

LA SÉPARATION LINÉAIRE UTILISÉE POUR DÉTERMINER LE CARACTÈRE PHYSIQUE D'UNE ÉTOILES DOUBLE VISUELLE

The Linear Separation Used to Determine the Physical Character of a Visual Double Star

Philippe LAURENT

SAF - Commission des Étoiles Doubles
Président de l'Association Astronomie en Provence (83)
Email : apilaure_astro@yahoo.fr



Résumé

Le présent article a pour but de présenter une démarche de sélection de couples visuels présentant une chance raisonnable d'être des paires physiques. Elle repose sur le calcul de la séparation linéaire des couples, à partir des données Gaia DR3.

Un outil construit à partir d'Excel est décrit et permet de faciliter le calcul de la séparation linéaire d'une liste de couples.

Abstract

The purpose of this paper is to present an approach for selecting visual pairs with a reasonable chance of being physical pairs. It is based on the calculation of the linear separation of the pairs, using Gaia DR3 data.

A tool built from Excel is described and allows to facilitate the calculation of the linear separation of a list of pairs.

Keywords: binaries: visual, astrometry



1 Introduction

Le Washington Double Star Catalog (WDS) [1] constitue, depuis sa création, le catalogue de référence qui recense les étoiles doubles visuelles ainsi que les données astrométriques afférentes à ces couples stellaires. Encore aujourd'hui des couples s'ajoutent régulièrement à ce catalogue qui compte plus de 150 000 entrées et des millions de données de mesures.

Il a été constitué à partir des catalogues des astronomes, amateurs comme professionnels, qui au fil du temps ont découvert les étoiles doubles. Pour la plus grande partie, ces découvertes reposaient sur un simple critère de proximité apparente des composantes de chaque couple. Il est donc naturel que le WDS recense un grand nombre de couples optiques, c'est-à-dire dont la proximité des composantes sur le ciel ne repose que sur un effet de perspective : les deux étoiles sont alors situées à des distances très différentes et leur apparente proximité n'est due qu'à la projection de leur position sur la voûte céleste.

Les missions spatiales Hipparcos et Gaia ont, quant à elles, apporté des informations astrométriques à la fois précises et portant sur un grand nombre d'étoiles. La disponibilité des résultats de ces missions n'est toutefois que récente (1989 à 1993 pour Hipparcos et depuis 2015 pour Gaia) en regard des nombreuses données historiques sur les étoiles doubles datant, pour les plus anciennes, de la fin du 18^{ème} siècle. Elles permettent aujourd'hui de porter un regard plus objectif sur la nature physique ou optique des étoiles doubles. Ces données nouvelles permettent d'envisager de constituer des programmes

d'observation fondés sur des étoiles doubles offrant de bonnes chances d'être physiques.

Dans la suite de cet article, c'est l'utilisation des données Gaia qui est proposée, ces données étant plus précises et couvrant une beaucoup plus grande population d'étoiles que les données issues de la mission Hipparcos.

2 Les apports des données astrométriques Gaia DR3 à la connaissance des étoiles doubles

Dans la version DR3 [2] disponible à la date d'écriture de cet article, le catalogue Gaia fournit les données astrométriques complètes de 1 467 744 818 étoiles, atteignant une magnitude limite voisine de 21, en excluant les étoiles de magnitude plus brillante que la magnitude 3.

Ces données astrométriques comprennent notamment :

- Les positions en ascension droite et déclinaison (époque 2016),
- Les mouvements propres en ascension droite et déclinaison,
- Les parallaxes.

Au stade actuel de publication des données Gaia, les étoiles doubles ne sont pas décrites en tant qu'objets binaires, mais des données astrométriques essentielles telles que la séparation (ρ) et l'angle de position (θ) d'un couple peuvent être aisément déduites des coordonnées (AD et Déc) des deux composantes. Les formules [3] suivantes exposent les calculs à effectuer pour y parvenir (en prenant soin de convertir les AD en degrés décimaux) :

$$\rho = \cos^{-1}[\cos(\Delta\alpha \cos \delta_1) \cos(\delta_2 - \delta_1)]$$

$$\theta = 90^\circ - \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\delta_2 - \delta_1)}{\cos(\delta_2 - \delta_1) \sin(\Delta\alpha \cos \delta_1)} \right]$$

Notons toutefois que dans le cas des couples serrés, les données individuelles des composantes ne sont pas systématiquement disponibles dans le catalogue Gaia DR3, le raisonnement et le calcul présentés plus haut ne pouvant donc pas s'appliquer. La complétude est proche de 100% pour une séparation angulaire d'1 seconde d'arc, mais on est encore à 50% à 0.5 secondes, descendant jusqu'à environ 0.2 seconde comme limite inférieure (0.5 dans des champs très denses en direction du centre galactique). La figure 1 illustre cette complétude pour les données Gaia DR2 et eDR3.

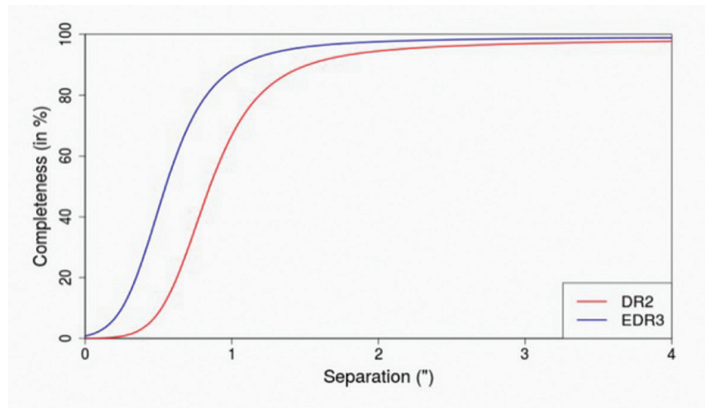


Figure 1. Amélioration de la couverture (en pourcentage) des étoiles doubles visuelles du catalogue WDS en fonction de la séparation WDS, entre les catalogues Gaia DR2 (rouge) et Gaia DR3 (bleu) [4]

On constate néanmoins que Gaia DR3 permet de disposer du calcul de ρ et θ , pour l'époque 2016, de plus de 125 000 couples. Cette évaluation est faite en utilisant l'outil WDSTOOL [5], en positionnant un filtre sur la séparation ne retenant que les couples du WDS séparés de plus d'une seconde d'arc. Ce chiffre doit donc être considéré seulement comme un ordre de grandeur, faisant néanmoins apparaître clairement tout l'intérêt d'utiliser les données Gaia DR3 pour évaluer les séparations et angles de position d'un très grand nombre d'étoiles doubles.

Si disposer de mesures pour l'époque 2016 d'un grand nombre de couples est d'un apport significatif, cela ne nous permet pas toutefois de se prononcer sur la nature physique ou optique de ces couples. Les mouvements propres ainsi que les parallaxes peuvent en revanche fournir des indices intéressants.

Depuis plusieurs années la recherche de couples à mouvements propres communs, c'est-à-dire se déplaçant dans l'espace dans la même direction projetée sur le ciel, a motivé un grand nombre d'astronomes amateurs comme professionnels. Cette homogénéité des mouvements propres des deux composantes est en effet un indice sérieux du caractère physique d'un couple. Ce critère a permis de retenir au sein du WDS des couples constituant des candidats plausibles de binaires physiques au vu de leurs mouvement propres voisins. Citons également la création du catalogue « The CPMDS catalogue of common proper motion double stars in the Bordeaux Carte du Ciel zone » riche de 2572 couples candidats [6]. Si de nombreux catalogues ont fourni les données de mouvements propres (Hipparcos ou PPM Extended par exemple), les données Gaia DR3 sont maintenant disponibles pour un nombre d'étoiles bien plus élevé et avec une précision inégalée.

Gaia DR3 fournit également la parallaxe (et donc la distance)

d'un grand nombre de sources. On comprend aisément que pour constituer une paire physique, un couple doit présenter des parallaxes voisines, indiquant des distances similaires. Cette donnée constitue donc un indice important pour déterminer si un lien physique est susceptible d'exister entre les composantes d'une étoile double.

Rappelons comment se calcule la distance D (en parsec) lorsqu'on dispose de la parallaxe P (en mas) :

$$D = 1000 / P$$

Et voici deux formules de conversion d'une distance exprimée en Parsecs, vers respectivement des Années-Lumières (AL) et des Unités Astronomiques (UA) :

$$D \text{ (AL)} = D \text{ (Parsec)} \times 3.26$$

$$D \text{ (UA)} = D \text{ (Parsec)} \times 206265$$

3 Calcul de la distance des composantes connaissant leur séparation angulaire et leurs distances à l'observateur

Nous avons vu qu'une valeur de la séparation angulaire ρ des composantes se déduit de leurs positions. De même, la distance à l'observateur se déduit facilement des valeurs de parallaxes des deux étoiles (si ces données sont disponibles dans Gaia DR3).

L'utilisation de ces données permet de connaître la séparation linéaire des deux étoiles. Le raisonnement est illustré par la figure 2, où cette séparation (en Parsec) est calculée à partir des données connues (ρ , Parallaxe1, Parallaxe2), en utilisant les relations géométriques d'un trapèze isocèle [7].

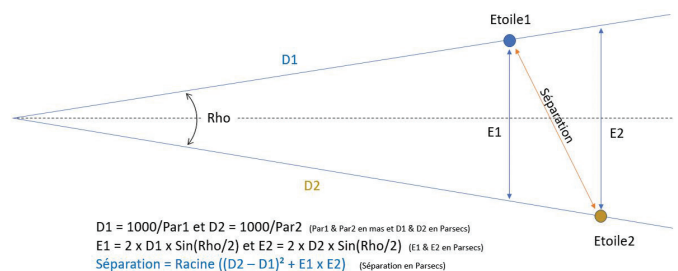


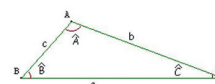
Figure 2. Calcul de la séparation de deux étoiles connaissant leur séparation angulaire et leurs parallaxes utilisant la géométrie du trapèze isocèle

Une autre méthode de calcul est possible à partir de la loi des cosinus ou théorème de Pythagore généralisé. Elle est exposée figure 3 et fournit naturellement un résultat strictement identique à la précédente.

Formule d'al-Kashi, loi des cosinus

On appelle **formule d'Al-Kashi**, ou **loi des cosinus**, ou encore **théorème de Pythagore généralisé** l'égalité suivante, valable dans tout triangle ABC, qui relie la longueur des côtés en utilisant le cosinus d'un des angles du triangle :

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2b \cdot c \cos(\hat{A})$$



$$\left. \begin{array}{l} \text{Angle A} = \rho \\ c = D1 \\ b = D2 \end{array} \right\} a = \text{Racine} (D1^2 + D2^2 - 2 \times D1 \times D2 \times \text{Cos}(\rho))$$

Figure 3. Calcul de la séparation a de deux étoiles connaissant leur séparation angulaire et leurs parallaxes utilisant la loi des cosinus

Si disposer de la séparation linéaire des deux composantes d'un couple constitue un indice pertinent pour établir avec une

probabilité raisonnable le caractère physique ou optique de celui-ci, le calcul de cette distance nécessite quelques étapes successives comme le montre la Table 1.

Étape	Source des données/Outil
Identifier les coordonnées du couple cible	WDS / Aladin
Lister les sources Gaia DR3 au voisinage	Site Gaia Archive, Vizir ou Aladin
Identifier les deux composantes dans la liste de sources	
Calculer Rhô et Thêta à partir des coordonnées de chaque composante	Logiciel tableur
Calculer la distance linéaire à partir de Rhô et des deux parallaxes	Logiciel tableur

Table 1. Étapes suivies pour le calcul de la séparation linéaire d'un couple

Suivre ces différentes étapes nécessite également de transférer les données entre chaque support.

Le caractère fastidieux de ce travail, reposant sur l'utilisation de plusieurs outils, freine une mise en œuvre sur un grand nombre de couples. Sur la base de ce constat, et souhaitant mettre en application cette méthode de manière systématique en amont de chaque séance de mesures, j'ai mis au point un outil basé sur l'utilisation de Microsoft Excel et présenté ci-après. Il a pour objectif d'optimiser le calcul de la séparation linéaire d'une liste de couples.

4 Outil de calcul de la séparation linéaire pour élaborer une liste d'observation

Voici les principes généraux retenus pour mettre au point l'outil WDS-Gaia :

- Saisir le couple cible à partir de son nom « découvreur » (STF1000 par exemple)
- Simplifier cette saisie avec la possibilité d'utiliser une liste de couples issue par exemple de WDSTOOL [5]
- Automatiser l'extraction des sources Gaia DR3 voisines du couple
- Automatiser le calcul des données : Rhô, Thêta et séparation linéaire (sous réserve de disposer de la parallaxe de chaque composante)
- Constituer facilement une liste d'observation après analyse des données.

Pour atteindre ces objectifs le choix d'Excel a permis de disposer d'une interface connue et performante et de possibilités de manipulation des données grâce au langage de programmation VBA intégré à Microsoft Excel.

Il est rapidement apparu qu'intégrer le WDS à l'outil était

simplificateur, et ce malgré le grand nombre de données à intégrer (plus de 154000 lignes). En revanche, la récupération des données des différents catalogues Gaia se fait en ligne et nécessite donc une connexion internet.

Le présent article n'a pas pour but de se substituer à la notice d'utilisation de l'outil WDS-Gaia qui est intégrée à l'outil lui-même. Il se limitera à présenter les principes d'utilisation et les résultats obtenus.

L'outil WDS-Gaia est un classeur Excel constitué de plusieurs onglets.

4.1 Onglet « Notice » :

Notice d'utilisation de WDS-Gaia. Cet onglet permet également de télécharger le WDS pour l'intégrer à l'outil (première intégration ou mise à jour du WDS)

4.2 Onglet « Temp » :

Zone de stockage temporaire des données brutes issues des catalogues Gaia. Cet onglet n'est pas nécessaire à l'utilisateur, il pourra toutefois le consulter pour s'informer sur le format brut de ces données.

4.3 Onglet « WDS » :

Comme son nom l'indique, cet onglet contient l'ensemble du catalogue WDS.

4.4 Onglet « Liste » :

Cet onglet est destiné à recevoir la liste de couples que l'utilisateur souhaite étudier. Notez que si cette liste est extraite de l'outil en ligne WDSTOOL [5], il sera nécessaire de corriger la syntaxe des noms de chaque couple en y insérant le nombre de caractère « espace » entre le code découvreur et le numéro catalogue. Le bouton « Syntaxe Liste » effectue automatiquement cette correction sur l'ensemble de la liste. Si vous saisissez un couple de manière unitaire, il est inutile de passer par cet onglet, vous pouvez le saisir directement dans l'onglet principal « WDS-Gaia ».

4.5 Onglet « WDS-Gaia » :

C'est l'onglet principal de l'outil. Il est constitué de plusieurs zones :

Zone 1.1 (Figure 4) :

Elle permet le choix du couple WDS (saisie unitaire) et l'affichage des données WDS concernant ce couple. Il est possible de naviguer au sein du WDS grâce aux boutons « Couples WDS suivant » ou « Couple WDS précédent ».

Si vous utilisez une liste de couples contenue dans l'onglet « Liste », les boutons « Couple liste suivant » et « Couple liste précédent » permettent la navigation dans la liste et l'affichage successif des données WDS de chaque couple.

Une cellule permet de donner le nom de l'onglet (MaListe par exemple) dans lequel vous souhaitez stocker votre sélection de couples. Il faudra au préalable avoir créé cet onglet vierge. Le bouton « Choix » alimente l'onglet « MaListe ».

1.1 - Choix du couple dans le WDS

Saisissez le nom de couple recherché ou son identifiant WDS. Cliquez sur le bouton pour récupérer les données WDS du couple. Utiliser les deux boutons "couple ..." pour sélectionner les couples voisins dans le catalogue ou la liste (onglet liste)

Couple recherché	HLD 60	Afficher les données WDS du couple choisi	Couple WDS suivant	Couple WDS précédent	Couple Liste suivant	Couple Liste précédent	Choix	Onglet MaListe						
Ref WDS	Nom	Mag1	Mag2	Date1	Date2	NbMes	Theta1	Theta2	Rho1	Rho2	MP1	MP2	Coordonnées	Notes
00014+3937	HLD 60	9.09	9.77	1881	2020	150	124	165	0.6	1.4	-030-048	-030-048	000123.67+393638.2	NO

1.2 - Saisie des coordonnées

AD (h)	AD (m)	AD (s)	Dec (N ou S)	Dec (°)	Dec (m)	Dec (s)
5	12	55.87	S	16	12	19.55

Conversion

Entrez: AD en h,m,s et Dec en N/S, °,m,s puis cliquez sur conversion. Cela permet de lancer une requête Gaia sur ces coordonnées (sans passer par un couple WDS)

Figure 4. Zones 1.1 et 1.2 de l'onglet WDS-Gaia

Zone 1.2 (Figure 4) :

Cette zone est une fonctionnalité annexe, qui permet de saisir des coordonnées (Ascension Droite et Déclinaison) plutôt que de partir d'un nom de couple. L'utilisateur pourra utiliser la zone 1.1 ou la zone 1.2, avant de passer à la zone suivante.

Zone 2 (Figure 5) :

Cette zone permet de paramétrer la requête Gaia. Les coordonnées (AD et Déc.) sont déduites automatiquement des saisies effectuées dans les zones 1.1 ou 1.2.

2 - Récupération des données Gaia

Centrée sur les coordonnées RA (*) 0.348625 Dec (*) 39.61061111

Paramétrage de la requête Rayon en minute d'arc 8 Nb maximum d'étoiles 20 Ordre distance Magnitude maxi 19 Version

Lancement de la requête

Cette requête recherche les données Gaia des étoiles voisines des coordonnées du couple choisi plus haut. Les cellules prises pour référence sont RA(*) et Dec (*) de la ligne 17

Figure 5. Zone 2 de l'onglet WDS-Gaia

Zone 3 (Figure 6) :

Cette zone est consacrée à l'affichage des données Gaia et des données déduites par le calcul. Les entêtes de colonne en bleu sont renseignées avec les désignations des données Gaia [8].

La requête est lancée grâce au bouton « Lancement de la requête ». Les données sont recherchées sur le site Gaia Archive [9].

La première source affichée est choisie par défaut comme l'étoile principale du couple. Les valeurs Rhô, Thêta, Séparation et SéparMin sont calculées en prenant cette étoile comme référence. Ce choix peut être changé par l'utilisateur. On peut ainsi explorer la liste pour identifier les composantes d'étoiles multiples A, B, C, D, etc... Une imprécision dans les coordonnées données par le catalogue WDS peut également obliger

Les paramètres accessibles sont :

- Le rayon dans lequel rechercher les sources Gaia à partir des coordonnées,
- Le nombre maximum de sources à afficher,
- Le classement des sources (magnitudes ou distances croissantes),
- La magnitude limite des sources à retenir (critère reposant sur le champ « phot_g_mean_mag »,
- La version du catalogue Gaia à utiliser : DR1, DR2, eDR3 ou DR3.

l'utilisateur à rechercher l'étoile principale du couple dans la liste des sources Gaia proposées.

Les données Rhô, Thêta et Séparation sont calculées selon la méthode exposée au paragraphe 3.

La donnée SeparMin correspond à la séparation minimum du couple, obtenue en explorant la barre d'incertitude des parallaxes des deux composantes. Cette donnée est intéressante car les parallaxes peuvent éventuellement montrer des incertitudes significatives, conduisant à des séparations linéaires couvrant une large plage de valeurs. Seule la séparation minimum est affichée, pouvant aider à « repêcher » un couple dont la séparation nominale, calculée à partir des valeurs de parallaxes nominales, semble élevée.

3 - Affichage des données Gaia

Rho - Theta - Séparation

Affiche Rho, Theta et séparation de chaque étoile en prenant pour référence l'étoile principale choisie. SéparMin utilise l'incertitude sur les parallaxes. Le choix de l'étoile principale est effectué en sélectionnant n'importe quelle cellule de sa ligne de données et en cliquant sur le bouton situé à gauche de ce texte

#source_id	dist	ra	dec	parallax	parallax_error	phot_g_mean_mag	pmra	pmdec	astrometric_gof_ai	Rho (arcsec)	Theta (*)	Séparation (Pc)	SéparMin (Pc)
#2881804450094712192	0.6398	0.34842317	39.61052505	19.33601997	0.020306451	8.895423	-31.67058793	-44.07489178	2.318846	0	0	0	0
#2881804450094712320	1.6285	0.348533697	39.61016425	20.02757079	0.037064746	9.431236	-23.25184528	-45.81522715	21.320942	1.334562554	166.7209915	1.785783253	1.638949477
#2881804450094689152	14.1551	0.34354739	39.61021309	0.328529653	0.10368875	17.416336	-5.732442027	-4.835583893	0.94243604	13.5691731	265.2523332	2992.14832	2261.873804
#2881804347016833664	33.4660	0.342409674	39.62064319	1.47514599	0.24400973	16.81278	10.73853868	-2.128539458	55.0638	32.91320217	210.4460175	626.1820533	529.9095529
#2881804347015497856	34.5396	0.342211535	39.602387	0.711523295	0.10882128	17.10436	10.6437863	-1.887900832	-0.8531583	33.98677794	210.4568031	1353.718413	1167.228635
#2881804514519649920	37.5020	0.33619843	39.61471896	1.127316217	0.08849717	17.027313	-7.278516309	-1.737912462	0.322254	37.11415186	294.004	835.3456016	770.723359
#288180441444790880	47.0399	0.333143792	39.60527433	0.968940966	0.16832393	18.2896	-12.2112717	-10.42806691	-1.8477391	46.40100887	245.9599378	980.3376703	831.0243993
#2881804411443649920	62.0079	0.326361446	39.61219387	0.251835976	0.1727759	18.341158	1.51514833	-10.6226344	1.3881181	61.48079421	275.6077461	3919.121602	2303.320608
#2881804347016835072	67.4330	0.342473622	39.59248927	0.445974013	0.083074875	17.173687	29.609328	-0.918968875	-0.15867896	66.99270075	194.2589613	2190.566168	1838.413167
#288180736637928448	75.7029	0.32472476	39.62077112	0.282987906	0.16479406	18.254055	-1.700284942	-3.983942083	0.5254646	75.36871471	299.3014813	3482.002967	2181.458414
#2881805751470225792	78.5018	0.37395724	39.620342	0.675451005	0.068630524	16.695467	5.027316629	-8.209750632	2.0292153	79.14552853	63.47859509	1428.775336	1292.167434
#2881804553175259136	80.9119	0.345833456	39.63298356	0.28884508	0.08233741	17.231062	-3.152216865	-6.92075473	0.040331904	81.16900825	354.9234444	3410.346519	2642.321282
#2881804312657096448	85.4931	0.330822734	39.59122495	0.247139394	0.027926382	14.834955	-1.180241029	-0.49991138	1.1590284	84.91337128	215.0899968	3994.58253	3583.722765
#2881804175218144640	92.3814	0.371325094	39.59183351	1.052542432	0.026825396	14.7020635	-1.401126961	-3.165191682	-0.32921094	92.53251177	138.6520833	898.3635167	874.6999141
#2881804308361190144	97.4577	0.326814952	39.58938694	0.327412603	0.17549343	18.47581	-2.80808274	-3.315892728	-1.8436483	96.86200282	218.2214669	3002.53323	1936.671723
#2881805755766107392	100.7176	0.384434092	39.61527152	3.204978988	0.01612381	13.159624	67.12252579	5.241654909	-0.7213513	101.3248113	80.29132176	260.2975824	258.6813679
#2881804209576548864	102.1381	0.384680149	39.60483678	-1.153497161	0.23223223	17.882612	-1.119528564	-5.050270658	27.421568	102.6199744	101.5106239	101.5106239	101.5106239
#2881804205285304320	102.6603	0.378357284	39.59362849	0.264195044	0.11366951	17.683533	5.567596613	-4.176713714	-0.9447585	102.9194885	126.2297168	3733.36542	2594.679618
#2881804175218145536	103.8458	0.371298457	39.58765726	1.222433808	0.18192335	18.022718	-5.608942418	-4.260596001	5.589605	102.9339043	142.3804135	766.3232562	670.5862528
#2881807370679804800	107.7824	0.314396605	39.6247947	0.817606837	0.022549892	14.288027	3.702691173	0.701220216	-0.5733856	107.4461596	298.5618112	1171.364805	1138.482797

Figure 6. Zone 3 de l'onglet WDS-Gaia

4.6 Onglet « MaListe » :

Exemple d'onglet créé pour recevoir la liste des couples choisis (fonction « Choix » accessible dans l'onglet « WDS-Gaia »). L'utilisateur peut créer autant d'onglets de ce type qu'il le souhaite. On peut par exemple imaginer plusieurs onglets désignés par le nom d'une constellation, pour contenir les cibles choisies au sein de cette constellation.

4.7 Avertissement sur la version d'Excel à utiliser :

L'outil a été développé avec la version Excel 2016. Il a été testé avec succès avec la version d'Excel contenue dans Office365. En revanche, il n'a pas été testé avec les versions d'Excel antérieures à 2016.

4.8 Téléchargement de WDS-Gaia

WDS-Gaia peut être librement téléchargé à partir du site internet de la Revue Étoiles Doubles :

- Menu "Ressources"
- Rubrique "WDS-Gaia"

Vous pouvez également accéder directement à la page de téléchargement en suivant ce lien :

<https://etoilesdoubles.org/wds-gaia/>

Le fichier pèse 18MO ce qui peut vous demander un peu de patience si votre débit internet est lent.

Il est possible que le fichier soit bloqué par sécurité, Excel jugeant que ce contenu provenant d'internet contient du code potentiellement malveillant. La procédure de déblocage est simple à appliquer en suivant les conseils donnés ici :

<https://learn.microsoft.com/fr-fr/deployoffice/security/internet-macros-blocked>

5 La séparation linéaire comme critère de physicité d'un couple

Si cet article a abordé jusqu'à présent l'utilité de sélectionner les étoiles doubles visuelles à observer et a fondé cette sélection sur la séparation linéaire des composantes, il reste nécessaire de quantifier ce critère de sélection.

Plusieurs publications abordent ce sujet d'un point de vue théorique [10] [11]. L'approche proposée ici est plus pratique que théorique en suggérant d'examiner les paires orbitales contenues dans le 6ème catalogue d'orbite de l'USNO [12]. Il est naturellement nécessaire que pour chacun de ces couples, Gaia ait identifié les composantes individuelles. Pour cette analyse, 377 paires ont été sélectionnées, et pour chacune d'elles, la séparation linéaire a été calculée.

Séparation (Pc)	Nb de couples	Ratio	Grade 1	Grade 2	Grade 3	Grade 4	Grade 5	Autre
< 0.01	51	13.53%	1	4	5	20	21	
> 0.01 & < 0.1	108	28.65%	1	3	7	39	56	2
> 0.1 & < 1	130	34.48%	1	6	13	44	65	1
> 1 & < 10	63	16.71%			1	29	32	1
> 10	25	6.63%				7	18	4
	377							

Table 2. Classement de 377 couples décrits dans le catalogue ORB6 selon leur séparation linéaire et répartition selon le grade de l'orbite

La figure 7 permet d'approfondir ce point, et fournit, quant à elle, une limite supérieure aux alentours d'1 Parsec [14]. Ces orbites sont alors potentiellement instables dans les zones de forte densité stellaire. Elles présentent des périodes de plusieurs millénaires.

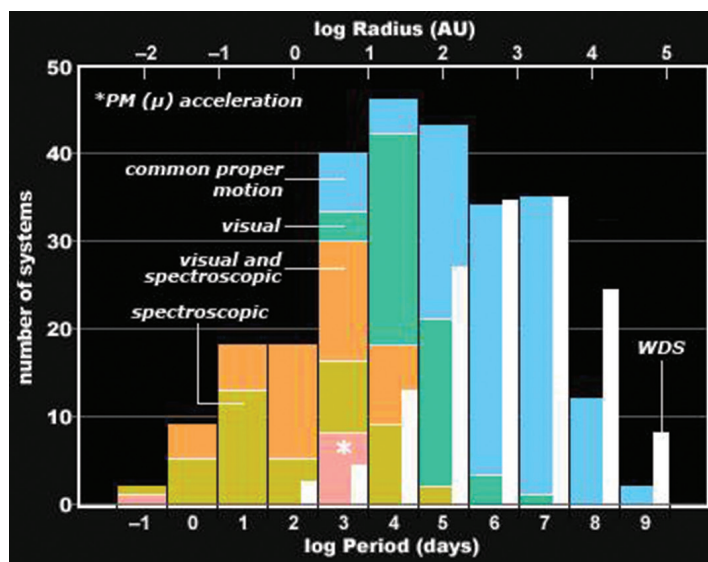


Figure 7. Distribution des séparations des couples orbitaux connus [14]. A droite du graphe, on trouve les séparations maximales pouvant atteindre 1 parsec : $\text{Log}(\text{séparation en UA}) \sim 5.3$.

Quelques exemples significatifs de couples orbitaux excédant ces valeurs sont décrits ci-après.

5.1 Des couples classés Grade 4 dont la séparation linéaire est supérieure à 10 Parsecs

7 couples parmi ceux présentant une séparation linéaire supérieure à 10 parsecs sont classés par l'USNO en Grade 4, autrement dit « Preliminary » avec la définition suivante :

La table 2 synthétise les résultats de cette étude. Elle présente la proportion de couples selon leur séparation linéaire SL :

- $SL < 0.01$ Parsec
- $0.01 \text{ Parsec} < SL < 0.1 \text{ Parsec}$
- $0.1 \text{ Parsec} < SL < 1 \text{ Parsec}$
- $SL > 1 \text{ Parsec}$
- $SL > 10 \text{ Parsecs}$
-

Partant de l'idée partagée avec quelques membres de la Commission des étoiles doubles de la SAF [13] que la séparation linéaire maximale d'une paire physique se situe aux environs de 0.1 parsec, j'ai été très surpris de constater qu'une majorité de couples présentait une séparation linéaire supérieure (et parfois même très supérieure).

"Individual elements entitled to little weight, and may be subject to substantial revisions. The quantity $3 \log(a) - 2 \log(P)$ should not be grossly erroneous. This class contains : orbits with less than half the ellipse defined ; orbits with weak or inconsistent data ; orbits showing deteriorating representations of recent data..."

Sur la base de cette définition, on peut considérer qu'un couple dont l'orbite est classée Grade 4 présente une quasi-certitude d'être physique.

Ces couples sont présentés dans la table 3 :

Ref WDS	Nom	MP1	MP2	Coordonnées	SL (Pc)
00521+1036	STF 67	+043-033	+043-033	005207.59+103603.7	11.75
02529+5300	STF 314AB,C	-002-015	-002-015	025252.03+525950.6	63.31
04385+2656	STF 572AB	+041-056	+043-066	043829.58+265625.6	10.92
15348+1032	STF1954AB	-072+013	-073+003	153448.14+103220.0	39.84
16568-2309	BU 1117	-011-003	-011-003	165648.01-230901.0	17.08
19054+3803	AG 227	-020+006	+008+005	190522.05+380320.6	43.91
20449+1219	STF2723AB	+020+003	+020+003	204454.58+121845.6	12.75

Table 3. Couples classés Grade 4 et présentant une séparation linéaire (SL) supérieure à 10 Parsecs

5.2 HLD 60, un couple classé Grade 3 et présentant une séparation linéaire d'1.78 Parsec

L'examen du cas de HLD 60 montre également un résultat étonnant : sa séparation linéaire calculée à partir des données Gaia DR3 est de 1.78 Parsec et son orbite est classée en grade 3 par l'USNO. Le graphe fourni par l'USNO (Figure 8) ne laisse guère de doute sur sa nature physique.

Par ailleurs, les zones d'incertitude sur la distance (déduite de la parallaxe) des deux composantes sont nettement disjointes :

- HLD 60 A : distance de 51,717 pc [51,663 - 51,771]
- HLD 60 B : distance de 49,931 pc [49,839 - 50,024]

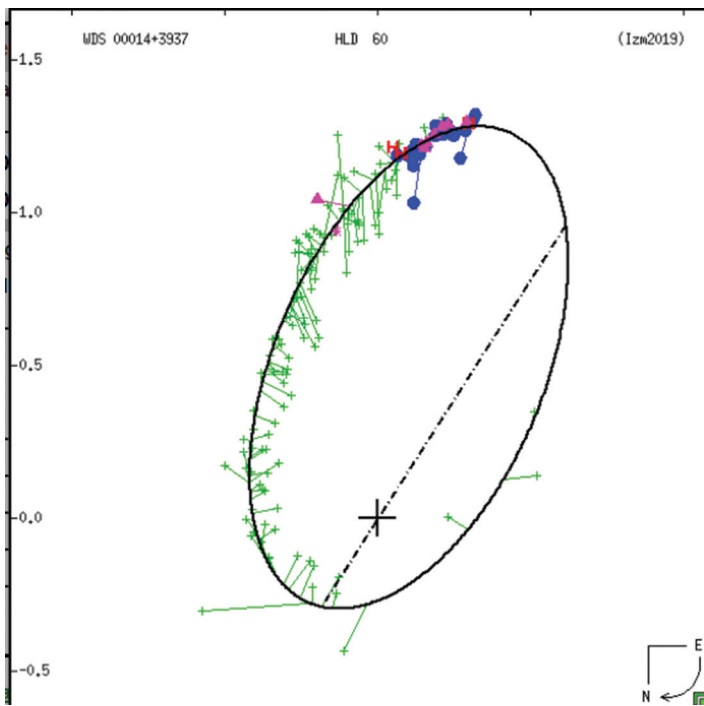


Figure 8. Tracé de l'orbite de HLD60 – crédit USNO

5.3 Des couples dont la séparation linéaire est supérieure à 10 Parsecs et classés Grade 5

La Table 2 montre également la présence de 18 couples dont la séparation linéaire est supérieure à 10 Parsecs et classés Grade 5 par l'USNO. Il ne me semble pas raisonnable de tirer des conclusions de cette liste, la nature orbitale de ces couples semblant très incertaine. A titre d'exemple, la figure 9 montre la courbe de ES 2360, où l'on voit clairement que le caractère orbital du couple repose sur une connaissance très partielle de son hypothétique orbite.

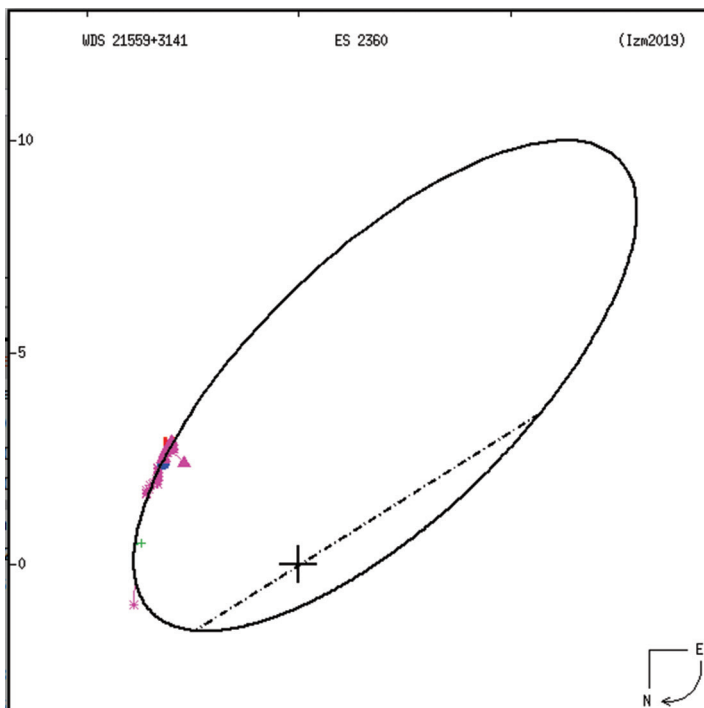


Figure 9. Tracé de l'orbite de ES 2360 – crédit USNO

5.4 Quelles conclusions peut-on tirer de l'étude des 377 couples orbitaux ?

Des échanges avec D. Bonneau puis avec F. Arenou ont apporté une explication aux résultats étonnants exposés plus

haut.

Les séparations linéaires élevées calculées pour un grand nombre de ces couples s'expliquent par la contamination mutuelle des deux composantes sur les images Gaia. Dans ces conditions, les données astrométriques du catalogue Gaia DR3 peuvent être affectées, ce qui impacte naturellement le calcul de la séparation linéaire. Les données astrométriques peuvent également être détériorées par une forte luminosité d'au moins une des deux étoiles.

Des indicateurs de qualité de la réduction astrométrique sont fournis par le catalogue Gaia DR3 [8] :

- RUWE : Renormalised unit weight error
- astrometric_gof_al : Goodness of fit statistic of model wrt along-scan observations

Ils peuvent guider l'utilisateur pour apprécier la fiabilité du calcul de la séparation linéaire. Le présent article n'a pas pour objectif de les décrire. L'outil Excel WDS-Gaia fournit le RUWE pour chaque source.

Si nous avons vu que le calcul de la séparation linéaire peut être entaché d'erreurs dans le cas des couples résolus mais serrés, l'étude exposée plus haut montre néanmoins la zone de valeurs de cette séparation dans laquelle il est raisonnable de considérer qu'un couple présente des chances d'être physique. Un seuil de 10 parsecs, tenant compte des imprécisions sur les données astrométriques exposées plus haut, semble raisonnable.

En revanche, la démarche proposée permet d'écarter un grand nombre de couples manifestement optiques car présentant une séparation linéaire bien supérieure (au-delà de 1000 Parsecs parfois) ce qui permet de les retirer de la liste d'observation.

6 Conclusions

L'intérêt de constituer une liste d'observation d'étoiles doubles visuelles présentant des chances raisonnables d'être physiques est naturellement évident.

Le calcul de la séparation linéaire des deux composantes, réalisé à partir des données Gaia DR3, permet de disposer d'un critère de sélection pertinent pour écarter un grand nombre de couples manifestement optiques, bien que référencés dans le WDS.

Ce critère ne présente pas toutefois la rigueur souhaitée, en raison de données astrométriques perturbées par la proximité des composantes et leur contamination mutuelle. Après étude de 377 couples orbitaux connus, il est proposé que cette séparation linéaire (entachée d'erreurs potentielles) se situe en dessous de 10 Parsecs pour que le couple présente des chances raisonnables d'être physique.

L'outil WDS-Gaia, construit à partir du progiciel Excel, est proposé comme outil de sélection de couples visuels dont la mesure présente une chance raisonnable d'utilité.

7 Remerciements

Je remercie F. Arenou pour son aide dans l'interprétation des données Gaia, pour les documents fournis et pour la réactivité dont il a fait preuve pour répondre aux nombreuses questions que je lui ai posées.

Je remercie également D. Bonneau pour son aide afin d'appréhender la réalité du couple HLD 60.

Références :

- [1] Washington Double Star Catalog
<http://www.astro.gsu.edu/wds/>
- [2] Gaia Data Release 3
<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3>
- [3] Measurement of doubles stars with a CCD caméra : Two methods - J. Smolinski1 and W. Osborn – 2006
- [4] Gaia Early Data Release 3 - Catalogue validation A&A 649, A5 (2021)
<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2021/05/aa39834-20.pdf>
- [5] WDSTOOL – Recherche et édition de listes d'étoiles doubles visuelles – David CHIRON
<http://wdstool.com/>
- [6] The CPMDS catalogue of common proper motion double stars in the Bordeaux Carte du Ciel zone - P. Gavras, D. Sinachopoulos, J. F. Le Champion, and C. Ducourant
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00542350/document>
- [7] <http://villemin.gerard.free.fr/Wwwgymm/Geometri/Trapeze.htm#isocele>
- [8] Data Model Gaia DR3 – Main catalog
https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/Gaia_archive/chap_datamodel/sec_dm_main_source_catalogue/ssec_dm_gaia_source.html
- La référence fournie correspond aux données du catalogue principal Gaia DR3. Les données Gaia DR1 et DR2 sont également disponibles sur le même site.
- [9] Gaia Archive
<https://gea.esac.esa.int/archive/>
- [10] "THEORETICAL IMPLICATIONS OF WIDE BINARY OBSERVATIONS" de Ira Wasserman et Martin D. Weinberg - 1987, ApJ 312, 390-401
- [11] "DETECTION OF BINARIES WITH PROJECTED SEPARATIONS AS LARGE AS 0.1 PARSEC" de David W.Latham et al. (1984,ApJ 281, L41-L45)
- [12] Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars
<http://www.astro.gsu.edu/wds/orb6.html>
- [13] Site internet de la commission des étoiles doubles de la SAF <https://ced.saf-astronomie.fr/>
- [14] <https://www.handprint.com/ASTRO/bineye5.html>



Philippe LAURENT

Je suis astronome amateur depuis mon plus jeune âge. Membre de la Commission des étoiles doubles de la SAF depuis un peu plus de 10 ans, j'ai pu approfondir ce domaine de l'astronomie qui m'a toujours passionné et me consacrer à des travaux apportant une contribution scientifique, même modeste.