PROJET OLED : OCCULTATIONS D'ÉTOILES DOUBLES PAR LA LUNE

Project OLED: lunar occultations of double stars

Enrique VELASCO [(1)], **Philippe LAURENT** [(2)]

1 Professeur titulaire de physique théorique de la matière condensée à l'Universidad Autónoma de Madrid, enrique.velasco@uam.es
2 Société Astronomique de France, Commission des Étoiles Doubles, apilaure_astro@yahoo.fr

Résumé

Les occultations par la Lune sont une technique puissante permettant d'obtenir une astrométrie de haute résolution. Appliquée aux étoiles doubles, il est désormais possible d'obtenir une astrométrie relative au niveau de 10 milliarcsecondes en utilisant un équipement amateur adéquat. Cependant, la collaboration entre différents observateurs situés dans une zone géographique suffisamment vaste est essentielle, car un minimum de deux observations est requis pour résoudre l'astrométrie de l'étoile double. Le projet OLED vise à animer un groupe d'observateurs en France et en Espagne pour analyser les étoiles du WDS et d'autres catalogues, dans le but de mesurer par occultation lunaire les paires serrées, découvrir de nouvelles duplicités et contribuer au domaine en utilisant une méthode peu usitée mais puissante.

Abstract

Lunar occultations is a powerful technique that allows to obtain high resolution astrometry. As applied to double stars, it is possible to retrieve relative astrometry at the 10 milliarcsecond level using adequate amateur equipment. However, collaboration between different observers located in a sufficiently large geographical area is essential, as a minimum of two observations are required to solve the astrometry of the double star. The OLED project is an effort to organize a group of observers from France and Spain to analyze stars of the WDS and other catalogues, with the aim to measure close pairs, discover new duplicities and contribute to the field using a little used yet powerful method.

Keywords: astrometry, binaries, techniques : lunar occultation

1 Introduction

Les occultations par la Lune ont commencé à être enregistrées peu après l'invention du télescope. Cependant, ce n'est qu'au XIXe siècle que le véritable potentiel du phénomène en tant qu'outil astrométrique a été mis en œuvre. Nous notons que le mouvement apparent de la Lune dans le ciel (environ 0,5"/s) est idéal pour le travail d'occultation : il est suffisamment lent pour obtenir une grande précision spatiale, mais assez rapide pour que la Lune couvre une zone considérable du ciel et occulte donc de nombreux objets en peu de temps. Un calcul simple permet de conclure que 10 % du ciel sont couverts par la Lune au cours de sa période de 18,6 ans. En multipliant par le nombre d'étoiles du catalogue WDS, cela implique qu'environ 16000 étoiles doubles répertoriées seront occultées par la Lune pendant cette période, la plupart d'entre elles à plusieurs reprises. Ce nombre élevé signifie qu'il y a beaucoup de travail accessible dans ce domaine.

L'utilisation de la Lune en tant qu'outil de mesure astrométrique repose sur un fait simple mais utile : à l'instant précis où une étoile est occultée, l'observateur, le limbe lunaire et l'étoile se trouvent tous sur une ligne droite[1]. Cette relation entre le moment de l'occultation, la position de l'observateur, la position de la Lune, l'élévation de la topographie lunaire sur la surface de référence et la position de l'étoile peut être exploitée à notre avantage : si nous connaissons quatre des ingrédients précédents, le facteur restant peut être extrait de manière statistique. Au fil des années, la nature du facteur inconnu a varié en fonction du niveau de connaissance des autres éléments. Ainsi, des années 1960 aux années 1980, les occultations lunaires ont été abondamment utilisées pour aider à définir une échelle de temps uniforme, le Temps des Éphémérides, qui corrigeait les imperfections du temps astronomique, fondé jusque là sur la rotation intrinsèquement erratique de la Terre.

Dans les années 1980, le temps atomique a été normalisé et des moyens efficaces de sa diffusion à l'échelle mondiale ont été établis. Les occultations lunaires n'étaient plus nécessaires à des fins de définition du temps. Cependant, l'observation des occultations n'était pas abandonnée. L'origine des coordonnées des catalogues d'étoiles (qui sont définies indirectement à partir des coordonnées des étoiles contenues dans le catalogue) était affinée en utilisant des mesures d'occultations lunaires, et les irrégularités de l'orbite lunaire étaient également surveillées de cette manière. Mais encore une fois, la nouvelle technologie précise fondée sur l'interférométrie à très longue base et la modélisation de la dynamique du Système Solaire, y compris les effets relativistes, à l'aide de puissants ordinateurs, ont à nouveau relégué les occultations lunaires à l'obscurité.

1 Ceci est seulement approximatif en raison du "temps de propagation de la lumière", c'est-à-dire le temps nécessaire à la lumière pour voyager de la Lune à la Terre. Ce temps doit être pris en compte dans les occultations par la Lune, car il équivaut à environ une seconde, alors que les calculs exigent des précisions de quelques millisecondes.

Aujourd'hui, les occultations lunaires sont principalement utilisées dans le domaine professionnel pour estimer les diamètres des étoiles, et seuls quelques amateurs appliquent cette technique dans le but d'estimer les paramètres des étoiles doubles. L'effort est principalement entrepris par l'IOTA (International Occultation Timing Association [1]), une organisation amateure principalement dédiée aux occultations d'étoiles par les astéroïdes, avec une certaine activité dans le domaine des étoiles doubles. Alors que les observations d'astéroïdes ont gagné en popularité, l'application des occultations lunaires à l'étude des étoiles doubles est sous-estimée et certainement en déclin. Néanmoins, certains observateurs d'étoiles doubles ont exprimé un vif intérêt pour entreprendre ce travail. Pourquoi cela ?

Les occultations lunaires donnent accès à des mesures astrométriques de haute résolution. En supposant une occultation instantanée d'une étoile par la Lune, une précision de mesure de 0,01 seconde dans le temps d'occultation se traduit par une précision étonnante de 5 millisecondes d'arc (mas) dans le domaine spatial (0,5"/s x 0,01s = 0,005"). Ce niveau de précision est étonnant et s'avère inestimable pour mener une astrométrie stellaire de haute précision. Il est important de souligner que les astronomes amateurs peuvent facilement obtenir des mesures temporelles avec ce niveau de précision en utilisant un équipement minimal et une courte période de formation. En utilisant quelques techniques supplémentaires, un peu de patience et en favorisant la collaboration entre les observateurs, les occultations lunaires peuvent fournir une astrométrie relative (séparation Rho et angle de position Thêta) très précise pour les étoiles doubles dans la plage de 10 à 100 mas. Ce niveau de précision surpasse les techniques photographiques et manuelles traditionnelles, et surclasse les techniques interférométriques des tavelures fondées sur des télescopes amateurs, car il est possible d'accéder à des paires d'étoiles doubles avec des séparations inférieures à 0,1″ en utilisant des ouvertures de télescope relativement modestes (100mm par exemple). Cependant, il est nécessaire de reconnaître que les occultations lunaires ne constituent pas une méthode pour mesurer massivement les étoiles doubles. De plus, cette technique nécessite de maitriser quelques subtilités, et l'estimation finale demande un travail de réduction significatif. Heureusement, les observateurs n'ont pas à s'inquiéter de cette procédure complexe, car elle est bien documentée et peut être automatisée grâce à un pipeline de calcul avec un contrôle d'erreur robuste.

2 Le Projet OLED

Fin 2021, la Commission des Étoiles Doubles de la Société Astronomique de France a lancé un projet pour observer les occultations lunaires d'étoiles doubles (Projet OLED, « Occultations Lunaires d'Étoiles Doubles », encore appelé OLED-France). Indépendamment, un groupe d'observateurs de l'Agrupación Astronómica de Madrid, avec le soutien de l'Universidad Autónoma de Madrid, de la Federación de Asociaciones Astronómicas de España (FAAE) et de la Sociedad Española de Astronomía (SEA), a créé fin 2022 le Proyecto OLED (« Ocultaciones Lunares de Estrellas Dobles » ou encore OLED-Espagne [2]). Le projet a bénéficié de la participation d'astrophotographes et de photométriciens expérimentés, dont certains sont activement impliqués dans la recherche sur les occultations d'astéroïdes, en plus de quelques astronomes amateurs débutants dans ce domaine.

Le processus de formation pour le travail d'occultation par la Lune n'est pas difficile, mais nécessite parfois des conseils sur les étapes essentielles. Cela inclut la détermination des paramètres optimaux de la caméra numérique (exposition, temps d'échantillonnage, région d'intérêt sur les images) et le traitement des images pour obtenir une courbe de lumière. L'estimation des instants de contact (comme discuté plus loin) peut être effectuée par l'observateur en utilisant un logiciel standard ou par le coordinateur, qui accepte également les enregistrements complets pour le calcul des courbes de lumière, surtout pour les observations réalisées dans des conditions difficiles. Un aspect de l'observation particulièrement important est la base temporelle de l'équipement, qui n'est généralement pas une préoccupation pour les astronomes amateurs. Cependant, dans ce projet, des précisions allant jusqu'à 10-20 ms sont nécessaires, et heureusement, il existe quelques méthodes faciles à mettre en œuvre pour que les amateurs atteignent ce niveau de précision.

Les observations des projets OLED France et OLED Espagne sont désormais mutualisées. À ce jour, le projet a rassemblé plus de vingt observateurs répartis dans différentes régions de la péninsule ibérique, aux îles Baléares et aux îles Canaries, ainsi que trois observateurs de Provence et de Bavière. En un peu plus d'un an, le projet a recueilli des données pour près de 200 contacts, tant sur des étoiles simples que doubles.

Comme nous le soutiendrons plus loin, pour une détermination réussie des paramètres d'une étoile double, un minimum de deux observations de la même occultation provenant de stations suffisamment éloignées sont nécessaires. Alternativement, les données de deux occultations ou plus de la même étoile lors de différentes lunaisons, peuvent être combinées (que les observateurs soient identiques ou différents). Dans tous les cas, une large répartition géographique des stations est d'une importance capitale si l'on vise une précision astrométrique élevée. Par conséquent, le travail sur les occultations par la Lune appliqué aux étoiles doubles est un effort collaboratif où un groupe d'observateurs collaborent au sein d'un programme organisé. À cet égard, il était donc naturel que les deux groupes OLED unissent leurs efforts et collaborent dans le cadre d'un projet unifié. En quelque sorte, le présent article concrétise l'aspiration des coordinateurs à une telle collaboration entre les deux projets.

3 Circonstances d'une occultation lunaire

La figure 1 illustre le schéma d'une occultation lunaire. La ligne droite représente la trajectoire (une corde du disque lunaire apparent) d'une étoile par rapport à la Lune, qui se déplace effectivement d'ouest en est par rapport au fond d'étoiles. Par conséquent, une étoile occultée disparaîtra d'abord à un point spécifique le long du limbe lunaire oriental (point D), puis réapparaîtra un peu plus tard à un point spécifique le long du limbe occidental (point R). Les positions de ces points le long du limbe sont définies par leurs angles de position, γ, mesurés dans le plan du ciel depuis le côté nord du méridien céleste lunaire vers l'est. Alternativement, le paramètre d'impact *b* peut être utilisé, fournissant la distance fractionnaire de la corde au centre du disque lunaire apparent : une occultation avec une durée maximale correspondra à $b=0$, tandis qu'une occultation rasante à $b=1$.

À leur tour, un événement d'occultation, soit D soit R, peut se produire aux limbes lunaires illuminés ou sombres. Mis à part les étoiles très lumineuses, les phénomènes utiles du point de vue de l'observation se produisent au limbe sombre. De plus, près de la pleine Lune, l'éclat lunaire peut gêner considérablement les observations, tandis qu'à proximité de la nouvelle Lune, la proximité avec le Soleil rendra les observations très difficiles.

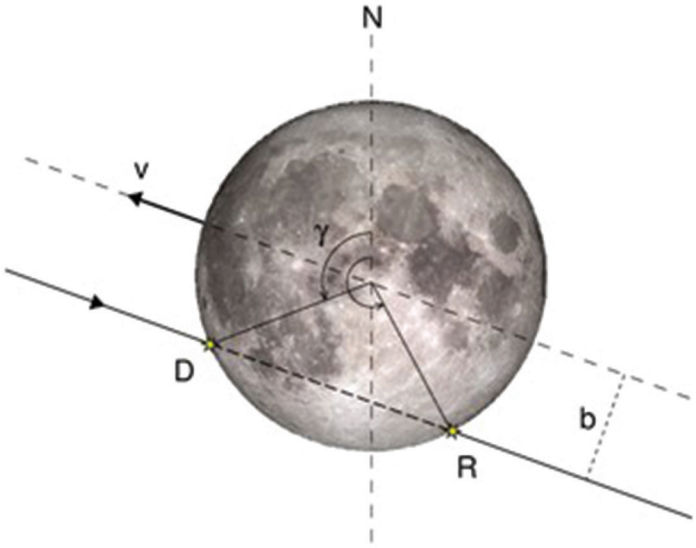

Figure 1. Schéma des circonstances d'une occultation lunaire. La trajectoire apparente d'une étoile est dessinée au moment où elle croise le disque lunaire à deux points de contact sur le limbe : D (Disparition) et R (Réapparition). Les positions des points de contact sont déterminées par leurs angles de position (γ), mesurés du nord vers l'est dans le plan du ciel. Le trajet de l'étoile est parallèle au mouvement apparent de la Lune, représenté par la vitesse (v). De plus, la trajectoire de l'étoile peut être caractérisée par le facteur d'impact (b), caractérisé par la distance entre la trajectoire et le centre du disque en unités fractionnaires du demi-diamètre apparent de la Lune.

Cela signifie que les fenêtres d'observation sont généralement restreintes du jour 4 au jour 12 puis du jour 16 au jour 25 du mois lunaire.

4 L'idée de base : une étoile individuelle

Considérons la disparition d'une étoile (la réapparition est un phénomène symétrique et la discussion est identique). Au moment précis de l'occultation, noté t_1, un observateur (observateur 1) verra le limbe lunaire apparent projeté sur la sphère céleste sur la grille des méridiens et parallèles célestes, comme le montre la figure 2(a). Étant donné qu'il n'est pas possible de déterminer avec précision l'emplacement exact du point de contact le long du limbe lunaire, l'observateur ne peut que déterminer qu'au moment t_1, l'étoile se trouvera quelque part le long du limbe (dessiné en rouge). D'autre part, un autre observateur (observateur 2) mesurant la même occultation verra l'étoile disparaître à un instant différent t_2, figure 2(b), et à un point de contact le long d'un autre limbe (dessiné en bleu). Les différents limbes découlent de la grande valeur de la parallaxe lunaire, qui fait que les deux limbes apparents sont projetés différemment dans le ciel, avec des profils différents et des angles distincts par rapport à la grille des méridiens et parallèles célestes. Étant donné que l'étoile occupe la même position dans le ciel pour tous les observateurs, les deux limbes se croiseront exactement à cette position α,δ (ascension droite et déclinaison, respectivement).

Évidemment, il est physiquement impossible pour l'un ou l'autre des observateurs de voir les deux limbes projetés dans le ciel en même temps, mais nous pouvons utiliser les lois de la mécanique céleste et un ordinateur pour dessiner les limbes sur la grille céleste et calculer avec précision le point de croisement [3]. Des incertitudes potentielles découlent de l'estimation du temps de contact et de la détermination de l'emplacement précis du limbe lunaire, avec des erreurs allant jusqu'à 15-20 milliarcsecondes (mas).

Un exemple est donné dans la figure 3, qui montre les limbes projetés (à une petite échelle de 1,6" x 1,6") lors de l'occultation de PPM 119002 le 29 janvier 2023. Dans ce cas, la position de l'étoile déduite des occultations (point noir) est très proche de la position prédite par le catalogue Gaia DR3, extrapolée à l'époque de l'observation, le point d'intersection entre les deux limbes étant à seulement 7 millisecondes d'arc de cette position (notez que, sur le graphique, les coordonnées relatives sont référencées par rapport à cette dernière position, de sorte que la position prédite coïncide avec l'origine). Cela signifie que l'étoile suit effectivement un mouvement rectiligne dans le ciel, et que la position du catalogue et les mouvements propres linéaires

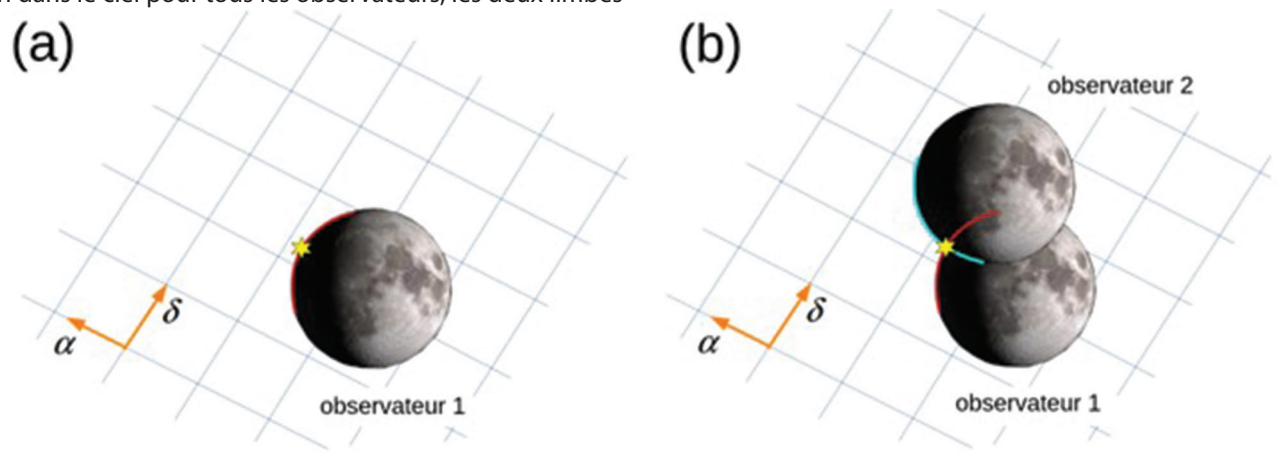

Figure 2. (a) L'observateur 1 voit la Lune projetée sur le ciel par rapport à la grille des méridiens célestes et des parallèles célestes. À l'instant t_1 (représenté par la Date Julien), l'étoile est occultée, ce qui signifie que l'étoile se trouvera à un certain point le long du limbe lunaire (représenté par une ligne rouge). (b) L'observateur 2 voit la Lune projetée dans une position différente. À l'instant d'occultation t_2 (qui, selon les positions géodésiques des observateurs, peut différer de t_1 d'une fraction d'heure), l'étoile se trouvera à un (différent) point le long du limbe (dessiné par une ligne bleue). Comme l'étoile occupe une position définie sur le ciel, les deux limbes doivent nécessairement s'intersecter à cette position, et les coordonnées célestes de l'étoile (a,d) peuvent être facilement extraites. Notez que les deux observateurs pourraient être les mêmes, et les moments t_1 et t_2 pourraient être séparés de plusieurs mois, voire plusieurs années. La position déduite sera correcte si elle est associée au temps moyen de l'observation $(t_1+t_2)/2$.

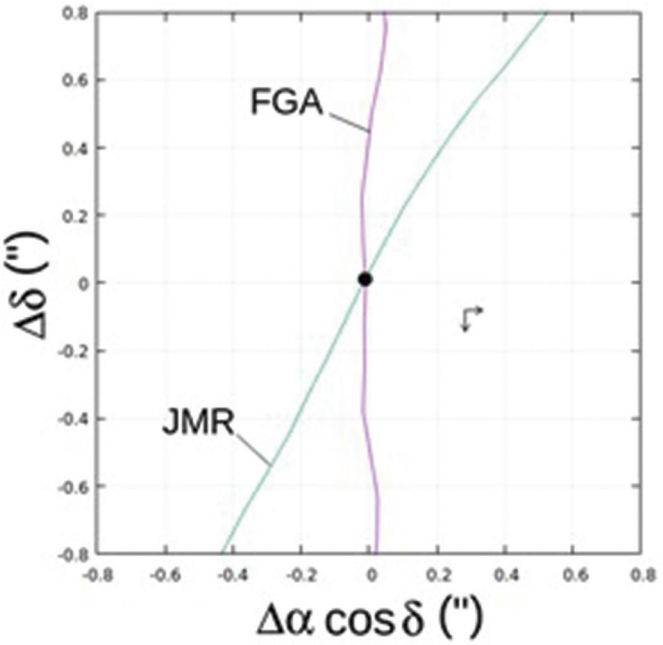

Figure 3. Limbes lunaires apparents projetés sur le ciel calculés pour deux observateurs (Faustino García dans les Asturies et Jordi Marco en Catalogne) au moment de leur contact respectif, lors de l'occultation de PPM 119002, survenue le 29 janvier 2023. La position de l'étoile dans le ciel peut être déduite de l'intersection des deux limbes (cercle noir) sans aucune hypothèse. L'origine du graphique correspond à la position de l'étoile telle que déduite du catalogue Gaia DR3 (avancée à l'époque de l'observation, en supposant un mouvement rectiligne tridimensionnel). Comme le montre clairement le graphique, la position calculée coïncide presque avec celle extraite du catalogue (en fait à moins de 7 millisecondes d'arc), ce qui représente un changement de 52 millisecondes d'arc et -57 millisecondes d'arc sur les axes x et y, respectivement, depuis l'époque du catalogue jusqu'à l'époque de l'observation (les flèches représentent l'amplitude de ces déplacements).

sont corrects et compatibles avec l'analyse de l'occultation lunaire. Pour mettre ce résultat dans une perspective plus quantitative, le déplacement attendu de l'étoile sur le ciel depuis l'époque du catalogue jusqu'à l'époque de l'observation est de 0,052″ en Δα cos δ et -0,057″ en Δδ. Le fait que la prédiction de l'occultation par la Lune soit bien en deçà de l'amplitude de ce déplacement atteste de la puissance de cette technique en tant qu'outil astrométrique.

La position estimée de l'étoile est totalement indépendante de toute coordonnée supposée pour l'étoile. Cela signifie que si la position du catalogue était très éloignée de la position réelle, la méthode d'occultation par la Lune récupèrera *miraculeusement* la position correcte, à condition qu'elle ne soit pas trop éloignée de la position du catalogue, de sorte que les deux limbes s'intersectent en un point unique. Cela est dû au fait que la mesure du temps de l'occultation peut être transformée en une mesure spatiale en utilisant la Lune comme une outil astrométrique.

Le même principe s'applique lorsque les deux observations se rapportent à des lunaisons différentes, impliquant soit les mêmes observateurs, soit des observateurs différents. Pour les objets célestes à mouvement lent comme les étoiles, les observations espacées de plusieurs mois voire de plusieurs années seront tout aussi utiles. Dans de tels cas, l'époque de la position astrométrique correspond à la moyenne des époques, à condition qu'elles ne soient pas trop éloignées.

Lorsque plusieurs observateurs enregistrent la même occultation ou une occultation différente d'une étoile, un critère supplémentaire devient nécessaire pour déterminer la position de l'étoile, étant donné que trois limbes ou plus projetés ne se croiseront jamais en un point unique. Un critère pratique implique la fonction χ^2, donnée par la somme des distances au carré de l'étoile au limbe lunaire, $f_i(\alpha,\delta;t_i)$, au moment du contact t_i, pour tous les N observateurs [4] :

$$\chi^2(\alpha,\delta) = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{f_i(\alpha,\delta;t_i)}{\sigma_i}\right]^2 \rightarrow min. \qquad (1)$$

σ_i est l'incertitude estimée associée au i-ème observateur. La fonction f_i est en fait la valeur habituelle de l'O-C (Observé moins Calculé) pour chaque observation, à la différence qu'ici, les coordonnées *(α,δ)* de l'étoile ne sont pas supposées provenir d'une source externe, mais sont autorisées à varier et réellement optimisées, et donc générées, par la procédure elle-même. Cela est fait en minimisant χ^2 par rapport à la position de l'étoile *(α,δ)*,

$$\frac{\partial\chi^2}{\partial\alpha} = 0\,,\frac{\partial\chi^2}{\partial\delta} = 0 \qquad (2)$$

ce qui fournit la meilleure estimation de cette dernière. Idéalement, l'étoile devrait se situer exactement aux limbes locaux pour tous les observateurs, atteignant ainsi $\chi^2=0$. En pratique, les incertitudes d'observation et de calcul aboutiront à une valeur de χ^2 non nulle. Le critère du moindre carré, encapsulé dans l'équation (1-2), garantira que cette valeur non nulle sera la plus petite possible, et donc que la position estimée sera la meilleure possible pour l'ensemble des observations disponibles et pour le niveau d'incertitudes d'observation et de calcul. La section 10 présente un exemple de l'application de cette technique sur les étoiles doubles.

5 La courbe de lumière et la détermination de l'instant de contact

Le paramètre observationnel crucial dans une occultation par la Lune est l'instant de contact, essentiel pour l'analyse ultérieure. Le temps de contact est déterminé à partir de la courbe de lumière, qui représente le flux émis par l'étoile en fonction du temps UTC. Historiquement, les photo-électromètres étaient utilisés pour capturer le flux de l'étoile. Cependant, de nos jours, les caméras numériques sont devenues le choix privilégié, bien que les caméras analogiques soient encore couramment utilisées dans les études d'occultation. Pour obtenir la courbe de lumière, les images doivent être enregistrées et analysées. Les fichiers vidéo sont généralement accompagnés d'horodatages sur chaque image, tandis que les caméras numériques CCD ou CMOS utilisent principalement des fichiers SER ou FITS, où l'horodatage de chaque image est intégré dans l'en-tête du fichier. La courbe de lumière est ensuite calculée à partir des images à l'aide de techniques standard telles que la photométrie par ouverture. Divers logiciels sont disponibles à cet effet, le logiciel Tangra [4] étant particulièrement adapté à l'analyse des occultations.

À titre d'exemple, la figure 4 présente la courbe de lumière de l'occultation par la Lune de l'étoile PPM 096718. On observe une chute brutale du flux lumineux au moment où l'étoile se

cache derrière le limbe lunaire. La détermination de l'instant de contact est généralement aisée, sauf dans les cas où le bruit du signal des deux régions (avant et après les occultations) interagit de manière significative. Il est important de savoir si la datation enregistrée correspond au début ou à la fin de chaque trame selon le logiciel d'acquisition utilisé. Les caméra dites « rolling shutter » peuvent induire un écart entre la datation de la trame et l'instant réel d'acquisition qui dépend de la position de la cible sur le capteur. Cet écart prédictible peut être corrigé. Les situations où le limbe lunaire est visible et a une intensité similaire à celle de l'étoile peuvent poser d'importants défis. Des techniques statistiques spéciales peuvent être appliquées pour déterminer le temps précis de l'occultation, et des logiciels gratuits peuvent être utilisés pour analyser les courbes de lumière, par exemple AOTA intégré au logiciel Occult) ou PyOTE, disponibles sur le site web de l'IOTA [2]. Des temps d'échantillonnage plus courts (<10 ms) peuvent produire des courbes lisses révélant des effets de diffraction. Dans ces cas rares, le logiciel peut appliquer des

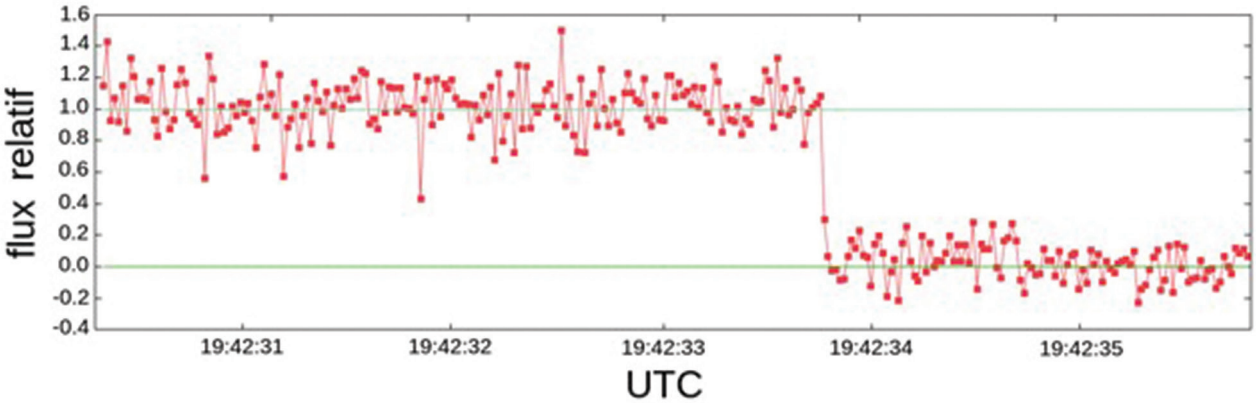

Figure 4. Courbe de lumière de l'occultation de l'étoile PPM 096718 le 25 septembre 2023, obtenue par Rosendo Jorba depuis Caraquiz, Guadalajara, à l'aide d'un équipement de niveau amateur et un temps d'échantillonnage de 19 ms. Le flux est normalisé à l'unité avant l'immersion et décalé à zéro après l'occultation. Le temps de contact estimé, 19:42:33.778 UTC, peut être déduit directement de la courbe de lumière.

modèles physiques sophistiqués à partir desquels l'instant de contact peut être extrait.

6 Le limbe lunaire

Dans l'introduction, nous avons souligné que pour estimer avec précision la position d'une étoile en utilisant les occultations par la lune, divers facteurs doivent être pris en compte, contribuant au résultat final et demandant un contrôle précis de tous les éléments impliqués. La position de l'observateur peut être déterminée avec une grande précision en utilisant un récepteur GPS. Ensuite, la position de l'observateur doit être liée au référentiel céleste en utilisant UT1, le temps universel astronomique au moment de l'observation. UT1 [5] (plus connu sous le nom de UT) quantifie l'angle de rotation (erratique) de la Terre ce qui permet donc de situer précisément l'observateur par rapport au cadre de référence céleste. La Terre se comporte assez bien ces dernières années (pas de secondes intercalaires depuis 2016), presque en synchronisation avec l'UTC fondé sur le temps atomique, de sorte que l'effet est désormais minuscule (par exemple UT1-UTC = 0,01445s pour le 23 octobre 2023, et sa valeur absolue ne dépasse jamais 0,9s). De plus, le mouvement polaire (le déplacement lent du pôle Nord par rapport à l'axe de rotation de la Terre) a une amplitude mineure mais doit également être pris en compte pour une analyse précise. Enfin, les transformations de précession et de nutation sont nécessaires pour positionner définitivement l'observateur par rapport au Système de Référence Céleste International (ICRS), auquel les éphémérides des étoiles et de la Lune sont référencées. Une fois que tous les éléments - observateur, Lune et étoile - sont référencés dans le même système de coordonnées, l'analyse de l'occultation peut être réalisée.

Chaque fois que cela est possible, les positions des étoiles de Gaia DR3 devraient être utilisées. De plus, l'exactitude actuelle des éphémérides lunaires est très élevée, de l'ordre de 0,1 mas en position céleste. Le facteur restant concerne le limbe lunaire visible par un observateur au moment précis de l'observation. Cela se manifeste par la projection de la Lune tridimensionnelle sur la sphère céleste. La topographie lunaire était relativement inconnue jusqu'à récemment. À présent, nous avons accès à des modèles d'élévation précis pour la topographie lunaire, référencés à une lune sphérique conventionnelle qui approxime la Lune à une sphère parfaite d'un rayon de 1737,4 km. En utilisant une éphéméride lunaire, il est possible d'orienter très précisément la Lune pour un observateur terrestre spécifique, et le modèle d'élévation nous permet de délimiter les limites du limbe lunaire sur la sphère céleste avec une précision d'environ 5 mas. Ces récents progrès, fondés sur les

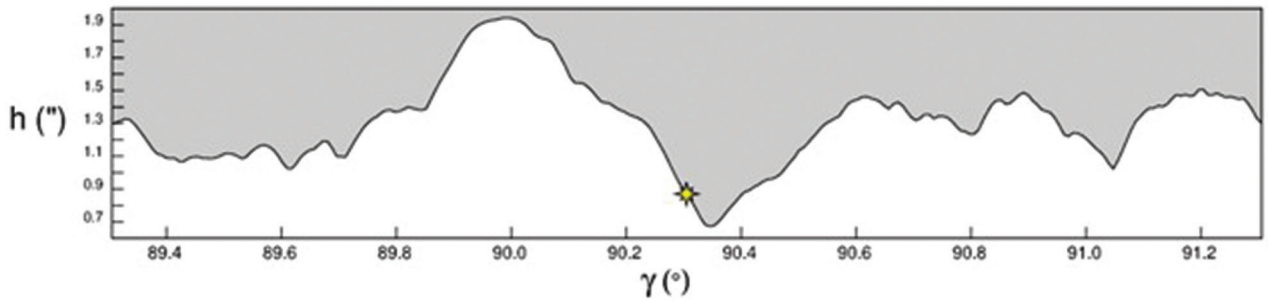

Figure 5. Limbe lunaire projeté au moment précis de l'occultation de PPM 119426 le 16 décembre 2021, tel qu'observé depuis le point de vue de l'observateur terrestre. L'étoile est également représentée. L'axe vertical représente un angle mesuré dans le ciel dans la direction radiale de la Lune, tandis que l'axe horizontal représente l'angle de position le long du limbe lunaire. L'échelle de l'axe vertical a été agrandie 10 fois par rapport à l'échelle horizontale pour mettre en évidence la topographie lunaire.

observations des orbiteurs lunaires tels que LRO ou Selene [6], ont considérablement renforcé la technique d'occultation par la Lune avec des capacités hautement quantitatives.

Pour illustrer ce point, la figure 5 présente une représentation du limbe lunaire tel qu'il est vu par un observateur terrestre en un endroit spécifique sur Terre et au moment précis de l'occultation de l'étoile PPM 119426 (survenue le 16 décembre 2021). Les données sont réelles et reflètent la grande précision de tous les éléments impliqués. L'axe vertical représente un angle projeté sur la sphère céleste à la distance lunaire topocentrique le long de la direction radiale lunaire, tandis que l'axe horizontal est l'angle de position du contact le long de la lune de référence apparente. Remarquez l'axe vertical fortement amplifié par rapport à l'axe horizontal (environ 10 fois plus grand). L'étoile s'aligne précisément avec le limbe au moment du contact enregistré.

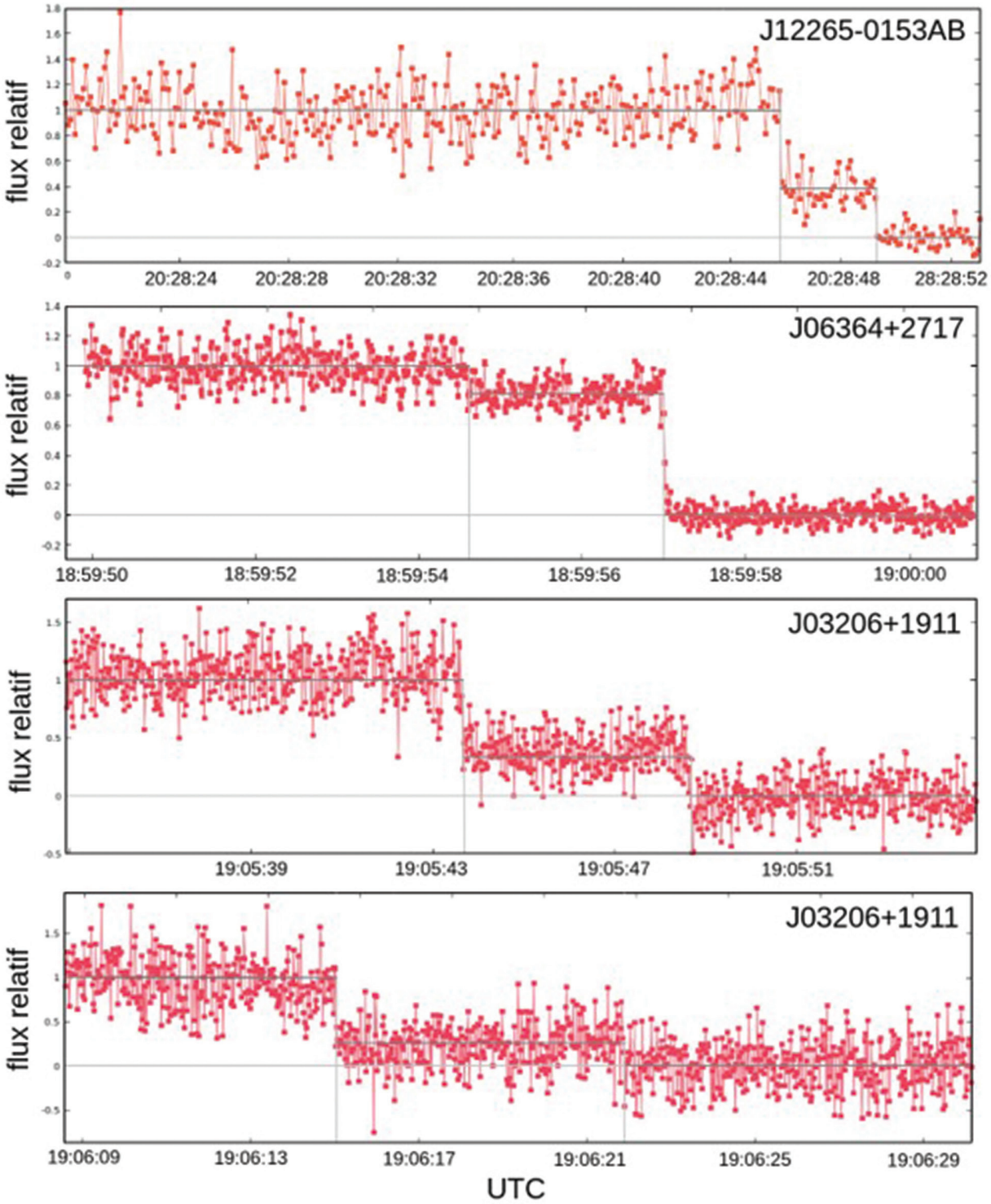

Figure 6. Exemples de courbes de lumière étagée obtenues à partir d'occultations lunaires d'étoiles doubles. Tous les cas correspondent à des immersions dans le limbe sombre. (a) Un palier très net à un flux relatif proche de 0,4. Les niveaux de bruit des signaux avant le premier contact, au niveau du palier et après le second contact ne se chevauchent pas, ce qui permet de détecter facilement les moments de contact. (b) Les niveaux de bruit avant et après le premier contact se chevauchent fortement. Le palier, à un niveau d'environ 0,8, est très clair, mais pour estimer le temps du premier contact, des techniques statistiques sont nécessaires et l'incertitude est significative. Dans (c) et (d), les courbes de lumière correspondent à la même occultation mais ont été obtenues à partir de différentes stations. L'estimation du second contact dans (d) est particulièrement difficile et l'incertitude résultante est très élevée. Les données des courbes de lumière ont été obtenues par (de haut en bas) : Pedro Benedicto, Jordi Marco, Ricard Casas et Jordi Marco.

7 Application aux étoiles doubles

Le même principe abordé dans la section 4 concernant une étoile individuelle peut être étendu aux étoiles doubles. Considérons une étoile double dont les composantes sont trop proches pour être distinguées individuellement et qui subissent une occultation lunaire. Le flux lumineux capturé de l'étoile sera la somme des flux des deux composantes. Dans ce scénario, les courbes de lumière présenteront une forme étagée comme illustré dans la figure 6, avec deux temps de contact séparés par un intervalle de temps t, correspondant aux contacts des deux composantes A et B. En utilisant les flux normalisés, la hauteur de l'étape intermédiaire sera liée aux magnitudes des deux composantes de l'étoile double. Supposons m_A et m_B être les magnitudes respectives, et utilisons la relation m = -2.5 log I, entre le flux I et la magnitude m. Selon que la composante A ou B disparaît ou réapparaît en premier, le flux relatif de l'étape peut être plus élevé ou plus bas. En inversant la relation ci-dessus, nous arrivons aux relations suivantes pour le flux relatif :

$$r_1 = \frac{I_B}{I_A+I_B} = \frac{1}{1+10^{0.4(m_B-m_A)}}$$

$$r_2 = \frac{I_A}{I_A+I_B} = \frac{1}{1+10^{-0.4(m_B-m_A)}} \qquad (3)$$

avec la relation évidente $r_1 + r_2 = 1$ (dans les formules 3, on a considéré que la composante B disparaît ou réapparaît en premier lieu).

Un mot de prudence est nécessaire ici : l'utilisation de filtres n'est pas recommandée dans les observations (car ils bloquent une partie du flux). De plus, l'équipe assurant la gestion du Catalogue WDS ne montre pas d'empressement à faire confiance aux déterminations photométriques des magnitudes par les amateurs, car la réponse spectrale de l'équipement peut varier d'un observateur à l'autre. Par conséquent, le flux relatif de l'étape ne peut pas être comparé entre différents observateurs, et il ne devrait être utilisé que pour garantir la cohérence.

Si les deux composantes de l'étoile double peuvent être vues séparément, il peut être nécessaire de générer deux courbes de lumière distinctes. Dans tous les cas, l'occultation d'une étoile double donne lieu à deux temps de contact, t_1 et t_2. En utilisant l'approche décrite dans la Section 2, nous pouvons obtenir deux positions, α_A, δ_A et α_B, δ_B, correspondant à chaque composante. La trigonométrie sphérique donne ensuite :

$$\cos\rho = \sin\delta_A \sin\delta_B + \cos\delta_A \cos\delta_B \cos(\alpha_A - \alpha_B),$$

$$\tan\theta = \frac{\cos\delta_B \sin(\alpha_B-\alpha_A)}{\sin\delta_B \cos\delta_A - \cos\delta_B \sin\delta_A \cos(\alpha_B-\alpha_A)} \qquad (4)$$

ou, dans la condition d'une petite séparation angulaire,

$$\rho = \sqrt{(\alpha_B-\alpha_A)^2 \cos^2\delta_A + (\delta_B-\delta_A)^2},\ \tan\theta = \frac{\alpha_B-\alpha_A}{\delta_B-\delta_A}\cos\delta_A. \qquad (5)$$

Nous présentons ci-dessous l'analyse de l'étoile double WDS J07128+2713AB (STF1037AB), observée le 29 mars 2023 depuis deux stations : Sabadell (Ricard Casas, RC1) et Barjols (Philippe Laurent, PLA). Il s'agit d'une étoile physique avec une orbite de grade 2 et une période de 118 ans. La dernière mesure remonte à 2021, avec ρ = 0,770″ et θ = 302,3°. Le catalogue Gaia DR3 (époque 2016) fournit des coordonnées distinctes pour les deux composantes.

Le diagramme d'intersection des limbes est présenté dans la figure 7(a). Les deux composantes sont incluses dans le même graphique. Les points d'intersection donnent les positions différentielles de chaque composante par rapport à l'origine (qui correspond dans chaque cas aux positions du catalogue Gaia DR3 avancées à l'époque de l'observation). À partir de ces intersections, les coordonnées absolues de chaque étoile peuvent être obtenues, et l'utilisation des équations ci-dessus fournit les valeurs de l'astrométrie relative. Nous obtenons ρ=0,790″+-0,034″ et θ=302,6°+-2,4°. La figure 7(b) montre la position de la nouvelle mesure par rapport aux mesures interférométriques précédentes et à l'orbite calculée. Par rapport à cette dernière, les valeurs O-C sont de +0,037″ et +3,1°, assez proches des incertitudes estimées (nous notons que l'orbite de cette étoile n'est pas encore définitive).

À ce stade, nous devons faire une remarque importante. La méthode d'analyse projette le limbe lunaire au moment de chaque occultation sur la sphère céleste, avec ses irrégularités locales et sa courbure moyenne. Les points d'intersection des limbes refléteront toutes ces caractéristiques simultanément, et donc la position relative correcte des deux composantes

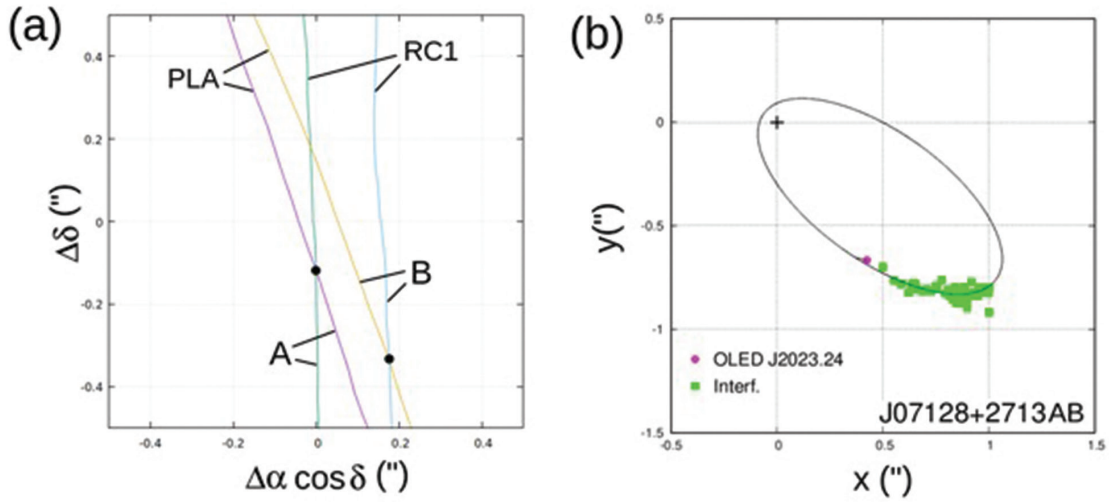

Figure 7. (a) Limbes lunaires projetées pour l'occultation de WDS J07128+2713AB le 29 mars 2023. L'occultation a été observée par Ricard Casas (RC1) et Philippe Laurent (PLA). L'origine du graphique correspond aux positions des deux étoiles obtenues à partir du catalogue Gaia DR3, extrapolées à l'époque de l'observation (notez que ces positions sont différentes car le catalogue a des entrées différentes pour chaque étoile). Les points noirs indiquent les intersections des limbes, correspondant à la position de chaque composante à l'époque de l'observation. (b) Nouvelle mesure (cercle magenta) pour l'astrométrie de l'étoile double, par rapport aux mesures interférométriques précédentes et à l'orbite calculée

sera obtenue à partir des équations (4), indépendamment de la séparation entre les composantes de l'étoile double (qu'il s'agisse de quelques millisecondes d'arc ou de quelques minutes d'arc).

Il sera fructueux de comparer les résultats obtenus pour des couples serrés par la technique d'occultation par la Lune avec d'autres méthodes de mesure comme l'interférométrie des tavelures. Cette technique permet en effet d'approcher la résolution théorique de l'instrument en limitant drastiquement les effets de la turbulence ce qui rend une cible comme WDS J07128+2713AB accessible à partir de 250mm.

8 Simplification pour les étoiles binaires proches

L'analyse des étoiles doubles avec des séparations inférieures à l'échelle où les irrégularités du limbe sont significatives peut être simplifiée en supposant que le limbe lunaire peut être approximé à une ligne droite [7], [8]. Pour les systèmes binaires proches, nous ne prévoyons pas de déplacements significatifs entre les positions du catalogue et les positions à l'époque de l'observation. Tant que les différences attendues de séparation ne dépassent pas l'échelle des irrégularités du limbe, le point de contact précis des étoiles devient sans importance. Ce qui importe, c'est la pente de la ligne droite, qui peut être calculée avec précision en utilisant la position du catalogue (généralement, le catalogue Gaia fournit une seule entrée pour les paires proches; cependant, si deux entrées sont disponibles, une pente moyenne ou effective peut être calculée). C'est très intéressant, car cela nous permet d'accéder directement à l'astrométrie relative de l'étoile double, sans avoir besoin de déterminer préalablement l'astrométrie absolue des deux composantes.

De plus, même dans le cas d'une seule observation disponible (empêchant une solution complète pour l'astrométrie relative), il est possible d'obtenir une solution unidimensionnelle et de déterminer une séparation minimale entre les composantes (appelée séparation vectorielle) à l'époque de l'observation grâce à cette technique. Un exemple est présenté dans la section suivante.

9 Possible découverte de nouvelles étoiles doubles : PPM 126988

Les occultations lunaires sont couramment utilisées depuis les années 1970 pour découvrir de nouvelles étoiles doubles. Même à l'ère actuelle de Gaia, de nouvelles duplicités continuent à être découvertes, bien qu' à un rythme plus lent. Comme nous le savons tous, les performances du satellite astrométrique Gaia dans le domaine des étoiles doubles sont stupéfiantes, tant en termes de mesures que dans la détermination des binaires à très courte période (principalement grâce à des analyses photométriques et dans une plage de séparations où deux sources distinctes ne peuvent pas être spatialement distinguées). Cependant, les capacités de Gaia ont leurs limites, notamment pour les séparations r<0,2" en raison de la précision photométrique et astrométrique limitée. Remarquablement, cette plage de séparations est idéale pour les études d'occultation par la Lune, et c'est ici que les amateurs peuvent encore apporter des contributions substantielles.

Un exemple récent est la probable duplicité mise en évidence pour l'étoile PPM 126988 par l'un des auteurs (PL), membre de OLED-France, à partir de l'occultation survenue le 23 mai 2023 et observée depuis Barjols. La séparation initiale fondée sur cette seule observation a abouti à une solution unidimensionnelle et à une séparation vectorielle de 0,103". Une seconde occultation de cette étoile, survenue le 10 octobre 2023, a pu être observée

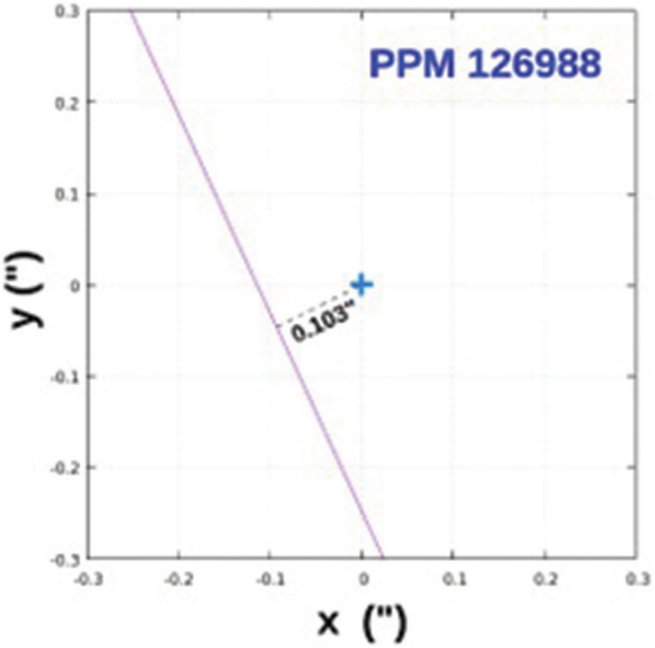

Figure 8. Diagramme de position de PPM 126988, dont la nature en tant qu'étoile double n'était pas connue avant ces observations. La possible duplicité a été découverte en mai 2023 par un seul observateur, et une solution unidimensionnelle a pu être obtenue (ligne droite). À partir de cette solution, une séparation vectorielle (séparation minimale possible) a été estimée à 0,103"

dans des conditions difficiles par deux membres d' OLED-France (P. Laurent et JF. Coliac) sans toutefois confirmer la première constatation. L'analyse des futures occultations de cette étoile devrait pouvoir confirmer sa duplicité et permettre une estimation de son astrométrie relative. La figure 8 montre la projection du limbe rectiligne sur le ciel et la séparation minimale préliminaire dérivée pour cette étoile.

10 Occultations rasantes

Lorsque le paramètre d'impact d'une occultation approche l'unité, plusieurs contacts - séquences de disparitions et de réapparitions consécutives le long du limbe - peuvent se produire. Dans le passé, ces phénomènes rasants ont joué un rôle crucial dans la détermination précise du limbe lunaire, en particulier près des régions polaires. Des réseaux de stations d'observation étaient positionnés stratégiquement perpendiculairement au chemin d'occultation à la surface de la Terre, séparées de quelques centaines de mètres. La proximité de ces stations, combinée à la considérable parallaxe lunaire, provoquait de légères déviations dans les trajectoires célestes apparentes de l'étoile par rapport au limbe lunaire. La variation des trajectoires donnait lieu à des motifs d'occultation distincts, à partir desquels le profil lunaire pouvait être déduit en combinant les observations de toutes les stations. Cette approche est similaire à celle des groupes d'observateurs déduisant la forme des astéroïdes en observant les occultations d'étoiles causées par ces petits corps. Avec les connaissances actuelles de haute précision sur la topographie lunaire et les éphémérides lunaires, les occultations rasantes ont perdu leur pertinence pour la détermination du limbe lunaire. Cependant, elles peuvent être utilisées pour effectuer des mesures précises d'astrométrie, notamment pour les étoiles doubles ou multiples. En pratique, même un seul observateur capturant de multiples contacts des deux composantes d'une étoile double peut accumuler suffisamment de points de données pour déterminer avec précision les paramètres de l'étoile double.

À titre d'exemple, nous présentons la réduction et l'analyse

des données obtenues par un groupe dédié d'observateurs en Catalogne lors de l'occultation rasante de l'étoile WDS J06200+2826 le 19 août 2006. La réduction a été récemment réalisée par l'un des auteurs (EV) à l'aide d'un logiciel spécialement développé pour le projet OLED. Bien que les observations aient été répertoriées dans la base de données d'occultation lunaire de Herald & Gault [9], l'analyse n'a pas été effectuée à cette époque en raison de la faible précision du limbe lunaire à ce moment-là, et par conséquent, la base de données WDS ne contient aucune entrée de cette observation. La décision a été prise d'améliorer le logiciel pour faciliter l'analyse des occultations rasantes, nous permettant d'appliquer la réduction et l'analyse des contacts simples ou doubles aux contacts multiples, comme dans l'observation actuelle. Un total de treize observateurs expérimentés de l'Agrupación Astronómica de Sabadell (AAS), Àngel Massallé, Ricard Casas, Carles Perelló, Antoni Ardanuy, Lluís Xifra, Joan López, Daniel Sampedro, Antoni Selva, Joan Rovira, Carles Schnabel, Montserrat Ribell, Xavier Puig et Miguel Guillén, répartis sur huit stations, ont participé aux observations. Diverses techniques, y compris l'enregistrement manuel du temps, ont été utilisées. Cinq des stations ont enregistré les occultations.

WDS J06200+2826 est un système stellaire triple, avec à la fois AB et AB,C constituant des binaires physiques (l'orbite de la paire AB est de grade 2). Plusieurs contacts ont été observés pour chacune des trois composantes. La tâche complexe d'associer chaque contact à sa composante correspondante a été habilement réalisée par les membres de l'AAS.

Pour déterminer la position optimisée de chaque composante, une méthode des moindres carrés, (équations 1 et 2), a été utilisée. Ces positions optimisées, ainsi que le limbe lunaire, ont été projetées sur la sphère céleste pour tous les contacts observés, comme illustré dans la figure 9. La représentation montre l'alignement remarquablement proche des contacts avec le limbe lunaire aux moments estimés. Notamment, la plupart des estimations ont été faites manuellement, soulignant l'effort méticuleux impliqué aux observations.

Dans la figure 10, l'orbite de la paire AB est représentée, intégrant les mesures disponibles ainsi que la nouvelle mesure dérivée de l'occultation rasante (cercle bleu clair). Il convient de souligner le niveau élevé de précision atteint

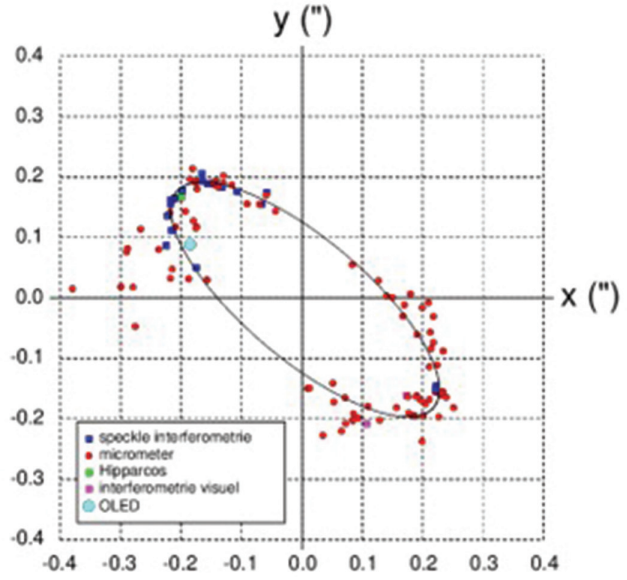

Figure 10. Orbite de J06200+2826AB, avec les mesures précédentes et avec la nouvelle mesure dérivée de l'analyse de l'occultation rasante (cercle bleu clair).

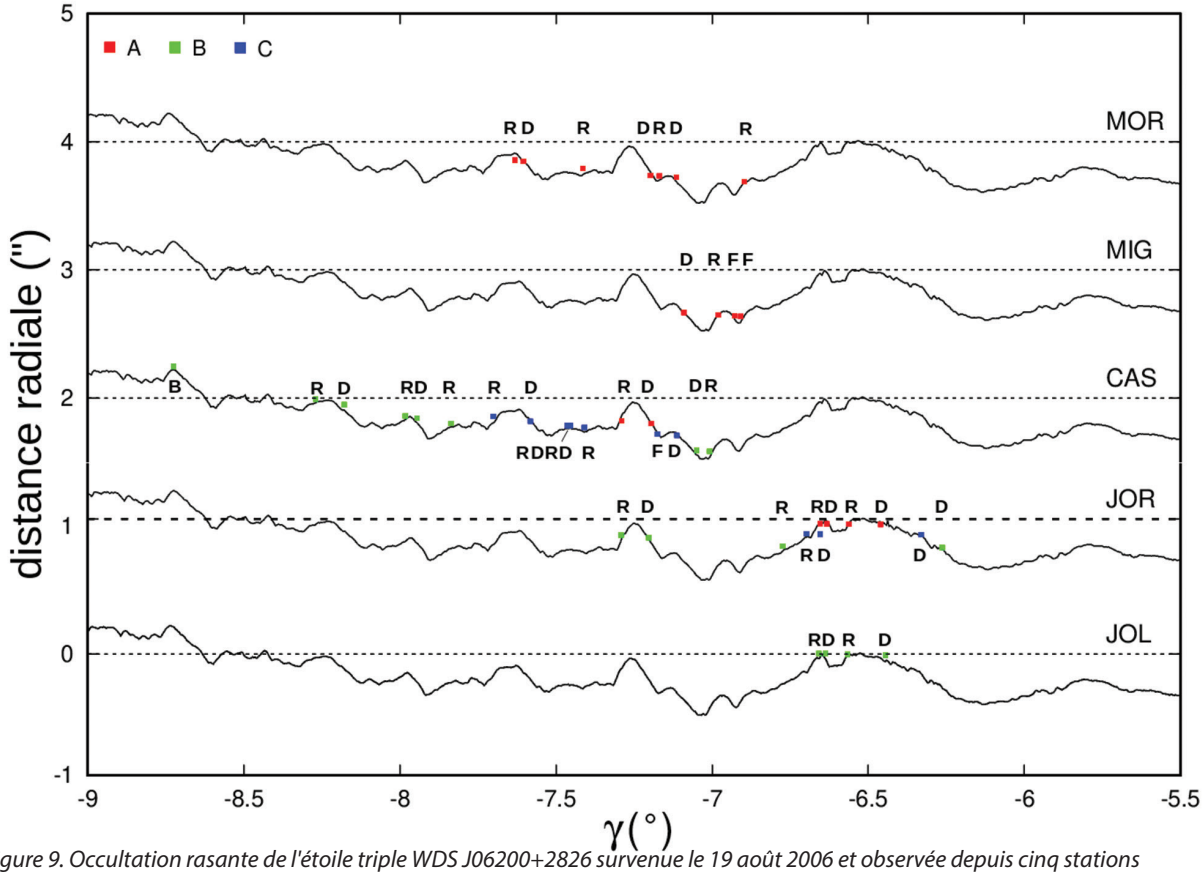

Figure 9. Occultation rasante de l'étoile triple WDS J06200+2826 survenue le 19 août 2006 et observée depuis cinq stations différentes. Positions des étoiles aux contacts correspondants, observées par chaque station, après optimisation, avec les limbes superposés. Remarquez que les limbes ont été décalés de 1" pour plus de clarté. Les contacts pour chaque composante sont codés en couleur, comme indiqué par les étiquettes dans le coin supérieur gauche. Les différents contacts constatés sont : réapparitions (R), disparitions (D), flashes (F) et clignotements (B).

(O-C inférieur à 20 mas), en particulier par rapport aux mesures interférométriques des tavelures obtenues à l'aide d'équipements professionnels. Manifestement, plus il y a de contacts disponibles, plus la précision obtenue par la méthode d'occultation lunaire s'améliore de manière significative.

Les occultations rasantes des étoiles doubles sont des événements rares et nécessitent d'importantes ressources en termes d'observateurs humains et d'équipements spécialisés. On comprend donc qu'elles ne constituent pas une technique pratique pour les suivis généralisés en astrométrie des étoiles doubles. Néanmoins, à l'instar des occultations d'étoiles par les astéroïdes, elles offrent un élément de plaisir et peuvent servir de moyen pour inspirer une collaboration au sein d'un groupe d'astronomes amateurs résidant dans une région géographique relativement compacte. L'équipe du projet OLED peut générer des prédictions localisées pour des zones ou régions spécifiques, si nécessaire.

11 Projets d'observations

Une fois la méthode de mesure par occultation lunaire comprise et maîtrisée, ce qui implique de bien connaître les atouts et les limites de cette technique, il est possible de construire des programmes d'observation adaptés.

En premier lieu, les amateurs espagnols et français se sont consacrés aux étoiles doubles incluses dans le WDS. De nombreux couples sont en effet bien connus et peuvent servir à s'étalonner. Et de nombreux autres méritent d'être régulièrement suivis pour établir une première orbite ou améliorer une orbite existante. Plus haut, nous avons aussi exposé l'intérêt de continuer à observer des étoiles simples et de découvrir d'éventuels couples inconnus jusqu'alors.

En complément, deux catalogues peuvent nous fournir un grand nombre de cibles potentielles. En premier lieu il s'agit du WDSS, composé de plus de 2,4 millions de couples qui s'ajoutent à ceux contenus dans le WDS, essentiellement découverts à travers des missions de « survey » automatiques. Ces couples ont été peu observés. Ce catalogue est encore méconnu, et peu d'outils y font référence, qu'il s'agisse de logiciels de cartographie stellaire ou de prédiction d'occultations.

En second lieu, il faut citer le catalogue Gaia publié dans sa version DR3 en juin 2022. Cette dernière version mentionne plus de 814000 couples, dont la binarité a été établie par une ou plusieurs des techniques suivantes : astrométrie, éclipses mutuelles des composantes et spectrographie. Ces couples sont décrits comme des « non single stars » car Gaia n'a pas réussi à différencier les deux composantes. Certains de ces couples sont déjà connus, mais un grand nombre sont des découvertes. Des mesures par occultations lunaires peuvent aider à confirmer et/ou compléter les informations fournies par la sonde Gaia. Celle-ci jouant ici le rôle de « découvreur », le suivi de ces couples devra être assuré dans le temps, et la technique des occultations lunaires a là aussi un rôle à jouer.

12 Résultats obtenus à ce jour et comment contribuer

À ce jour, des analyses ont été effectuées sur 20 étoiles doubles, avec 15 solutions astrométriques réussies et 5 solutions unidimensionnelles. De nombreuses autres observations ont été collectées sur des étoiles doubles du catalogue WDS qui ne présentent pas de courbes de lumière discontinues, apportant des preuves supplémentaires de leur nature peu probable d'étoiles doubles. Une nouvelle étoile double a probablement été découverte, et certainement d'autres le seront lorsque le programme de recherche de duplications sera pleinement déployé dans un avenir proche. Étant donné que les données collectées à partir d'occultations avec des séparations s'étendant sur quelques années restent précieuses et peuvent donner des solutions astrométriques valides, la conservation d'une base de données des contacts observés garantit une production continue de résultats au fur et à mesure de l'ajout de données supplémentaires pour une étoile double spécifique collectées sur des mois et des années.

À cet égard, cette méthode peut produire des résultats immédiats si les observations sont faites simultanément dans le temps. Ou bien la méthode peut également être cumulative : les observations faites par le même observateur ou par des observateurs différents, quelques mois voire années plus tard, permettront de résoudre des paires d'étoiles. C'est seulement que la mesure peut être "décalée" dans le temps, contrairement à l'immédiateté des mesures standard. Cela peut être un prix à payer pour l'accès à des résolutions spatiales qui ne sont pas accessibles avec les techniques habituelles.

Encore une fois, nous insistons sur la nécessité vitale d'un réseau complet d'observateurs répartis dans des régions couvrant de 200 à 2000 km pour parvenir à une résolution efficace en astrométrie d'étoiles doubles. À mesure qu'un plus grand nombre de stations bien réparties contribuent, nous anticipons un nombre accru de solutions avec une précision améliorée. Cette entreprise internationale collaborative évolue dans un contexte astronomique fascinant et complexe, n'exigeant pas d'équipement sophistiqué ou de techniques d'observation avancées. Les occultations lunaires offrent un accès à un niveau de résolution hors de portée des méthodes plus conventionnelles, et c'est une activité amateure précieuse encouragée activement par le projet OLED.

Les astronomes amateurs qui observent activement les étoiles doubles ou qui sont simplement intéressés par ce sujet, et qui souhaitent élargir leurs techniques de mesure en utilisant les occultations lunaires, en collaborant avec d'autres observateurs ayant les mêmes aspirations, sont encouragés à contacter les coordinateurs. Des conseils, de l'aide et toutes sortes d'informations sur la technique seront fournis, ainsi que l'accès à des ressources sur les programmes et les prévisions locales pour leurs stations d'observation.

Les résultats des analyses sur les étoiles doubles réalisées dans le cadre du projet OLED seront régulièrement publiés dans les prochains numéros de la revue Étoiles Doubles.

Remerciements

Cette recherche a utilisé la base de données SIMBAD [10] et l'outil d'accès au catalogue Vizier [11], exploités au CDS, Strasbourg. Des ressources du catalogue Gaia [12] ont également été utilisées. Les ressources informatiques fournies par l'Universidad Autónoma de Madrid sont chaleureusement reconnues. EV a bénéficié des échanges avec les membres du Grupo de Estudios de l'Agrupación Astronómica de Madrid (remerciements spéciaux à Rosendo Jorba), ainsi que du soutien de la FAAE et de la SEA.

Références

[1] https://occultations.org

[2] https://sites.google.com/aam.org.es/oled

[3] "Methods of analysis for lunar occultations of double stars", E. Velasco, https://astroserver.ftmc.uam.es/oled/projectOLED_procedures.pdf

[4] http://www.hristopavlov.net/Tangra3

[5] https://datacenter.iers.org/data/latestVersion/bulletinA.txt

[6] “Lunar Reconnaissance Orbiter”, https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/lro/lola.htm

[7] “Photoelectric measurements of lunar observations. V. Observational results”, D. S. Evans, Astron. J. 76, 1107 (1971). https://adsabs.harvard.edu/full/1971AJ.....76.1107E

[8] “SAO 97883 - A New Double Star”, D. Herald, JDSO 5, 208 (2009). http://www.jdso.org/volume5/number4/Herald.pdf

[9] “Lunar occultation archive”, D. Herald et D. Gault (2022), https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/VI/132C

[10] "The SIMBAD astronomical database", Wenger et al., Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 143, 9 (2000).

[11] “The VizieR database of astronomical catalogues”, F. Ochsenbein et al., Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 143, 23 (2000).

[12] Gaia Data Release 3 (Gaia DR3), https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/data-release-3

Enrique VELASCO

Professeur titulaire de physique théorique de la matière condensée à l'Universidad Autónoma de Madrid, mes recherches couvrent la physique statistique des liquides complexes et la simulation informatique de systèmes dynamiques de particules et de champs. Je suis astronome amateur, membre de l'Agrupación Astronómica de Madrid depuis 1979 (actuellement responsable de la section de recherche). J'anime des cours sur le calcul astronomique pour les amateurs et j'observe le ciel, notamment les occultations lunaires.

Philippe LAURENT

Ingénieur en electronique de formation, je suis astronome amateur depuis mon plus jeune âge. Membre de la Commission des étoiles doubles de la SAF depuis 2010, 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. Récemment, j'ai porté un intérêt particulier aux occultations d'étoiles doubles par la Lune.