

# Les étoiles carbonées

Alain Brémond



Appréciées par les observateurs en raison de leurs belles couleurs rouges, les étoiles carbonées sont, en général, des géantes rouges dont l'enveloppe périphérique est riche en carbone.

## 1. Historique :

En 1868, Angelo Secchi, célèbre spectroscopiste italien, découvre un type spectral particulier qui correspond à des étoiles rouges possédant des raies et des bandes du carbone. Il définit la classe IV.

Le Draper Catalogue of Stellar Spectra de 1890 n'identifie pas encore les étoiles carbonées. Mais, dans une version de 1897, publiée à partir de 1911, apparaissent des étoiles carbonées. C'est le type N, correspondant au type IV de Secchi.

De 1911 à 1915, la nouvelle version du Henry Draper Catalogue d'Antonia Maury et Pickering définit alors deux classes R et N. C'est le « right now » de la phrase mnémotechnique de la classification spectrale des étoiles. En 1918, Annie Jump Cannon de la même équipe de Harvard, étudie les deux types d'étoiles carbonées R et N. Les étoiles de type N sont des étoiles rouges et celles de type R des étoiles moins rouges mais riches en raies et bandes des composés du carbone

Tableau I : Classification de Harvard (Draper catalog) pour les étoiles carbonées.

**Classification de Harvard (Draper catalog)**

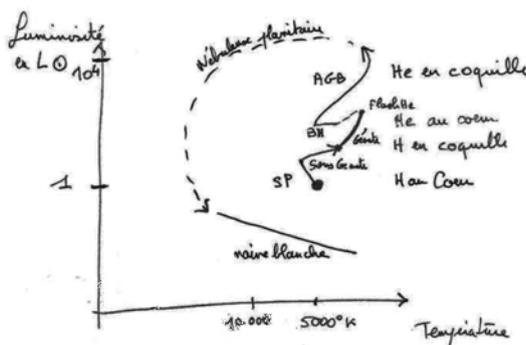
Type R-N	R0	R3	R5	R8	Na	Nb
Equivalent	G7-G8	K1-K2	K2-K3	K5-M0	M2-M3	M3-M4
Effective	4300	3900	3700	3450	-	-

## 2. Rappel

La classification spectrale des étoiles « normales » correspond aux sept classes O, B, A, F, G, K, M dont l'ordre correspond à une température effective décroissante de O à M. Elle est basée sur la présence ou l'absence et l'intensité de raies spectrales d'absorption. Il existe cependant des raies d'émission dans le spectre des étoiles Be (avec e pour émission).

Evolution des étoiles de type solaire.

Lorsque les étoiles sont sur la séquence principale (SP) du diagramme H-R, la fusion de l'hydrogène au cœur produit de l'hélium qui peu à peu remplace l'hydrogène.



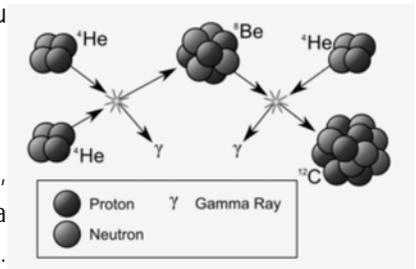
Lorsqu'elles atteignent la branche des sous-géantes et des géantes rouges la fusion de l'hydrogène se fait en coquille autour de la sphère centrale d'hélium lui-même en fusion croissante (flash d'hélium).

Sur la branche horizontale (BH) c'est la fusion de l'hélium au cœur qui produit l'énergie de l'étoile.

Enfin sur la branche asymptotique des géantes (AGB) la fusion hélium a lieu en coquille, tandis que le cœur contient du carbone et de l'oxygène. L'étoile devient instable (variable). Elle perd de la masse dans l'espace interstellaire. Elle termine sa vie en naine blanche.

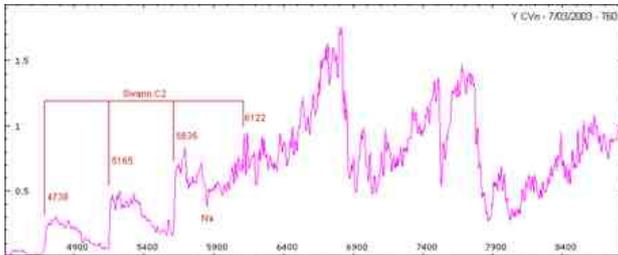
Figure 1 : évolution des étoiles de type solaire

Figure 2 : Réaction triple alpha : formation de carbone à partir du noyau d'hélium.



### 3. Les étoiles carbonées

Dans les étoiles carbonées, les différents composés du carbone (C2, C3, CH, CN...) sont situés dans la photosphère de l'étoile.



C'est au cours de la phase de géante rouge que les composés lourds, produits dans l'intérieur de l'étoile sont dragués par convection vers la surface. Le rapport C/O est  $> 1$  dans ce type d'étoiles. Le C2 forme en spectroscopie optique les bandes de Swan.

Figure 3 : Spectre de Y CVn. On remarque immédiatement les bandes de Swan, à la forme très particulière (front "raide" côté bleu). Remarquer aussi le Na en absorption. D'après Maylis Lavayssière, Sylvain Rondi.

Morgan et Keenan définissent en 1941 la classe C qui remplace les types R et N. Elle est parallèle aux types K et M dont elles se séparent par les bandes et raies des composés du carbone. Le système est révisé de Morgan-Keenan en 1993 qui sous-divisent la classe C qui contient maintenant les classes de C0 à C7.

Type MK	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Equival.	G4-G6	G7-G8	G9-K0	K1-K2	K3-K4	K5-M0	M1-M2	M3-M4
Teffective	4500	4300	4100	3900	3650	3450	-	-

Tableau II : Classification de Morgan-Keenan avec la correspondance avec les types spectraux des étoiles non carbonées des types G, K et M ainsi que les température effective correspondant. Les données des classes C6 et C7 sont imprécises.

La classification de Yamashita utilise la température de surface (classée de 0 à 9) et le degré d'intensité des raies du carbone de 0 à 5.

### 4. Classification actuelle

Classe	Spectre	Population	Mv	Théorie	Teffective	Exemple	Nombre
C-R	Harvard Extrémité bleue du spectre, fortes bandes isotopiques, par de renforcement des raies du Ba	Disque Pop. I	0	Géantes rouges ?	5100-2800	S Cam	25

On distingue des étoiles carbonées classiques et des étoiles carbonées non classiques.

#### 4.1. Les étoiles carbonées classiques.

Tableau III : Etoiles carbonées classiques de type C-R

Tableau IV : Etoiles carbonées classiques de type C-N

Ce sont des étoiles de population I situées dans le disque de la Galaxie. La plupart des étoiles carbonées sont des étoiles variables de longue période. Certaines sont des étoiles doubles. Les étoiles carbonées classiques (C) sont subdivisées en séries C-N et C-R.

Classe	Spectre	Population	Mv	Théorie	Teffective	Exemple	Nombre
C-N	Harvard Raies intenses d'absorption dans le bleu, éléments du processus s, raies isotopiques faibles	Disque Pop I	2-3	AGB	3100-2600	R Lep	90

#### 4.1. Processus physiques

Il s'agit au départ d'étoiles de 9 à 11 masses solaires qui n'aboutissent pas en supernovae mais en naines blanches riches en carbone. Normalement les géantes rouges sont plus riches en oxygène qu'en carbone dans leur atmosphère. Dans ce type d'étoiles carbonées, le carbone est formé en excès ; il consomme l'oxygène pour former du monoxyde de carbone (CO). Le reste du carbone forme d'autres composés carbonés comme le graphite, le CH, CN (cyanogène) SiC<sub>2</sub> etc.

Dans les étoiles carbonées classiques (C-R et C-N) la fusion de l'hélium se produit par la réaction triple alpha (figure 2). Elles sont arrivées au stade de géantes rouges (C-R) ou sur la branche asymptotique des géantes (C-N). L'hydrogène fusionne dans une coque externe mais quand cette fusion ralentit, l'étoile grossit et sa luminosité augmente. L'hélium fusionne alors dans une coquille et les produits carbonés viennent à la surface puis la fusion de l'hydrogène redémarre suivie d'une phase de fusion de l'hélium et ainsi de suite jusqu'à la fin en naine blanche.

#### 4.2. Etoiles carbonées non classiques

Ce sont des étoiles doubles. Le couple est formé d'une géante rouge (parfois une naine rouge) et d'une naine blanche.

La géante rouge a accreté des matériaux, alors qu'elle était encore sur la séquence principale, à partir de son compagnon, qui lui, était une étoile carbonée classique.

L'étoile carbonée qui est maintenant la géante rouge n'a ainsi pas formé elle-même son carbone, elle l'a captée à partir de son compagnon.

Dans les étoiles riches en Baryum, celui-ci s'est formé par le processus s. (slow process de capture de neutrons).

Etoiles carbonées non classiques de type C-Hd (Hd pour déficientes en hydrogène)

Les étoiles CH sont des étoiles de population II situées dans le halo galactique. Elles sont enrichies en molécules CH.

Les étoiles classées RCrB et HdC sont des supergéantes pauvres en hydrogène. Elles se sont probablement formées à partir de géantes qui ont brûlé tout leur hydrogène au cours de leur phase sur la branche asymptotique des géantes (AGB) ou ont été formées à partir de la fusion de naines blanches.

Les étoiles RCrB sont des variables dues à des nuages circumstellaires de grains de carbone tandis que les HdC ne sont pas variables. Ces étoiles ont un spectre optique inhabituel avec des raies faibles de CH et des raies de Balmer de l'hydrogène ainsi que de fortes raies de He I en émission. Ces étoiles viennent récemment de passer par le flash de l'hélium.

Exemples: RCrB, RYSgr, XXCam, MVSgr, DYPer, et HD182040 (non-variable).

Des étoiles carbonées naines (dC) viennent d'être découvertes.

Classe	Specre	Population	Mv	Theorie	Effective	Exemple	Nombre
C-J	Très fortes bandes isotopiques de C2 et CN	Inconnue	Inconnue	Inconnue	3900-2800	Y CVn	20
C-H	Fortes raies d'absorption de CH	Halo Pop. II	1-8	Géantes brillantes Binaires	5000-4100	V Art, TT CVn	20
C-Hd	Raies de H et faibles bandes de CH ou absentes	Disque Pop. I	3-5	Inconnue		HD 137613	7

Tableau V : Etoiles carbonées non classiques

#### 5. Rôle des étoiles carbonées

Elles enrichissent le milieu interstellaire en poussières semblables au graphite.

#### 6. Observations

Au télescope, ce sont des étoiles rouges. Un grand nombre sont facilement observables -11 dans l'hémisphère nord, de magnitudes

4,4 à 8.5.

En spectroscopie, on observe les raies des étoiles géantes rouges Ket M principalement, avec en plus des raies et bandes des composés carbonés (bandes de Swan).

## 7. Enjeux de recherche.

On s'attache à mesurer la température d'un plus grand nombre d'étoiles carbonées de tous types. Certaines variétés sont plus rares que d'autres. Cette mesure de la température effective permet de mieux connaître la physique de l'évolution stellaire.

La mesure de leur température effective peut se faire à l'aide de différentes méthodes:

- Par la mesure de la largeur des raies du Na et du CaI mais les difficultés sont nombreuses.

Le calcul est effectué à partir de la loi de Stephan-Boltzmann:

$$L = 4 \pi R^2 T_{\text{eff}}^4$$

- Mesure du flux en Infra rouge, plus précise.

### Liste d'étoiles carbonées pour l'observation

Constellation	Etoile	RA	DEC	magnitude visuelle	Type spectral
And	SU And	00 04 36.4	+43 33 05	8.0-8.5	C6,4
And	VX And	00 19 54.2	+44 42 34	7.8-9.5	N7;C4,5
And	ST And	23 38 45.2	35 46 26	8.2-11.8	R3e;C6,4e
Ant	AB Ant (Irr)	10 11 53.8	-35 19 40	6.8-6.9	N0;C6,3
Aql	UV Aql	18 58 32.4	+14 21 49	8	N4;C5,3
Aql	V Aql	19 04 24.4	-05 41 06	6.5-8.1	N6;C6,4
Ari	V Ari	02 14 59.9	+12 14 36	8.5-10.8	R8;C5p,5
Aur	EL Aur	05 03 23.0	+50 37 58	8.5	N3C5,4
Aur	TX Aur	05 09 05.4	+39 00 09	8.5-9.2	N3;C5,4
Aur	S Aur	05 27 07.5	+34 08 58	8.2-13.3	N3;C5,5
Aur	FU Aur	05 48 08.2	+30 37 54	8.3	N0;C7,2
Aur	V Aur	06 24 02.3	+47 42 26	8.5-13.0	N3e;C6,2e
Aur	RV Aur	06 34 44.7	+42 30 13	8.4	N;C5,3
Aur	UU Aur	06 36 32.9	+38 26 42	6.2	N3;C5,3
Cae	T Cae	04 47 20.4	-36 11 56	7.5	N;C6,4
Cam	U Cam	03 41 47.8	+62 38 57	6.9	N5;C5,4
Cam	UV Cam	04 05 53.8	+61 47 43	7.5-8.1	R8;C5,3
Cam	ST Cam	04 51 13.5	+68 10 08	7	N5;C5,4
Cam	S Cam	05 41 02.6	+68 47 58	8.1-11.6	R8e;C7,3e
Cam	RU Cam	07 21 43.9	+69 40 17	7.9	K0-R0
Cap	RT Cap	20 17 06.7	-21 19 39	7.5-8.1	N;C6,4
Cas	WZ Cas	00 01 15.7	+60 21 19	6.9-11.0	N1p;C9,2
Cas	ST Cas	00 17 32.0	+50 17 16	7.5	N;C4,4
Cas	W Cas	00 54 53.7	+58 33 55	8.0-12.5	C9,1e
Cep	S Cep	21 35 13.1	+78 37 25	7.5-12.9	N8e;C7,4e
Cep	DG Cep	22 44 11.1	+61 43 40	8.3	N;C6,4
Cma	W CMa (Irr)	07 08 03.4	-11 55 26	6.4-8.0	N;C6,3
CMa	BE CMa	07 23 38.5	-22 58 10	7	N;C5,5
CMi	R CMi	07 08 42.2	+10 01 25	7.4-11.6	C7,1e
Cnc	X Cnc	08 55 22.9	+17 13 51	5.6-7.5	N3;C5,4
Cnc	T Cnc	08 56 40.2	+19 50 58	7.6-10.5	N6;C5,5
Cyg	AW Cyg	19 28 47.3	+46 02 36	8.1	N;C4,5
Cyg	TT Cyg	19 40 57.1	+32 37 06	7.0-9.1	N3e;C5,4e
Cyg	AX Cyg (Irr)	19 57 12.3	44 15 41	7.4-8.5	N6;C4,5
Cyg	SV Cyg	20 09 30.1	+47 52 17	8.5	N3;C7,4
Cyg	RY Cyg (Irr)	20 10 24.6	+35 56 53	8.5-10.0	N;C4
Cyg	V429 Cyg	20 11 06.2	+36 06 47	7	R;C5,4
Cyg	RS Cyg	20 13 23.9	+38 43 45	6.5-9.5	N0pe;C8,2e
Cyg	U Cyg	20 19 36.4	+47 53 39	6.7-12.0	Npe;C9,2e
Cyg	V Cyg	20 41 18.7	+48 08 32	6.8-13.8	Npe;C7,4e
Cyg	YY Cyg	21 22 28.7	+42 23 47	8.5-9.5	N;C7,3
Cyg	V460 Cyg (Irr)	21 42 00.6	+35 30 30	6.1-7.0	N1;C6,3
Cyg	RV Cyg	21 43 16.0	+38 01 10	7.1-9.3	N5;C6,4
Dra	RY Dra	12 56 25.8	+65 59 37	6.1-8.0	N4p;C4,5
Dra	T Dra	17 56 23.2	+58 13 07	7.2-13.5	N0e;C8,3e
Dra	UX Dra	19 21 35.1	+76 33 34	6.1	N0;C7,3
For	R For	02 29 15.8	-26 05 56	7.5-13.0	Ne;C4,3e
Gem	TU Gem	06 10 53.1	+26 00 53	7.4-8.4	N3;C6,4
Gem	AB Gem	06 26 14.2	+19 04 26	8.2	N3;C5,4
Gem	VW Gem	06 42 08.7	+31 27 07	8.1	N;C5,4
Gem	NQ Gem	07 31 54.5	+24 30 14	7.4	R9;C6,2
Hya	RY Hya	08 20 06.0	+02 45 52	8.3	Ne;C6,4e

Hya	Y Hya	09 51 03.9	-23 01 02	6.9-9.0	N3p;C5,4
Hya	U Hya (Irr)	10 37 33.2	-13 22 56	4.5-6.2	N2;C7,3
Lep	R lep	04 59 36.3	-14 50 48	5.9-11.0	N6e;C7;6e
Lep	SZ Lep	05 35 47.9	-25 43 12	7.4-7.9	R8;C7,3
Lib	HM Lib (Irr)	15 27 48.3	-25 10 09	7.4-7.6	R3
Lyr	T Lyr (Irr)	18 32 19	+36 59 50	7.5-9.3	R6;C6,5
Lyr	HK Lyr (Irr)	18 42 49.7	+36 57 34	7.8-9.6	N4;C6,4
Lyr	U Lyr	19 20 09.1	+37 52 40	8.3-13.0	N0e
Mon	GY Mon	06 53 11.3	-04 34 36	8.1-8.9	N;C6,3
Mon	V614 Mon	07 01 01.7	-03 15 06	7.3	R6
Mon	RY Mon	07 06 56.8	-07 33 07	7.7	N;C5,5
Oph	V Oph	16 26 44.1	-12 25 36	7.3-11.5	N3e;C7,4e
Oph	TW Oph	17 29 43.5	-19 28 22	7.0-9.0	Nb;C5,5
Ori	W Ori	05 05 23.7	+01 10 40	6.5-10.0	N5;C5,4
Ori	RT Ori	05 33 13.4	07 08 58	8.0-8.9	N3;C6,4
Ori	BL Ori (Irr)	06 25 28.3	+14 43 19	6.3-7.0	N0;C6,3
Peg	RX Peg	21 56 22.2	22 51 46	7.7-9.5	N3;C4,4
Peg	RZ Peg	22 05 52.9	+33 30 24	7.6-13.5	Ne;C9,1e
Per	Y Per	03 27 42.8	+44 10 35	8.1-10.9	R4e;C4,3e
Per	V 466 Per	03 41 29.8	+51 30 10	8.4	N;C5,5
Psc	Z Psc	01 16 04.7	+25 46 08	6.7-7.9	N0;C7,3
Pup	RT Pup	08 05 20.0	-38 46 36	8.0-9.2	Nb;C6,2
Pup	RU Pup	08 07 30.0	-22 54 45	8.5-11.0	N3;C5,4
Pup	FK Pup	08 09 11.1	-36 17 20	8.5	N;C6,3e
Pup	IR Pup	08 11 41.1	-21 12 37	8.2	N;C4,3
RR Her	RR Her	16 04 13.1	+50 29 58	7.8-12.5	N0e;C8,1e
Scl	R Scl	01 26 59.0	-32 32 44	6.1-8.8	N;C6,5
Sco	SU Sco	16 40 38.4	-32 22 48	6.7-7.1	N0;C5,5
Sco	V901 Sco	17 02 45.8	-32 43 28	8	Ne;Ce
Sco	V644 Sco	17 26 19.0	-40 01 48	8.2	N;C5,5
Sco	SX Sco (Irr)	17 47 28.2	-35 42 03	8.0-9.5	N3;C5,4
Scu	S Scu	18 50 19.7	-07 54 24	6.3-9.0	N3;C6,4
Ser	FO Ser (Irr)	18 19 21.8	-15 36 45	8.2-8.5	R6;C4,5
Sgr	SZ Sgr	17 44 56.2	-18 39 24	8.2-9.2	Nb;C7,3
Sgr	V1942 Sgr (Irr)	19 19 09.6	-15 54 29	6.7-7.1	N2;C6,4
Sgr	AQ Sgr	19 34 18.9	-16 22 27	6.6-7.7	N3;C7,4
Tau	TT Tau	04 51 31.3	+28 31 38	8.1-10.0	N3;C7,4
Tau	Y Tau	05 45 39.4	+20 41 45	6.9-9.5	N3;C6,4e
U Ant	U Ant	10 35 12.9	-39 33 34	6	N;C5,3
Uma	VY UMa (Irr)	10 45 03.9	+67 24 42	5.9-7.0	N0;C6,3
V Crb	V Crb	15 49 31.2	+39 34 16	6.9-12.5	N2e;C6,2e
Vir	SS Vir	12 25 14.5	+00 46 11	6.0-9.6	Ne;C6,3e
Vul	BD Vul	20 37 17.9	+26 29 02	7.7-12.7	Ne;C7,3e
Y CVn	Y CVn	12 45 08.0	+45 26 25	4.8-6.4	N3;C5,5
	HD16115	02 35 06.6	-09 26 43	8.3	R3;C2,3
	HD19557	03 11 25.0	+57 54 12	8.1	R5;C4,5
	HIP 41535	08 28 13.3	-27 15 26	8.5	N...
	HIP 43093	08 46 36.2	-29 43 42	7.6	C
	HIP 63955	13 06 26.6	-20 03 08	8.5	K0IIICN...
	HD156074	17 13 32.9	+42 08 03	7.7	R1
	HIP 85148	17 24 00.7	-29 19 31	8.5	CII...
	HD182040	19 23 13.3	-10 41 31	7	R0
	HD198269	20 48 41.6	+17 50 11	7.9	R0

## Christophe GROS : Sorties d'observation

La SAL organise les vendredis soirs, quand le temps le permet et autour de la nouvelle lune, des sorties d'observation hors les murs.

Elles se déroulent en général dans les Monts du Lyonnais , au Col de la Croix de Pars (811m) au-dessus d'Yzeron. Le terrain est en herbe, plat et très facile d'accès en voiture . Le ciel est y généralement plus que correct pour un site à 30 mn de l'agglomération lyonnaise. Les principaux objets du ciel y sont parfaitement visibles aux instruments.



**Pour toute autre information, contacter la SAL afin de s'inscrire sur la liste de diffusion**

**www.soaslyon.org ou Christophe à l'adresse suivante :  
tharsis.mars@wanadoo.fr**