



DÉCOUVERTE D'UNE BINAIRE À ÉCLIPSES TRÈS RARE

L'astronome amateur Hervé Lerat a découvert une étoile binaire à éclipses d'un type particulièrement peu répandu. Grâce au travail d'un groupe d'astronomes qu'il réunit, de nouvelles acquisitions sont réalisées et leur analyse a permis de caractériser partiellement cette étoile, apportant des éléments préliminaires essentiels aux astronomes professionnels pour une caractérisation plus poussée.

Les photons, particules élémentaires de la lumière, sont porteurs d'informations essentielles sur la nature du chemin qu'ils ont parcouru dans l'Univers, mais surtout sur leur point d'origine : les étoiles. Les physiciens et les astronomes ont su exploiter cette source d'information et, grâce à ses propriétés, expliquer et prédire de nombreux phénomènes astronomiques. La plus simple des propriétés exploitables de la lumière est son intensité, c'est-à-dire le flux des photons arrivant sur la rétine ou le capteur optique de l'observateur. Ce flux peut varier pour diverses raisons, notamment lorsqu'un obstacle s'interpose entre l'observateur et l'étoile. Ce phénomène est exploité par les astronomes professionnels et amateurs pour détecter, par exemple, la présence d'exoplanètes orbitant autour d'étoiles de notre proche banlieue galactique (méthode du transit par photométrie).

La découverte

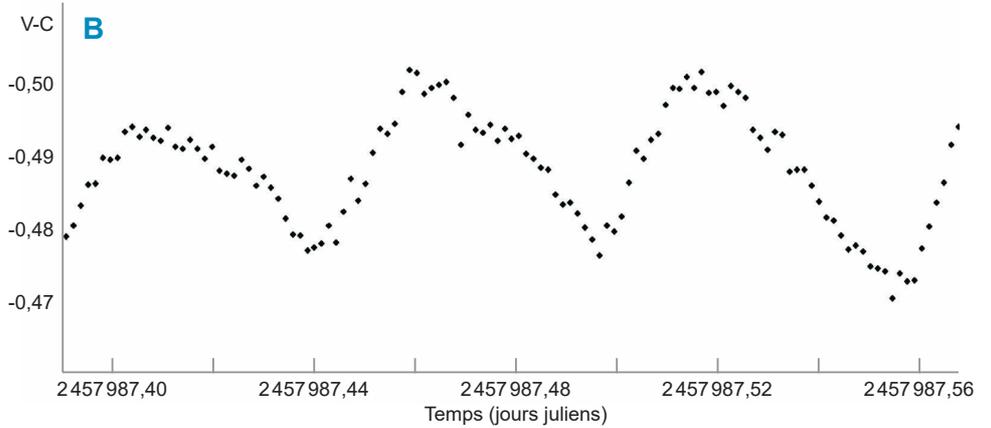
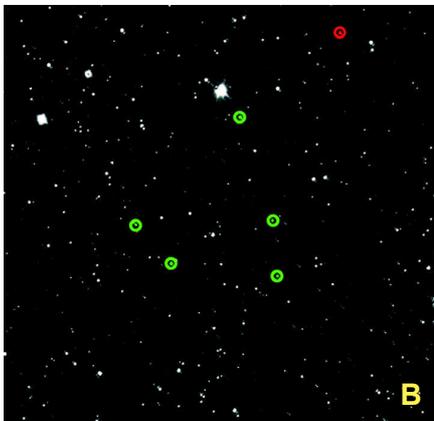
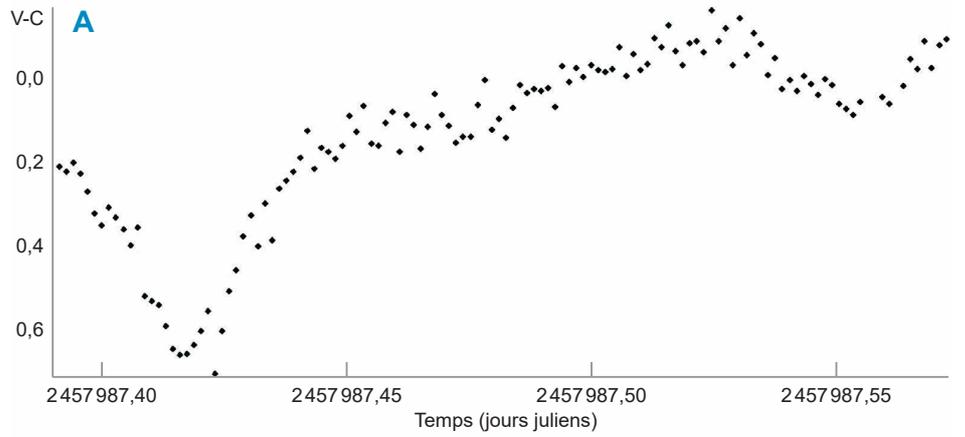
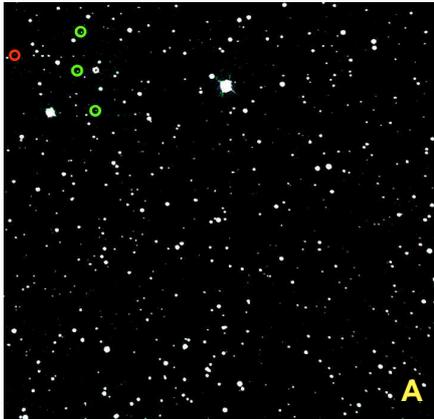
En 2017, pour le traitement des images réalisées lors du transit de Qatar-5b devant son étoile hôte (voir encadré page 45), nous avons utilisé Muniwin [1]. Ce logiciel permet de mesurer le flux de l'étoile et de visualiser la variation de flux de photons ayant atteint les photosites de la caméra. On obtient ainsi une courbe de la variation de l'intensité lumineuse de la zone de pixels choisie sur l'image, donc de l'étoile étudiée, au cours du temps.

De manière très intéressante, Muniwin permet non seulement de déterminer la courbe de lumière d'une cible stellaire, mais de toutes les étoiles présentes dans le champ étudié. Cette analyse globale du champ de 22' de côté (voir la figure 1), contenant environ un millier d'étoiles détectées, nous révèle deux objets intéressants avec des courbes de lumière qui semblent non aléatoires

dans leur aspect. À partir de ce constat, le plus gros travail reste à faire, notamment déterminer si ces étoiles sont réellement « variables » dans leur flux lumineux et si elles sont déjà connues comme telles par la communauté scientifique, grâce à l'utilisation d'outils et catalogues en ligne.

La démarche scientifique

La première démarche est de consulter une des bases de données internationales les plus fournies sur les étoiles variables : The International Variable Star Index (VSX), gérée par l'AAVSO (The American Association of Variable Star Observers, Cambridge, Massachusetts, É.-U.). Son portail web [2] permet de chercher les étoiles variables connues autour de coordonnées entrées par l'utilisateur. Dans notre cas, la génération d'un champ de 40' autour de Qatar-5 (figure 2) révèle que notre première variable

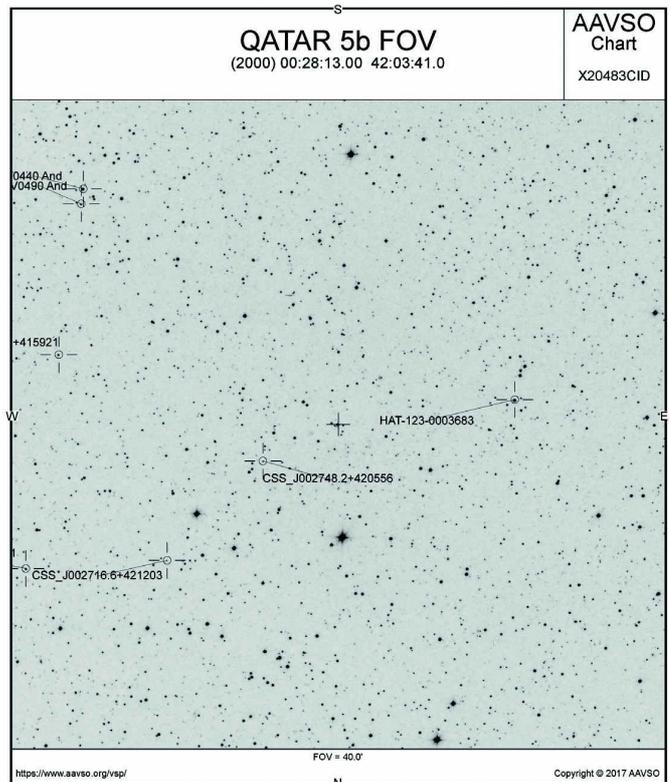


1. Ci-dessus, captures d'écran tirées du logiciel Muniwin montrant deux étoiles (A et B) avec des variations d'intensité lumineuse intéressantes au cours des quatre heures d'observation au télescope de 820 mm (T820) de l'observatoire des Baronnies provençales. Dans les deux cadres de champ d'étoiles (à gauche) sont surlignées en rouge la variable et en vert les étoiles de comparaison. Les deux graphiques de droite représentent le différentiel d'intensité lumineuse en fonction du temps, pour chacune des cibles A et B, comparé aux étoiles de comparaison.

d'intérêt (présentée en figure 1A) est déjà décrite dans ce catalogue. Il s'agit de CSS_J002716.6+421203, une binaire à éclipses de type EW (W Ursae Majoris type) de période 0,43 jour (10 h 19 min) et de magnitude 17,66. En revanche, la deuxième variable détectée (présentée en figure 1B et figure 3) n'apparaît pas dans le catalogue VSX. Il en est de même lorsque les coordonnées de cette variable sont entrées dans le catalogue issu de la mission *Gaia* (version DR2 en 2017). Une étoile est bien présente dans ce catalogue (DR2), mais pas repérée en tant que variable. Nous apprenons néanmoins qu'elle est de magnitude 11,98 (bande Optical R comprise entre 600 nm et 700 nm) et à une

2. Champ d'étoiles de 40° de côté, centré sur Qatar-5, et généré sur le site de l'AAVSO.

Les étoiles repérées et nommées dans ce champ sont des étoiles variables publiées dans son catalogue VSX au moment de la requête (en décembre 2017). La magnitude limite des étoiles sur l'image est de 22.



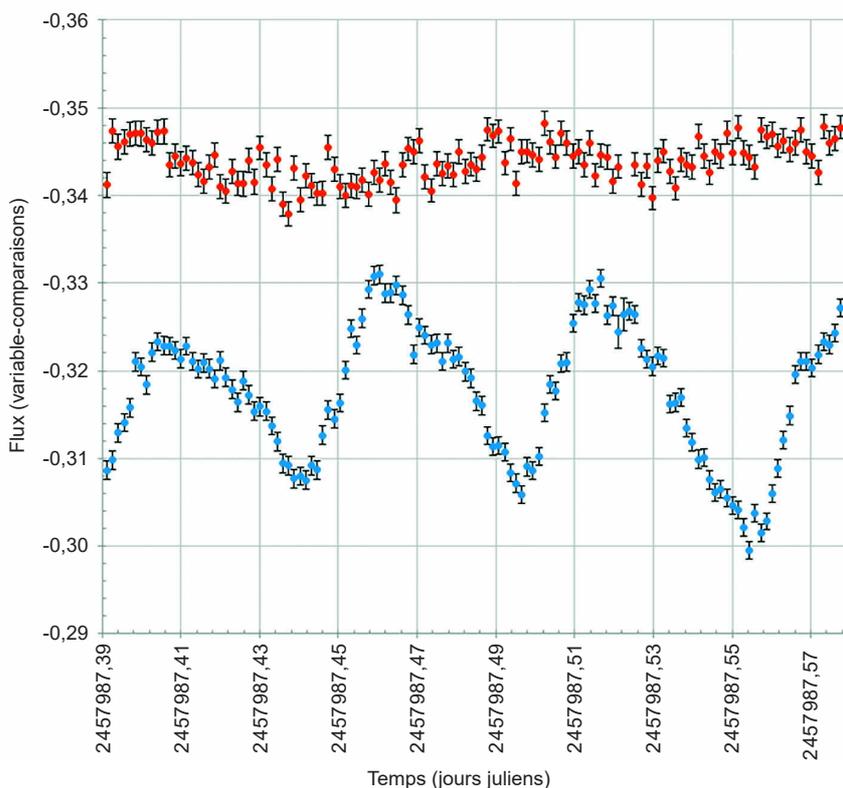


distance de 1390 parsecs de la Terre. Cette recherche de variabilité dans les bases de données, pourtant infructueuse, nous incite justement à continuer notre investigation !

Si nous voulons publier la découverte de la variabilité de notre cible d'intérêt, afin de mettre à disposition nos données pour la communauté scientifique, la deuxième démarche à entreprendre

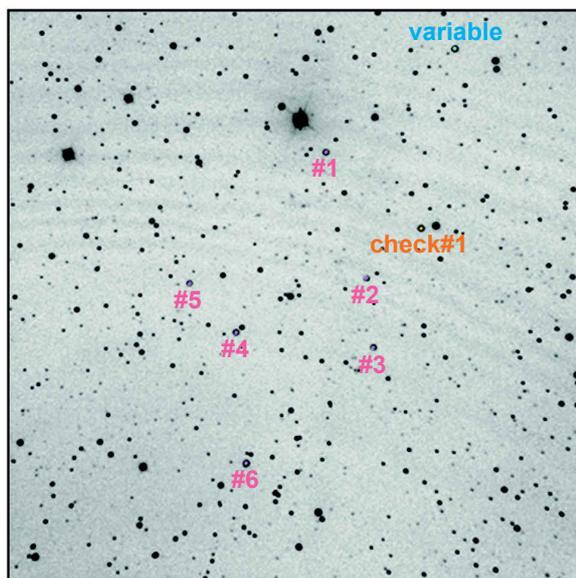
est de consolider nos données initiales. Deux approches ont été réalisées. Tout d'abord, retour sous la coupole ! Nous avons mené à bien une seconde mission de photométrie à l'observatoire des Baronnies provençales en 2019 pendant laquelle nous avons pu recueillir cinq nouvelles courbes sur cette cible avec le T820. Ces nouvelles données ont consolidé notre première analyse : nous

avons bien affaire à une étoile dont la pulsation très rapide nous suggère un type « delta Scuti » (DSCT) avec une période de 1 h 20 min et une amplitude de 30 mmag (millimagnitude). Ensuite, il faut continuer à consolider ces résultats en s'attelant à la fouille des données astronomiques publiques disponibles sur le Web ! Nous avons consulté des bases de données pour lesquelles des champs d'étoiles ont été étudiés de manière répétée au cours du temps, avec préférentiellement un échantillonnage assez serré (quelques heures) ou avec des acquisitions discontinues, mais répétées. Ces bases permettent de récupérer des données à partir de coordonnées d'objets célestes et d'établir ainsi leur courbe de lumière. Nous avons utilisé principalement les bases ASAS-SN, SWASP, ZTF et TESS (voir encadré page 48), et en avons extrait les données aux coordonnées de notre cible ($\alpha = 0\text{ h }28\text{ min }47,00\text{ s}$; $\delta = +41^\circ 56' 46,2''$ J2000). Mis à part TESS, ces bases ne permettent pas de générer directement une courbe de lumière comme celle provenant de nos propres observations. En effet, l'échantillonnage est généralement trop large et les périodes d'observation discontinues. Il faut donc extraire les caractéristiques de périodicité par une analyse par transformée de Fourier. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel Period04 [3]. Les résultats de l'analyse de Fourier (figure 4) présentent de manière inattendue deux groupes de fréquences intéressants.



3. En haut, flux lumineux (V-C) au cours du temps (en jours juliens) de la cible d'intérêt découverte le 21 août 2017 lors de l'observation de l'étoile Qatar-5 avec le T820 de l'observatoire des Baronnies provençales (bleu). En orange, la variation de flux d'une étoile de référence dans le même champ.

À droite, une image brute représentant le champ d'étoiles observé. Les étoiles de comparaison sont indiquées en magenta (#1 à 6). L'étoile de référence est en orange (check#1). Les coordonnées J2000 de la variable (en bleu) sont : $\alpha = 0\text{ h }28\text{ min }47,00\text{ s}$; $\delta = +41^\circ 56' 46,2''$.



Le premier groupe avec des fréquences entre 16 et 20 correspond à une période très courte de fluctuation d'intensité de l'objet. Une analyse plus poussée confirme donc une combinaison complexe de pulsations de type « delta Scuti » et permet d'en affiner les caractéristiques pour au moins deux des composantes : période principale 0,056 815 31 jour (1 h 21 min 49 s), époque 2458719,948 (HJD), amplitude 0,05 magnitude ; période secondaire 0,057 539 9 jour (1 h 22 min 51 s), époque 2458719,986 (HJD) (figure 5).

Mais l'information la plus intéressante réside dans le second groupe de fréquences que nous avons découvert avec cette analyse. Elle démontre la présence de fluctuations de période plus longue (plus de deux jours), mais surtout plus profondes, caractéristiques d'éclipses

(variabilité extrinsèque) et non plus de pulsations (variabilité intrinsèque). Celles-ci sont bien visibles directement à partir des données photométriques de TESS. Period04 nous permet d'établir des courbes de phase et de spécifier les caractéristiques orbitales : période 2,156 047 jours (2 j 9 h 22 min), époque 2458779,250 (HJD), durée de l'éclipse 3 h 10 min (6 %) et plage de magnitude 12,38 à 12,52 (V) lors du minimum de l'éclipse (figure 6).

Nous avons donc affaire à un système d'étoiles binaires à éclipses dont au moins une des composantes montre des pulsations de type « delta Scuti ». Une étoile binaire à éclipses est un système binaire dans lequel le plan de révolution des deux astres se trouve dans la ligne de visée de l'observateur, l'une venant donc occulter l'autre périodiquement. Elles sont regroupées en trois catégories en fonction de leurs caractéristiques orbitales, les EA, EB et EW. Les EA, dont l'étoile type est Algol (bêta Persei), sont des binaires « détachées », donc pas suffisamment proches pour qu'un échange de matière ait lieu entre elles. Elles peuvent devenir « semi-détachées » au cours de leur évolution (Mkrtychian *et al.*, 2002). Au vu de nos observations et calculs, le système que nous avons découvert appartiendrait potentiellement

QATAR-5B ET LE LOGICIEL MUNIWIN

Située dans la constellation d'Andromède, Qatar-5b est une exoplanète de type « Jupiter chaude » extrêmement proche de son étoile Qatar-5 ($\alpha = 0 \text{ h } 28 \text{ min } 12,94 \text{ s}$; $\delta = +42^\circ 03' 40,95''$), puisqu'elle orbite à 0,041 27 unité astronomique, soit 10 fois plus proche que Mercure du Soleil, avec une période orbitale de seulement 2,9 jours. La masse de la géante gazeuse Qatar-5b est évaluée à 4,32 fois celle de Jupiter.

Le 21 août 2017, une observation du transit de Qatar-5b est réalisée par un groupe d'astronomes amateurs à l'observatoire des Baronnies provençales grâce au télescope Cassegrain à double foyer Nasmyth de 820 mm couplé à une caméra CCD FLI PL230.

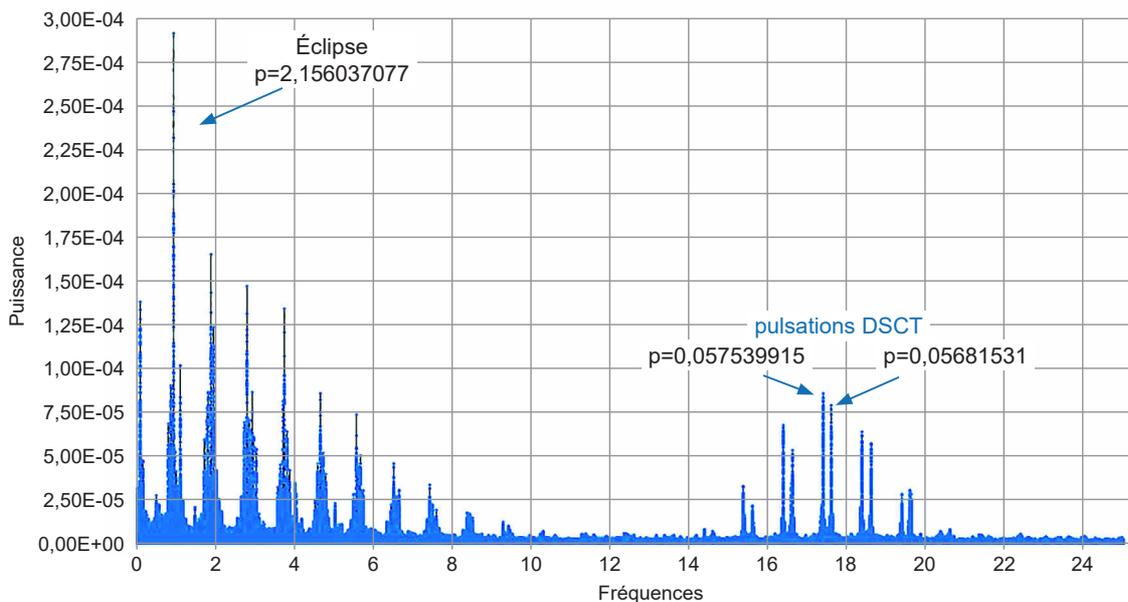
Sa découverte ayant eu lieu la même année*, peu de courbes de transit sont alors disponibles pour cette exoplanète. En effet, la magnitude de l'étoile de ce système est de 11,98 dans le rouge (entre 600 nm et 700 nm) et la profondeur du transit de 0,016 magnitude, limitant les moyens d'observation à des équipements de grand diamètre, mais rendant cette cible très intéressante et son étude utile pour préciser ses caractéristiques. L'acquisition des données de photométrie est réalisée sur

une période de quatre heures avec une image toutes les 120 secondes. Le champ d'étoiles résultant, acquis avec cette installation instrumentale, est un carré de 22' de côté. L'acquisition des images est réalisée avec MaximDL (Diffraction Limited, Cyanogen Imaging). Le logiciel Muniwin est utilisé pour traiter les 140 images brutes acquises et calculer la courbe de lumière du transit de Qatar-5b. Grâce à ce logiciel, ce soir-là, nous avons obtenu pour Qatar-5b des résultats très satisfaisants qui ont permis d'ajouter un cinquième jeu de données dans la base ETD** pour cette exoplanète, précisant ainsi la taille de celle-ci ($1,27 \pm 0,016$ fois le rayon de Jupiter), l'inclinaison du plan de son orbite par rapport à la Terre ($87,18^\circ \pm 0,23^\circ$), son époque du milieu de transit ($2\,457\,987,47883 \pm 0,00051 \text{ JD}$) et la durée du transit ($168,0 \pm 1,7 \text{ min}$).

* Alsubai Khalid *et al.*, « Qatar Exoplanet Survey: Qatar-3b, Qatar-4b, and Qatar-5b », *The Astronomical Journal*, 153 (4), 2017, 200.

** <http://var2.astro.cz/ETD>
Poddaný Stanislav, Brát Luboš, Pejcha Ondřej, « Exoplanet Transit Database. Reduction and processing of the photometric data of exoplanet transits », *New Astron.*, 15, 2010, 297-301 [https://doi.org/10.1016/j.newast.2009.09.001].

Analyse de la période d'Andr(o)EA



4. Analyse par transformée de Fourier des données d'observation de la cible d'intérêt obtenues les 26 et 29 août 2019 à l'observatoire des Baronnies provençales et des bases de données ASAS-SN, SuperWASP, TESS et ZTF. Les périodes p sont exprimées en jour.



à ce groupe EA. L'argument principal réside dans la séparation très nette des éclipses, avec un plateau entre les deux. Lorsque les étoiles se rapprochent trop et échangent donc de la matière, il devient difficile de déterminer sur la courbe de lumière les moments exacts de début et fin des éclipses. Nous lui avons donc attribué, officieusement, le

nom de Andr(o)EA : binaire oscillante à éclipses de type Algol de la constellation d'Andromède. Nous avons publié en janvier 2024 ces données à l'AAVSO, dans son catalogue VSX, sous la dénomination 1SWASP J002847.00+421321.6. C'est la première binaire EA+DSCT observée et caractérisée partiellement dans cette constellation !

En faisant appel à un réseau d'amateurs et de professionnels (voir encadré ci-contre), nous avons réalisé plusieurs observations d'Andr(o)EA avec des spectroscopes à basse résolution, type Alpy 600 (Shelyak Instruments). L'analyse de ces observations (figure 7) nous a révélé que cette binaire avait un spectre caractéristique d'étoiles de type spectral « A » précoce (A2V potentiellement), avec des raies d'absorption de la série de Balmer (hydrogène) bien marquées, mais des raies du calcium (Ca II K) peu présentes (figure 7, cadre rouge). Ce résultat est cohérent avec cette famille de binaires, avec les données de GAIA (DR3) et TESS, notamment la température effective calculée entre 8 700 et 9 100 K. Cela en fait une binaire serrée « chaude » (bleue) avec des pulsations DSCT, ce qui est assez rare. Mais c'est une moyenne globale, car le système comporte deux étoiles qui ne sont pas forcément à la même étape d'évolution ni aux mêmes températures. Ces caractéristiques individuelles restent à déterminer.

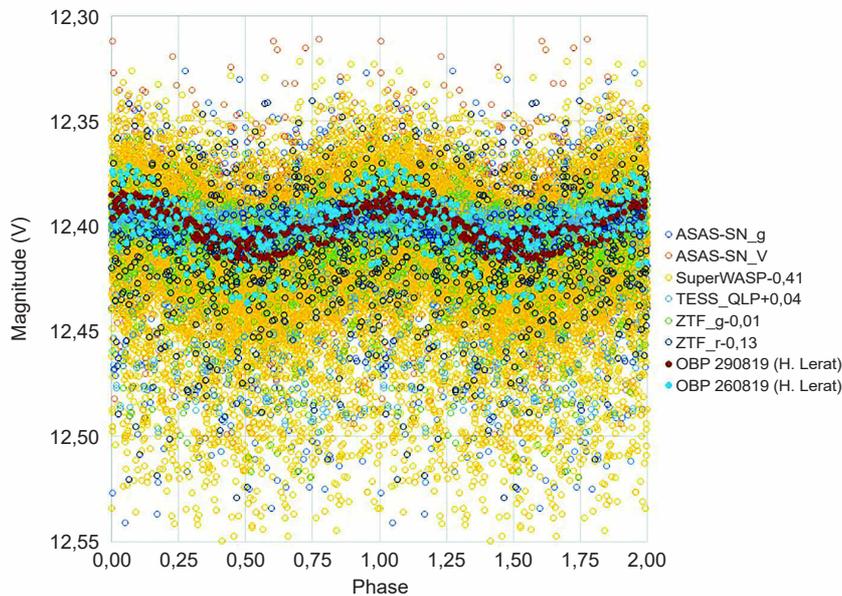
UNE BELLE AVENTURE HUMAINE

L'idée d'observer des transits d'exoplanètes, et plus globalement d'observer et analyser différents objets célestes par photométrie, a mûri au sein d'un petit groupe de passionnés d'astronomie fraîchement diplômés de l'Observatoire de Paris (<https://www.observatoiredeparis.psl.eu/-diplomes-d-universite-235-.html>). De nombreux aspects fondamentaux et expérimentaux de l'astronomie ont été abordés au cours du diplôme d'université Explorer et Comprendre l'Univers suivi par ces passionnés, notamment lors d'un stage pratique à l'observatoire de Haute-Provence, lieu de découverte de la première exoplanète. Mais la frustration est toujours grande lorsque le dernier jour de formation arrive et une seule pensée s'impose alors : à quand les prochaines nuits dans un observatoire ? Avec cet objectif en tête et suite à une discussion aux Rencontres du ciel et de l'espace à Paris en 2016 avec Marc Bretton, directeur de l'observatoire des Baronnies provençales (<http://www.obs-bp.com/>), Hervé Lerat met sur pied une mission de photométrie qu'il réalisera en 2017 dans cet observatoire privé. La nuit de la découverte, c'est le petit groupe composé d'Hervé, de Cécile Pouliquen et de Clément Dhamelin court qui est aux commandes du T820, sous la supervision de Marc. La réussite de cette mission, tant du point de vue humain que scientifique, nous a motivés à échauffer une nouvelle mission photométrie à l'observatoire des Baronnies provençales (OBP) en 2019 avec cette fois l'aide d'Anaël Wünsche, astrophysicien récemment recruté à l'OBP. Cible prioritaire de la mission : notre étoile variable découverte en 2017 afin d'accumuler le plus de données photométriques possible. En novembre 2021, lors du salon Explor/Espace à Montrouge, Hervé rencontre Anica Lekic, enseignante à l'IPSA (www.ipsa.fr), mais surtout une passionnée d'astronomie possédant un réseau très étendu d'amateurs et de professionnels

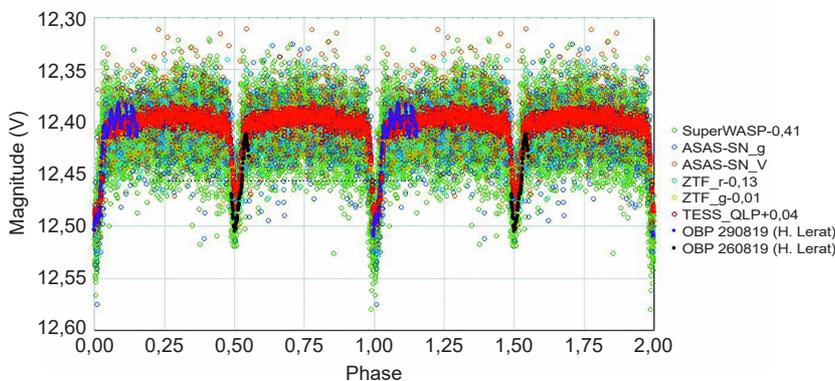
dans ce domaine. C'est ainsi qu'elle le relance sur cette découverte et lui présente Yannic Delisle, qui coordonne le comité de promotion scientifique (CPS) de Planète Sciences (www.planete-sciences.org), dans la perspective de proposer aux membres du CPS de participer à une campagne d'observation d'Andr(o)EA, notamment en utilisant le télescope Jean-Marc-Salomon (TJMS) à Buthiers. Ce fut une opportunité d'accumuler, entre 2021 et 2022, de nouvelles observations de cette binaire. Ainsi, grâce à cette campagne, Pierre Barroy, Martin Grandidier, Bruno Guillet, Michael Irzyk, Anica Lekic (avec ses étudiants du club IPSA-VEGA), Arnaud Leroy, Pierre Francesco Rocci, Pierre Traverse et Jean-Michel Vienney ont contribué à l'acquisition de données très intéressantes, notamment en photométrie avec des filtres de référence, mais aussi en spectrométrie, notamment avec le premier spectre basse résolution d'Andr(o)EA réalisé par Stéphane Neveu en juillet 2022 au TJMS, avec un spectroscopie LISA. En 2022, d'autres personnes ont rejoint notre groupe impliqué dans l'étude d'Andr(o)EA : Jean-Bruno Desrosiers, de l'observatoire du mont Saint-Joseph au Canada (<http://omsj.info>) avec ses collègues Serge Bergeron et Damien Lemay, Patricia Lampens, astrophysicienne à l'Observatoire royal de Belgique (<http://www.astro.oma.be/>), et Sacha Foschino, astrophysicien à l'OBP. Ils ont tous activement participé à la collecte de nouvelles données (notamment Jean-Bruno et Sacha), mais surtout à l'analyse et l'interprétation de ces données. La mutualisation des compétences et les disponibilités de chacun nous ont permis à ce jour, sous la coordination depuis 2017 d'Hervé Lerat, le découvreur d'Andr(o)EA, d'accumuler suffisamment de données pour, dans un avenir proche, organiser une collaboration avec des astronomes professionnels et ainsi accéder aux instruments nécessaires pour compléter la caractérisation d'Andr(o)EA et de modéliser cette binaire si particulière.

Pourquoi est-ce une découverte intéressante ?

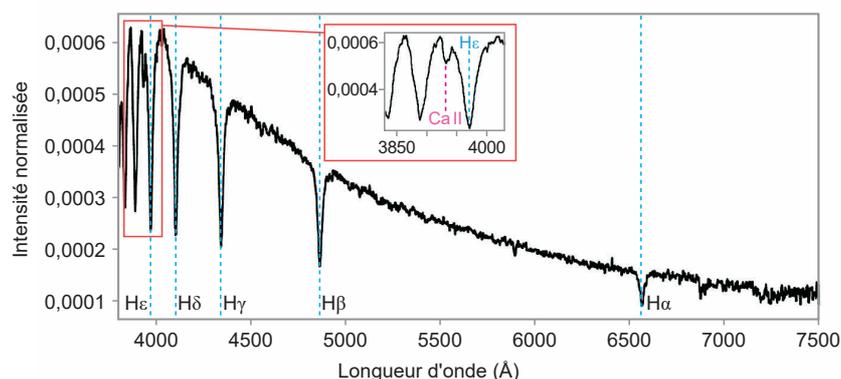
Pour comprendre l'Univers dans lequel nous vivons, il est important de caractériser les étoiles qui le constituent. Ces caractéristiques stellaires sont principalement leur masse (M), leur rayon (R) et leur composition interne. Les étoiles binaires à éclipses sont très intéressantes à étudier, car l'estimation de la masse et du rayon de ces objets est très précise (moins de 1 % d'erreur). En revanche, cela ne suffit pas pour déterminer la composition de l'intérieur de ces étoiles. L'existence de pulsations et leur étude vont venir compléter cette donnée manquante. En effet, les fréquences d'oscillation de ces étoiles pulsantes pourront servir, grâce à des calculs reposant sur des théories de sismologie stellaire, à déterminer la composition interne de ces étoiles et ainsi mieux comprendre leur évolution au cours du temps. Ce sont des modèles très complexes au sein desquels les pulsations d'une des étoiles de la binaire peuvent être affectées par sa compagne et par les forces de marée s'exerçant entre les deux. Il a d'ailleurs été décrit une relation entre leurs paramètres orbitaux et la période de pulsation dominante [4]. Ces systèmes binaires



5. Courbe de phase montrant la pulsation de type delta Scuti. Chacune des séries ayant été acquise avec des filtres différents, il a été nécessaire de réaliser des ajustements de magnitude, indiqués dans la légende à droite de la figure, pour les tracer sur la même figure (-0,41 pour SWASP, +0,04 pour TESS, -0,01 pour ZTFg et -0,013 pour ZTFr). On distingue clairement les dispersions de valeurs, très différentes en fonction des bases de données, dénotant les marges d'erreur lors des acquisitions dues aux caractéristiques des instruments employés.



6. Courbe de phase montrant les éclipses primaires et secondaires. La fréquence élevée d'échantillonnage des observations à l'OBP nous permet de visualiser aussi les pulsations DSCT (points violets et noirs).



pulsants sont donc pour les astronomes professionnels des outils extrêmement précieux pour établir des modèles d'évolution stellaire.

En 2000, seules neuf étoiles binaires EA+DSCT, identiques à celle que nous venons de découvrir, étaient connues. Actuellement, GAIA dans sa version DR3 a étudié 1,8 milliard de sources lumineuses, parmi lesquelles 9,5 millions d'étoiles variables, dont seulement 22 % (2 184 000) sont des systèmes binaires à éclipses. Sur ces millions d'étoiles variables observées, il y a à ce jour moins de 150 EA+DSCT découvertes et caractérisées, au moins partiellement, dans la littérature scientifique [5]. Dans le catalogue VSX de l'AAVSO, seules 75 EA+DSCT sont répertoriées. Notre découverte vient donc augmenter le nombre connu de ces étoiles rares, dont les caractéristiques particulières viendront améliorer nos connaissances en sismologie et évolution stellaires.

Finaliser la caractérisation de cette binaire

Les données photométriques d'Andr(o)EA que nous avons accumulées à partir de nos propres observations et à partir des bases de données publiques sont suffisamment nombreuses et de qualité pour proposer des propriétés orbitales précises et calculer des éphémérides des éclipses et pulsations. Ces connaissances vont permettre de programmer des observations à des moments clés des phases de variation lumineuse de cette binaire. Cela permettra d'analyser par photométrie et spectrométrie l'un ou l'autre des composants de la binaire et de mieux en définir les caractéristiques. Les paramètres orbitaux

7. Ci-contre, spectre visible d'Andr(o)EA, moyenne de cinq spectres individuels de 1 200 s de temps de pose, obtenus avec un spectrographe Alpy 600 monté sur un télescope Newton de 305 mm de diamètre ouvert à 4, basé à l'observatoire des Baronnies provençales. Spectre normalisé à l'aire du spectre. L'encadré rouge en haut à droite est un agrandissement de la région encadrée en rouge à basse longueur d'onde. L'absorption du Ca II peut y être comparée à celle de la raie H epsilon. Les raies de Balmer (hydrogène) sont matérialisées par les lignes en tirets. Les caractéristiques globales des raies Ca II et H sont typiques d'un type A2V. Sacha Foschino (OBP)



peuvent être déduits de la photométrie, mais les masses des deux composantes ne pourront être calculées précisément qu'à partir de l'étude des vitesses radiales, déduites de spectres à haute résolution. Ces mesures reposent sur l'effet Doppler-Fizeau induisant un décalage vers le rouge ou le bleu de la lumière provenant des composants de

la binaire lorsqu'ils s'éloignent ou se rapprochent de l'observateur. Andr(o)EA est de magnitude supérieure à 12. Pour obtenir des spectres à haute résolution, des instruments puissants et donc professionnels seront nécessaires. Pour cela, nous comptons nous appuyer sur les réseaux et programmes de collaboration pro-am très bien développés en France. ■

Notes

1. Motl David [<https://c-munipack.sourceforge.net/>].
2. [<https://www.aavso.org/vsx/index.php>].
3. Pet Lenz et al., *Communications in Asteroseismology*, 146, 2005, 53 [<http://www.period04.net/>].
4. Soyduğan, E., İbanoğlu, C., Soyduğan, F., et al. 2006b, MNRAS, 366, 1289.
5. Shi, Xiang-dong & Qian, Sheng-bang & Li, Lin-jia, (2022). *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 259. 50.

LES BASES DE DONNÉES

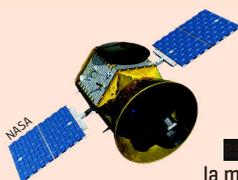
SWASP : <https://www.superwasp.org>

SuperWASP est un programme pour la détection des exoplanètes. Il a été créé par le Royaume-Uni et était initialement composé d'un consortium de huit institutions académiques : l'université de Cambridge, l'Instituto de Astrofísica de Canarias, le Groupe de télescopes Isaac-Newton, l'université de Keele, l'université de Leicester, l'Open University, l'université Queen's de Belfast et l'université de St Andrews. Le projet WASP est actuellement financé et piloté par les universités de Warwick et de Keele. SuperWASP se compose de deux observatoires couvrant les deux hémisphères du ciel. Le premier, SuperWASP-North, est situé sur l'île de La Palma ; SuperWASP-South est situé sur le site de l'Observatoire astronomique d'Afrique du Sud (SAAO). Les observatoires comprennent chacun huit caméras grand-angle qui surveillent simultanément le ciel à la recherche d'événements de transit planétaire. Chaque observatoire est composé d'une série de huit objectifs Canon 200 mm ouverts à 1,8, couplés à des caméras CCD iKon (Andor Technology) de 2 048 × 2 048 pixels. Les observatoires surveillent en continu le ciel, prenant une série d'images environ une fois par minute, recueillant jusqu'à 100 gigaoctets de données par nuit. La base de données SWASP peut être interrogée sur le site suivant : <https://wasp.cerit-sc.cz/form>. Elle contient environ 18 millions d'objets.

ASAS-SN :

<https://www.astronomy.ohio-state.edu/asasn/index.shtml>

ASAS-SN, qui signifie « All-Sky Automated Survey for Supernovae », est un projet de recherche du département d'astronomie de l'Ohio State University, visant à détecter de façon automatique et en temps réel les supernovæ dans l'ensemble du ciel. Pour cela, cette mission utilise des télescopes automatisés répartis dans différents endroits du globe et surveille le ciel de manière continue et automatisée pour des objets jusqu'à la magnitude 18. Il s'agit de 24 télescopes robotisés (téléobjectifs Nikon de 14 cm de diamètre) répartis par séries de quatre à Hawaï, au Chili (deux séries), Afrique du Sud, Texas (États-Unis) et en Chine. Ils sont couplés à des caméras FLI ProLine CCD, procurant un champ de 4,47 degrés de côté, centré sur 480 nm (Sloan g-band). Chaque champ a été observé plus de 2 000 fois. Environ 100 millions d'étoiles ont été étudiées [<https://asas-sn.osu.edu/photometry>].



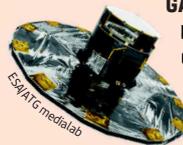
TESS : <https://tess.mit.edu>

La mission TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*) est une mission spatiale de la Nasa lancée en 2018. Son objectif principal, sur deux ans au départ, est de détecter des exoplanètes en utilisant la méthode de transit. La mission vise à identifier des exoplanètes de la taille de la Terre, afin de permettre des études plus détaillées de leur atmosphère

et de leur composition. TESS embarque quatre caméras CCD grand champ de chacune 24 × 24 degrés de champ, qui observent 85 % du ciel. Elles sont couplées à quatre télescopes de 10,5 cm de diamètre ouverts à 1,4. La longueur d'onde observée est comprise entre 600 et 1 000 nm (rouge et proche infrarouge). Chaque champ est observé pendant au minimum 27 jours consécutifs avec un échantillonnage de 30 minutes, voire 10 minutes pour la mission étendue. 200 000 étoiles présélectionnées ont été étudiées avec une cadence de deux minutes. Le catalogue TIC-8 rassemble 1,5 milliard de sources lumineuses accessibles à travers la base MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes) : <https://archive.stsci.edu/missions-and-data/tess>.

ZTF : <https://www.ztf.caltech.edu>

La Zwicky Transient Facility (ZTF) est un partenariat public-privé (États-Unis, Allemagne, Suède) démarré en 2017 et visant à étudier de manière systématique le ciel nocturne dans le domaine optique. En utilisant une caméra à champ de vision extrêmement large, la ZTF scanne l'ensemble du ciel septentrional tous les deux jours. La ZTF utilise une caméra CCD à mosaïque qui exploite l'ensemble du plan focal (environ 47 degrés carrés) du télescope P48 (1,22 m de diamètre) à Palomar (Californie). La bande passante étudiée est d'environ 400 à 900 nm (filtres g, r, i) et la limite de détection jusqu'à la magnitude 20,5. Les données sont rendues publiques (<https://irsa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/Gator/nph-scan?dd>), la dernière version datant de janvier 2024 et contenant plus de 53 millions d'images.



GAIA : <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia>

Gaia est une mission de l'Agence spatiale européenne (Esa) lancée en 2013. Son objectif principal est de cartographier avec une grande précision la position, le mouvement et d'autres caractéristiques de plus d'un milliard d'objets célestes (étoiles, astéroïdes, galaxies, etc.)

jusqu'à la magnitude 20. Actuellement, plus de 1,8 milliard d'objets jusqu'à une distance de 50 kpc ont été étudiés pour leur position dans la Galaxie, leur parallaxe, leur mouvement propre et leur luminosité. Le satellite Gaia est doté d'instruments permettant une analyse photométrique et spectroscopique des cibles. L'observation des objets, répétée plus de 70 fois au cours d'une période de cinq ans, permet de réaliser une analyse dynamique au cours du temps de chacun d'entre eux. Gaia utilise une mosaïque de CCD (106 au total) au plan focal (longueur focale de 35 m par une combinaison de miroirs) cumulant un milliard de pixels. La bande de longueurs d'onde observée s'étend de 330 à 680 nm (photomètre bleu, BP) et de 640 à 1 050 nm (photomètre rouge, RP). La base de données (dernière version actuellement : GAIA DR3) est interrogeable à cette adresse : <https://gea.esac.esa.int/archive/>.