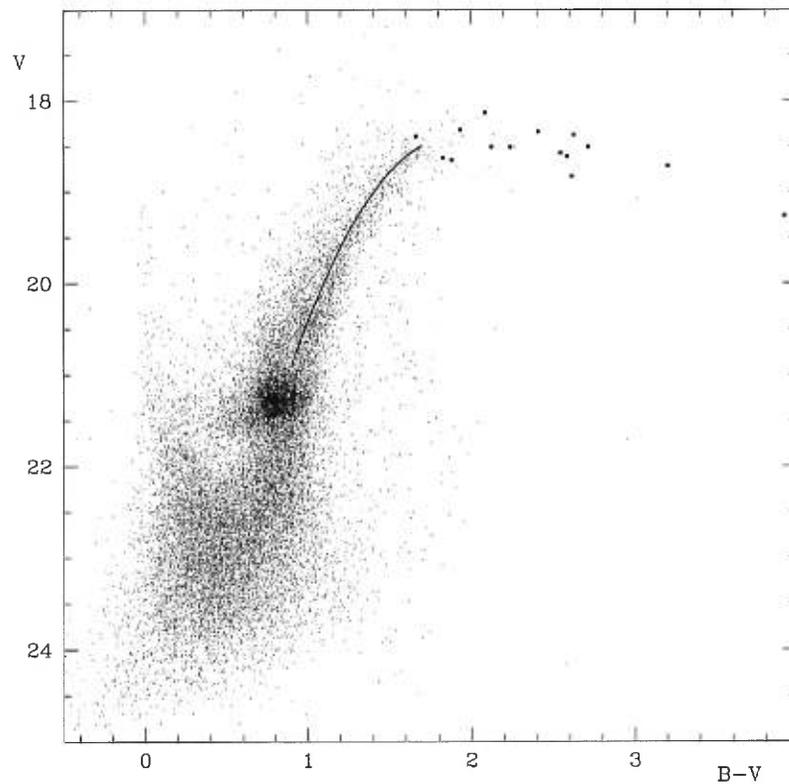


FIGURE 8. Diagramme couleur-magnitude du champ fnx1. Le “red clump” est bien visible. Les points plus foncés représentent les étoiles de carbone confirmées par spectroscopie. Les étoiles de la branche asymptotique, relativement brillante et rouge, sont nettement isolées.

une combinaison de variation d'abondance de 0.27 ± 0.06 dex pour $[\text{Fe}/\text{H}]$ et une différence d'âge de 3 à 15 milliards d'années est aussi plausible. Cela serait le

résultat d'un enrichissement du milieu interstellaire dans Fornax causé par des générations successives d'étoiles (Demers, Kunkel, & Hardy, 1979). D'après les travaux de Mateo *et al.* (1998), il y a dans Fornax des variables de type RR Lyrae ce qui implique des étoiles âgées d'au moins 11 milliards d'années (Walker, 1989). Il semble certain que la formation d'étoile s'est poursuivie sur plusieurs milliards d'années. Le mystère est: quand s'est-elle arrêtée? Une autre caractéristique du DCM est l'agglomération importante d'étoiles, centrée à $V = 21.25$ mag, connu sous le nom de *red clump*. Selon Hatzidimitriou (1991), cette concentration révèle la présence d'étoiles d'âge intermédiaire. Lorsque cette caractéristique est présente dans un DCM, elle implique la présence d'étoiles de carbone.

La photométrie est un outil pouvant servir à départager les différents types d'étoiles de la branche asymptotique. En effet, une limite inférieure de $B - V = 2.0$ est généralement adoptée pour les étoiles de carbone (L90). À titre indicatif, les étoiles de carbone confirmées par spectroscopie (appartenant au champ fnx1) sont représentées par les points foncés (figure 8).

La figure 9 présente un agrandissement du DCM de la figure 8 où l'on se concentre sur la branche asymptotique. Cette fois-ci, toutes les étoiles de notre étude sont présentées (i.e. les quatre champs fnx). Différents symboles sont utilisés selon la nature de l'étoile; les étoiles de carbone, les étoiles de type M (dans chaque cas, confirmées par spectroscopie selon les différentes références citées aux tableaux IV et VI) et les étoiles sans classification spectrale. La valeur standard $B - V = 2$, délimitant les étoiles de carbone, est indiquée par la ligne verticale; aucune étoile dont le spectre est classifié M ne se situe au-delà de cette limite.

Nous nous basons sur les étoiles confirmées par spectroscopie afin de dégager certaines propriétés photométriques partagées par les étoiles de carbone tout en isolant les étoiles de type M³ et K. Dans la section 3.3, deux graphiques couleur-

³Puisque nous n'avons pas d'informations sur leurs vitesses radiales pour confirmer leurs appartenances à Fornax, il se peut que certaines étoiles soient des naines rouges de notre galaxie.

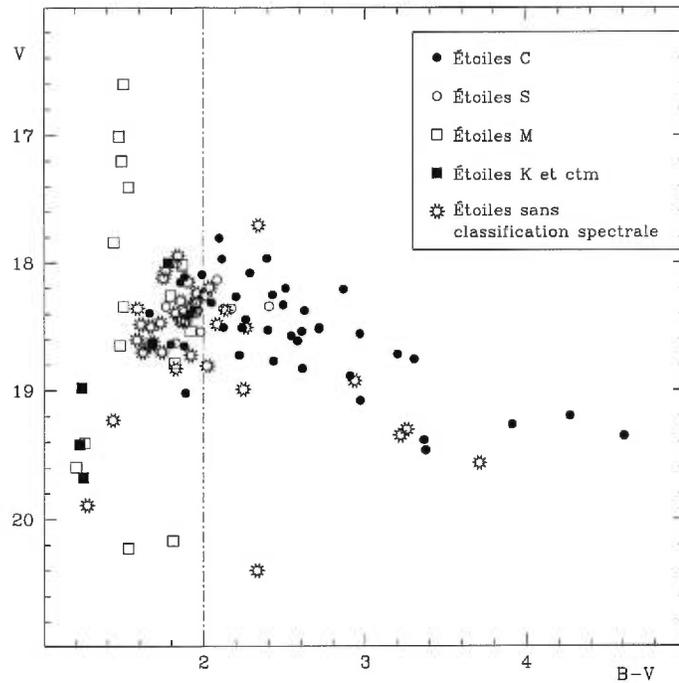


FIGURE 9. *Diagramme couleur-magnitude des étoiles des quatre champs fnx. Les données proviennent des tableaux IV, VI et VIII.*

couleur (un dans le visible et un dans le proche-infrarouge) serviront à déterminer ces critères de sélection.

3.3 Diagrammes couleur-couleur

La figure 10 est un diagramme couleur-couleur, dans le domaine du visible, des étoiles dont la photométrie CCD est connue. Les données proviennent des tableaux IV, VI et VIII. Les étoiles pour lesquelles la couleur $v - i$ est inconnue sont arbitrairement placées à $v - i = 3.2$. Les flèches indiquent que ces étoiles devraient normalement se trouver plus bas dans le diagramme. Les étoiles dont le type spectral n'est pas connu qui se trouvent à droite de la ligne verticale sont les candidats pour de nouvelles étoiles de carbone dans Fornax. On remarque la

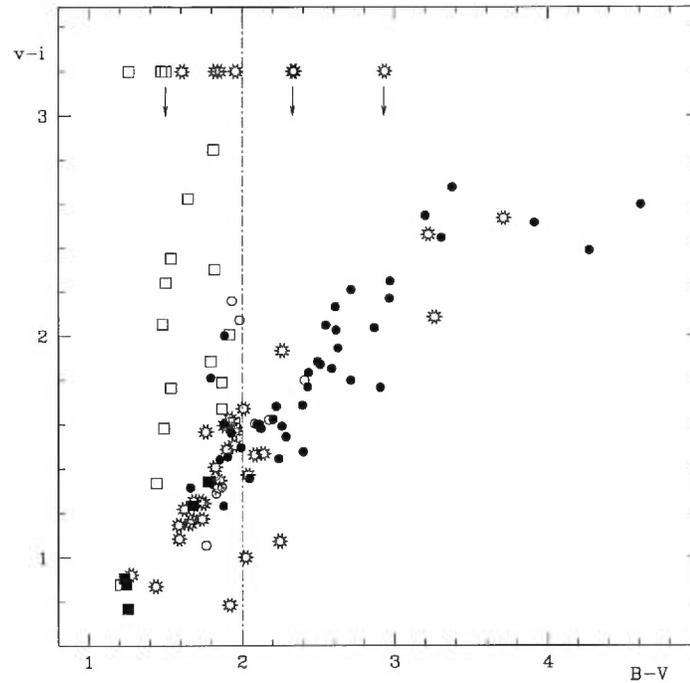


FIGURE 10. *Diagramme couleur-couleur des étoiles avec photométrie CCD seulement. La limite $B - V \geq 2$ est identifiée par ligne verticale. Les étoiles pour lesquelles nous connaissons uniquement la couleur $B - V$ sont situées arbitrairement à $v - i = 3.2$. Symboles identiques à ceux de la figure 9.*

distribution des étoiles de type M et K se limite à une colonne étroite dans le diagramme $(B - V, v - i)$. L'intervalle de couleur de ces étoiles est ici restreint à $1.21 < B - V < 1.95$. Pour ce qui est des étoiles ctm, elles occupent la région la plus bleue du diagramme. Les étoiles de type S semblent imiter à la fois les étoiles de type M et de carbone. Elles se situent de part et d'autre de la limite $B - V = 2$ avec une variation de ± 0.4 mag. Les étoiles de carbone sont distribuées sur un vaste intervalle en $B - V$, en plus d'être distribuées selon une pente prononcée. Cette figure nous permet d'identifier, par leur couleur $B - V$, 13 nouvelles étoiles de carbone.

La figure 11 présente un diagramme couleur-couleur, mais cette fois-ci dans

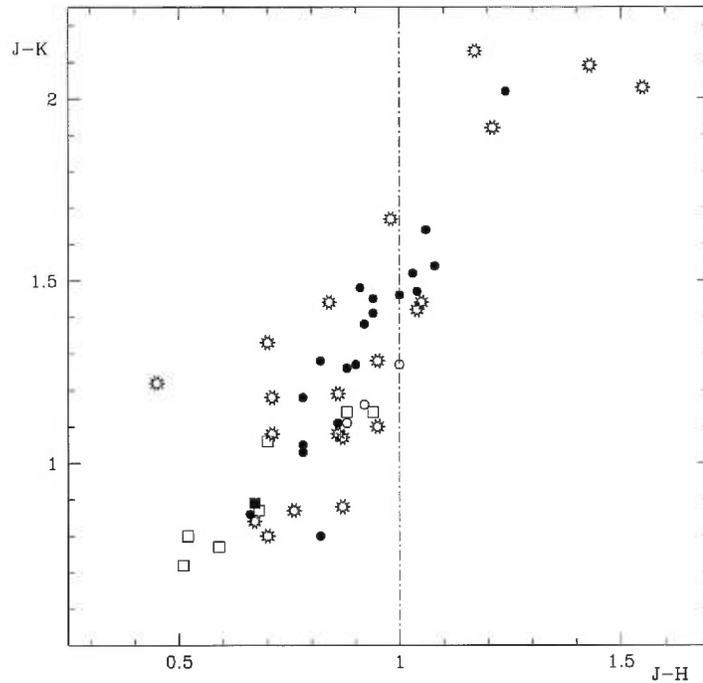


FIGURE 11. *Diagramme $J-K$ en fonction de $J-H$. Symboles identiques à ceux de la figure 9.*

le domaine du proche infrarouge. La frontière ($J-H = 1.0$) séparant les étoiles de carbone des étoiles de type M, vient de l'article de Bergeat & Lunel (1980). La figure 1 de cet article montre un graphique de $H-K$ en fonction de $J-H$. Les étoiles de type M occupent une région presque constante en $H-K$ entre $J-H = 0$ et 1.0 et aucune ne traverse la frontière $J-H = 1.0$. Les étoiles de carbone se situent du côté rouge de cette limite avec une pente beaucoup plus prononcée. Dans notre cas la couleur $J-K$, qui présente une dispersion moins importante, est utilisée au lieu de $H-K$. Les deux types d'étoiles se distinguent encore bien par des pentes différentes et aucune étoile de type M ne dépasse la limite $J-H = 1.0$ (malgré la présence d'étoiles de carbone à gauche de cette limite). Le peu de données pour les étoiles de type M est bien sûr inquiétant mais nous adoptons quand même cette limite comme étant réelle. Cette technique nous fournit alors cinq nouveaux candidats d'étoiles de carbone. La sixième étoile à droite de la

frontière, DK23, a déjà été répertoriée à l'aide de la figure 10.

3.4 Nouveaux candidats possibles

À l'aide des deux derniers graphiques, il nous est possible de dresser une liste de nouveaux candidats d'étoiles de carbone dans Fornax, c'est-à-dire toutes les étoiles qui se situent à droite de nos deux critères: $B - V = 2$ et $J - H = 1.0$. Ces candidats sont donnés au tableau X. Plusieurs étoiles avec des données infrarouges sont à l'extérieur de nos champs fnx; c'est ce qui explique la présence d'un grand nombre de données photographiques (en italique) dans le tableau. Il est à noter que toutes les étoiles ayant de la photométrie visible et infrarouge, à l'intérieur des incertitudes (0.05 mag en infrarouge), satisfont aux deux critères.

La photométrie de l'étoile FCS03 est problématique. Bien que l'erreur soit un peu plus élevée que la moyenne ($V = 20.40 \pm 0.06$ et $B - V = 2.33 \pm 0.07$, avec $\sigma_V = 0.03$ et $\sigma_{BV} = 0.04$), sa position dans le DCM (figure 9, page 35) est pour le moins étrange. Malheureusement, elle n'est pas présente dans les données de Mateo où l'on aurait vérifié son emplacement dans le diagramme couleur-couleur (figure 10). Il peut s'agir d'une erreur de photométrie ou d'une étoile de masse tout juste supérieure à la limite nécessaire pour amorcer le deuxième dragage (voir chapitre 1). Jusqu'à preuve du contraire, par le biais de nouvelles observations, elle demeure dans la liste des candidats de nouvelles étoiles de carbone.

TABLEAU X.
Nouvelles étoiles de carbone

Étoile	V	$B - V$	K	$J - K$	$J - H$
R36	18.65	3.29	13.39	1.44	1.05
DK66 V6	18.50	3.75	13.77	1.92	1.21
DK8	19.40	2.60	13.15	2.13	1.17
V8	19.10	2.10	14.00	2.03	1.55
V4	18.63	2.92	13.13	2.09	1.43
R9	18.37	2.14	—	—	—
R35	17.71	2.34	—	—	—
DK23	18.93	2.94	13.47	1.42	1.04
V28	19.6:	3.7:	12.97	1.67	0.98
DK18	19.3:	3.2:	—	—	—
DK31	18.81	2.02	—	—	—
DK14	19.3:	3.3:	—	—	—
DK41 V31	18.48	2.08	—	—	—
V14	18.26	2.01	13.70	1.10	0.95
DK58	18.19	2.04	—	—	—
FCS01	18.51	2.26	—	—	—
FCS02	18.99	2.25	—	—	—
FCS03	20.40	2.33	—	—	—

CHAPITRE 4

Propriétés des étoiles de carbone de Fornax

4.1 Fonction de luminosité

Grâce à nos nouvelles observations, le nombre d'étoiles de carbone de Fornax est maintenant de 68; 50 étoiles confirmées par spectroscopie et les 18 candidats discutés à la section 3.4. En comparaison, la liste de L90 en contient 49.

Nous calculons les magnitudes absolues M_v de 55 étoiles de carbone pour lesquelles nous avons de la photométrie CCD. L'extinction pour Fornax est négligeable et nous adoptons $E(B - V) = 0$. Le module de distance adopté est $(m - M)_0 = 20.66$ (Demers *et al.*, 1990). Nous comparons la fonction de luminosité de Fornax avec deux champs de la galaxie M31 à la figure 12. Les données pour M31 ont été tirées de l'article de Brewer *et al.* (1995). Les magnitudes I , des champs F3 et F4 situés à 10.8 et 16.8 kpc du centre, sont transformées en M_v selon les valeurs indiquées dans le texte soit; un module de distance de $(m - M)_0 = 24.38$, une absorption de $A_I = 0.43$ et $A_V = 0.71$ et un excès de couleur de $E_{V-I} = 0.29$.

Les valeurs moyennes de M_v pour les deux champs de M31 ne diffèrent que de 0.07 mag, tandis qu'une différence maximale de 0.24 mag existe entre la valeur de Fornax et celle du champ F4 de M31. Une imprécision dans le module de distance peut, à elle seule, expliquer cet écart. La différence majeure est la largeur des profils. La distribution de Fornax est beaucoup plus étroite que les deux autres. C'est l'homogénéité de Fornax qui est ici en évidence. Les étoiles

de M31 souffrent d'un important rougissement interne. Brewer *et al.* affirment qu'une valeur unique ne peut être déterminée pour d'aussi grands champs ($1.6 \text{ kpc} \times 1.6 \text{ kpc}$) puisque l'effet est variable: distribution irrégulière de la poussière et quantité plus ou moins importante de poussière entourant l'étoile selon sa position dans la galaxie. Les valeurs énumérées plus-haut ne sont en fait que des moyennes.

L'excès à droite de la distribution de Fornax n'indique pas une population d'étoiles faibles. Il s'agit plutôt d'étoiles très froides (et poussiéreuses) qui brillent moins en V . On peut facilement identifier cette tendance à la figure 9, page 35. Les étoiles avec un $B - V > 3.2$ ont une magnitude beaucoup plus faible ($V > 19.2$) que celles situées dans l'intervalle $1.8 < B - V < 2.6$.

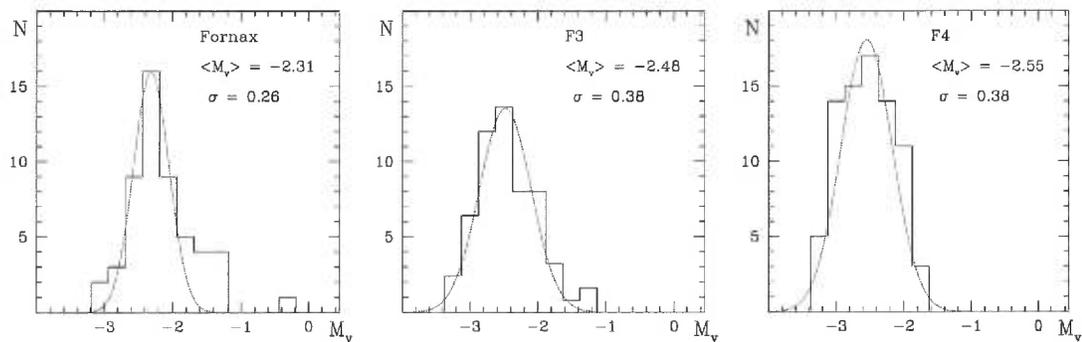


FIGURE 12. *Fonction de luminosité (de gauche à droite) de Fornax et des champs F3 et F4 de M31. Les valeurs des différentes médianes et variances sont indiqués pour chaque champ.*

4.2 Températures de couleur

La détermination d'une échelle de température pour les étoiles de la branche asymptotique est un problème de taille. La température de couleur (associée à la température d'un corps noir) permet, tout au mieux, d'évaluer grossièrement la température effective. La relation entre ces deux températures est incertaine et

aucune correction n'est apportée (Scalo, 1976).

La température de couleur ne peut pas être calculée à partir de l'indice $B - V$ pour les étoiles de la branche asymptotique. Malgré le fait que nous possédions cette couleur pour la majorité de nos étoiles, cet indice n'est pas un bon indicateur de température pour l'intervalle de types spectraux concerné. Selon Ridgway *et al.* (1980), la relation $(B - V, T_c)$ devient un diagramme de dispersion vers $B - V = 1.6$. L'absorption de la molécule de TiO augmente dans le filtre V lors d'une baisse de température; en conséquence $B - V$ diminue. À l'inverse, cette même variation de température induit un déplacement vers le rouge de la fonction de Planck donc $B - V$ augmente. L'indice $J - K$ ne présente pas ce comportement ambivalent. Une relation empirique $(J - K, T_c)$ fut déterminée à l'aide des données de Mendoza & Johnson (1965). Pour les étoiles de carbone, l'équation est:

$$\log T_c = -0.203(J - K) + 3.767$$

Nous avons tenté de déterminer la température des étoiles pour lesquelles nous ne connaissions que $B - V$. WEL ainsi que FBMC proposent de déduire une simple relation $(B - V, J - K)$ avec les observations disponibles et d'appliquer cette transformation pour les étoiles n'ayant pas de photométrie dans l'infrarouge. L'idée de déduire des couleurs infrarouges pour toutes nos étoiles était très intéressante. Nous avons déterminé cette relation puis calculé les couleurs $J - K$ pour les étoiles dont nous avons déjà la photométrie infrarouge. Mais comme le démontre la figure 13, il est plutôt utopique de vouloir procéder ainsi; une telle démarche est beaucoup trop imprécise et ne peut, en aucun cas, remplacer les observations.

Pour les étoiles de type M et K, une échelle de température est disponible. Calculée à partir du diamètre angulaire par Ridgway *et al.* (1980), la relation s'applique aux étoiles de type spectraux KO-M6. Cette échelle de température, initialement une relation $(V - K, T_c)$, fut modifiée pour les raisons discutées

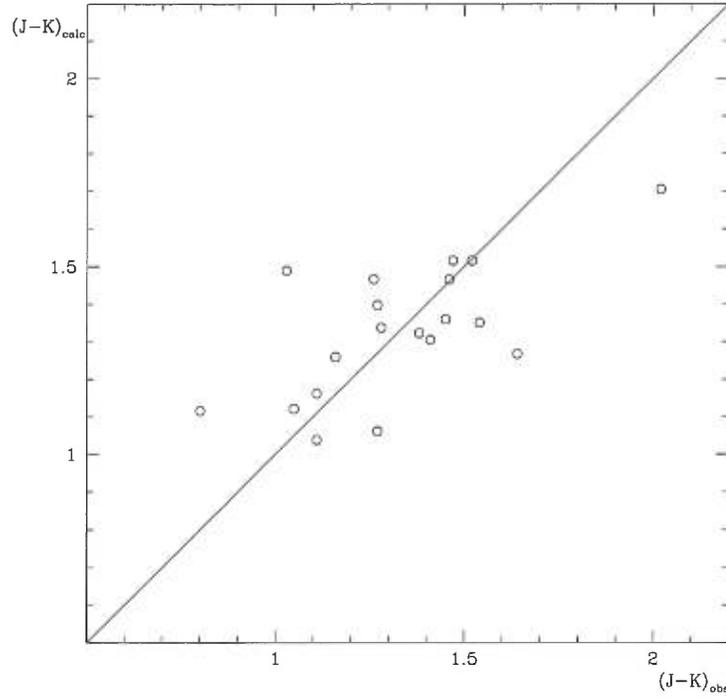


FIGURE 13. *Diagramme de la transformation des couleurs $B - V$ en $J - K$. La dispersion est beaucoup trop importante pour que la transformation soit appliquée au reste des données. La ligne pleine représente $(J - K)_{calc} = (J - K)_{obs}$.*

plus-haut. Comme il est suggéré dans l'article de Mould & Aaronson (1980), nous utilisons une équation de correspondance entre les couleurs $V - K$ et $J - K$ à l'aide des données de l'appendice 12 de l'article de Frogel *et al.* (1978). Nous transformons donc la relation $(V - K, T_c)$ en une relation $(J - K, T_c)$. L'équation finale, pour les étoiles de type K et M, est:

$$\log T_c = -0.289(J - K) + 3.849$$

Les tableaux XI et XII contiennent les couleurs et les températures de couleur des étoiles M et C respectivement. Les températures de couleur obtenues par AM (noté T_{AM}) pour quelques étoiles communes aux deux travaux sont aussi indiquées. Les valeurs diffèrent uniquement à cause de la photométrie, puisque la méthode utilisée est la même. La différence moyenne entre les deux séries de

valeurs est de 192 K, si l'étoile DK64 BM10 n'est pas incluse.

La comparaison de nos températures avec celles publiées par Mould & Aaronson (1980) pour les étoiles des Nuages de Magellan révèle une différence importante. Ils déterminent une température de transition, pour les deux Nuages, entre les étoiles de type M et C à 3100 K. Toutes les températures de leurs étoiles de carbone sont inférieures à cette valeur. Une telle tendance n'est pas présente pour les étoiles de carbone de Fornax, avec des températures variant entre 2272 et 4019 K.

TABLEAU XI.

Températures de couleur des étoiles de type K et M

Étoile	$B - V$	$J - K$	T_c (K)	T.Sp.
M10	1.53	1.06	3489	M
M11	1.82	1.14	3308	M2S
M8	1.49	0.87	3959	M
DK38 BM29	1.92	1.14	3308	M
M12 BM16	1.65	0.80	4148	M3d
BM32	<i>1.98</i>	0.72	4375	M1
BM22	1.26	0.77	4232	M
DK6	<i>1.78</i>	0.89	3907 ¹	K5

¹ $T_{AM} = 3733$ K.

TABLEAU XII.

Températures de couleur des étoiles de carbone et de type S

Étoile	$B - V$	$J - K$	T_c (K)	T_{AM} (K)	T.Sp.
M19	1.93	1.11	3477		S3/2
DK47	2.86	1.46	2952		C
DK46 BM1	2.86	1.26	3241	2890	C
DK48 V7	2.61	1.54	2843		C
DK43 BM2	2.58	1.28	3211		C
DK44 BM3	2.55	1.38	3064		C
DK42 BM6	2.43	1.64	2713		C
C13 BM5	2.63	1.45	2966		C
DK54	2.41	1.16	3396		S4/3
C15 BM28	2.20	1.11	3477		C
C11	1.86	0.86	3908		C
DK61 BM8	2.97	1.47	2938		C
DK60 BM7	2.71	1.27	3226	3041	C
C9 V19	2.91	1.03	3609		C
C10 V20	3.38	2.02	2272		C
C4 BM13	2.10	0.80	4019		C
C7 BM9	2.97	1.52	2870		C
DK64 BM10	2.11	1.05	3576	3020 ²	C
DK22 BM12	2.51	1.41	3022	2917	C
BM24	1.98	1.27	3226		S
DK7 V29	2.30	1.48	2924	3013	C
DK2	2.14	1.18	3365	3119	C

²Déterminée à partir d'une estimation de $J - K$.

4.3 Distribution spatiale

La figure 14 illustre la distribution spatiale de 65 (parmi les 68 étoiles décrites à la section 4.1) étoiles de carbone dans Fornax; les étoiles C19, V4 et V8 n'ont pas été identifiées sur les plaques photographiques. Les étoiles confirmées par spectroscopie sont indiquées par des points pleins tandis que les nouveaux candidats sont indiqués par des points ouverts. Les nouvelles étoiles à l'extérieur des champs fnx proviennent des données infrarouges ou de confirmation spectroscopique. L'ellipse définit simplement la forme générale de Fornax et ne se veut

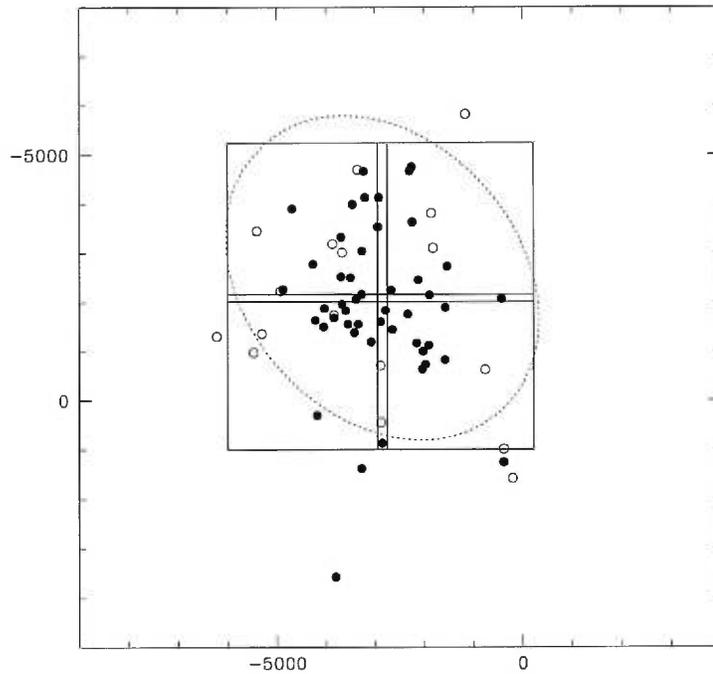


FIGURE 14. *Distribution spatiale des étoiles de carbone dans Fornax. Les unités sont en unités de l'APM.*

pas une limite stricte du contour de celle-ci (pour plus de détails voir Demers *et al.*, 1994). Les étoiles de carbone de Fornax étant âgées d'environ 5 milliards d'années, il semble raisonnable de supposer qu'elles soient distribuées comme le reste des étoiles de la galaxie. Le rapport du nombre d'étoiles de carbone au

nombre d'étoiles du *red clump* (N_c/N_r) pour chacun des quatre champs fnx est présenté au tableau XIII. Seules les étoiles dont l'erreur sur la magnitude est inférieure à 0.1 sont incluses.

TABLEAU XIII.
Valeurs de N_c/N_r

Champ	N_c	N_r	N_c/N_r ($\times 10^{-3}$)
fnx1	16	4538	3.53
fnx2	10	2932	3.41
fnx3	11	3396	3.24
fnx4	20	2743	7.29

Il semble exister une surpopulation d'étoiles de carbone dans le champ fnx4; cette surpopulation n'est cependant pas significative. Le champ fnx4 est le seul contenant un des cinq amas globulaire de Fornax. Cet amas correspond au point de plus haute densité de Fornax (Demers *et al.*, 1994). Le programme DAOPHOT II parvient difficilement à identifier toutes les étoiles des régions très denses. Une sous-estimation du nombre total d'étoiles du *red clump* pour le champ fnx4 peut expliquer cet écart. De plus, les valeurs de N_c/N_r pour les champs fnx2 et fnx4 ne diffèrent que de 1.5σ .

CONCLUSION

Il semble évident que le recensement des étoiles de carbone dans Fornax est incomplet³. En effet, nos critères photométriques ne définissent qu'une limite dans le DCM au-delà de laquelle les étoiles de type M et K ne sont plus présentes; pour la région $B - V \geq 2.0$, il n'y a que des étoiles de carbone. Nous sommes cependant en mesure de proposer 18 nouveaux candidats d'étoiles de carbone; 15 étoiles auparavant reconnues comme étoiles très rouges et 3 nouvelles étoiles.

Mais qu'en est-il de la région du DCM où étoiles de type M et K co-habitent avec celles de carbone, i.e. l'intervalle $1.6 < B - V < 2.0$? Notre démarche dans ce cas, ne peut s'appliquer. Une alternative très intéressante nous vient des travaux de Brewer *et al.* (1995). Ils utilisent un diagramme (CN - TiO, $V - I$) et identifient deux régions totalement indépendantes pour les étoiles C et les étoiles M. De telles observations, incluant le halo, permettraient de contourner le problème dont souffre notre démarche: l'impossibilité d'identifier de nouvelles étoiles de carbone pour $B - V < 2.0$.

Le rôle des étoiles de type S doit aussi être étudié plus en détail. Bien que la séquence spectrale de M-S-C soit mal comprise, il est clair qu'une meilleure compréhension de ces étoiles sera bénéfique aux modèles d'évolution stellaire. Récemment, Van Eck *et al.* (1997) ont identifié deux différents type d'étoiles S. Le premier, de type intrinsèque, est riche en élément technétium (Tc), en raison du phénomène de pulses thermiques. Le second, de type extrinsèque, fait partie d'un système binaire; la contamination de son enveloppe se fait alors par transfert

³Lors du dépôt de ce mémoire, Steston *et al.* (1998) publient les résultats d'un important relevé systématique d'étoiles brillantes dans Fornax.

de masse provenant de son compagnon. Les 7 étoiles S de Fornax sont de type intrinsèque en raison de leur grande luminosité (le type extrinsèque est systématiquement plus faible et plus bleu). La présence d'étoiles de type extrinsèque dans Fornax est avancée; plusieurs étoiles de type M pourraient être en fait des étoiles de type S. Le rapport S:C de Fornax, lorsqu'on ajoute les nouvelles étoiles de notre étude, passe de 1:7 (L90) à 1:9.

RÉFÉRENCES

- Aaronson, M. & Mould, J., *Carbon stars in the Fornax dwarf spheroidal galaxy*: 1980, *The Astrophysical Journal* **240**, 804–810 (AM)
- Becker, S.A. & Iben, I. Jr., *The asymptotic giant branch evolution of intermediate-mass stars as a function of mass and composition. I. Through the second dredge-up phase*: 1979, *The Astrophysical Journal* **232**, 831–853
- Bergeat, J. & Lunel, M., *IJHKL photometry of carbon stars*: 1980, *Astronomy and Astrophysics* **87**, 139–141
- Brewer, J.P., Richer, H.B. & Crabtree, D.R., *Late-type stars in M31. I. Photometric study of AGB stars and metallicity gradients*: 1995, *The Astronomical Journal* **109**, 2480–2502
- Chiosi, C., Bertelli, G. & Bressan, A., *New developments in understanding the HR diagram*: 1992, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **30**, 235–285
- Demers, S. & Irwin, M.J., *The long-period variables of Fornax–I. Search, discovery and periods*: 1987, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **226**, 943–961
- Demers, S., Irwin, M.J. & Kunkel, W.E., *Large scale photographic survey of Fornax*: 1994, *The Astronomical Journal* **108**, 1648–1657
- Demers, S. & Kunkel, W.E., *Discovery of very red giants in the Fornax galaxy*: 1979, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **91**, 761–765 (DK)
- Demers, S., Kunkel, W.E. & Grondin, L., *CCD photometry of Cluster 1 of Fornax*: 1990, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **102**, 632–638

- Demers, S., Kunkel, W.E. & Hardy, E., *The giant branch of Fornax*: 1979, *The Astrophysical Journal* **232**, 84–90
- Elias, J.H., Frogel, J.A., Matthews, K. & Neugebauer, G., *Infrared standard stars*: 1982, *The Astronomical Journal* **87**, 1029–1034
- Frogel, J.A., Blanco, V.M., McCarthy, M.F. & Cohen, J.D., *The late-type stellar content of the Fornax and Sculptor dwarf galaxies*: 1982, *The Astrophysical Journal* **252**, 133–146 (FBMC)
- Frogel, J.A., Persson, S.E., Aaronson, M. & Matthews, K., *Photometric studies of composite stellar systems. I. CO and JHK observations of E and O galaxies*: 1978, *The Astrophysical Journal* **220**, 75–97
- Grondin, L., Demers, S., Kunkel, W.E. & Irwin, M.J., *Stars between the Magellanic Clouds. I. An association at $2^h 27^m$, $-73^\circ 59'$* : 1990, *The Astronomical Journal* **100**, 663–673
- Hatzidimitriou, D., *A new age calibrator for red horizontal branch populations*: 1991, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **251**, 545–554
- Iben, I. Jr., *Stellar evolution within and off the main sequence*: 1967, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **5**, 571–626
- Iben, I. Jr. & Renzini, A., *Asymptotic giant branch evolution and beyond*: 1983, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **21**, 271–342
- Jura, M., *Mass loss from S stars*: 1988, *Astrophysical Journal Supplement Series* **66**, 33–41
- Kunkel, W.E., *On the origin and dynamics of the Magellanic Stream*: 1979, *The Astrophysical Journal* **228**, 718–733
- Landolt, A.U., *UBVRI photometric standard stars in the magnitude range $11.5 < V < 16.0$ around the celestial equator*: 1992, *The Astronomical Journal* **104**, 340–371

- Lundgren, K., *Red giants in the Fornax dwarf elliptical galaxy*: 1990, *Astronomy and Astrophysics* **233**, 21–39 (L90)
- Mateo, M., Demers, S. & Kunkel, W.E., 1998, en préparation
- Mendoza V, E.E. & Johnson, H.L., *Multicolor photometry of carbon stars*: 1965, *The Astrophysical Journal* **141**, 161–169
- Mould, J. & Aaronson, M., *Globular clusters of the Magellanic Clouds*: 1979, *The Astrophysical Journal* **232**, 421–427
- Mould, J. & Aaronson, M., *The extended giant branch of intermediate age globular clusters in the Magellanic Clouds*: 1980, *The Astrophysical Journal* **240**, 464–477
- Ridgway, S.T., Joyce, R.R., White, N. & Wing, R.F., *Effective temperatures of late-type stars: The field giants from K0 to M6*: 1980, *The Astrophysical Journal* **235**, 126–137
- Sagar, R., Hawkins, M. R. S. & Cannon, R. D., *The giant branch of Fornax dwarf spheroidal galaxy*: 1990, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **242**, 167–176
- Scalo, J.M., *A composite Hertzsprung-Russel diagram for the peculiar red giants*: 1976, *The Astrophysical Journal* **206**, 474–489
- Stetson, P.B., *Guinea pig notes*
- Stetson, P.B., *User's Manual for DAOPHOT II*: 1996
- Stetson, P.B., Hesser, J.E. & Smecker-Hane, T.A., *Homogeneous photometry for star clusters and resolved galaxies. I. A survey of bright stars in the Fornax dwarf spheroidal galaxy*: 1998, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **110**, 533–552
- Van Eck, S., Jorissen, A., Udry, S, Mayor, M. & Pernier, B., *The HIPPARCOS Hertzsprung-Russel diagram of S stars: probing nucleosynthesis and dredge-up*: 1998, *Astronomy and Astrophysics* **329**, 971–985

Walker, A.R., *A survey for RR Lyrae variables in five Small Magellanic Cloud clusters*: 1989, Publications of the Astronomical Society of the Pacific **101**, 570–572

Westerlund, B.E., *Red stars in nearby galaxies*: 1979, The Messenger **19**, 7–10

Westerlund, B.E., Edvardsson, B. & Lundgren, K., *Red stars in the Fornax dwarf galaxy*: 1987, Astronomy and Astrophysics **178**, 41–50 (WEL)

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier mon directeur, Serge Demers, qui m'a permis de réaliser ce projet. Je voudrais souligner sa disponibilité et ses encouragements tout au long de ma maîtrise. La patience et le soutien technique de Luc Turbide ont été grandement appréciés. Un gros merci à Jean-François Bertrand pour le code permettant de tracer de si belles figures.