

# LES ÉTOILES VARIABLES BLEUES LUMINEUSES DE LA GALAXIE SONT RAREMENT SEULES...

Galactic luminous blue variable stars are rarely alone...

**Daniel Bonneau**

Astronome honoraire à l'Observatoire de la Côte d'Azur Collaborateur bénévole du Laboratoire Lagrange



## Résumé

Les étoiles variables bleues lumineuses sont une phase de l'évolution stellaire encore mal connue des étoiles massives et chaudes de la séquence principale vers les étoiles de type Wolf-Rayet.

Pour la première fois, une étude menée par une équipe internationale a permis de déterminer une valeur du taux de multiplicité pour un échantillon représentatif d'étoiles LBV confirmées (LBV) ou candidates (cLBV).

Des observations spectroscopiques fournissant des mesures de vitesses radiales et des observations à haute résolution angulaire par interférométrie optique à longue base ont permis de détecter des compagnons.

L'analyse de ces résultats conduit à de nouvelles réflexions sur le rôle de la multiplicité dans la phase LBV de l'évolution des étoiles massives.

## Abstract

Luminous blue variable stars are a still poorly understood phase of stellar evolution from hot and massive main sequence stars to Wolf-Rayet type stars.

For the first time, a study conducted by an international team has made it possible to determine a value of the multiplicity rate for a representative sample of confirmed (LBV) or candidate (cLBV) LBV stars.

Spectroscopic observations providing measurements of radial velocities and high angular resolution observations by long-baseline optical interferometry made it possible to detect companions.

Analysis of these results leads to new insights into the role of multiplicity in the LBV phase of massive star evolution.

**Keywords: binaries: spectroscopic - techniques: radial velocities, interferometric**



## Introduction

Les étoiles variables bleues lumineuses (LBV) sont des étoiles variables de type S Doradus, chaudes et très lumineuses, présentant de lentes variations photométriques et spectroscopiques parfois accompagnées de violentes éruptions. La localisation des étoiles LBV dans le diagramme Hertzsprung-Russel est montrée dans la Figure 1. Ces étoiles, souvent accompagnées de nébulosités circumstellaires, subissent une perte de masse importante. La rareté de ces étoiles (une vingtaine de LBV identifiées dans la Galaxie) est due à une courte durée de vie (de l'ordre de quelques millions d'années) en raison de leur grande masse (jusqu'à la centaine de masses solaires) et d'une très forte luminosité.

On considère souvent que les étoiles massives de type O de la séquence principale évoluent en étoiles WR classiques (l'hydrogène des couches externes a disparu, l'hélium fusionnant dans le noyau) en perdant leurs couches externes emportées par de puissants vents stellaires. Les étoiles LBV seraient une brève phase de transition entre ces deux stades évolutifs, pendant laquelle de fortes éruptions formeraient la nébuleuse circumstellaire.

Cependant, l'explication de leur origine est encore l'objet de débats dans le cadre de l'évolution d'une étoile simple, laissant envisager que certaines LBV sont apparues dans des systèmes binaires ou multiples. Jusqu'à présent, quelques LBV étaient connues dans des systèmes binaires, mais leur fraction de multiplicité est encore incertaine.

Une équipe de dix astronomes menée par Laurent Mahy de l'Observatoire Royal de Belgique et de l'Institut d'Astrophysique de Louvain, a entrepris de déterminer la fraction binaire de la population des étoiles LBV galactiques.

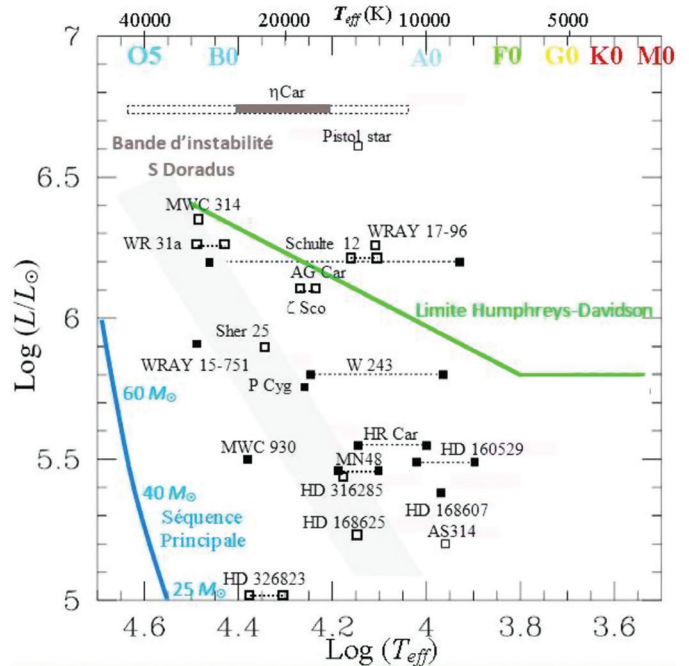


Figure 1. Localisation des étoiles LBV (■) et cLBV (□) dans le diagramme Hertzsprung-Russel.

La séquence principale (courbe bleue) se situe dans la partie inférieure gauche du diagramme. La limite de Humphreys-Davidson (tracé vert) est une borne supérieure empirique pour la luminosité dans le diagramme H-R au-dessus de laquelle la pression de radiation devient supérieure à la gravité et les couches extérieures de l'étoile sont éjectées. Au-dessus de la limite de Humphreys-Davidson, les étoiles massives deviennent instables et connaissent des épisodes de perte de masse élevée qui empêchent leur évolution vers des températures plus froides. Les étoiles LBV sont des exemples de cette phase.

D'après la Figure 5 de l'article de J.S.Clark et al. [2].

Une publication [1] présente cette étude basée sur l'analyse des données obtenues à partir d'observations spectroscopiques et d'observations à haute résolution angulaire par interférométrie optique à longue base d'une sélection d'étoiles LBV confirmées (LBV) ou candidates LBV (cLBV) de notre Galaxie.

### Les étoiles LBV retenues

Les auteurs ont construit leur échantillon à partir des listes d'étoiles LBV et cLBV établies lors de prospections par photométrie dans l'infrarouge proche [2] et dans le domaine des rayons X [3].

Pour les observations spectroscopiques l'échantillon contient 19 étoiles de magnitudes  $V \leq 13,5$  mag, 18 étoiles sélectionnées plus  $\eta$  Car, dont la nature binaire était déjà établie [4].

Pour les observations interférométriques, compte-tenu de la sensibilité des instruments utilisés, 18 étoiles ont été sélectionnées avec des magnitudes  $H < 5$  mag (observations avec l'interféromètre CHARA) ou  $H < 6,5$  mag (observations avec l'interféromètre VLTI). Les observations obtenues pour 15 étoiles ont été complétées par des données publiées pour  $\eta$  Car [5], HR Car [6] et l'étoile Pistol [7].

La table 1 présente la liste des 24 étoiles retenues comme LBV et cLBV galactiques pour l'étude de leur binarité.

### Les observations spectroscopiques et la fraction de binaires spectroscopiques.

Les observations spectroscopiques ont été réalisées au moyen des spectrographes HERMES (High-Resolution Mercator Echelle Spectrograph), TIGRE (1.2 m Telescopio Internacional de Guanajuato Robotico Espectroscopico), HRS (High Resolution Spectrograph on SALT). Des spectres d'archives ont été obtenus à l'ESO à l'aide des instruments FEROS (Fibrefed Extended Range Optical Spectrograph), UVES (UV and Visible Echelle Spectrograph), HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) et X-Shooter.

Pour chaque étoile LBV, les vitesses radiales (VR) ont été mesurées en calculant l'intercorrélation du profil spectral observé pour une raie ou un ensemble de raies avec un modèle de spectre, puis en déterminant la position du maximum de la fonction d'intercorrélation. Pour être considérées comme la détection spectroscopique d'une binarité, les mesures de VR doivent satisfaire à deux critères. L'écart entre deux mesures de VR doit être au moins quatre fois supérieur à l'écart type des incertitudes de mesure (détection à  $4\sigma$ ). La variabilité détectée doit être causée par le mouvement orbital d'un système binaire et non par la variabilité stellaire intrinsèque. Pour cela, il a été établi que l'écart entre deux mesures de VR doit être supérieur  $\Delta RV_{\min} = 35 \pm 3$  km/s.

**Table 1. Liste des étoiles LBV ou candidates LBV (cLBV) sélectionnées pour l'étude de leur binarité.**

Table établie à partir des tables 1 et 2 de l'article Mahy et al. [1]. Les étoiles pour lesquelles un compagnon a été détecté sont notées binaire spectroscopique (BS) ou interférométrique (BI).

COORD	Etoile	Autre ID	Classification	Spectroscopie <sup>(1)</sup>	BS	Interférométrie	BI
09159-4958	HD 80077	PV Vel	cLBV	F/S/U/X	N	VLTI/PIONIER	N
10229-5937	HR Car	HD 90177	LBV	F/U/Ha	O	VLTI/PIONIER	O
10450-5941	$\iota$ Car	HD 93308	LBV	-	O	VLTI/PIONIER	O
10540-6026	WR 31a	AAVSO 1050-59	cLBV	F/U/S	N	N	-
10562-6027	AG Car	HD 94910	LBV	N	-	VLTI/PIONIER	O
11087-6042	WRAY 15-751	V432 Car	LBV	F/Ha/S	O	N	-
11151-6115	Sher 25	NGC 3603 25	cLBV	F	N	N	-
16433-4600	[GKF2010]MN 46	WRAY 16-232	cLBV	N	-	VLTI/PIONIER	O
16471-4552	W 243 <sup>(2)</sup>	TIC 237063807	LBV	U	N	VLTI/PIONIER	O
16496-4536	[GKF2010]MN 48	TIC 246281184	LBV	N	-	VLTI/PIONIER	O
16540-4221	$\zeta$ Sco	V zet01 Sco	cLBV	F/U/Ha	N	VLTI/PIONIER	O
17069-4236	HD 326823	V1104 Sco	cLBV	F	O	VLTI/PIONIER	O
17416-3006	WRAY 17-96	TIC 192821454	cLBV	N	-	VLTI/PIONIER	N
17420-3330	HD 160529	V905 Sco	LBV	F/U	N	VLTI/PIONIER	O
17440-3028	[GKF2010]MN 64	TIC 109107916	cLBV	N	-	VLTI/PIONIER	N
17462-2850	Pistol	V4647 Sgr	cLBV	X	N	VLTI/PIONIER	O
17482-2801	HD 316285	HDS 2514	cLBV	OF/U	N	VLTI/PIONIER	N
18212-1622	HD 168607	V4029 Sgr	LBV	F/U/T/H	N	VLTI/PIONIER	O
18213-1622	HD 168625	V4030 Sgr	cLBV	F/U/T/H	N	VLTI/PIONIER	O
18264-0713	MWC 930	V446 Sct	LBV	F/U/H	N	N	-
18394-1351	AS 314	V452 Sct	cLBV	F/H	N	N	-
19215+1453	MWC 314	V1429 Aql	cLBV	H	O	N	-
20178+3802	P Cyg	HD 193237	LBV	H/T	N	MIRC-X/CHARA	O
20327+4114	Schulte 12	HIP 101364	cLBV	H	N	MIRC-X/CHARA	O

Notes :

(1) Spectrographes utilisés : H = HERMES ; F = FEROS ; U = UVES ; X = XSHOOTER ; Ha = HARPS ; T = TIGRE ; S = SALT HRS.

(2) Le nom complet est Westerlund 1 W 243.

À partir des mesures de vitesses radiales par spectroscopie multi-époques, les auteurs déterminent une fraction binaire spectroscopique observée de  $f_{obs} = 0,26^{+0,16}_{-0,10}$  qu'ils ont jugée nécessaire de corriger des biais observationnels.

En considérant les plages de période orbitale  $P_{orb}$  [1 à 1000 j] et de rapport de masse  $q = M_2/M_1$  [0,1 à 1,0], pour un ensemble représentatif de distributions de paramètres orbitaux, les simulations montrent que la probabilité de détection d'un compagnon par spectroscopie est de 42%. Les auteurs en déduisent que la fraction de binarité spectroscopique pour les étoiles LBV et cLBV Galactiques, corrigée des biais, est  $f_{sp} = 0,62^{+0,38}_{-0,24}$

### Les observations interférométriques et détection de compagnons.

L'essentiel des observations interférométriques ont été obtenues sur le VLTI (Very Large Telescope Interferometer) de l'ESO avec l'instrument PIONIER (Precision Integrated Optics Near-infrared Imaging Experiment) en recombinaison les faisceaux de quatre Télescopes Auxiliaires (AT) en bande H ( $\lambda = 1,65 \mu\text{m}$ ). La configuration des bases utilisées a permis d'atteindre une résolution angulaire de  $\lambda/2B = 1,3 \text{ mas}$  (Figure 2). Les observations ont été réalisées au VLTI en janvier, février et mars 2019 dans le cadre du programme ESO ID 01.102.D-0460 (A).

Pour deux étoiles (P Cyg et Schulte 12), des observations en bande H avec une résolution angulaire voisine de 1 mas ont été faites sur le réseau interférométrique CHARA (Center for High Angular Resolution Astronomy) avec l'instrument MIRC-X (Michigan InfraRed Combiner-eXeter).

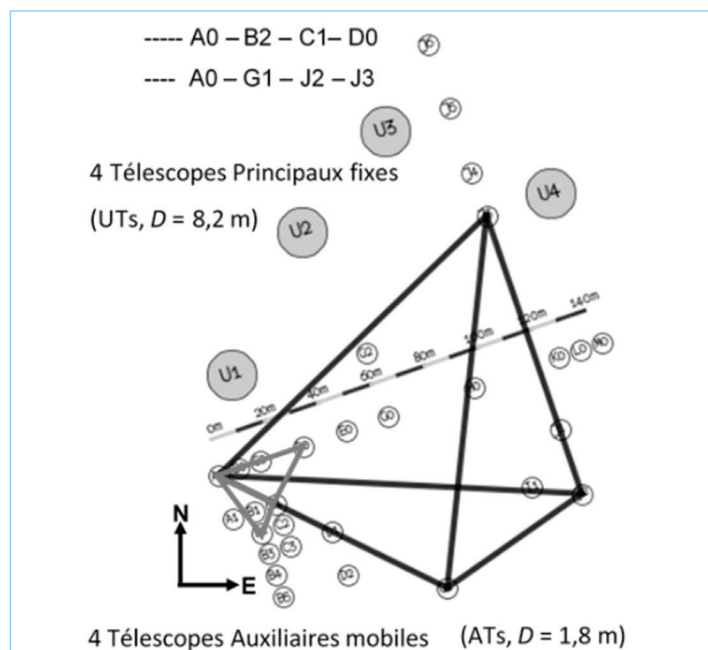


Figure 2. Configuration des bases du VLTI. Télescopes auxiliaires (ATs) sur les positions : A0 – B2 – C1 – D0 (en gris) et A0 – G1 – J2 – J3 (en noir). Base maximale de longueur  $L = 132 \text{ m}$  soit une résolution angulaire de  $\lambda/2B = 1,3 \text{ mas}$  à  $\lambda = 1,65 \mu\text{m}$  (bande H).

Les données d'observation fournies par ces interféromètres sont des mesures du carré de la visibilité normalisée des franges d'interférences  $V^2$ , liée à la taille de l'objet, et de la phase de clôture CP, liée au degré d'asymétrie de la source.

La détection et la mesure (angle de position  $PA$ , séparation angulaire  $\rho$  et différence de magnitude  $\Delta m$ ) des compagnons ont été obtenues par modélisation des données interférométriques

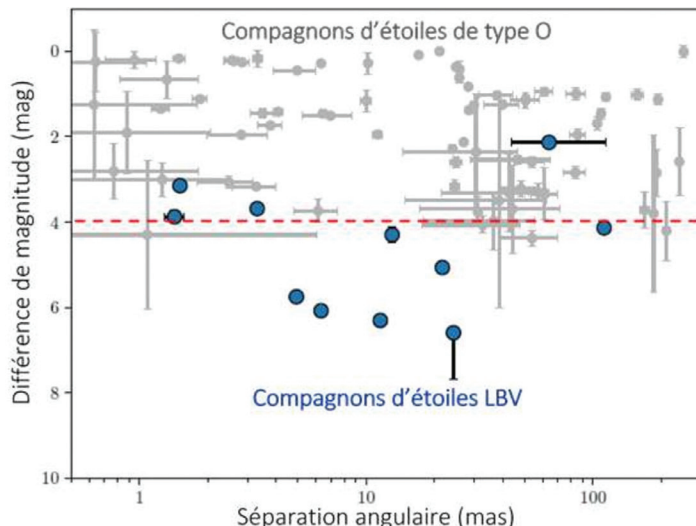


Figure 3. Différence de magnitude en fonction de la séparation angulaire pour les compagnons détectés (points bleus).

On note que 7 compagnons d'étoiles LBV et cLBV ont des  $\Delta m > 4 \text{ mag}$  en deçà de la limite de détection de la prospection de binarité parmi les étoiles de type spectral O (points en gris).

D'après la Figure 5 de Mahy et al. [1].

au moyen du logiciel CANDID (Companion Analysis and Non-Detection in Interferometric Data). Le modèle représente l'étoile primaire par un disque résolu (diamètre  $\phi_A$ ), la secondaire par une source ponctuelle ainsi que d'un flux de fond ( $F_{fond}$ ).

Onze compagnons ont ainsi été détectés sur les 15 étoiles de l'échantillon avec une détection à plus de  $7\sigma$ . La table 2 résume les résultats obtenus par les observations interférométriques.

A ces couples, les auteurs ont ajoutés 3 étoiles déjà connues comme doubles :  $\eta$  Car observée avec VLTI/GRAVITY en 2016 et 2017, HR Car observée avec le VLTI/PIONIER et AMBER en 2014, 2015 et 2016, et l'étoile Pistol observée avec VLTI/AMBER en 2009 et 2010.

Pour les étoiles détectées à la fois comme doubles dans les échantillons spectroscopiques et interférométriques, il reste à confirmer l'identité des compagnons et seule une étude dédiée permettra de comprendre la configuration de ces systèmes.

Comme le montre la Figure 3, les compagnons détectés présentent une différence de magnitude  $2,1 \leq \Delta m_H \leq 6,6 \text{ mag}$ , dont 7 avec un  $\Delta m_H > 4 \text{ mag}$ , au-delà de la limite de détection de la prospection de binarité parmi les étoiles de type spectral O [8].

Les luminosités estimées pour les compagnons sont  $2,8 < \log(L/L_\odot) < 5,4$  suggérant que ceux-ci sont probablement des étoiles de type O ou B sur la séquence principale. Il est également noté que les distributions des séparations angulaires et projetées des compagnons d'étoiles LBV et cLBV apparaissent significativement différentes de celles des compagnons d'étoiles de type O (Figure 4). Sur la base des données interférométriques, la fraction binaire des étoiles de type LBV et cLBV est estimée à  $f_{astro} = 0,70 \pm 0,09$ .

Plus d'observations sont nécessaires pour préciser la nature binaire de ces systèmes et déterminer leurs mouvements orbitaux.

La caractérisation de la binarité des étoiles LBV et cLBV au moyen d'observations interférométriques a permis une détermination directe du rayon stellaire  $R_{int}$  pour les 12 étoiles (11 binaires de l'échantillon plus HR Car) résolues dont la distance au Soleil est connue (Gaia E DR3 et Smith et al. 2019). Les valeurs de  $R_{int}$  vont de  $\sim 100 R_\odot$  à  $\sim 650 R_\odot$ .

**Table 2. Paramètres mesurés pour les 11 compagnons détectés par les observations interférométriques.**

D'après la table 2 de Mahy et al. [1].

COORD	Etoile	Date*	$\varphi_A$	$F_{\text{fond}}$	$\Delta m$	$\theta$	$\rho$	Notes
			(mas)	(%)	(mag)	(°)	(mas)	
10562-6027	AG Car	2019	1,08	0,5	5,8	100,19	4,92	
16433-4600	[GKF2010]MN 46	2019	1,40	3,35	3,7	317,83	3,30	
16471-4552	W 243(2)	2019	0,81	5,5	3,1	222,87	1,51	
16496-4536	[GKF2010]MN 48	2019	0,49	2,21	4,1	221,98	111,91	
16540-4221	$\zeta$ Sco	2019	0,75	0,30	6,3	283,22	11,54	
17069-4236	HD 326823	2019	0,88	2,81	3,9	187,69	1,43	
17420-3330	HD 160529	2019	1,13	0,37	6,1	328,36	6,32	
18212-1622	HD 168607	2019	0,93	0,94	5,1	7,22	21,86	
18213-1622	HD 168625	2019	-	0,23	6,6	299,32	24,24	Primaire non résolue
20178+3802	P Cyg	2019	0,76	1,91	4,3	131,75	13,00	
20327+4114	Schulte 12	2019	1,27	14,00	2,1	-	~100	Plus observations nécessaires

\*Les observations ont été réalisées au VLTI/PIONIER dans le cadre du programme ESO ID 01.102.D-0460 (A) en janvier, février et mars 2019.

Les auteurs soulignent que certaines étoiles LBV de l'échantillon sont entourées de nébuleuses de matière éjectée dont l'étendue est de plusieurs parsecs.

### Conclusions

L'analyse faite par Laurent Mahy et ses collaborateurs montre pour la première fois que la fraction binaire dans la population LBV galactique est importante. Sur la base de leurs campagnes d'observations spectroscopiques et interférométriques, les auteurs trouvent un taux de binarité de l'échantillon d'étoiles LBV et cLBV Galactiques,  $f_{bin} = 67 \pm 11\%$  avec  $f_{bin} \approx 90\%$  pour les étoiles LBV confirmées, valeurs qu'ils estiment en accord avec le taux de multiplicité  $f_{mul} = 91 \pm 3\%$  trouvé pour les étoiles massives de type OB [8]. La Figure 5 montre la distribution des taux de multiplicité en fonction de la masse de l'étoile primaire du système.

On constate une grande différence dans la distribution des

périodes orbitales parmi les couples dont l'étoile primaire est une étoile OB (80% de couples serrés de  $P_{orb} < 100$  j) ou une étoile LBV (majoritairement des couples écartés). Seule une étude basée sur la connaissance de la distribution des éléments orbitaux (période, excentricité et rapport des masses) permettra de comprendre l'origine de cette différence et d'évaluer le rôle des étoiles LBV dans l'évolution des étoiles massives.

La question se pose de savoir si l'abondance de systèmes de courtes périodes parmi les étoiles de type O est compatible avec le fait que les étoiles de type LBV ont majoritairement des compagnons écartés. Pour que la phase LBV apparaisse durant l'évolution d'une étoile isolée, celle-ci devrait se former dans un système à longue période dans lequel les deux composantes évoluent comme des étoiles simples. Si la phase LBV apparaît durant l'évolution d'un système binaire, cela implique soit que ce système de courte période initiale subit un transfert de masse important et non conservatif (avec perte de masse par le

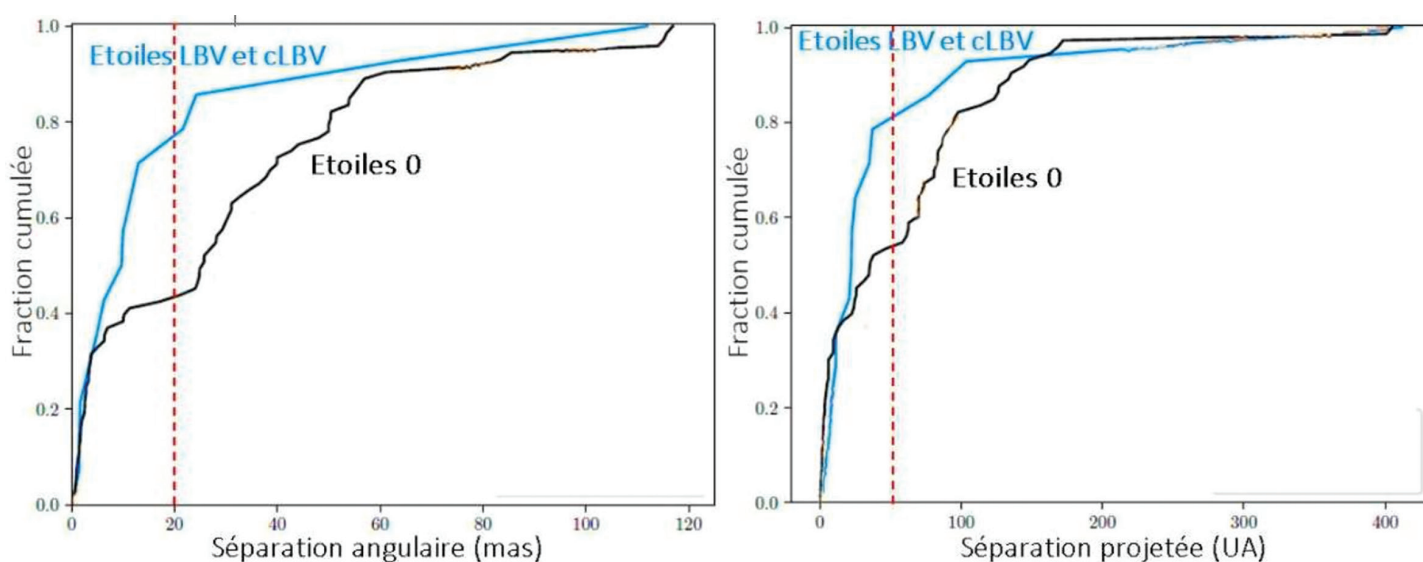


Figure 4. Comparaison des distributions des séparations angulaires et projetées sur le ciel pour les compagnons des étoiles LBV ou cLBV et des étoiles de type O.

A gauche : environ 80% des compagnons d'étoiles LBV ou cLBV ont des séparations angulaires  $\rho < 20$  mas, pour environ 45% des compagnons d'étoiles O.

A droite : Les distributions des séparations converties en distances projetées sur le ciel en utilisant les distances fournies par GAIA EDR3 sont également différentes avec environ 80% des compagnons d'étoiles LBV ou cLBV à moins de 50 UA, pour environ 53% des compagnons d'étoiles O.

D'après la Figure 7 de Mahy et al. [1].

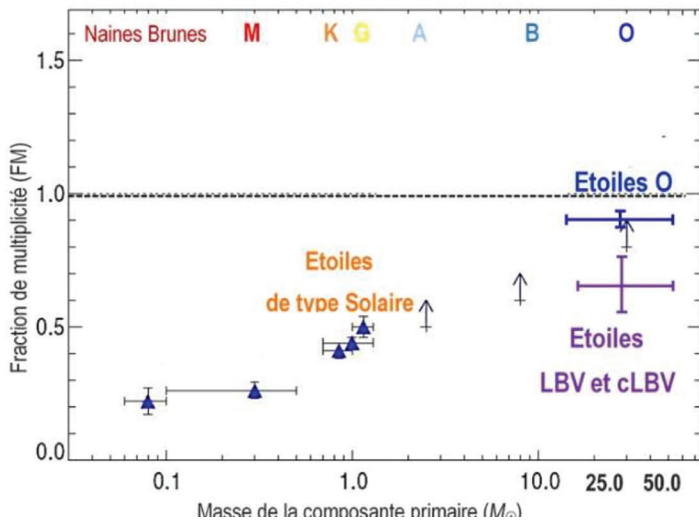


Figure 5. Distribution de la fraction de multiplicité (FM) en fonction de la masse de la composante primaire. Les valeurs de FM établies pour les étoiles massives de type O (H Sana et al 2014) et les étoiles LBV et cLBV Galactiques [1] ont été reportées dans un diagramme dessiné d'après la figure 1 de l'article de Gaspard Duchêne et Adam Kraus [9]. Les types spectraux sont indiqués dans la partie supérieure du diagramme.

système) pour aboutir à un système écarté de longue période, soit que l'étoile LBV se forme par la fusion de deux composantes serrées dans un système initialement binaire ou triple.

Le suivi interférométrique des étoiles LBV binaires devrait fournir les distributions des paramètres orbitaux à différents stades de l'évolution stellaire, permettant ainsi de tester quantitativement l'évolution des étoiles massives au sein de systèmes binaires.

## Références

[1] L. Mahy, C. Lanthermann D. Hutsemékers, J. Kluska, A. Lobel, R. Manick, B. Miszalski, M. Reggiani, H. Sana et E. Gosset, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 657, A4, 15 pp (2022) ; "Multiplicity of Galactic Luminous Blue Variable stars". <https://arxiv.org/pdf/2105.12380.pdf>

[2] J. S. Clark, V. M. Larionov, and A. Arkharov, *A&A* 435, 239–246 (2005), "On the population of galactic Luminous Blue Variables". <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2005/19/aa2563-04.pdf>

[3] Y. Nazé, G. Rauw, and D. Hutsemékers, *A&A* 538, A47 (2012), "The first X-ray survey of Galactic luminous blue variables". <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2012/02/aa18040-11.pdf>

[4] A. Daminieli, P. S. Conti, D. F. Lopes, *New Astronomy* 2, 107-117 (1997), "Is Eta Carinae a long period binary ?". <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997NewA....2..387D/abstract>

[5] GRAVITY Collaboration, *A&A* 618, A125 (2018), "GRAVITY chromatic imaging of  $\eta$  Car's core". <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832977>

[6] H. M. J. Boffin, T. Rivinius, A. Mérand et al. *A&A* 593, A90 (2016), "The luminous blue variable HR Carinae has a partner". <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629127>

[7] C. Martayan, A. Lobel, D. Baade et al. *ASPC* 464, 293-300, "On the binarity of LBV Stars". <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2012ASPC..464..293M>

[8] H. Sana, J.-B. Le Bouquin, S. Lacour, et al. *Ap. J. S.S.* 215, 15 (35pp), (2014) "Southern Massive Stars at High Angular Resolution: Observational Campaign and Companion Detection". <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014ApJS..215..15S/abstract>

[9] G. Duchêne et A. Kraus, *ARA&A* 51, 269-310 (2013), "Stellar Multiplicity". <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013ARA%26A..51..269D/abstract>



## Daniel Bonneau

Une thèse de troisième cycle en Astrophysique effectuée à l'observatoire de Meudon sous la direction d'Antoine Labeyrie, m'a amené à découvrir le monde étoiles doubles et à participer à l'aventure de la renaissance des observations à haute résolution angulaire. Entre 1972 et 1991, je me suis surtout consacré à la détermination des paramètres stellaires fondamentaux (masses et températures) et au sondage de la structure de l'atmosphère étendue d'étoiles géantes froides par interférométrie des tavelures. Ensuite, mes recherches ont eu essentiellement pour thème l'étude des phénomènes de perte et de transfert de masse dans les systèmes binaires massifs (type Be binaires, beta Lyrae, Wolf-Rayet) et la détermination des paramètres stellaires au moyen d'observations par interférométrie optique à grande base. Depuis 2011, je suis astronome honoraire à l'Observatoire de la Côte d'Azur, collaborateur scientifique bénévole du laboratoire Lagrange.