

ÉTUDE DES LIMITES ASTROMÉTRIQUES ET PHOTOMÉTRIQUES DES TÉLESCOPES DE CLASSE 1M ET 2M DU RÉSEAU LCO

Astrometry and Photometry of Double Stars 3rd Part - A Study of the Astrometric and Photometric Limits of the Lco Network's 1M and 2M Class Telescopes

André Debackère - dbrstars@gmail.com



Résumé

Cet article fait suite aux articles intitulés "Astrométrie et Photométrie d'Étoiles Doubles 1ère partie, Étude des paires Baillaud 805 et Baillaud 806" (André Debackère, Etoiles Doubles, n°07, pp. 13-27, 2023) et "Astrométrie et Photométrie d'Étoiles Doubles 2ème partie, Étude des paires Knapp 1113 et Knapp 1201" (André Debackère, Etoiles Doubles, n°08, pp. 14-28, 2024). Ce travail a montré qu'il est possible de caractériser les binaires observées, en mesurant les positions astrométriques et les données photométriques, magnitudes et indices de couleurs de leurs composantes. L'intérêt de ces études est d'une part l'observation d'étoiles doubles dont l'importance est grande dans la détermination des paramètres stellaires fondamentaux et d'autre part d'accroître les mesures photométriques des composantes d'étoiles doubles jusqu'ici peu nombreuses. La grande séparation angulaire des composantes des systèmes étudiés dans ces deux articles en utilisant des télescopes de classe 1m du réseau global "Las Cumbres Observatory" (LCO) permet en particulier de faire avec un peu plus de facilité les mesures photométriques de chacune d'elle.

L'objectif principal du travail décrit dans cet article est de déterminer les limites des mesures astrométriques et photométriques que l'on peut atteindre non seulement avec des télescopes de classe 1m mais également avec les télescopes Faulkes de classe 2m du réseau LCO, en particulier la séparation limite que l'on peut atteindre pour laquelle les mesures photométriques de chaque composante peuvent être considérées de bonne qualité.

J'étudie 18 couples DBR que j'ai découverts entre 2016 et 2018, répertoriés dans le catalogue d'étoiles doubles de Washington (WDS) et dont la séparation angulaire est comprise entre environ 1" et 5". Deux nouvelles étoiles doubles ont été découvertes lors de ces observations que je propose de nommer DBR 343 et DBR 344. Je procède d'abord aux mesures astrométriques en déterminant les coordonnées polaires des systèmes observés ainsi que leurs coordonnées équatoriales à l'époque des observations. Puis je détermine le profil photométrique de chaque paire étudiée afin de mettre en évidence la limite de faisabilité des mesures photométriques de leurs composantes.

Je sélectionne enfin à partir de ces observations deux couples DBR 304 et DBR 343 susceptibles d'être binaires pour lesquels les résultats obtenus en astrométrie permettent d'étudier leur évolution. Les mesures photométriques permettent de déterminer les magnitudes apparentes de chaque composante et de calculer leurs différences de magnitude Δm pour chaque système étudié. Le calcul de l'indice de couleur (B-V) de chaque composante de ces systèmes et la connaissance de leur distance permettent d'accéder à leur magnitude absolue, leur classe de luminosité et leur type spectral. L'étude montre que les deux binaires observées appartiennent à la séquence principale (classe V) et sont de type spectral A ou F.

Abstract

This article comes after the articles entitled "Astrométrie et Photométrie d'Étoiles Doubles 1ère partie, Étude des paires Baillaud 805 et Baillaud 806" (André Debackère, Etoiles Doubles, n°07, pp. 13-27, 2023) and "Astrométrie et Photométrie d'Étoiles Doubles 2ème partie, Étude des paires Knapp 1113 et Knapp 1201" (André Debackère, Etoiles Doubles, n°08, pp. 14-28, 2024). This work has shown that it is possible to characterize the binaries observed, by measuring the astrometric positions and photometric data, magnitude and colour index of their components. The interest of these studies is, on the one hand, to observe double stars of great importance in determining fundamental stellar parameters and, on the other hand, to increase the number of photometric measurements of double star components, which have so far been few and far between. In particular, the large angular separation of the components of the systems studied in these two articles, using 1m class telescopes from the "Las Cumbres Observatory" global network (LCO), means that photometric measurements of each of them can easily be made.

The main objective of the work described in this article is to determine the limits of astrometric and photometric measurements that can be achieved not only with 1m class telescopes but also with the 2m class Faulkes telescopes of the LCO network. In particular, the separation limit that can be reached for which the photometric measurements of each component can be considered of good quality.

I study 18 DBR pairs that I discovered between 2016 and 2018, listed in the Washington Double Star Catalogue (WDS) and with angular separation between about 1" and 5". Two new double stars were discovered during these observations, which I propose to name DBR 343 and DBR 344. I first carry out astrometric measurements by determining the polar coordinates of the observed systems and the equatorial coordinates of the components of these systems at the epoch of the observations. I then determine the photometric profile of each pair studied, in order to highlight the feasibility of photometric measurements of their components.

Finally, from these observations I select two pairs DBR 304 and DBR 343 that are likely to be binaries, for which the astrometric results allow us to study their evolution. Photometric measurements allow us to determine the apparent magnitudes of each component and calculate their magnitude differences Δm for each system studied. Calculation of the colour index (B-V) of each component of these systems and knowledge of their distance provide access to their absolute magnitude, luminosity class and spectral type. The study shows that the two binaries observed belong to the main sequence (class V) and their spectral types are A or F.



1 Introduction

Rappelons que les étoiles binaires et multiples sont des objets essentiels dans de nombreux domaines de l'astrophysique et leur observation est donc d'une importance fondamentale. Ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux que j'ai menés à la suite de la proposition de Pierre Durand de mesurer les indices de couleur (B-V) de chaque composante d'étoiles doubles lors de la réunion de la Commission des Étoiles Doubles de la Société Astronomique de France qui s'est tenue au Pôle des Étoiles à Nançay les 8 et 9 octobre 2022. J'ai commencé ce travail photométrique en février 2023 avec l'étude des paires Baillaud 805 et 806 (Debackère, A., 2023) [1] suivie de l'étude des paires Knapp 1113 et 1201 (Debackère, A., 2024) [2]. Il s'agit de couples très écartés (environ 15" pour BAL 805 AB, 11" pour BAL 806 AB, 9" pour KPP 1113 AB et 1201 AB et 6" pour la nouvelle double découverte lors des observations de KPP 1201 AB) qui présentent donc des profils photométriques bien distincts que l'on peut voir dans les articles [1] et [2] cités plus haut. Il s'agit ici de faire les mesures astrométriques et photométriques d'une liste de couples de plus en plus serrés et de déterminer les limites de ces mesures sur des images obtenues avec les télescopes de 1m et de 2m du réseau Las Cumbres Observatory LCO.

Dans cette étude, je commence par mesurer les coordonnées polaires des couples sélectionnés (Partie 3) puis je classe les différents couples étudiés par ordre de séparation angulaire décroissante. Les données astrométriques du catalogue Gaia-DR3 [3] permettent de sélectionner dans la liste des couples observés ceux dont les composantes ont des distances et des mouvements propres communs dans les marges d'erreur et qui sont donc probablement des systèmes binaires écartés. Je mesure les coordonnées équatoriales des composantes de ces derniers couples à la date des observations et leur évolution dans le temps.

Je passe ensuite à l'étude photométrique (Partie 4) dont le principal objectif est de tenter de déterminer la séparation angulaire minimale pour laquelle la photométrie de chaque composante est possible avec une bonne précision. En effet, la photométrie globale des deux composantes est relativement facile ainsi que la photométrie de chaque composante lorsque la séparation est grande, mais quelle est la limite inférieure de séparation angulaire assurant une photométrie convenable ? La séparation angulaire des composantes associée aux profils photométriques de ces couples permet de déterminer la limite au-delà de laquelle il n'est plus possible de faire la photométrie des composantes. Je détermine donc, quand c'est possible, les magnitudes en différentes bandes spectrales des systèmes Sloan SDSS [4] et Johnson-Cousins/Bessel [5], en les corrigeant de l'extinction atmosphérique et de l'absorption interstellaire. Ces mesures me permettent d'accéder à la différence de magnitude Δm entre les composantes des couples observés et aux indices de couleur. Les mesures photométriques sont couplées aux informations fournies par la base de données Gaia@AIP [6] (Carme Jordi, membre de la collaboration Gaia et impliquée dans la production de données photométriques, indique que les observations de Gaia-DR3 ne couvrent ni les UV ni les IR et il existe donc des dégénérescences entre l'extinction et la température). En ajoutant des informations supplémentaires aux données Gaia, cette dégénérescence peut être rompue.

La base de données Gaia@AIP intègre des informations issues d'autres catalogues et améliore donc la qualité des données de distance, d'extinction, de température effective et de masse, qui permet le calcul des indices de couleur intrinsèque et de la magnitude absolue M_V .

2 Observations

2.1 L'observation au sol et l'atmosphère terrestre.

André Couder disait « L'air est la plus mauvaise partie de l'instrument ». En effet, la turbulence atmosphérique limite le pouvoir séparateur de tous les instruments à environ 1" dans les meilleures conditions, valeur typique de la résolution angulaire d'observations limitées par la tache du seeing imposée par la turbulence atmosphérique, c'est le facteur majeur de dégradation des images.

2.1.1 Qu'est-ce que le seeing atmosphérique ?

Il s'agit de fluctuations de température à haute fréquence de l'atmosphère et du mélange de cellules d'air de températures et de densités différentes. Ce comportement de l'atmosphère est perçu dans l'oculaire comme une image floue, en mouvement ou scintillante. Les turbulences atmosphériques se produisent principalement dans deux zones, la troposphère centrale (100 m - 2 km) et la haute troposphère (6-12 km). En particulier les meilleurs endroits ayant une atmosphère stable sont les observatoires de montagne, situés au-dessus des couches d'inversion de température. Les sites d'implantation des télescopes du LCO situés à Ténérife (2330 m), Hawaii (3055 m) ou au Cerro Tololo (2198 m) bénéficient souvent d'une superbe visibilité la majeure partie de l'année. Mais d'autres sites situés près de la mer à moyenne altitude comme à Siding Spring (1116 m) ou à Sutherland (1760 m) où les vents dominants ont traversé de longues distances au-dessus des océans peuvent être presque aussi bons, les conditions qui y règnent sont généralement très cohérentes et stables. Ces fluctuations provoquent l'étalement de l'image observée sous la forme d'une tache de telle sorte que la résolution angulaire dans une image à pose longue est donnée par $\epsilon(\text{rd}) \approx 0,98 \lambda / r_0$, avec r_0 le rayon de Fried.

Soit $\epsilon(") \approx 20,214 \lambda(\mu\text{m}) / r_0(\text{cm})$.

C'est en fait la propagation de l'onde lumineuse venant de l'étoile à travers l'atmosphère terrestre turbulente qui transforme le plan d'onde initial en une surface d'onde bosselée (un écran de phase) dont les parties qui peuvent être considérées comme une onde plane (zone cohérente) ont pour taille le rayon de Fried (Bonneau D., 2022) [7]. C'est pour cela que r_0 est considéré comme le diamètre du télescope qui montre une image limitée par la diffraction en présence de turbulence, puisqu'il ne voit que de petits morceaux d'onde plane, il correspond au diamètre maximal du télescope qui ne serait pas affecté par la turbulence.

2.1.2 Comment mesurer la turbulence ?

Pour mesurer l'intensité des disques de seeing sans bords bien nets on utilise la largeur à mi-hauteur de la fonction d'étalement du point FWHM exprimée en pixels (définie par le nombre de pixels remplis à moitié de la plage de la dynamique entre le niveau du fond du ciel et le niveau du pixel le plus brillant de l'image de l'étoile). La mesure de la largeur à mi-hauteur (FWHM) de l'image longue pose d'une étoile simple donne une

estimation de la valeur du paramètre de Fried r_0 et représente donc un indicateur de la qualité de l'observation en présence de turbulence atmosphérique. L'angle de seeing, noté ϵ_0 exprimé en secondes de degré est le paramètre principal de la turbulence nous avons $\epsilon_0 = E \cdot \text{FWHM}$. On considère qu'une nuit est correcte lorsque le seeing est d'environ 1". La Figure 1 montre un exemple du profil d'une étoile située dans une image en bande r' datant du 7 mai 2024 et obtenue avec le télescope de 2m FTS du LCO (Siding Spring) et la largeur à mi-hauteur FWHM. Ce profil photométrique est obtenu avec l'outil « Graph » du logiciel Subaru Image Processor Makali'i [8] avec en abscisse la distance en pixels et en ordonnée l'intensité du flux reçu exprimé en ADU [1]. Le disque de seeing a un diamètre d'environ 13 pixels et la

largeur à mi-hauteur FWHM est d'environ 6 pixels (soit un angle de seeing de 1,6") dans des images prises à $\lambda \approx 0,62 \mu\text{m}$ ce qui correspond à un paramètre de Fried $r_0 \approx 8\text{cm}$ qui indique un site de qualité très moyenne. Les conditions météorologiques n'étaient pas optimum cette nuit-là puisque l'angle de seeing à l'observatoire de Siding Spring est en moyenne de 1,2" (Goodwin M. et al. 2013) [9]. Les mesures avec un « Differential Image Motion Monitor » DIMM (Vernin J., Munoz-Tunon C. 1995) [10] montrent que sur le site de l'Haleakala l'angle de seeing moyen est de 0,83". En moyenne 35 % des nuits sont photométriques avec 30 % de nuits supplémentaires utilisables avec une très faible extinction ou plus de 60 % du ciel sans nuages [11].

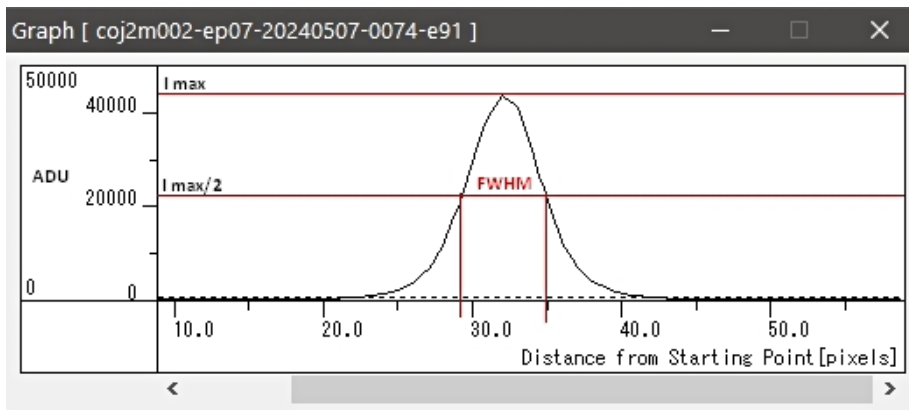


Figure 1 : Profil d'une étoile simple dans le champ d'une image obtenue au FTS le 7 mai 2024. A la longueur d'onde du filtre r' ($\lambda=0,62 \mu\text{m}$) et avec l'échantillonnage des images de $0,27''/\text{pix}$, l'étalement mesuré FWHM = 6 pix correspond à un angle de seeing de $\epsilon_0 \approx 1,6''$ soit un paramètre de Fried $r_0 \approx 8\text{cm}$.

2.1.3 Influence sur l'astrométrie

L'étalement des taches de diffraction affecte le pouvoir séparateur des instruments comme le montre très bien la Figure 2. La mesure de la séparation angulaire des composantes d'un couple d'étoiles est possible tant que le logiciel de mesure est capable de distinguer les deux photo-centres de la paire étudiée. L'expérience que j'ai acquise avec les télescopes de classe 2m que j'utilise depuis janvier 2000 montre que l'on peut mesurer au mieux une séparation angulaire d'environ 1" (les

deux photo-centres sont alors séparés sur l'image d'environ 4 pixels). Le logiciel SURFACE mis au point par Morlet et Salaman [12] en langage C à partir de l'algorithme développé par Bacchus et intégré au logiciel REDUC [13] est très performant dans le cas de couples serrés dont les lumières sont mélangées. La Figure 2 présente un exemple de mesure à l'aide du logiciel REDUC sur une image en bande r' du 7 mai 2024 avec le FTS. Il s'agit de la paire DBR 279 de séparation angulaire 1,2".

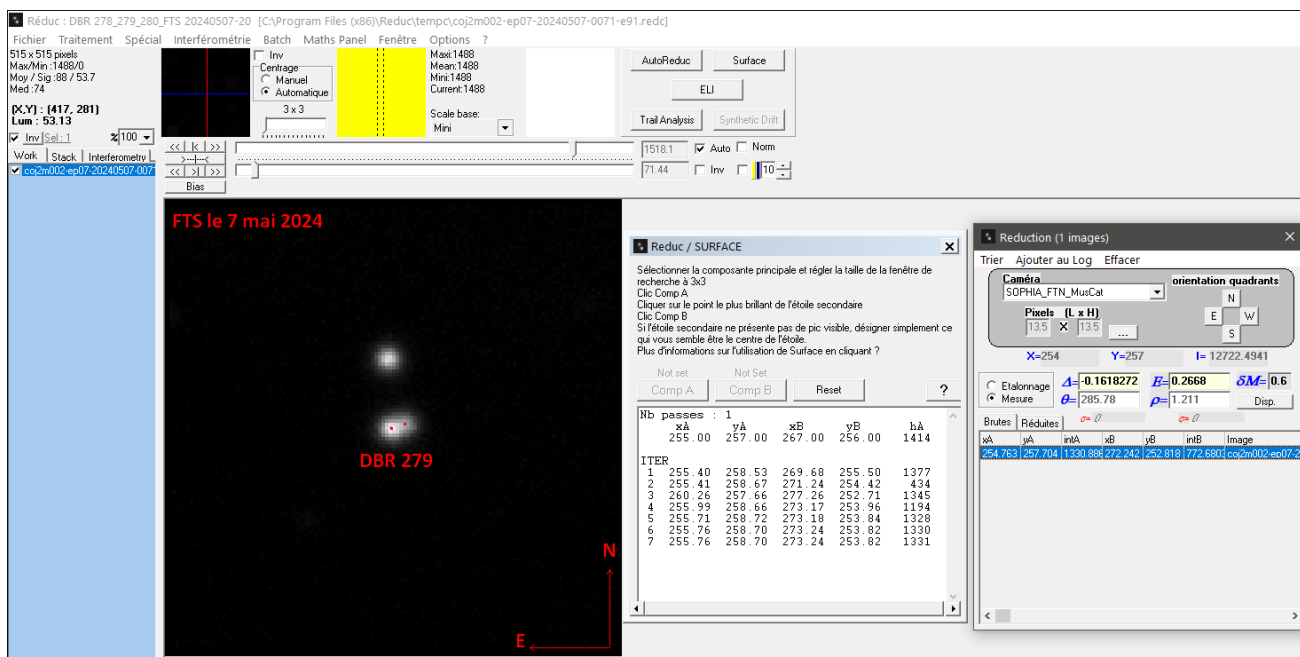


Figure 2 : Capture d'écran du logiciel REDUC utilisant SURFACE pour mesurer les coordonnées polaires de la paire DBR 279

2.1.4 Influence sur la photométrie des étoiles doubles

Évidemment, l'étalement des images par la turbulence atmosphérique limite la sensibilité des mesures par la perte de flux lumineux dans les parties périphériques de l'image d'une étoile simple et empêche de mesurer correctement des étoiles trop proches dont les taches de seeing se mélangent plus ou moins en fonction de leur séparation angulaire.

Dans la même image obtenue le 7 mai 2024 avec le télescope Faulkes Sud de 2m de diamètre FTS (E10) à l'observatoire de Siding Spring équipé du filtre SDSS r' (angle de seeing 1,6"), je choisis la paire la plus écartée DBR 138 (de séparation angulaire $\rho \approx 5''$ et à fort $\Delta m \approx 4$ mag), la paire DBR 121 (de même séparation angulaire mais à faible $\Delta m \approx 0,6$ mag), la paire DBR 320 (de séparation angulaire $\approx 2''$ et $\Delta m \approx 2$ mag.) et la paire la plus serrée DBR 279 (de séparation angulaire 1" et $\Delta m \approx 0,4$ mag). La Figure 3 montre les profils obtenus à l'aide du logiciel SUBARU Image Processor Makali'i de ces 4 paires ainsi que les extraits d'image correspondants de 128 pixels de côté soit

environ 35"x35".

Dans les images obtenues avec les télescopes de 1m de diamètre du réseau LCO le 15 juin 2024 à l'observatoire astronomique d'Afrique du Sud à Sutherland (K92) équipé du filtre Bessel V (angle de seeing 2,1"), je choisis la paire la plus écartée DBR 121 et le 11 juin 2024 à l'observatoire Teide à Ténérife équipé d'un filtre Bessel V (angle de seeing 1,6"), je choisis la paire la plus serrée DBR 320. La Figure 4 montre les profils obtenus à l'aide du logiciel SUBARU Image Processor Makali'i de ces 2 paires ainsi que les extraits d'image correspondants de 128 pixels de côté soit $\approx 50'' \times 50''$.

Il apparaît clairement que la photométrie des composantes de la paire DBR 279 au T2m ou celle de DBR 320 au T1m est impossible à réaliser. Pour les couples plus écartés, la différence de magnitude entre les composantes va aussi intervenir dans la précision des mesures même si la séparation permet la photométrie.

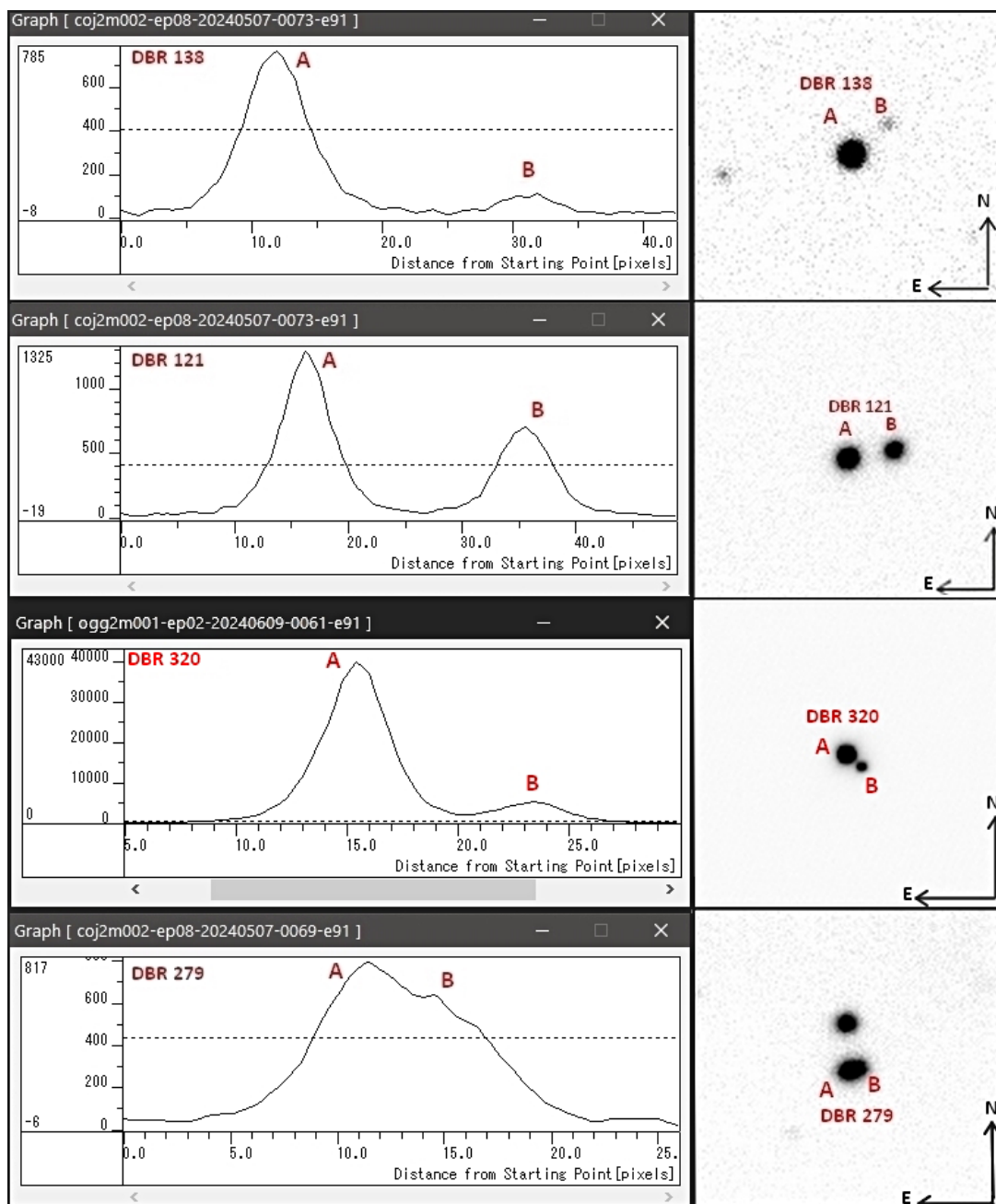


Figure 3 : Profils de DBR 138, DBR 121, DBR 320 et DBR 279 et leurs images au T2m

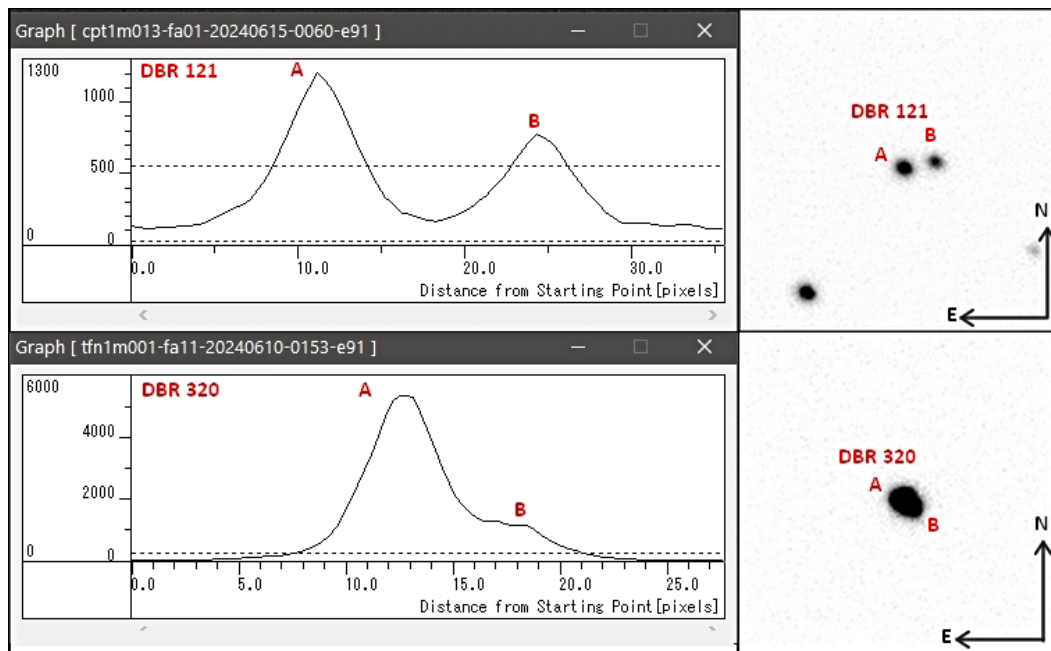


Figure 4 : Profils de DBR 121 et DBR 320 et leurs images au T1m

2.2 Le matériel utilisé

J'utilise dans cette étude des télescopes de 1 m de diamètre du réseau LCO [14] équipés de la caméra SINISTRO [15] munie de filtres Johnson-Cousins/Bessel (UBVRI) et SDSS/PanSTARRS (u'g'r'i'z's et Yw). Cette caméra possède des pixels carrés de $15 \cdot 10^{-6}$ m de côté. J'utilise également depuis 2010 les télescopes Faulkes (FTN et FTS) du réseau LCO, télescopes jumeaux de 2m de diamètre [16] situés respectivement à l'observatoire de l'Haleakala à Hawaii et à l'observatoire de Siding Spring en Australie et équipés du système imageur MuSCAT [17] à 4

canaux simultanés muni de 4 caméras Princeton Instruments : 1 caméra Pixis 2048 B munie d'un filtre SDSS r', 2 caméras Pixis 2048 eX munies des filtres SDSS g' et i' et 1 caméra Sophia 2048 BR munie du filtre SDSS z's (Figure 6). Ces 4 caméras ont toutes des pixels carrés de $13,5 \cdot 10^{-6}$ m de côté. Les bandes passantes de ces filtres sont présentées à la Figure 5 qui est extraite de la page 304 de l'article « Standard Photometric Systems », (Bessell M. S. 2005) [18].

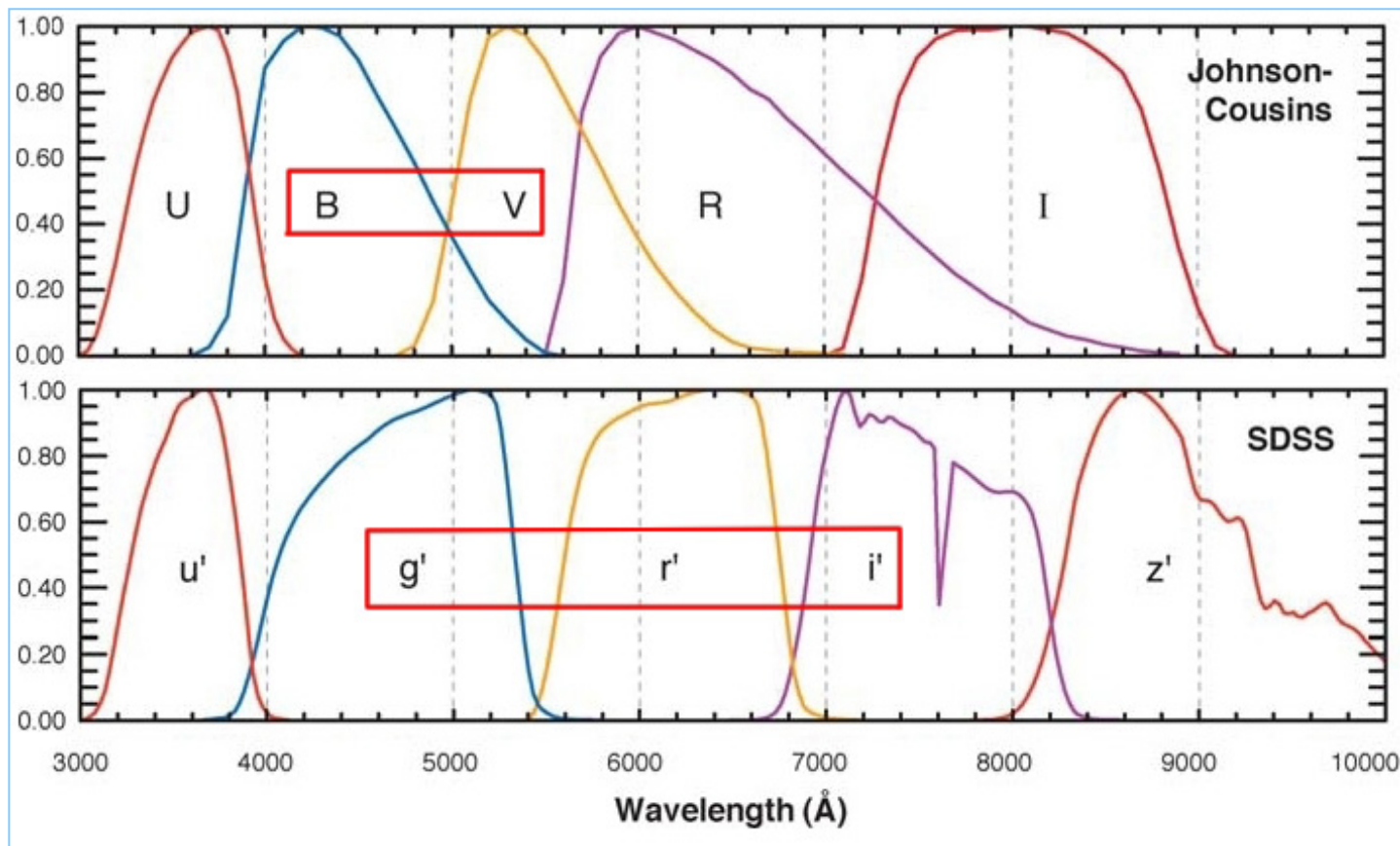


Figure 5 : Bandes passantes des différents filtres des systèmes Johnson Cousins et SDSS, les filtres utilisés lors des observations sont encadrés en rouge.

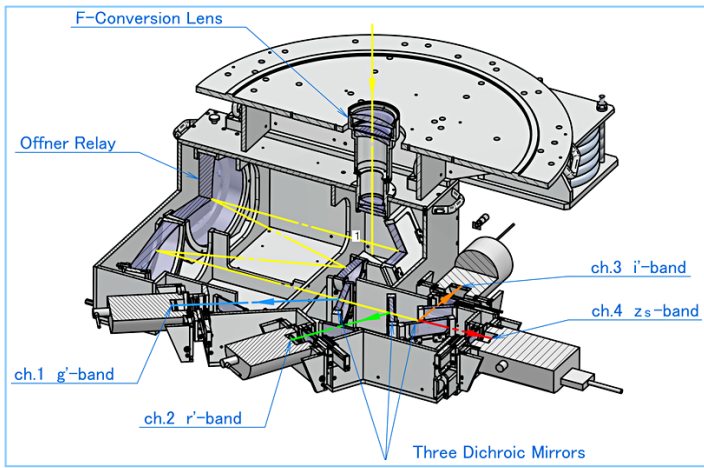


Figure 6 : Le système imageur multicanaux MuSCAT qui équipe les 2 télescopes Faulkes Nord et Sud de 2m de diamètre. Crédit LCO

La combinaison optique des télescopes de 1m donne une focale résultante d'environ 8 m et un échantillonnage $E = 0,389''/\text{pix}$ ce qui est nettement sous-échantillonné car en fait le nombre de pixel/'' n'est pas assez grand dans ce cas pour permettre de percevoir des détails à la limite de résolution du télescope. La résolution des télescopes de 1 m est $\lambda/D \approx 0,1''$ en bande V et pour atteindre cette résolution, les images devraient avoir un échantillonnage $E \leq 0,05''/\text{pix}$. Le champ des images obtenues avec ces instruments est de $26' \times 26'$. Il en est de même pour les images obtenues avec les télescopes de 2m dont l'échantillonnage de $0,27''/\text{pix}$ est trop grand par rapport à un échantillonnage $\leq 0,03''/\text{pix}$ qui permettrait d'atteindre la résolution de $0,06''$. La focale résultante est d'environ 10 mètres et le champ des images obtenues est de $9,1' \times 9,1'$. Ces combinaisons optiques ne peuvent malheureusement pas être modifiées, les échantillonnages ont été probablement choisis pour bien échantillonner la tache de seeing.

En avril, mai et juin 2024, j'ai utilisé des télescopes de classe 1m et les deux télescopes Faulkes de classe 2m pour observer 18 étoiles doubles parmi mes découvertes et répertoriées dans le catalogue d'étoiles doubles de Washington WDS [19] sous l'abréviation DBR (code découvreur proposé en mars 1998 par l'astronome Jean Dommanget de l'Observatoire Royal de Belgique lors de mes premières découvertes d'étoiles doubles en mai 1997 et dont je salue ici la mémoire). À l'époque de mes découvertes et jusqu'en 2016, j'utilisais les catalogues UCAC4 [20], USNO-B.1 [21] et NOMAD [22]. Puis, pour les découvertes de 2017 et 2018, je ne disposais que du catalogue Gaia-DR1 (paru en septembre 2016) [23] qui ne donnait pas la parallaxe et les mouvements propres des composantes des étoiles. La version DR2 du catalogue Gaia [24] qui apportait ces données n'est sortie qu'en août 2018. La précision sur les mouvements propres avant cette date pouvait laisser penser à une possible binarité de ces couples mais sans grande certitude. L'excellence du catalogue Gaia-DR3 [3] paru le 13 juin 2022 change considérablement la donne puisqu'il fournit avec une très grande précision la parallaxe de chaque composante ainsi que leurs mouvements propres en ascension droite et en déclinaison, indicateurs importants de la binarité ou non des paires observées. Ainsi, par exemple, le système triple DBR 277 AB-C (Fig. 7a) est en fait un système optique (note1 de la Table 2) puisque les composantes A, B et C ont des parallaxes trigonométriques différentes, par contre la paire DBR 304 AB (Fig.7b) est très probablement physique car les deux composantes ont la même parallaxe et des mouvements propres communs dans les marges d'erreur (note 2 de la Table 2). La Figure 7b montre une étoile très faible au

sud-est semblant accompagner la double DBR 304. D'autre part, comme très souvent, l'observation de couples connus amène à la découverte de nouveaux systèmes non répertoriés au WDS. C'est le cas des deux paires découvertes avec deux des trois télescopes de 1m de diamètre du réseau LCO à l'observatoire astronomique d'Afrique du Sud en juin 2024 et que je propose de nommer DBR 343 AB (Fig. 7c et 7d) située dans le champ de TDS 5142 (Fig.8) et DBR 344 AB (Fig. 9a et 9b) dans le champ des galaxies NGC 3267 et NGC 3268. Les Figures 7 et 9 montrent bien la sélection des couples probablement physiques du fait de la quasi identité des mouvements propres mesurés par Gaia.

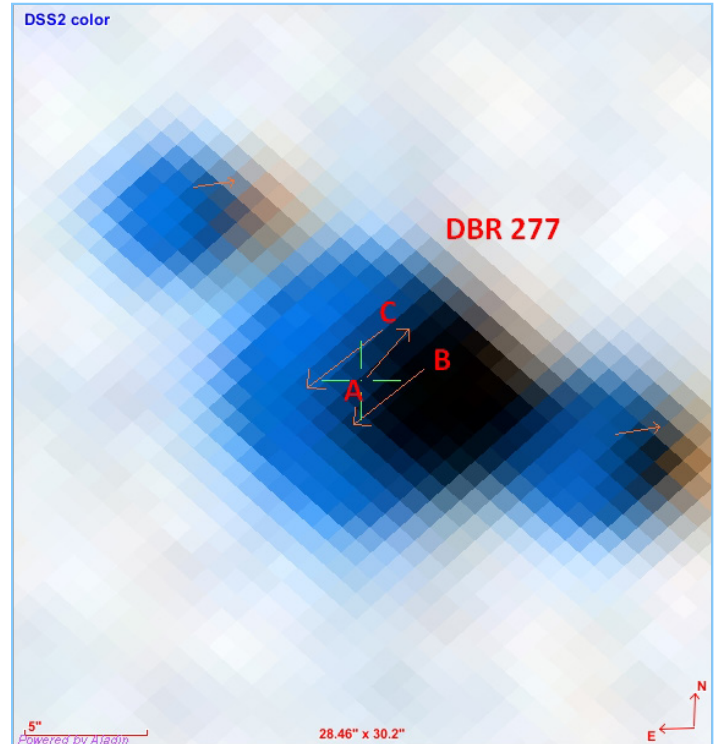


Figure 7a

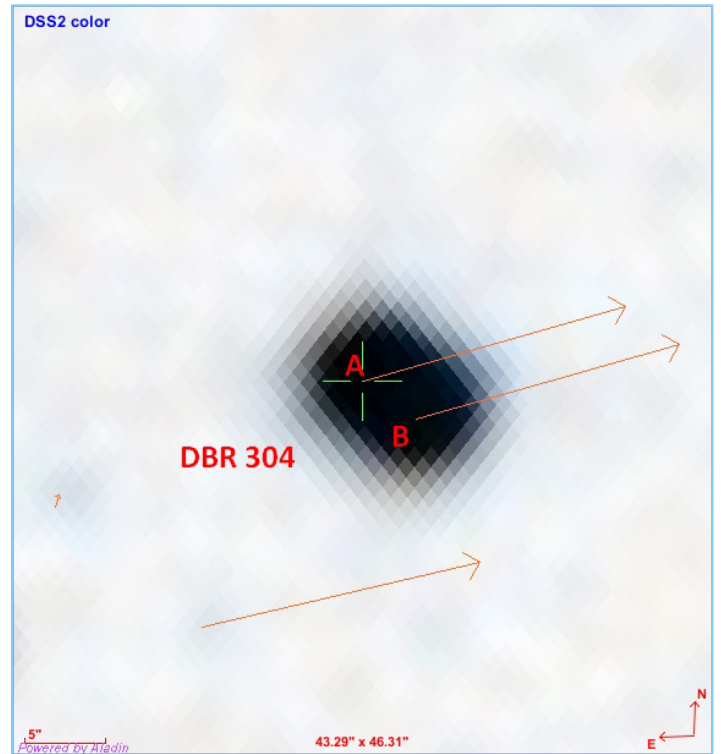


Figure 7b

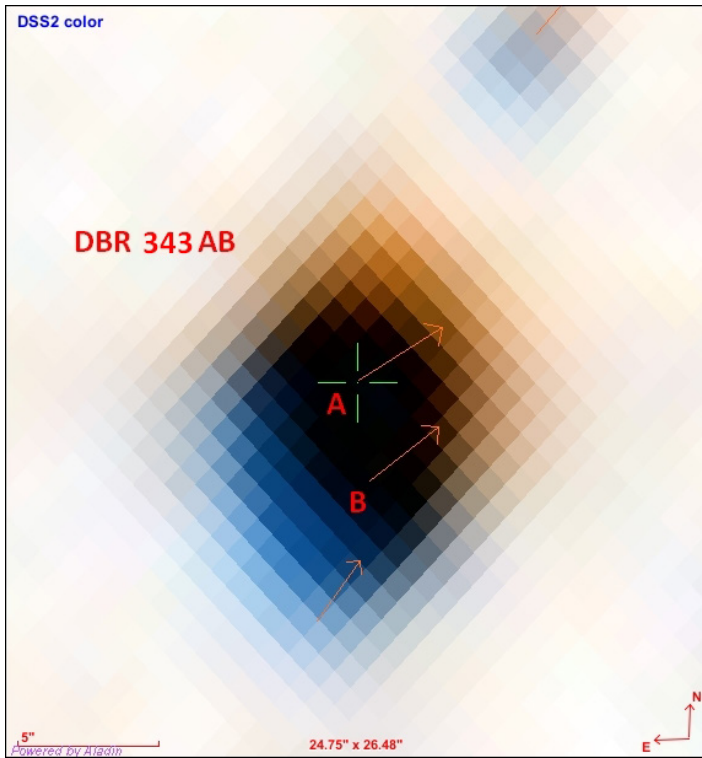


Figure 7c

Figures 7 : Champs réduits générés dans ALADIN autour de DBR 277, DBR 304 et DBR 343 mettant en évidence les mouvements propres des étoiles et extrait d'une image de DBR 343 obtenue au T1m (K92) le 15 juin 2024.

Remarque : L'étoile très faible (magG = 18,6) située à $\approx 13''$ au nord nord-ouest de DBR 343 sur la Figure 7c n'est pas visible sur la Figure 7d, le temps de pose de 10s en bande V étant trop court.

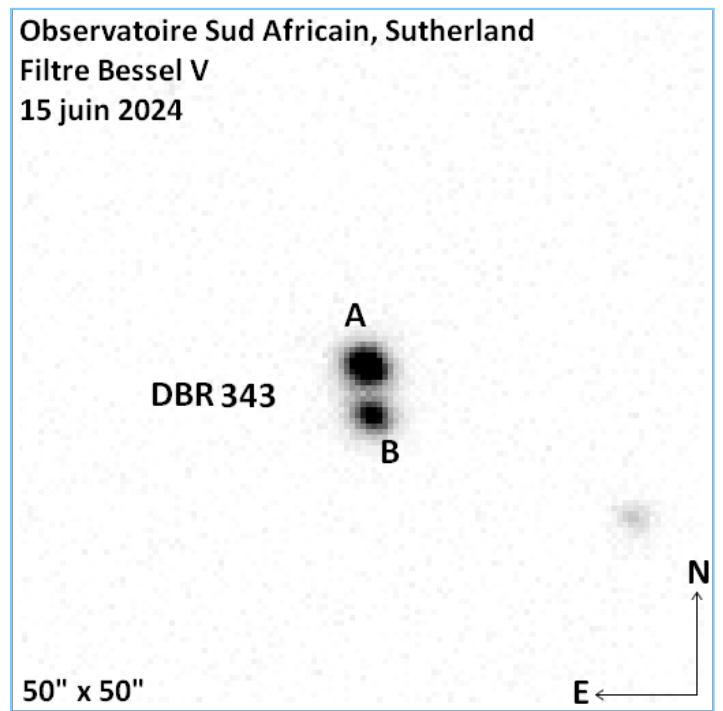


Figure 7d

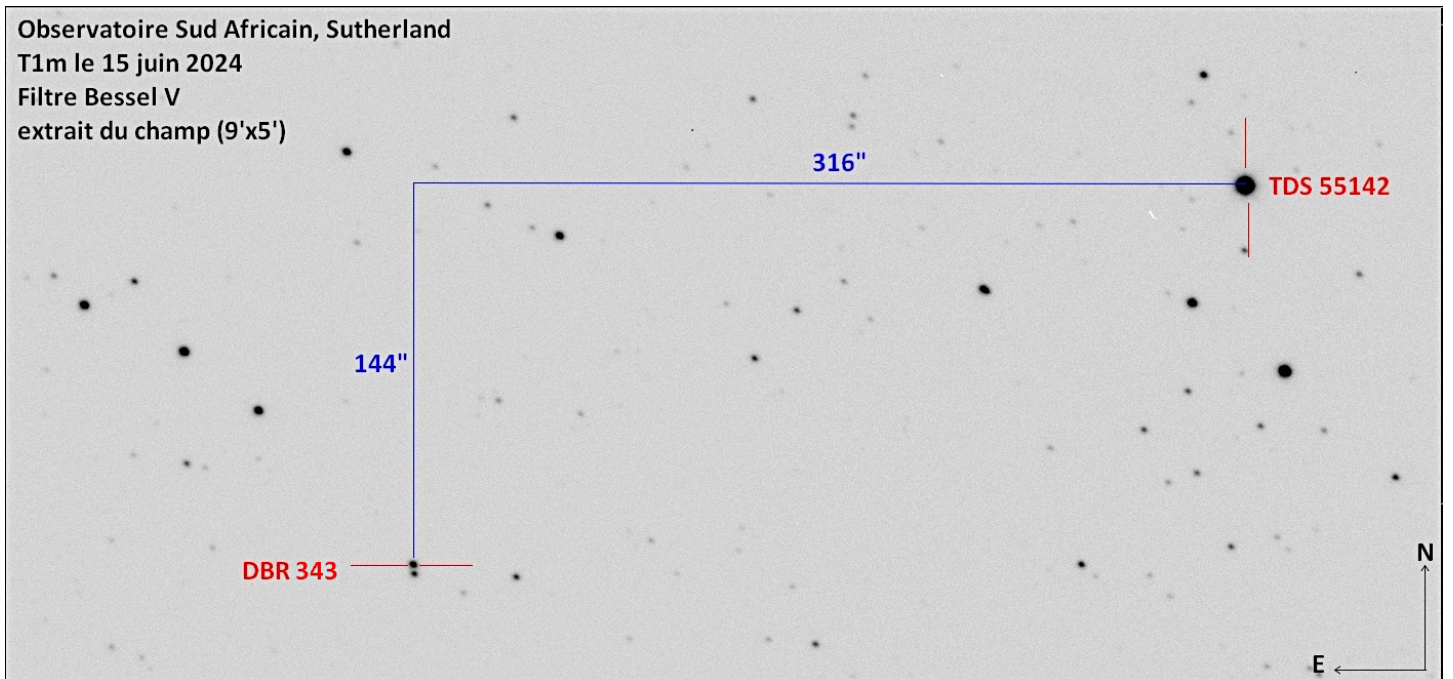


Figure 8 : Extrait du champ obtenu le 15 juin 2024 avec le télescope K92 de 1m de diamètre à l'observatoire d'Afrique du Sud montrant la position de DBR 343 par rapport à TDS 5142.

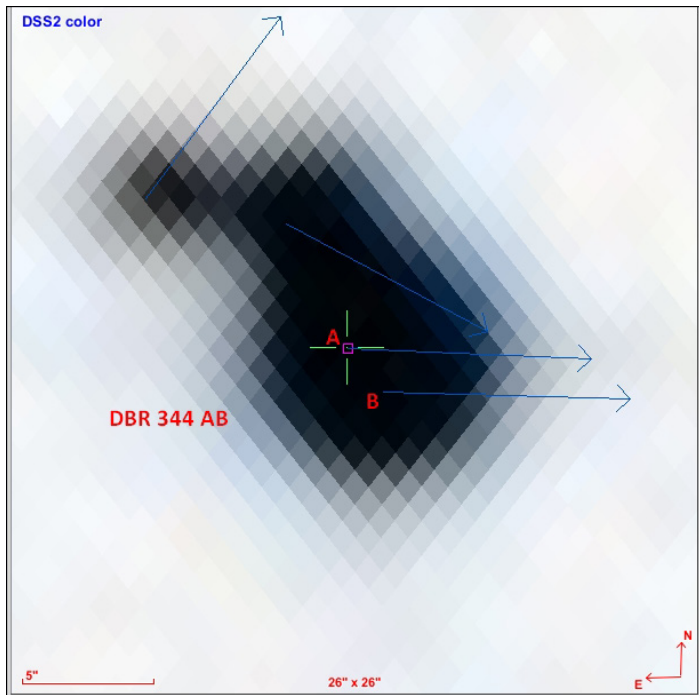


Figure 9a

Figures 9 : Champ réduit généré dans ALADIN autour de DBR 344 mettant en évidence les mouvements propres des étoiles et extrait du champ de DBR 344 au T1m (K91).

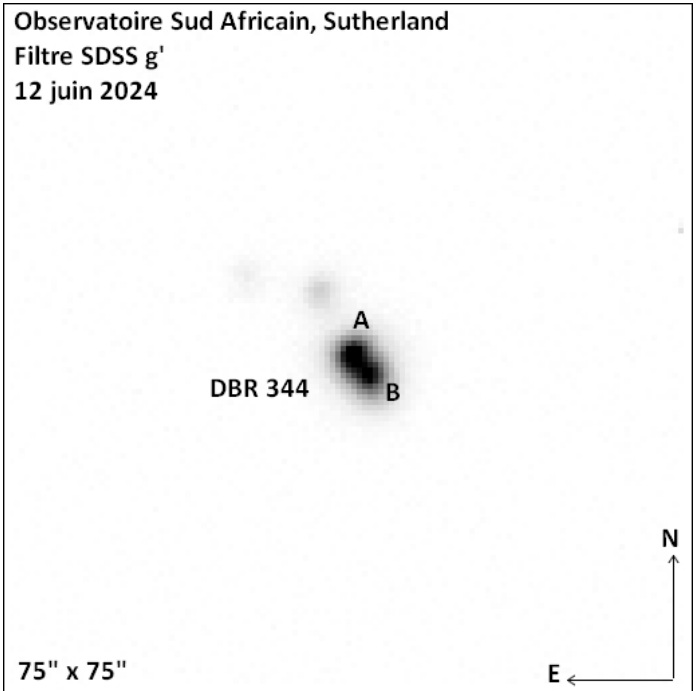


Figure 9b

2.3 Le journal des observations

La table 1 donne les dates d'observation avec les télescopes utilisés, les filtres et les temps de pose choisis ainsi que le nombre d'images obtenues.

J'ai observé 4 nuits avec les 2 télescopes de 2m de diamètre pour un total de 33 images dans les différents filtres SDSS et 6 nuits avec différents télescopes de 1m de diamètre pour un total de 42 images dans les différents filtres SDSS et Johnson-Cousins B et V.

Description de la table1

Col.1, Date des observations

Col.2, Nom de code au Minor Planet Center (MPC) du télescope utilisé

Col.3, Seeing en secondes de degré

Col 4,5,6,7 & 8, Nombre d'images et temps de pose en secondes pour le filtre utilisé.

Table 1. Journal des observations

Date	Code MPC	Seeing (")	SDSS g'				SDSS i'		SDSS z's		B		V		
			n _{ima}	t _(s)	n _{ima}	t _(s)	n _{ima}	t _(s)	n _{ima}	t _(s)	n _{ima}	t _(s)	n _{ima}	t _(s)	
	2m														
27/04/24	E10	1,5	2	25											
28/04/24	E10	1,5	1	8											
07/05/24	E10	1,6			2	1	2	1							
					2	4	4	4							
					2	6	2	6							
					2	8									
					2	20	2	20							
				2	25										
10/06/24	F65	1,3	2	1	2	1	2	1	2	1					
	1m														
09/06/24	K91	1,8									2	3	2	2	
											2	35	2	35	
11/06/24	Z24	1,6									2	1	2	1	
12/06/24	K91	2,2	2	35	2	35									
	Q63	4	2	3	2	2	2	2							
13/06/24	V37	1,7	2	1	2	1	2	1							
14/06/24	K92	2,4									2	3	2	2	
	K93	2,6	2	3	2	2	2	2							
15/06/24	K92	2,2									2	15	2	10	

Codes des télescopes du réseau LCO au Minor Planet Center (MPC) [25] :

- E10 : Faulkes Telescope South (FTS) de 2m de diamètre à l'observatoire de Siding Spring, Nouvelle Galles du sud, Australie
- F65 : Faulkes Telescope North (FTN) de 2m de diamètre à l'observatoire de l'Haleakala, Maui, Hawaï, USA
- K91, K92 et K93 : Les 3 télescopes de 1m de diamètre à l'observatoire astronomique d'Afrique du Sud, Sutherland, Afrique du Sud
- Q63 : Le télescope de 1 mètre de diamètre à l'observatoire de Siding Spring, Nouvelle Galles du Sud, Australie
- V37 : Le télescope de 1 mètre de diamètre à l'observatoire McDonald, Texas, USA
- Z24 : Télescope de 1m de diamètre à l'observatoire Teide, Ténérife, Îles Canaries, Espagne.

3 Astrométrie

Il s'agit ici de déterminer les coordonnées polaires de tous les couples étudiés à l'époque des observations. Les coordonnées équatoriales de chacune des composantes de tous les couples étudiés sont données par le catalogue Gaia-DR3 pour l'époque J2000,0. Ces résultats sont présentés dans la Table 2. Je mesure les coordonnées équatoriales des composantes des couples potentiellement physiques (note 3 dans la Table 2) à la date de leurs observations à l'aide du logiciel ASTROMETRICA [26]. Je détermine également les coordonnées polaires des 4 couples potentiellement physiques à l'aide du logiciel REDUC à l'époque des observations. L'évolution de ces systèmes au cours du temps est présentée dans la Table 3.

3.1 Calibration astrométrique des images

J'utilise ALADIN [27] pour déterminer l'orientation dans le plan du ciel du capteur par rapport à la direction du nord comptée positivement vers l'est, notée Δ_{capt} , exprimée en degrés ainsi que l'échantillonnage E en secondes de degré par pixel. Pour déterminer ces valeurs ALADIN utilise la matrice de transformation du système de cartographie standard appelé World Coordinate System WCS [28] de l'entête du fichier de données standard appelé Flexive Image Transport System FITS [29] des images pour la transformation du repère de coordonnées en pixels de l'image en repère de coordonnées équatoriales.

3.2 Mesures de l'angle de position et de la séparation angulaire des couples étudiés

Le logiciel REDUC [13] est utilisé pour déterminer les positions astrométriques relatives des différentes composantes stellaires. Les images sont redressées suivant l'orientation standard Nord en haut et Est à gauche, les valeurs de Δ_{capt} et E sont renseignées dans le logiciel pour chaque image.

Les mesures dans le plan du ciel de l'angle de position θ (en degrés) compté positivement vers l'est à partir de la direction du nord et de séparation ρ (en secondes de degré) des couples étudiés sont effectuées sur chacune des images obtenues au cours des nuits d'observation en suivant la procédure de mesure de REDUC indiquée dans le tutoriel du logiciel [30]. Pour les couples les plus serrés j'utilise le logiciel SURFACE [12], mis au point par Guy Morlet et Maurice Salaman en langage C à partir de l'algorithme développé par Pierre Bacchus, très performant dans le cas de couples serrés dont la lumière est mélangée et intégré à REDUC.

La table 2 donne les valeurs moyennes des mesures de θ et ρ et leurs incertitudes à la date des observations.

Description de la table 2

- Col.1, Identifiant dans le catalogue WDS, * non répertorié
- Col.2, Désignation découvreur, numéro & composante dans le catalogue WDS. ** indique une étoile variable
- Col.3, Identifiant dans le catalogue GAIA-DR3
- Col.4, Coordonnées équatoriales à l'époque J2000,0 dans le catalogue GAIA-DR3
- Col.5, Parallaxe absolue et incertitude (en mas) de chaque composante dans le catalogue GAIA-DR3
- Col.6 et 7, Mouvements propres en ascension droite AD et déclinaison DE et leurs incertitudes (en mas/an) dans le catalogue GAIA-DR3
- Col.8, Date moyenne de l'observation en années Juliennes
- Col.9, Nombre de nuits
- Col.10, Nombre d'images utilisées pour la mesure des coordonnées polaires de chaque paire
- Col.11, Angle de position et incertitude (en degrés) de chaque paire
- Col.12, Séparation angulaire et incertitude (en secondes de degré) de chaque paire
- Col.13, Nom de code au Minor Planet Center (MPC) du télescope utilisé
- Col.14, Notes
 - 1: couple optique : parallaxes et mouvements propres différents dans les marges d'erreur
 - 2 : même parallaxe dans les marges d'erreur
 - 3 : même parallaxe et mêmes mouvements propres dans les marges d'erreurs
 - 4 : nouveau couple

3.3 Évolution de l'angle de position et de la séparation des 4 couples potentiellement physiques

Les étoiles doubles physiques ont leurs composantes liées par la gravitation et par conséquent suivent les lois de Kepler. Il est donc intéressant de déterminer leur évolution au cours du temps en calculant les écarts $\Delta\theta$ et $\Delta\rho$ depuis leur découverte. L'observatoire naval de Washington, États-Unis, « U.S. Naval Observatory Washington D.C. 20392 », fournit sur demande la liste de toutes les mesures des étoiles doubles sélectionnées depuis leur découverte et figurant au catalogue WDS. J'ai choisi les mesures les plus anciennes de l'angle de position et de la séparation pour lesquelles une incertitude est mentionnée concernant DBR 180 et DBR 304. Les incertitudes sur la mesure des coordonnées polaires de la paire DBR 279 découverte en 2017 ne sont pas connues.

Les écarts $\Delta\theta$ en degré sont la différence entre l'angle de position mesuré à la date moyenne des observations et de la mesure fiable (avec incertitude) la plus ancienne de l'angle de position enregistrée au WDS. Pour DBR 279 ainsi que pour la nouvelle double DBR 343 l'écart $\Delta\theta$ en degré est la différence entre l'angle de position mesuré à la date moyenne des observations et calculée à l'aide du logiciel WDSTOOL [31] à l'époque J2016,000 du catalogue GAIA-DR3.

De même les écarts $\Delta\rho$ en seconde de degré sont la différence entre la séparation mesurée à la date moyenne des observations et de la mesure fiable (avec incertitude) la plus ancienne de la séparation enregistrée au WDS. Pour DBR 279 ainsi que pour la nouvelle double DBR 343, l'écart $\Delta\rho$ en seconde de degré est la différence entre la séparation mesurée à la date moyenne des observations et calculée à l'aide du logiciel WDSTOOL à l'époque J2016,000 du catalogue GAIA-DR3.

Je calcule ensuite les mouvements relatifs de l'angle de position θ et de la séparation ρ .

La Table 3 présente ces résultats

Table 2. Caractéristiques astrométriques des systèmes étudiés

(1) Identifiant WDS	(2) Dé- couv. Comp.	(3) Identifiant Gaia-DR3	(4) Coordonnées précises J2000,0 hhmmss,sss±ddmmss,s	(5) Plx e_Plx (mas)	(6) mpAD e_mpAD (mas/an)	(7) mpDE e_mpDE (mas/an)	(8) Date Jaaaa,aaa	(9) n_obs	(10) n_ima	(11) θ e_ θ (")	(12) ρ e_ ρ (")	(13) Tél.	(14) N
07159-1159	DBR 277 A	3045242902201280640	071554,241-115914,64	0,3427 0,0181	-1,651 0,016	1,963 0,014	2024,267	1	4	273,06 0,52	2,108 0,090	E10	1
	DBR 277 B	3045242902195370880	071554,087-115914,33	0,6737 0,0244	2,851 0,023	-2,217 0,019							
07159-1159	DBR 277 A	3045242902201280640	071554,241-115914,64	0,3427 0,0181	-1,651 0,016	1,963 0,014	2024,267	1	4	342,49 1,26	1,434 0,031	E10	1
	DBR 277 C	3045242902195371008	071554,203-115912,72	0,8885 0,0294	3,018 0,025	-2,322 0,021							
07442-2807	DBR 120 A	5599939477648208512	074409,975-280725,50	0,5694 0,0144	-2,227 0,012	2,164 0,014	2024,349	1	4	231,20 0,35	2,734 0,020	E10	1
	DBR 120 B	5599939477648209792	074409,818-280727,31	0,4605 0,0311	-5,008 0,025	4,523 0,029							
07442-2806	DBR 121 A	5599939580727409280	074411,994-280646,53	0,5294 0,0440	-6,553 0,038	9,555 0,042	2024,403	2	8	280,51 0,20	5,105 0,033	E10 K92	2
	DBR 121 B	5599939473344421888	074411,605-280645,40	0,5573 0,0199	-1,991 0,016	1,514 0,019							
07442-2805	DBR 123 A	5599942634434454400	074412,657-280449,05	2,2596 0,0103	-32,942 0,008	21,359 0,010	2024,349	1	4	100,55 0,02	3,041 0,023	E10	1
	DBR 123 B	5599942638744102528	074412,839-280449,18	1,1801 0,0373	-6,285 0,031	3,805 0,040							
07442-2803	DBR 124 A	5599943291579015936	074409,630-280255,87	0,2909 0,0214	-2,027 0,018	2,887 0,021	2024,349	1	4	1,74 0,38	4,836 0,040	E10	1
	DBR 124 B	5599943291579015680	074409,648-280250,98	0,5502 0,0591	-5,056 0,050	2,263 0,059							
07443-2805	DBR 129 A	5599940096123441152	074418,767-280423,04	0,7202 0,0268	-9,355 0,023	1,635 0,026	2024,403	2	8	64,15 0,77	3,491 0,037	E10 K92	1
	DBR 129 B	5599940096123440640	074418,993-280421,58	0,2609 0,0324	-2,546 0,027	4,516 0,031							
07444-2805	DBR 134 A	5599939821245528320	074423,780-280529,70	0,5638 0,0203	-4,135 0,016	3,818 0,020	2024,349	1	4	355,02 0,40	1,695 0,015	E10	1
	DBR 134 B	5599939821245527936	074423,773-280528,02	0,4602 0,0347	-4,844 0,027	5,091 0,031							
07444-2804	DBR 135 A	5599940130483608448	074424,672-280412,90	0,3127 0,0181	-0,705 0,014	0,790 0,018	2024,403	2	8	12,43 0,55	4,959 0,085	E10 K92	1
	DBR 135 B	5599940130483608192	074424,755-280408,07	0,4323 0,0291	-2,153 0,023	2,578 0,028							
07445-2807	DBR 138 A	5599938962252071296	074427,894-280723,49	0,2721 0,0198	-2,135 0,016	2,453 0,019	2024,349	1	4	311,03 0,35	5,122 0,020	E10	1
	DBR 138 B	5599938962252071680	074427,602-280720,09	0,1733 0,0687	-1,735 0,055	2,163 0,070							
07445-2806	DBR 139 A	5599939855605252608	074429,522-280541,01	0,6244 0,0197	-2,537 0,016	1,591 0,019	2024,349	1	4	0,58 0,23	3,491 0,021	E10	2
	DBR 139 B	5599939855605252096	074429,522-280537,46	0,6848 0,0649	-0,298 0,052	0,775 0,061							
*	DBR 343 A	5599926386587835904	074435,328-281125,68	0,5566 0,0126	-2,958 0,011	1,879 0,012	2024,457	1	4	186,37 0,25	3,540 0,013	K92	3,4
	DBR 343 B	5599926386587836288	074435,299-281129,23	0,5481 0,0164	-2,454 0,015	1,904 0,015							
07182-1311	DBR 278 A	3032944074371505536	071810,552-131117,65	0,8895 0,0259	-0,421 0,021	-0,209 0,020	2024,267	1	4	170,05 0,76	1,511 0,008	E10	1
	DBR 278 B	3032944074366711680	071810,570-131119,16	0,2912 0,0204	0,094 0,017	0,059 0,016							
07185-1317	DBR 279 A	3032939229648422400	071831,295-131720,63	0,8859 0,0454	-0,070 0,038	2,210 0,041	2024,267	1	4	285,07 0,82	1,235 0,020	E10	2
	DBR 279 B	3032939229643699456	071831,214-131720,29	0,8567 0,0527	0,470 0,037	2,335 0,046							
07188-1309	DBR 280 A	3033035398254443392	071849,838-130854,12	0,6526 0,0181	-0,151 0,016	-1,592 0,015	2024,349	1	4	131,87 0,53	2,402 0,015	E10	1
	DBR 280 B	3033035402558342272	071849,970-130855,74	0,8196 0,0309	-3,955 0,026	-1,901 0,025							
*	DBR 344 A	5447122273502097024	102922,490-352349,22	1,2222 0,0179	-9,199 0,015	-0,357 0,017	2024,440	1	4	219,21 0,48	2,121 0,021	K91	3,4
	DBR 344 B	5447122273499310592	102922,381-352350,86	1,2509 0,0229	-9,323 0,019	-0,263 0,023							
10296-3521	DBR 304 A	5447123957129284608	102937,892-352053,49	0,6151 0,0194	16,226 0,016	4,570 0,018	2024,388	5	13	234,15 0,16	4,025 0,010	E10 K91	3
	DBR 304 B	5447123957129284480	102937,624-352055,87	0,5752 0,0217	-16,263 0,018	4,576 0,021							
10298-3519	DBR 305 A	5447124300726789888	102950,313-351907,37	0,6062 0,0405	-20,755 0,032	2,072 0,034	2024,388	5	12	192,40 0,38	2,822 0,034	E10 K91	1
	DBR 305 B	5447124300726789760	102950,233-351910,19	0,4452 0,0590	-5,814 0,049	3,999 0,049							
13480-3051	DBR 180 A	6175038656585917568	134802,739-305044,60	0,9241 0,0173	-4,081 0,017	-6,377 0,018	2024,450	2	12	297,50 0,80	2,770 0,023	K91 K92 K93 Q63	3
	DBR 180 B	6175038656585917696	134802,550-305043,32	0,9371 0,0207	-4,630 0,021	-5,983 0,021							
15485+2015	DBR 320 A	1204105905482482048	154828,302+201442,85	1,6502 0,0137	3,282 0,012	-5,769 0,013	2024,446	2	12	232,49 0,37	2,108 0,020	F65 Z24	1
	DBR 320 B	1204105905482054912	154828,186+201441,55	1,5611 0,0273	2,762 0,024	-5,231 0,028							

Description de la Table 3

Col.1, Identifiant WDS, * couple non répertorié.

Col.2, Désignation : découvreur et numéro dans le catalogue WDS

Col.3, Identifiant dans le catalogue GAIA-DR3

Col.4, Date des observations

Col.5, Coordonnées équatoriales et incertitudes des composantes de chaque coupe à la date des observations

Col.6, Coordonnées polaires mesurées lors des observations, date, angle de position et séparation angulaire et incertitudes

Col.7, Date des premières mesures fiables de chaque couple.

Col.8, Coordonnées polaires précises les plus anciennes fournies par le WDS, date, angle de position et séparation angulaire et leurs incertitudes ou à défaut coordonnées polaires calculées à partir des coordonnées équatoriales J2016,000 fournies par GAIA-DR3 à l'aide du logiciel WDSTOOL

Col.9, Écarts entre les coordonnées polaires mesurées à partir des observations et les coordonnées polaires précises les plus anciennes fournies par le WDS ou à défaut calculées à partir des coordonnées équatoriales J2016,000 fournies par GAIA-DR3 à l'aide du logiciel WDSTOOL

Col.10, Intervalle en années entre les observations et les plus anciennes données fiables

Col.11, Mouvement relatif (θ) en millièmes de degré (m°) par an et mouvement relatif (ρ) en millièmes de seconde de degré (mas) par an.

Les écarts mesurés sur des durées très courtes au regard des très longues périodes orbitales de ces binaires sont très faibles et ne paraissent pas significatifs compte tenu des incertitudes de mesures. La grande qualité des données astrométriques de Gaia permet d'identifier les couples physiques. Pour une étoile binaire, le mouvement propre à court terme inclut en plus la composante tangentielle de sa vitesse orbitale. Cette dernière évoluant avec le temps au cours de la période orbitale du système, un écart apparaît entre les mouvements propres mesurés à court terme et sur le long terme de l'étoile, en raison de la courbure de sa trajectoire dans le ciel. La différence entre les mouvements propres à court terme et à long terme, est donc un indicateur efficace et sensible pour détecter les étoiles non solitaires, car elle est une approximation de la vitesse orbitale du photo-centre du système autour de son centre de masse (Kervella, P. et al. 2021)[32]. Ces différences sont d'autant plus mesurables que les périodes orbitales sont courtes ce qui n'est pas le cas des couples étudiés ici.

4 Photométrie

Le principal objectif de cette partie est de déterminer la séparation angulaire minimale pour laquelle les mesures photométriques des composantes des couples observés sont réalisables avec une bonne précision. Je détermine d'abord les profils photométriques des couples observés afin de choisir les cercles d'ouverture les mieux adaptés pour faire les mesures photométriques.

4.1 Profils photométriques des couples étudiés

Les profils photométriques de chaque paire étudiée sont obtenus avec l'outil « Graph » du logiciel Subaru Image Processor Makali'i [8] comme le montre par exemple la Figure 4 (Partie 2) : profils en bande SDSS r' suivant une coupe passant par les photo-centres des deux composantes de DBR 138, DBR 121, DBR 320 et DBR 279.

4.2 Détermination des rayons des cercles d'ouverture

Je pratique la photométrie d'ouverture à 3 cercles. Le premier cercle de rayon R_1 correspond à l'ouverture de mesure, il entoure l'étoile mesurée et comprend également du fond de ciel. L'espace entre le premier et le deuxième cercle est vide, il délimite l'anneau de fond de ciel ou anneau extérieur (compris entre les rayons R_2 et R_3) où l'on mesure le fond de ciel. Le principe de la photométrie d'ouverture consiste à mesurer l'intensité du fond de ciel dans l'anneau extérieur correspondant à la surface $\pi(R_3^2 - R_2^2)$. On calcule alors son intensité correspondante proportionnellement à la surface πR_1^2 et on la soustrait à l'intensité totale étoile-fond de ciel mesurée dans la première ouverture ce qui donne l'intensité de l'étoile :

$$I_{\text{étoile}} = I_{\text{totale}} - \left(\frac{\pi R_1^2}{\pi(R_3^2 - R_2^2)} \right) I_{\text{anneau ext.}}$$

Le choix de plusieurs étoiles de référence améliore la précision des mesures en moyennant l'intensité du fond de ciel.

Le choix des cercles d'ouverture est effectué en suivant les recommandations de l'AAVSO (American Association of Variable Observers) [33] à partir de la mesure de la largeur à mi-hauteur FWHM des étoiles sur les images. Mais dans notre cas de la mesure photométrique des composantes d'étoiles doubles, les rayons de ces cercles doivent être adaptés à la configuration des systèmes étudiés qui contraignent fortement ce choix (éclat, séparation angulaire et environnement stellaire). Je présente l'illustration du choix de ces cercles dans deux cas très différents (Figures 11 et 12)

Table 3. Évolution des binaires potentielles observées

Identifiant WDS	Découv. Comp	Identifiant Gaia-DR3	Date obs. Jaaaa,aaa	Coord. équat. Obs.		Coord. pol. Obs.		Date 1ères obs. Jaaaa,aaa	Coord. pol. Cat.		Écarts		Int ans	Mvt rel.	
				A.D. e.A.D. hhmmss,sss	DE. e.DE. ±ddmmss,ss	θ e. θ °	ρ e. ρ "		θ e. θ °	ρ e. ρ "	$\Delta\theta$ e. $\Delta\theta$ °	$\Delta\rho$ e. $\Delta\rho$ "		m ² /an	mas/an
*	DBR343A	5599926386587835904	2024,457	074435,328 0,000	-281125,60 0,00	186,37 0,25	3,540 0,013	2016	186,08 nr	3,566 nr	+0,29 0,25	-0,026 0,013	8,5	34	-3,1
	DBR343B	5599926386587836288		074435,300 0,008	-281128,90 0,00										
*	DBR344A	5447122273502097024	2024,44	102922,483 0,010	-352349,23 0,05	219,21 0,48	2,121 0,021	2016	219,16 nr	2,110 nr	+0,05 0,48	+0,011 0,021	8,4	6	1,3
	DBR344B	5447122273499310592		102922,395 0,017	-352350,50 0,22										
10296-3521	DBR304A	5447123957129284608	2024,388	102937,854 0,005	-352053,42 0,04	234,15 0,16	4,025 0,010	1999,112	233,40 1,0	3,999 0,079	+0,75 1,01	+0,026 0,080	25,3	30	1
	DBR304B	5447123957129284480		102937,592 0,004	-352055,74 0,05										
13480-3051	DBR180A	6175038656585917568	2024,45	134802,730 0,000	-305044,60 0,10	297,50 0,80	2,770 0,023	1999,2	298,40 0,60	2,757 0,049	-0,90 1,00	+0,013 0,054	25,3	-36	0,5
	DBR180B	6175038656585917696		134802,547 0,006	-305043,27 0,06										

4.2.1 Exemple de DBR 138 de séparation angulaire 5,122" et à fort Δm (≈ 4 mag)

Le logiciel IRIS [34] permet de mesurer la largeur à mi-hauteur FWHM du profil de l'image stellaire, par exemple pour DBR 138 A, j'obtiens FWHM=6,34 pix ce qui donne d'après les recommandations de l'AAVSO R1=22 pix, R2=32 pix et R3, le plus grand possible en tenant compte de l'environnement stellaire de DBR 138, R3=44 pix (voir Figure 10). J'utilise le logiciel Subaru Image Processor Makali'i pour la photométrie [8]. Il faut choisir des étoiles de référence (Debackère A., 2024) [2] dont les magnitudes sont bien connues. Après discussion avec Jean-Baptiste Marquette [35], il semble préférable d'utiliser les magnitudes fournies par Gaia plutôt que celles du catalogue APASS DR10 [36]. Les catalogues "Gaia DR3 Part 4. Variability" (Gaia Collaboration, 2022) [37], Gaia DR3. Cross match with known variable objects (Gavras et al., 2023) [38] et "Gaia DR3 Part 6. Performance verification Synthetic photometry" (Gaia Collaboration, 2022) [39] permettent d'éliminer les étoiles variables du champ observé pour les deux premiers et de choisir des étoiles de référence dont les magnitudes sont appropriées pour le troisième. J'ai retenu 5 étoiles de référence notées E1, E2, E3, E4 et E5 qui figurent à la Table 4. Il faut donc adapter le premier cercle en le réduisant de façon à exclure la composante B, l'observation du profil aide au choix de ce rayon, j'ai choisi R1=12 pix. Le rayon du cercle R3, contraint notamment par l'environnement stellaire de l'étoile de référence E3 peut être maintenu à 44 pix. La Figure 11 montre dans une image en bande SDSS r' les 3 cercles d'ouverture de rayons 12, 32, 44 pixels centrés sur chaque étoile de référence et sur DBR 138 A. Les magnitudes sont issues de la spectrophotométrie dans Gaia. Elles sont d'indice de qualité 1 dans les deux bandes spectrales

SDSS r' et i'. Les incertitudes sont données sur les flux F. Je calcule celles sur les magnitudes en appliquant la formule :

$$\sigma_{\text{mag}} = (2,5/\ln(10)) \cdot (\sigma_F/F)$$

Description de la Table 4

Col.1, Champs des étoiles étudiées

Col.2, Index des étoiles de référence pour la photométrie dans chaque champ

Col.3, Identifiant de l'étoile de référence dans GAIA-DR3

Col.4, Coordonnées équatoriales J2000,0 de l'étoile de référence fournies par le catalogue Gaia-DR3

Col.5, Magnitude en bande SDSS g' et incertitude calculée à partir du flux fourni par le catalogue GAIA-DR3 Part 6 Synthetic Photometry

Col.6, Magnitude en bande SDSS r' et incertitude calculée à partir du flux fourni par le catalogue GAIA-DR3 Part 6 Synthetic Photometry

Col.7, Magnitude en bande SDSS i' et incertitude calculée à partir du flux fourni par le catalogue GAIA-DR3 Part 6 Synthetic Photometry

Col.8, Magnitude en bande Bessel B et incertitude calculée à partir du flux fourni par le catalogue GAIA-DR3 Part 6 Synthetic Photometry

Col.9, Magnitude en bande Bessel V et incertitude calculée à partir du flux fourni par le catalogue GAIA-DR3 Part 6 Synthetic Photometry.

Dans cette figure, la ligne surlignée en bleu ainsi que la ligne précédente et la ligne suivante indique le numéro de la dernière étoile pointée (ici « 6 » correspond à DBR 138 A) et les résultats des mesures et calculs effectués par le logiciel suivant la procédure de la photométrie d'ouverture (voir Partie 4.2).

Table 4. Étoiles de référence pour la photométrie

Identifiant WDS	Ét. réf.	Catalogue Gaia-DR3		Mag. Sloan SDSS calculées			Mag. Bessel calculées	
		Identifiant	AD : hhmmss,sss DE : ±ddmmss,ss	g' e_g'	r' e_r'	i' e_i'	B e_B	V e_V
DBR 280	E1	3033035436914995712	071851,802 -130803,48			15,0882 0,0022		
	E2	3033034681000754048	071854,080 -130838,51			14,7352 0,0018		
	E3	3033034577921544448	071855,411 -130922,27			14,8053 0,0019		
	E4	3033034543561814272	071851,449 -130930,52			13,7460 0,0013		
	E5	3033034474842344192	071853,718 -131012,50			13,9123 0,0015		
DBR 120 DBR 121 DBR 123 DBR 124 DBR 129 DBR 135 DBR 138 DBR 139 DBR 343	E1	5599938996611797376	074429,900 -280628,72		15,4191 0,0023	14,9987 0,0019	17,1107 0,0068	15,8545 0,0027
	E2	5599938992310310912	074428,831 -280658,86		15,5728 0,0025	15,3449 0,0023	16,5663 0,0046	15,8146 0,0026
	E3	5599938962252075904	074426,504 -280738,06		14,3356 0,0017	14,1205 0,0014	15,1677 0,0029	14,5125 0,0020
	E4	5599938515575486208	074425,577 -280828,86		14,8794 0,0018	14,6851 0,0017	15,6663 0,0030	15,0508 0,0020
	E5	5599938687374159232	074432,463 -280836,13		14,9195 0,0019	14,7448 0,0016	15,7522 0,0030	15,1207 0,0020
DBR 304 DBR 305	E1	5447124335086530688	102956,581 -351831,03	16,4974 0,0046	15,8797 0,0031		16,9530 0,0060	16,1522 0,0037
	E2	5447124335086530944	102955,571 -351814,93	16,7489 0,0047	16,1498 0,0034		17,2088 0,0065	16,4045 0,0038
	E3	5447124335086531200	102953,999 -351759,97	17,1798 0,0059	16,6279 0,0044		17,6071 0,0083	16,8688 0,0050
	E4	5447124575604582016	102947,923 -351744,85	16,3387 0,0039	15,9664 0,0032		16,6870 0,0051	16,1306 0,0034
	E5	5447124575604580736	102947,206 -351811,00	16,5401 0,0046	15,9850 0,0035		16,9063 0,0061	16,2262 0,0037
	E6	5447124506885220864	102948,305 -351833,51	16,1976 0,0041	15,5285 0,0028		16,6871 0,0059	15,8143 0,0032

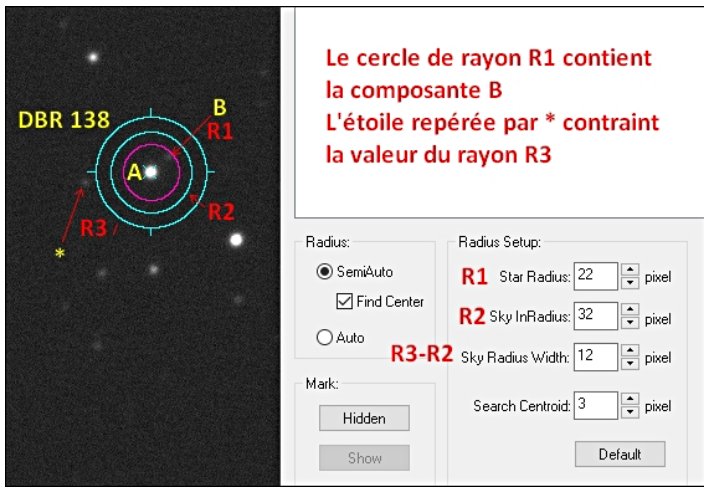


Figure 10 : Cercles d'ouverture « théoriques » définis à partir de la mesure de la largeur à mi-hauteur FWHM du profil de l'image de DBR 138 A.

Je répète cette démarche pour la composante B de DBR 138. Le rayon du premier cercle d'ouverture est ramené à R1=8 pix, R2=32 pix et R3=44 pix. J'utilise E1 et E2 comme étoiles de référence.

4.2.2 Exemple DBR 121 de séparation angulaire 5,105" et à faible Δm (<1 mag)

La valeur moyenne de FWHM mesurée avec IRIS est de 6,29 pix, les rayons des cercles calculés en suivant les recommandations de l'AAVSO sont R1=22 pix, R2=31 pix. Il faut adapter le rayon du premier cercle d'ouverture afin d'éviter la composante B de DBR 121, j'ai choisi R1=10 pix. Le rayon R3 est fixé à 43 pix en tenant compte de l'environnement stellaire de la paire DBR 121 et des 5 étoiles de référence précédentes notamment E3. La Figure 12 montre cette configuration. Les mêmes cercles sont utilisés pour la mesure des deux composantes A et B de la paire DBR 121. Dans cette figure, la ligne surlignée en bleu ainsi que la ligne précédente et la ligne suivante indique le numéro de la dernière étoile pointée (ici « 6 » correspond à DBR 121 A) et les résultats des mesures et calculs effectués par le logiciel suivant la procédure de la photométrie d'ouverture (voir Partie 4.2).

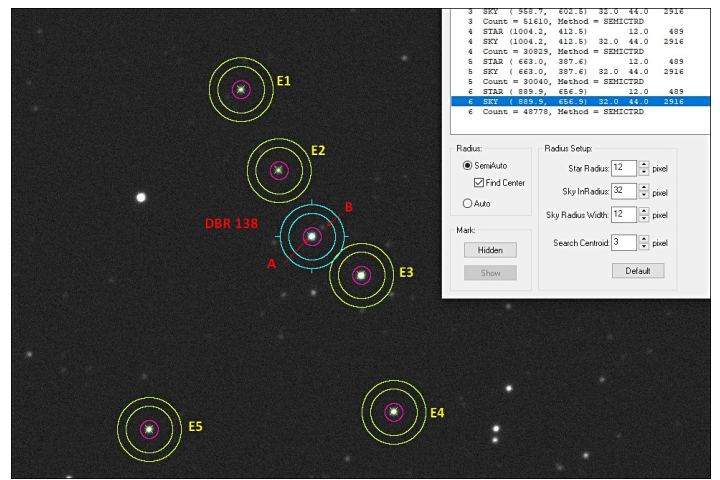


Figure 11 : Cercles d'ouverture « adaptés » à la configuration de DBR 138, des étoiles de référence et de leur environnement stellaire

4.3 Mesures

J'effectue ce travail de détermination des bons rayons R1, R2 et R3 pour toutes les paires étudiées par ordre de séparation angulaire décroissante jusqu'à trouver la limite de séparation angulaire où l'on peut faire les mesures photométriques. La méthode de calcul des magnitudes instrumentales standards non corrigées de l'extinction et de leurs incertitudes est décrite dans mon précédent article (Debackère, A., 2024) [2]. Les résultats de ces mesures figurent dans les Tables 5a (Télescope de 2 m) et 5b (Télescopes de 1m) qui présentent également les écarts aux données du catalogue GAIA-DR3 et en rouge les écarts lorsqu'ils sont $\geq 0,100$ mag.

Description des Tables 5(a et b)

Col.1, Désignation: découvreur, numéro et composante dans le catalogue WDS

Col.2, Séparation angulaire mesurée en secondes de degré

Col.3, Séparation angulaire mesurée en pixels

Col.4, Magnitude standard observée

Col.5, Incertitude sur la magnitude standard observée

Col.6, Magnitude catalogue calculée à partir du flux fourni par

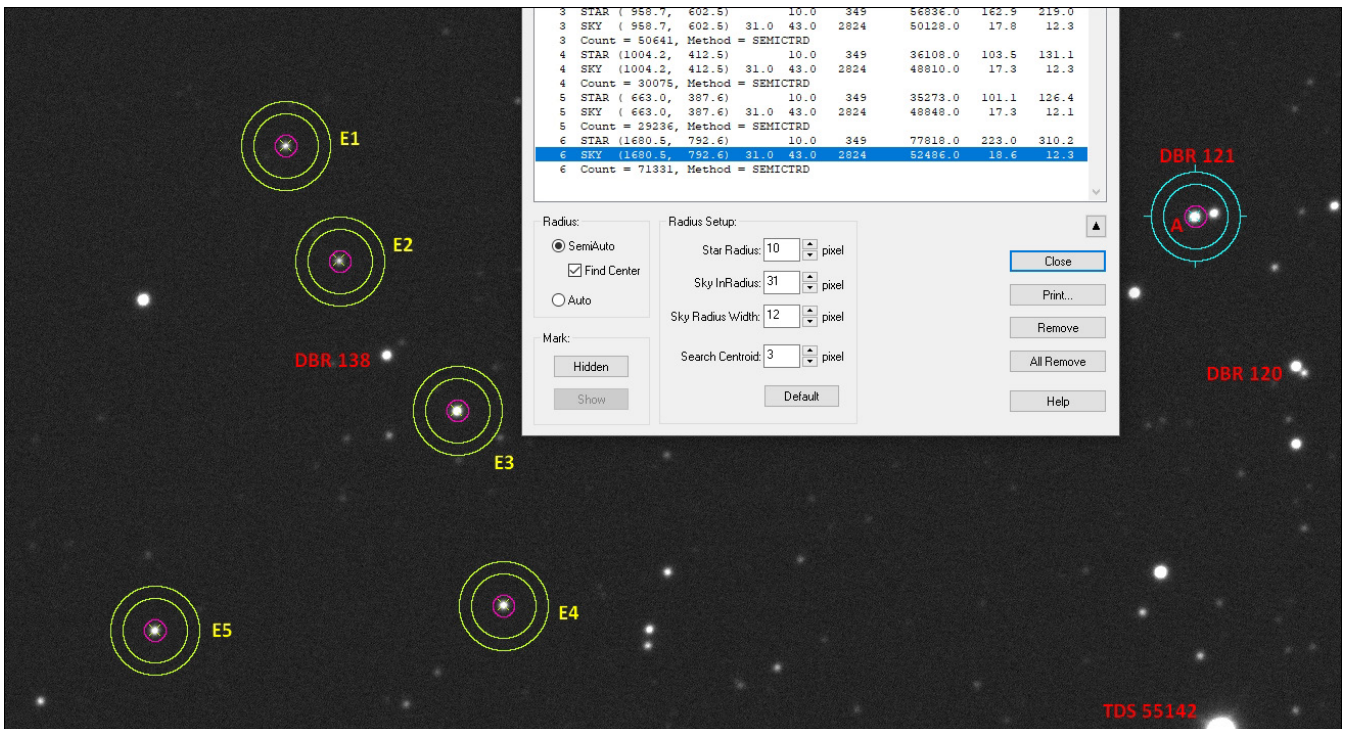


Figure 12 : Cercles d'ouverture « adaptés » à la configuration de DBR 121, des étoiles de référence et de leur environnement stellaire

Table 5a. Mesures photométriques sur les images obtenues au télescope de 2m FTS (E10), les écarts lorsqu'ils sont $\geq 0,100$ mag sont écrits en rouge

Identifiant WDS	Sép. "	Sép. pix	mag _{std}	e_mag _{std}	mag _{cat}	e_mag _{cat}	O-C	e_(O-C)
DBR 138 A	5,122	19	r' = 14,399	0,025	14,409	0,002	-0,010	0,025
			i' = 14,128	0,059	14,147	0,001	-0,019	0,059
DBR 138 B			r' = 17,395	0,026	17,489	0,007	-0,094	0,027
			i' = 16,671	0,048	16,753	0,005	-0,082	0,048
DBR 121 A	5,105	19	r' = 13,955	0,024	13,973*	0,002	-0,018	0,024
			i' = 13,765	0,052	13,790*	0,001	-0,025	0,052
DBR 121 B			r' = 14,519	0,026	14,539	0,002	-0,020	0,026
			i' = 14,366	0,052	14,373	0,002	-0,007	0,052
DBR 135 A	4,959	18	r' = 14,556	0,021	14,591	0,002	-0,035	0,021
			i' = 13,836	0,057	13,853	0,001	-0,017	0,057
DBR 135 B			r' = 15,425	0,024	15,440	0,002	-0,015	0,024
			i' = 15,256	0,052	15,276	0,002	-0,020	0,052
DBR 124 A	4,836	18	r' = 14,992	0,031	15,003	0,002	-0,011	0,031
			i' = 14,811	0,061	14,790	0,002	+0,021	0,061
DBR 124 B			r' = 17,077	0,086	17,121	0,005	-0,044	0,086
			i' = 16,813	0,055	16,732	0,004	+0,081	0,055
DBR 304 A	4,032	15	r' = 14,384	0,010	14,407	0,002	-0,023	0,010
			g' = 14,783	0,017	14,800	0,003	-0,017	0,017
DBR 304 B			r' = 14,666	0,010	14,708	0,002	-0,042	0,010
			g' = 15,072	0,017	15,097	0,003	-0,025	0,017
DBR 129 A	3,491	13	r' = 15,380	0,043	15,430	0,002	-0,005	0,043
			i' = 15,170	0,030	15,214	0,002	-0,044	0,030
DBR 129 B			r' = 15,912	0,035	15,950	0,004	-0,038	0,035
			i' = 15,621	0,036	15,666	0,003	-0,045	0,031
DBR 139 A	3,491	13	r' = 14,729	0,027	14,734	0,002	-0,005	0,027
			i' = 14,576	0,030	14,580	0,002	-0,004	0,030
DBR 139 B			r' = 16,919	0,029	17,077	0,006	-0,158	0,029
			i' = 16,658	0,023	16,765	0,005	-0,107	0,024
DBR 123 A	3,041	11	r' = 12,402 (0)	0,031	12,418	0,001	-0,016	0,031
			i' = 12,276	0,034	12,285	0,001	-0,009	0,034
DBR 123 B			r' = 15,256 (0)	0,019	15,555	0,010	-0,299	0,021
			i' = 15,120	0,068	15,274	0,006	-0,157	0,068
DBR 305 A	2,821	10	r' = 16,019	0,032	16,050	0,004	-0,031	0,032
			g' = 16,534	0,045	16,532	0,005	+0,002	0,045
DBR 305 B			r' = 16,596	0,071	16,711	0,008	-0,115	0,071
			g' = 17,181	0,058	17,278	0,010	-0,097	0,059
DBR 120 A	2,734	10	r' = 13,906 (0)	0,032	13,924	0,001	-0,018	0,032
			i' = 13,869 (0)	0,024	13,881	0,001	-0,012	0,024
DBR 120 B			r' = 15,375	0,021	15,474	0,004	-0,099	0,021
			i' = 15,210	0,026	15,253	0,004	-0,043	0,026
DBR 280 A	2,402	9	i' = 13,263	0,022	13,139 (0)	0,002	+0,124	0,022
DBR 280 B			i' = 14,490	0,015	14,368	0,003	+0,122	0,015

le catalogue GAIA-DR3 Part 6 Synthetic Photometry

Col.7, Incertitude sur la magnitude catalogue calculée à partir du flux fourni par le catalogue GAIA-DR3 Part 6 Synthetic Photometry

Col.8, Écart entre la magnitude standard observée et la magnitude catalogue

Col.9, Incertitude sur l'écart entre la magnitude standard observée et la magnitude catalogue.

La limite de séparation angulaire permettant de faire les mesures photométriques des deux composantes d'étoiles

doubles avec les télescopes Faulkes de 2m et avec les télescopes de 1m du réseau LCO est de l'ordre de 3,5" à 4". Les mesures photométriques sont plus précises avec les télescopes Faulkes de 2m comme on pouvait s'y attendre pour des télescopes de plus grands diamètre.

Parmi ces résultats, seule la paire DBR 304 AB ($\Delta m \approx 0,3$ mag), véritable double potentielle, possède des mesures photométriques en bandes SDSS r' et g' communes aux deux classes de télescopes utilisés permettant la comparaison. Je note une très faible différence entre les mesures de magnitude

Table 5b. Mesures photométriques sur les images obtenues aux télescopes de 1m, les écarts lorsqu'ils sont $\geq 0,100$ mag sont écrits en rouge

Identifiant WDS	Sép. "	Sép. pix	mag _{std}	e_mag _{std}	mag _{cat}	e_mag _{cat}	O-C	e_(O-C)
DBR 121 A	5,071	13	B=14,774	0,042	14,790	0,002	-0,016	0,042
			V=14,135	0,046	14,167	0,002	-0,032	0,046
DBR 121 B			B=15,279	0,043	15,332	0,003	-0,053	0,043
			V=14,684	0,049	14,724	0,002	-0,040	0,049
DBR 135 A	4,956	13	B=16,226	0,080	16,245	0,004	-0,019	0,080
			V=15,590	0,070	15,613	0,002	-0,023	0,070
DBR 135 B			B=16,829	0,102	16,805*	0,007	-0,015	0,024
			V=15,192	0,049	15,179	0,003	+0,013	0,049
DBR 304 A	4,021	10	B=15,106	0,055	15,162	0,003	-0,056	0,055
			V=14,541	0,049	14,578	0,002	-0,037	0,049
			r'=14,378	0,074	14,407	0,002	-0,029	0,074
			g'=14,777	0,065	14,800	0,003	-0,023	0,065
DBR 304 B			B=15,354	0,050	15,455	0,003	-0,101	0,050
			V=14,813	0,052	14,875	0,002	-0,062	0,052
			r'=14,651	0,074	14,708	0,002	-0,057	0,074
			g'=15,023	0,065	15,097	0,003	-0,074	0,065
DBR 343 A	3,540	9	B=14,136	0,041	14,205	0,002	-0,069	0,041
			V=13,671	0,040	13,754	0,002	-0,083	0,040
DBR 343 B			B=14,916	0,067	14,954	0,003	-0,038	0,067
			V=14,391	0,027	14,473	0,002	-0,082	0,027
DBR 129 A	3,428	9	B=16,291	0,061	16,346	0,004	-0,055	0,061
			V=15,631	0,045	15,649	0,003	-0,018	0,045
DBR 129 B			B=16,718	0,063	16,929	0,006	-0,211	0,063
			V=15,997	0,043	16,173	0,004	-0,176	0,043

en bandes r' et g' de la composante principale A avec les 2 types d'instruments (T2m/T1m) de l'ordre de 0,006 mag. Pour la composante secondaire B, je note une faible différence en bande r' de 0,015 mag et un peu plus importante en bande g' de 0,049 mag.

5 Étude des paires potentiellement physiques mesurées photométriquement

Parmi les 4 étoiles doubles potentiellement physiques identifiées dans la Partie 3, seules les paires DBR 304 et DBR 343 ont pu être mesurées photométriquement. La caractérisation des étoiles au moyen des mesures photométriques nécessite d'abord de déterminer les magnitudes stellaires intrinsèques en corrigeant les magnitudes observées données dans les tables 5a et 5b des effets de l'atmosphère terrestre (extinction atmosphérique) puis des effets du milieu interstellaire (extinction interstellaire). La Figure 9b (Partie 3) générée par le logiciel ALADIN [27] visualise les mouvements propres.

5.1 Correction des effets de l'atmosphère terrestre

Effectivement, les mesures photométriques effectuées depuis le sol sont biaisées par l'absorption du rayonnement stellaire par l'atmosphère terrestre qui dépend à la fois des conditions d'observations (la hauteur de l'étoile au moment de l'observation qui fixe la masse d'air) et de la couleur de l'étoile.

5.1.1 Calcul des corrections d'extinction atmosphérique.

Je reprends la démarche décrite dans mes deux précédents articles (Debackère A., 2023) [1] et (Debackère A., 2024) [2] concernant les corrections d'extinction atmosphérique.

L'extinction atmosphérique "k" se décompose en deux termes k' et k". Le terme de premier ordre k' est lié à la masse d'air X et insensible à la couleur. Le second k" dépend de la couleur.

La correction d'extinction du premier ordre est égale à $k'_\lambda \cdot \Delta X$ avec k'_λ coefficient d'extinction du premier ordre et ΔX masse d'air différentielle entre les masses d'air de l'étoile de référence et de l'étoile observée.

La correction d'extinction du second ordre ou de couleur est égale à $k''_\lambda \cdot X_{\text{moy}} \cdot E(B-V)$ avec k''_λ coefficient d'extinction de second ordre. Dans cette étude, je suppose que pour chaque nuit les conditions atmosphériques ne changent pas au cours de l'acquisition des images (durée d'acquisition courte). Les étoiles standards de référence et la cible sont dans le même champ, la masse d'air traversée est donc la même, la masse d'air différentielle ΔX est nulle. Enfin, je suppose, puisque le champ est petit (26' x 26') pour les télescopes de 1m utilisés, que l'extinction est uniforme.

- Correction d'extinction du premier ordre dans les bandes B et V. Nous avons $\Delta X=0$ donc cette correction est nulle en bandes B et V
- Correction d'extinction du second ordre dans les bandes B et V

L'extinction du 2nd ordre dans la bande V est considérée comme nulle.

L'extinction du 2nd ordre dans la bande B s'écrit $k''_B \cdot X_{\text{moy}} \cdot E(B-V)$ où k''_B est le coefficient d'extinction sensible à la couleur. La correction différentielle s'écrit alors $k''_B \cdot X_{\text{moy}} \cdot E(B-V)$ où X_{moy} est la masse d'air moyenne durant l'observation fournie par l'observatoire au moment des observations et $E(B-V)$ la différence entre les indices de couleur instrumentaux de l'étoile cible et de l'étoile de référence. Cette correction est soustraite de la magnitude en bande B : $m_{\text{Bcor}} = m_B - k''_B \cdot X_{\text{moy}} \cdot E(B-V)$. Les valeurs de k''_B sont généralement comprises entre -0,02 et -0,04. Pour effectuer les calculs de correction de couleur, je choisis de prendre la valeur $k''_B = -0,03$. La correction d'extinction s'ajoute à

la magnitude instrumentale.

5.1.2 Magnitudes hors atmosphère en bandes B et V pour les composantes de DBR 304 et DBR 343

La mesure de magnitudes B_{std} et V_{std} des composantes et la connaissance de la masse d'air moyenne X_{moy} au moment de l'observation permettent de calculer la correction d'absorption atmosphérique et d'en déduire la valeur des magnitudes de l'étoile hors atmosphère B_{cor} et V_{cor} .

Nous avons :

$$m_{Bcor} = m_{Bstd} + k'_B + k''_B \cdot X_{moy} \cdot E(B-V) \text{ avec } k'_B = 0 \text{ et } k''_B = -0,03$$

$$\text{et } m_{Vcor} = m_{Vstd} + k'_V + k''_V \cdot X_{moy} \cdot E(B-V) \text{ avec } k'_V = 0 \text{ et } k''_V = 0$$

La Table 6 présente ces résultats

Description de la Table 6

Col.1, Désignation: découvreur, numéro et composante dans le catalogue WDS

Col.2, Magnitude standard en bande B observée et incertitude

Col.3, Masse d'air moyenne

Col.4, Indice de couleur (B-V) de la cible et incertitude

Col.5, Indice de couleur moyen (B-V) des étoiles de référence et incertitude

Col.6, Différence entre l'indice de couleur de la cible et l'indice de couleur moyen des étoiles de référence et incertitude

Col.7, correction d'extinction atmosphérique et incertitude

Col.8, magnitude en bande B corrigée de l'extinction atmosphérique et incertitude

Col.9, magnitude en bande V corrigée de l'extinction atmosphérique et incertitude

5.2 Correction de l'extinction interstellaire

La caractérisation des composantes de chacune des binaires nécessite la détermination de leurs magnitudes intrinsèques en corrigeant leurs magnitudes mesurées hors atmosphère de l'effet de l'absorption interstellaire. Celle-ci dépend de la position de l'étoile et de la distance de l'étoile et sa correction s'avère délicate à effectuer.

La magnitude intrinsèque m_0 de l'étoile s'obtient alors en corrigeant sa magnitude hors atmosphère m_{cor} (déterminée ci-dessus) de l'extinction interstellaire notée A. Nous avons :

$$m_0 = m_{cor} - A.$$

L'extinction interstellaire en bande V est d'après la loi de l'extinction $A_V = R_V E(B-V)$ dans laquelle R est le facteur de rougissement et $E(B-V) = (B-V)_{cor} - (B-V)_0$ l'excès de couleur ou $(B-V)_{cor}$ est l'indice de couleur standard hors atmosphère et $(B-V)_0$ l'indice de couleur intrinsèque de l'étoile. La valeur de R_V communément admise est 3,1 (Cardelli et al., 1989) [40]. Comme je l'ai indiqué (Debackère A., 2024) [2] la combinaison des données de grande précision de Gaia-EDR3 et des catalogues photométriques Pan-STARRS1, SkyMapper, 2MASS et AllWISE permet d'améliorer substantiellement l'exactitude et la précision

Table 6. Calcul des magnitudes corrigées de l'extinction atmosphérique

Découv. Comp.	m_{Bstd} e_ m_{Bstd}	X_{moy}	$(B-V)_{cible}$	$(B-V)_{réf}$	$E(B-V)$ e_ $E(B-V)$	correction e_ cor	m_{Bcor} e_ m_{Bcor}	m_{Vcor} e_ m_{Vcor}
DBR 304 A	15,106 0,055	1,0417431	0,565 0,074	0,742 0,025	-0,177 0,099	0,006 0,003	15,100 0,058	14,541 0,049
DBR 304 B	15,354 0,050		0,541 0,072		-0,201 0,097	0,006 0,003	15,348 0,053	14,813 0,052
DBR 343 A	14,136 0,041	1,5496800	0,465 0,057	0,634 0,000	-0,169 0,057	0,008 0,003	14,128 0,060	13,671 0,040
DBR 343 B	14,916 0,067		0,525 0,072		-0,109 0,072	0,005 0,003	14,911 0,075	14,391 0,027

par rapport aux précédentes estimations photo-astrométriques des paramètres stellaires (Anders, F., et al., 2022) [41]. En février 2024, un nouvel article propose des cartes tridimensionnelles (3D) de l'extinction interstellaire dans les filtres V et Gaia G à moins de 2 kpc du Soleil (notre cas) très précises (Gontcharov G.A., 2024) [42]. Les auteurs ont produit ces cartes en se basant sur les parallaxes Gaia DR3 et sur la photométrie Gaia, Pan-STARRS1, SkyMapper, 2MASS, et WISE pour environ 100 millions d'étoiles. Ils ont porté une attention particulière à l'espace situé à moins de 200 pc du Soleil et aux hautes latitudes galactiques, régions où les estimations de l'extinction ont jusqu'à présent une grande incertitude relative. Les auteurs ont montré que les cartes présentées sont parmi les meilleures actuellement en termes de quantité de données, de taille de l'espace, de résolution, de précision et autres propriétés. Au sujet de l'utilisation des données d'Anders (2022) de l'extinction/rougissement, l'article de Gontcharov (2024) prend en compte une erreur systématique dans les estimations d'Anders (2022) – voir les Figures 1 et 2 de cet article. Cette erreur est la raison pour laquelle Anders (2022) n'a pas converti ses estimations d'extinction/rougissement en carte. J'ai contacté George Gontcharov qui a étudié le cas des deux paires DBR 304 AB et DBR 343 AB en utilisant ses cartes d'extinction ainsi que le site SFD98 [43] et la carte GSZ19 (Green, 2019) [44].

Concernant la première paire DBR 304 AB, la distance est

d'environ 1600 parsecs (Anders, F., et al., 2022), pour laquelle la carte 3D de Gontcharov donne $E(B-V) = 0,100 \pm 0,005$, c'est-à-dire $A_V = 0,32 \pm 0,01$ mag ($R_V \approx 3,2$ puisque ce sont des étoiles plutôt rouges avec la couleur GBP-GRP = 0,8) pour n'importe laquelle des 3 lignes de visée près de cette paire. De plus, le SFD98 donne le même $E(B-V) = 0,100 \pm 0,005$. Nous avons donc un cas très robuste, l'estimation du rougissement/extinction est bien établie (il n'y a pas d'estimation à partir de la carte GSZ19). Remarquons que cette paire semble être derrière la couche de poussière galactique et, par conséquent, la distance étant supérieure à 1300 pc son extinction/rougissement ne change pas. C'est pourquoi l'estimation précise de sa distance n'est pas importante car son $E(B-V)$ est le même pour toute distance supérieure à 1300 pc (Figure 13).

Alors que la seconde paire DBR 343 AB apparaît clairement à l'intérieur de la couche de poussière galactique étant donné la forte augmentation du rapport extinction/rougissement liée à la distance, l'estimation de cette dernière affectant fortement la détermination du rapport extinction/rougissement. Compte tenu de la distance moyenne (1700 pc) de cette paire (Anders, F., et al., 2022), la carte de Gontcharov (2024) donne $A_V = 0,98$ avec une grande incertitude (environ 0,05) due à l'incertitude sur la distance.

Les estimations d'Anders (2022) d'extinction/rougissement coïncident avec celles de Gontcharov pour la première paire et

s'accordent également pour l'étoile DBR 343 A ($A_V = 0,91$ et $A_V = 0,98$), mais ne s'accordent pas pour l'étoile DBR 343 B ce que Gontcharov n'explique pas (ce n'est pas dû à l'erreur systématique mentionnée ci-dessus, puisque l'erreur systématique maximale n'est que de 0,04 mag). Il suggère qu'il peut s'agir d'une influence d'un gradient d'extinction/rougissement très élevé dans un nuage. La séparation angulaire de la deuxième paire est si petite que les deux étoiles sont proches de la même et seule ligne de visée de la carte de Gontcharov. Par conséquent, une estimation autour de $A_V \approx 1$ semble être la meilleure. Nous avons un rougissement $E(B-V) = 0,32$ avec $R_V = 3,1$ (Figure 14).

La connaissance de A_V et de $(B-V)_{cor}$ permet de calculer l'indice de couleur intrinsèque $(B-V)_0$ de l'étoile. La magnitude intrinsèque en bande V de l'étoile est $V_0 = V - A_V$ et sa magnitude intrinsèque en bande B est $B_0 = (B-V)_0 + V_0$. J'ai déterminé les magnitudes apparentes en bande V corrigées des extinctions

atmosphériques et interstellaires. Il est donc possible de calculer les magnitudes absolues correspondantes grâce à l'équation de la distance : $m - M_V = 5 \log_{10} d - 5$. Ces résultats sont consignés dans la Table 7.

6 Types spectraux et classes de luminosité pour les composantes de DBR 304 et DBR 343

La magnitude absolue versus l'indice de couleur du diagramme Hertzsprung-Russell indique que les 4 étoiles étudiées appartiennent à la séquence principale de classe V. La table compilé par E. Mamajek pour les étoiles naines de la séquence principale [45] permet de déterminer à partir de l'indice de couleur, de la température effective et de la magnitude absolue d'une étoile son type spectral (Table 7). La Figure 15 qui utilise le diagramme de Hertzsprung-Russell publié dans Wikipédia [46] montre les composantes des deux paires DBR 304 et DBR 343 sur la séquence principale.

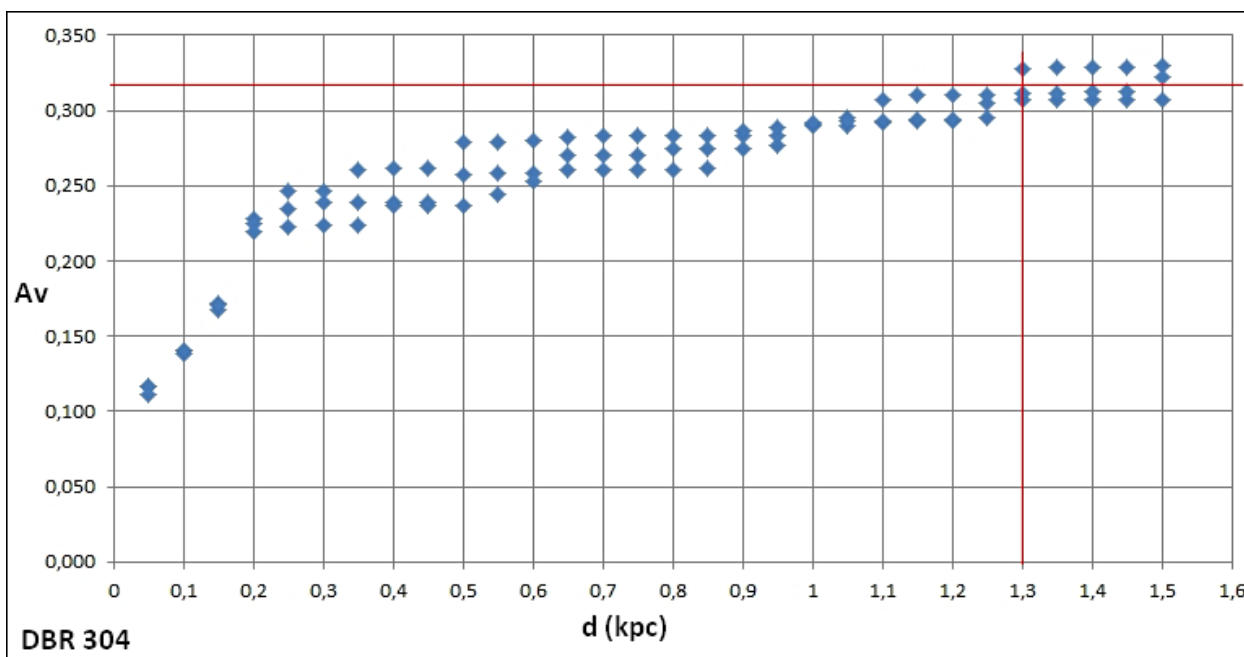


Figure 13 : Relation entre l'extinction A_V et la distance d pour un objet situé au-delà de la couche de poussière galactique. Crédit Gontcharov G.

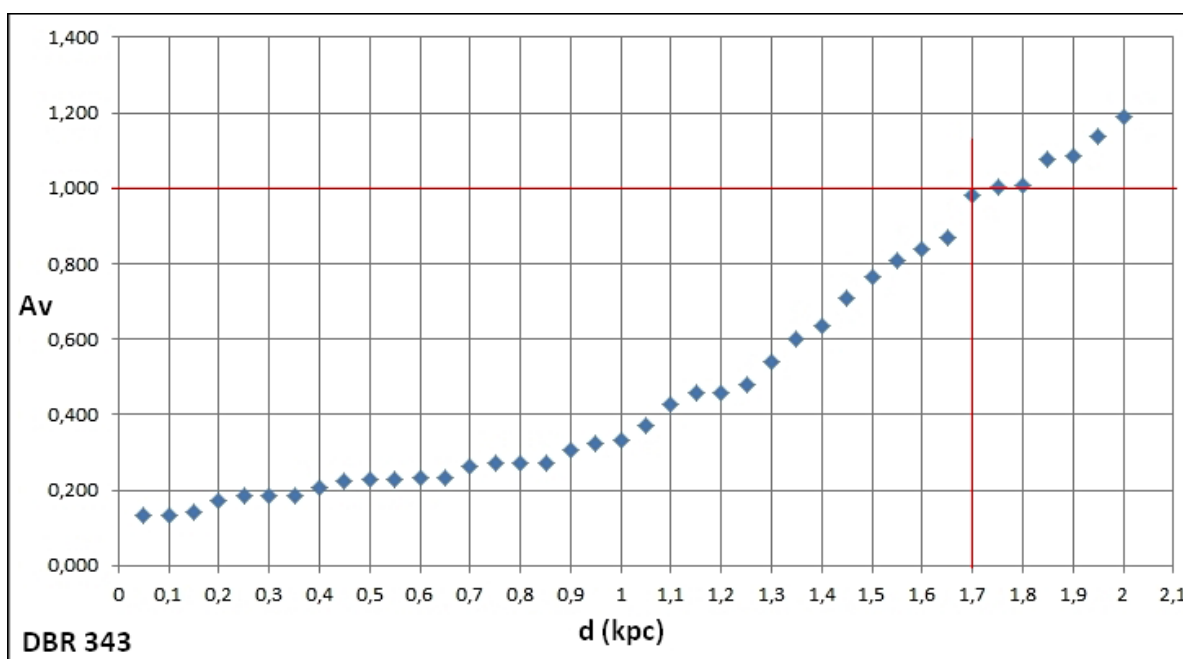


Figure 14 : Relation entre l'extinction A_V et la distance d pour un objet situé dans la couche de poussière galactique. Crédit Gontcharov G.

Table 7. Détermination des magnitudes corrigées de l'extinction interstellaire, des distances, des magnitudes absolues, des températures effectives et des masses.

Découv. Comp.	AV_{moy} $e_{AV_{\text{moy}}}$	V_0 e_{V_0}	$(B-V)_0$ $e_{(B-V)_0}$	$Sp(B-V)_0$	B_0 e_{B_0}	d e_d pc	M_V e_{M_V}	$Sp(M_V)$	T_{eff} $e_{T_{\text{eff}}}$ K	$Sp(T_{\text{eff}})$	m e_m m_{\odot}
DBR 304 A	0,32 0,01	14,221 0,050	0,456 0,079	F5	14,677 0,094	1521 73	3,31 0,15	F5	6106 333	F8	1,10 0,18
DBR 304 B		14,493 0,053	0,432 0,077	F5	14,925 0,094	1595 76	3,48 0,16	F5	6263 262	F7	1,14 0,11
DBR 343 A	1,00 0,05	12,671 0,064	0,134 0,088	A4	12,805 0,109	1649 35	1,58 0,11	A3	7820 575	A7	1,63 0,21
DBR 343 B		13,391 0,057	0,197 0,096	A6	13,588 0,111	1750 66	2,18 0,14	A7	6749 115	F3	1,33 0,03

Description de la Table 7

Col.1, Désignation: découvreur, numéro et composante dans le catalogue WDS

Col.2, Extinction interstellaire en bande V de chaque composante fournie par Gontcharov et incertitude

Col.3, Magnitude en bande V corrigée de l'extinction interstellaire et incertitude

Col.4, Indice de couleur (B-V) corrigé de l'extinction interstellaire et incertitude

Col.5, Type spectral obtenu à partir de l'indice de couleur dans la table de Mamajek

Col.6, Magnitude en bande B corrigée de l'extinction interstellaire et incertitude

Col.7, Distance en parsecs fournie par Anders et incertitude

Col.8, Magnitude absolue de l'étoile et incertitude

Col.9, Type spectral obtenu à partir de la magnitude absolue dans la table de Mamajek

Col.10, Température effective fournie par Anders et incertitude

Col.11, Type spectral obtenu à partir de la température effective dans la table de Mamajek

Col.12, Masse de l'étoile fournie par Anders et incertitude

7 Conclusion

Dans le cas présent, malgré le petit échantillon d'étoiles doubles utilisé (18 couples sélectionnés et 2 découvertes), la durée limitée des observations (4 nuits au T2m et 6 nuits aux T1m) effectuées dans des conditions très moyennes de seeing ($\approx 1,6''$), il convient de dire que l'objectif d'obtenir une estimation des limites de séparation des composantes pour effectuer des mesures astrométriques et photométriques correctes sur des images à grand champ, a été atteint. **Avec les télescopes utilisés de 1 m et 2 m du réseau LCO, on peut mesurer la position relative des composantes pour des couples de séparation > 1" et mesurer les magnitudes individuelles des composantes pour des couples de séparation > 4" avec une différence de magnitude atteignant ≈ 4 mag.**

Un télescope de 2 m utilisé en mode d'imagerie à grand champ, offre par sa plus grande surface collectrice un meilleur rapport signal sur bruit sur les images qu'un télescope de 1 m et donc, une plus grande précision dans les mesures.

Durant cette étude, il est apparu que deux couples (DBR 304 AB et DBR 343 AB) étaient probablement des binaires physiques écartées à mouvement propre commun. L'analyse des données acquises (Magnitude absolue, Couleur) sur ces deux systèmes a permis d'en estimer les paramètres astrophysiques. Cependant, ces couples lointains ont probablement des périodes trop longues pour permettre une étude de leur orbite.

Ma prochaine recherche portera donc sur les couples physiques proches et de séparation angulaire inférieure à 5".

8 Remerciements

L'auteur remercie très chaleureusement George Gontcharov de l'Observatoire Astronomique Pulkovo à Saint Petersburg pour la très grande pédagogie dont il a fait preuve pour expliquer sa méthode de détermination de l'extinction interstellaire ainsi que Daniel Bonneau, Astronome honoraire à l'observatoire de la Côte d'Azur, collaborateur bénévole du Laboratoire Lagrange pour la relecture de cet article, les corrections et les précieux conseils prodigués.

Cette recherche a utilisé:

- Les données de la mission Gaia de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), traitées par le Consortium de traitement et d'analyse des données Gaia (Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC), <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Le financement du DPAC a été assuré par des institutions nationales, en particulier les institutions participant à l'accord multilatéral Gaia (Gaia Multilateral Agreement).
- L'atlas du ciel Aladin (Aladin sky atlas) développé au CDS, Observatoire de Strasbourg, France 2000A&AS..143...33B (Aladin Desktop), 2014ASPC..485..277B (Aladin Lite v2), and 2022ASPC..532....7B (Aladin Lite v3).
- L'outil d'accès aux catalogues "VizieR catalogue access tool", CDS, Strasbourg, France (DOI : 10.26093/cds/vizieR). La description originale du service VizieR a été publiée en 2000, A&AS 143, 23
- Des observations du "Las Cumbres Observatory global telescope network" LCO, en particulier des observations réalisées les Faulkes telescopes North and South et avec des télescopes de 1 m de diamètre situés en Australie, en Afrique du Sud, aux îles Canaries et au Texas.
- Le catalogue d'étoiles doubles "The Washington Double Star Catalog" tenu par l'U.S. Naval Observatory.

Références

- [1] Debackère, A., "Astrométrie et Photométrie d'étoiles doubles 1ère partie, Étude des paires Baillaud 805 et Baillaud 806", ED, Étoiles Doubles, Revue francophone des observateurs d'étoiles doubles, n°7, pp. 13-27, Décembre 2023 : <https://etoiledoubles.org/revue/ED-2023-07/ED-2023-07-DEBACKERE.pdf>
- [2] Debackère, A., "Astrométrie et Photométrie d'Étoiles Doubles 2ème partie, Étude des paires Knapp 1113 et Knapp 1201", ED, Étoiles Doubles, Revue francophone des observateurs d'étoiles doubles, n°8, pp. 14-28, Juin 2024 : <https://etoiledoubles.org/revue/ED-2024-08/ED-2024-08-DEBACKERE.pdf>
- [3] Gaia Collaboration 2022, Gaia DR3 Part 1. Main source : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022yCat.1355....0G/abstract>

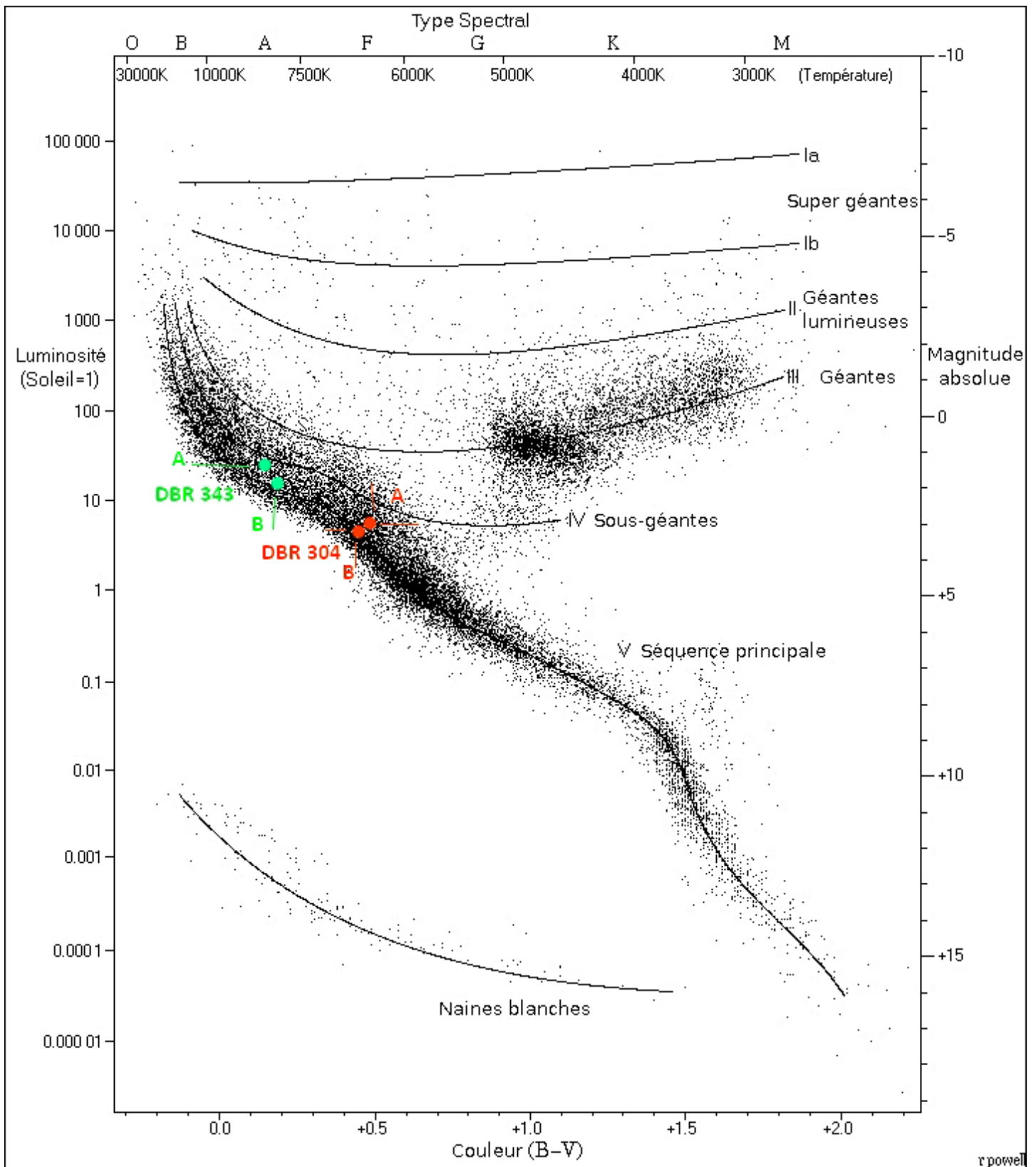


Figure 14 : Positions des composantes de DBR 304 (en rouge) et de DBR 343 (en vert) sur le diagramme HR

[4] Filtrés Sloan Digital Sky Survey SDSS : <https://skyserver.sdss.org/dr1/en/proj/advanced/color/sdssfilters.asp>

[5] Bessel M. S., "UBVRI PASSBANDS, Publications of the Astronomical Society of the Pacific", Vol. 102, p. 1181-1199, October 1990 : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990PASP..102.1181B/abstract>

[6] Gaia@AIP services, query interface : <https://gaia.aip.de/query/>

[7] Bonneau, D., "Les effets optiques de la turbulence atmosphérique dans les images astronomiques", Comptes Rendus Physique, Vol. 23, Special Issue S1, p. 269-291, 2022 : <https://doi.org/10.5802/crphys.101>

[8] SUBARU Image Processor: Makali'i, National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) and AstroArts Inc. : <https://makalii.mtk.nao.ac.jp/>

- [9] Goodwin, M. et al., "Characterisation of the Optical Turbulence at Siding Spring", Publication of the Astronomical Society of Australia, Volume 30, 2013 : <https://arxiv.org/abs/1210.4256>
- [10] Vernin J., Munoz-Tunon C., "Measuring Astronomical Seeing: The DA/IAC DIMM", Publications of the Astronomical Society of the Pacific 107: 265-272, March 1995 : <https://www.alcor-system.com/common/DIMM/publi.pdf>
- [11] Mesures de seeing sur le site de l'Haleakala : <https://outerspace.stsci.edu/display/PANSTARRS/PS1+Facility+design+and+construction>
- [12] Morley, G., Salaman, M., Obs. & Trav., première partie n°61, pp. 34-48 et deuxième partie n°62, pp. 34-68, décembre 2005 et juin 2006.
- [13] Losse, F., REDUC v5.39, 2022 : <http://www.astrosurf.com/hfosaf/fr/tdownload.htm#reduc>
- [14] Télescopes de 1,0 m du réseau LCO : <https://lco.global/observatory/telescopes/1m0/>
- [15] Caméra SINISTRO équipant les télescopes de 1m du réseau LCO : <https://lco.global/observatory/instruments/sinistro/>
- [16] Télescopes de 2,0 m du réseau LCO : <https://lco.global/observatory/telescopes/2m0/>
- [17] Système imageur des télescopes Faulkes : <https://lco.global/observatory/instruments/muscat/>
- [18] Bessell M. S., "Standard photometric systems", Annual Review of Astronomy and Astrophysics Volume 43, 2005 : <https://sites.astro.caltech.edu/~george/ay122/Bessel2005ARAA43p293.pdf>
- [19] Mason, B. D. et al., "The 2001 US Naval Observatory Double Star CD-ROM. I. The Washington Double Star Catalog", The Astronomical Journal, Volume 122, Issue 6, pp. 3466-3471, December 2001 : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001AJ....122.3466M/abstract>
- [20] Zacharias, N. et al., "The fourth US naval observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4)", The Astronomical Journal, 145:44 (14pp), February 2013 : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-6256/145/2/44/pdf>
- [21] Monet D. et al, "The USNO-B1.0 Catalog", The Astronomical Journal, Volume 125, Issue 2, pp. 984-993. February 2003 : <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/ub1.html>
- [22] Zacharias N. et al, "The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD)", American Astronomical Society Meeting 205, id.48.15; Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 36, p.1418, December 2004 : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004AAS...205.4815Z/abstract>
- [23] Gaia Collaboration, Brown A.G.A., et al, "Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties", Astronomy & Astrophysics, Volume 595, id.A1, 36 pp., November 2016 : <https://www.aanda.org/articles/aa/full.html/2016/11/aa29512-16/aa29512-16.html>
- [24] Gaia Collaboration, Brown A.G.A., et al, "Gaia Data Release 2. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties", Astronomy & Astrophysics, Volume 616, id.A1, 22 pp., August 2018 : <https://www.aanda.org/articles/aa/full.html/2018/08/aa33051-18/aa33051-18.html>
- [25] Codes des observatoires répertoriés au Minor Planet Center : <https://lco.global/observatory/sites/mpccodes/>
- [26] Raab, H., ASTROMETRICA v4.14.0.454, 2023 : <http://www.astrometrica.at>
- [27] Bonnarel, F. et al., "The ALADIN interactive sky atlas. A reference tool for identification of astronomical sources", Astronomy and Astrophysics Supplement, v.143, p.33-40, April 2000 : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000A&AS..143...33B/abstract>
- [28] Greisen, E. W. and Calabretta, M. R., "Representation of world coordinates in FITS", A&A, volume 395, p. 1061-1075, 2002 : <https://www.aanda.org/articles/aa/full/2002/45/aah3859/aah3859.html>
- [29] FITS format : https://fits.gsfc.nasa.gov/fits_documentation.html
- [30] Losse, F., Tutoriel REDUC : <http://www.astrosurf.com/hfosaf/reduc/tutoriel.htm#haut>
- [31] Chiron, D., WDSTOOL : <https://wdstool.com/>
- [32] Kervella, P. et al., "Stellar and substellar companions from Gaia EDR3 Proper-motion anomaly and resolved common proper-motion pairs" Astronomy and Astrophysics, volume 657, A7, 20 December 2021 : <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2022/01/aa42146-21.pdf>
- [33] AAVSO, "CCD Photometry Guide - French", version 1.1, November 2016 : https://www.aavso.org/sites/default/files/publications_files/ccd_photometry_guide/CCDPhotometryGuide-French/chapitre_5.pdf
- [34] Buil, C., IRIS, v5.59, 2010 : <http://www.astrosurf.com/buil/iris-software.html>
- [35] Jean Baptiste Marquette chercheur CNRS, LAB de Bordeaux, membre de l'UAI, membre de la SAF, directeur de publication SF2A : <https://www.iau.org/administration/membership/individual/20568/>
- [36] Henden, A. et al., APASS Data Release 10, American Astronomical Society, AAS Meeting #232, id. 223.06, Juin 2018 : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018AAS...23222306H/abstract>
- [37] Gaia Collaboration 2022, Gaia DR3 Part 4. Variability : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022yCat.1358....0G/abstract>
- [38] Gavras, P. et al., "Gaia Data Release 3. Cross-match of Gaia sources with variable objects from the literature", Astronomy & Astrophysics, Volume 674, id.A22, 30 pp., June 2023 : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023A&A..674A..22G/abstract>
- [39] Gaia Collaboration 2022, Gaia Data Release 3 Part 6. Performance verification- Synthetic photometry generated from the Gaia BP/RP mean spectra : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022yCat.1360....0G/abstract>
- [40] Cardelli J. A. et al., "The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction", Astrophysical Journal v.345, p.245, October 1989 : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1989ApJ...345..245C>

[41] Anders, F. et al., "Photo-astrometric distances, extinctions, and astrophysical parameters for Gaia EDR3 stars brighter than $G = 18.5$ ", *Astronomy & Astrophysics*, Volume 658, id.A91, 27pp., February 2022 : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022A&A...658A..91A/abstract>

[42] Gontcharov G.A. et al., "New Interstellar Extinction Maps Based on Gaia and Other Sky Surveys", *Astronomy Letters*, 2023, Vol. 49, No. 11, pp. 666-689, astro-ph.GA 9 February 2024: <https://arxiv.org/pdf/2402.06474>

[43] Galactic Dust Reddening and Extinction SFD98 : <https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>

[44] Green G. M., et al., "A 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1 and 2MASS", *The Astrophysical Journal*, Volume 887, Issue 1, article id. 93, 27 pp. 2019 : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...887...93G/abstract>

[45] Mamajek, E., "A Modern Mean Dwarf Stellar Color and Effective Temperature Sequence". University of Rochester, Department of Physics and Astronomy. Retrieved 5 July 2021 : http://www.pas.rochester.edu/~emamajek/EEM_dwarf_UBVIJHK_colors_Teff.txt et Pecaut & Mamajek, 2013, *ApJS*, 208, 9 : <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013ApJS..208....9P>

[46] Wikipédia, "Diagramme de Hertzsprung-Russell" : https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Hertzsprung-Russell



André Debackère

Astronome amateur depuis l'âge de 18 ans. Je suis membre de la commission des étoiles doubles depuis 1981. C'est Pierre Durand qui m'a initié aux méthodes d'observation et de mesures. J'ai découvert plus de 300 étoiles doubles. Depuis janvier 2010, j'utilise des télescopes robotisés du réseau LCO et de l'université de l'Iowa. Je participe à des projets Pro/Am. Plus récemment j'ai commencé à observer les binaires à éclipses dans le cadre d'une collaboration internationale.

