Fauvaud:L'Astronomie n°16 13/05/2009 16:23 Page 32

STÉPHANE FAUVAUD
stephane.fauvaud@wanadoo.fr
Association T60

L'OBSERVATION PHOTOMÉTRIQUE *des astéroïdes*

En orbite autour du Soleil, présents depuis le voisinage de la Terre jusqu'au-delà de Pluton, les astéroïdes sont des petits corps solides de quelques mètres à quelques centaines de kilomètres, qui se distinguent traditionnellement des comètes par l'absence d'une chevelure et de queue. Formés il y a 4,6 milliards d'années, ils sont des résidus peu évolués des matériaux originels constitutifs des planètes. La connaissance de la nature, de la distribution, de la formation et de l'évolution des astéroïdes est fondamentale pour l'étude de l'état physique et chimique de la nébuleuse solaire primitive, des processus de formation des planètes, mais aussi pour avoir une description la plus complète possible de notre Système solaire actuel.

L'observation depuis la Terre de la forme et de la surface des astéroïdes est difficile en raison de leur éloignement et de leur faible taille. Depuis quelques années, des images dans les domaines optique et radar, ainsi que le survol par des sondes interplanétaires, ont révélé la grande diversité de formes (sphériques, allongées...), configurations (astéroïdes doubles en contact ou séparés, systèmes multiples...) et surfaces (anisotropie minéralogique, topographie marquée par des cratères, failles, bosses...) des astéroïdes.

Si ces techniques augmentent significativement nos connaissances des astéroïdes, elles ne permettent cependant l'observation que d'une faible fraction d'objets, et les données disponibles sont essentiellement issues d'observations photométriques à large bande réalisées depuis le sol. La photométrie consiste à suivre l'éclat d'un objet au cours du temps pour obtenir une *courbe de lumière*. Bien adaptée à l'étude d'un grand nombre de petits corps de populations variées, la photométrie est une technique essentielle pour estimer l'état de la rotation, la forme et les propriétés de surface des astéroïdes, détecter des systèmes binaires puis déterminer la densité des composantes, en déduire des indications sur la structure interne.

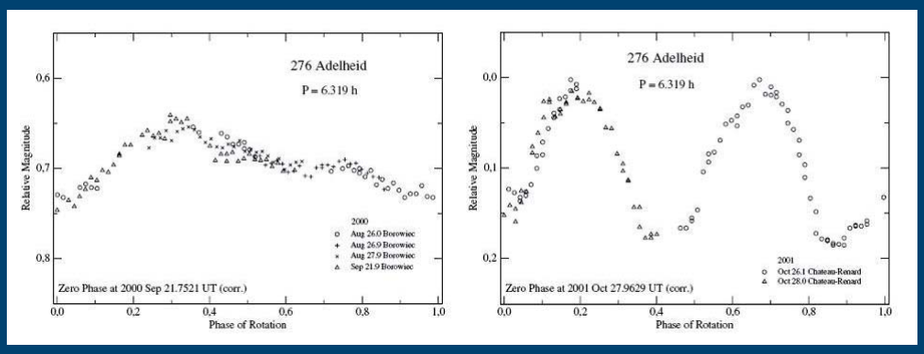
ABSTRACT. Photometric observations of asteroids. Minor bodies such as asteroids and comets, which are the most direct original remnants of the solar system, can provide clues on its origin and evolution. However, disk-resolved images can be obtained for a limited number of these, and a main part of our knowledge comes from groundbased photometric observations. This paper describes briefly how some physical properties of asteroids – e.g., shape, rotational state, binary systems detection – can be estimated from the analysis of the photometric lightcurves. The contribution of amateur observers to increase the amount of photometric data is emphasized, as well as their collaboration with professional astronomers.

Ce que révèlent les courbes de lumière des astéroïdes

Un astéroïde réfléchit une partie de la lumière solaire qu'il reçoit. La lumière perçue par l'observateur dépend de nombreux paramètres, notamment de la forme de l'objet et de l'orientation de son axe polaire, d'une possible distribution anisotrope de l'albédo de l'astéroïde, de sa fraction de surface éclairée (liée à l'angle de phase solaire observateur-objet-Soleil), mais aussi de sa distance à la Terre et au Soleil, d'une éventuelle multiplicité (astéroïdes doubles, présence de satellites), d'une possible "activité" soudaine (par exemple dégazage, collision avec un autre corps), etc.

Effet de forme des astéroïdes – Sur de courtes échelles de temps, l'axe de rotation de la plupart des astéroïdes conserve une direction fixe. La période de la courbe de lumière est alors directement liée à la période de rotation de l'objet – typiquement de l'ordre 4 à 12 h. Pour des périodes aussi courtes et des durées d'observation de quelques heures, l'influence des effets géométriques – en

Fauvaud:L'Astronomie n°16 13/05/2009 16:23 Page 33

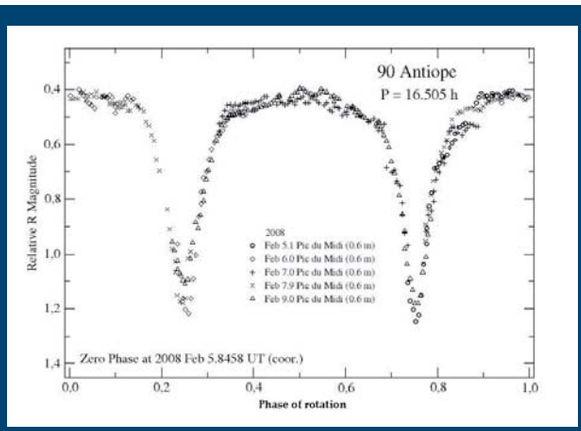


1. Forme possible de l'astéroïde 276 Adelheid. En haut : modèle morphologique tridimensionnel établi à partir de 31 courbes de lumière observées lors de 7 apparitions de l'astéroïde ; les vignettes de gauche et du milieu sont des vues équatoriales avec une rotation de 90° (la direction de l'axe polaire est indiqué en rouge), la vignette de droite est une vue polaire. L'astéroïde présente un aspect anguleux. En bas : exemples de deux courbes de lumière, l'une obtenue en 2000 avec le télescope professionnel de 0,4 m de diamètre de la station de Borowiec (observatoire de Poznan, Pologne), l'autre observée en 2001 avec le télescope amateur de 0,62 m de diamètre (T62) de l'observatoire du pic de Château-Renard (Hautes-Alpes, France). L'allure des deux courbes, d'amplitudes ~0,2 mag et ~0,4 mag, est différente ; en particulier, les deux minima et deux maxima par période de rotation (6,319 h) sont bien visibles sur la courbe de 2001. (D'après Marciniak *et al.*, 2007, *Astron. Astrophys.* 473, 633.).

particulier la variation de l'angle de phase solaire – sur l'amplitude de la courbe de lumière est négligeable (hormis pour les géocroiseurs, ces astéroïdes qui peuvent croiser l'orbite de la Terre). Toutefois, des observations réalisées seulement dans le domaine optique ne permettent pas d'attribuer *a priori* une cause unique aux variations lumineuses. Cependant, l'albédo des astéroïdes semble peu varier et, dans cette hypothèse, l'effet de forme est invoqué pour interpréter la courbe de lumière. Ainsi, pour un objet ellipsoïdal, la courbe montre deux maxima et deux minima par rotation, et son amplitude est d'autant plus élevée que le corps est allongé. Une ambiguïté subsiste néanmoins, car l'orientation de l'astéroïde par rapport à l'observateur est inconnue *a priori* ; cette ambiguïté peut être levée par des observations effectuées à des époques variées, sous des configurations géométriques différentes.
Un ensemble de courbes de lumière (typiquement une dizaine, observées lors d'au moins trois ou quatre apparitions) peut permettre de reconstituer, par méthode inverse, la morphologie tridimensionnelle d'un astéroïde (fig. 1). Pour les géocroiseurs, l'angle de phase solaire couvre rapidement une large gamme de valeurs et l'estimation de la forme est parfois possible avec des données obtenues lors d'une seule apparition.

Astéroïdes seuls ou en couple ? – Des configurations particulières d'astéroïdes binaires peuvent également produire des courbes de lumière comportant une seule période. C'est le cas notamment des systèmes où les deux corps sont en contact, ou des systèmes séparés mais dont la rotation de chaque corps est synchrone avec le mouvement orbital mutuel (fig. 2).

L'identification de périodes multiples dans des courbes de lumière peut être la signature d'astéroïdes dont l'axe polaire oscille dans l'espace, mais aussi révéler des systèmes binaires asynchrones, pour lesquels la période de rotation d'au moins un des deux corps est différente de la période orbitale du système (fig. 3).



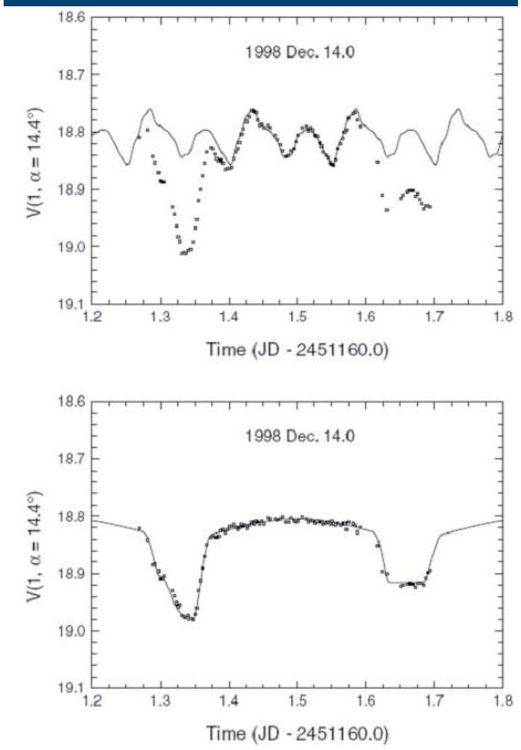
2. Courbe de lumière de l'astéroïde double 90 Antiope obtenue en février 2008. Deux corps de 91 et 86 km de diamètre, séparés de 171 km, constituent 90 Antiope. Ce système est synchrone : la période de rotation des deux corps est égale à la période de révolution orbitale du système (16,505 h). Selon l'aspect sous lequel celui-ci se présente à l'observateur, des phénomènes mutuels (éclipses, occultations) entre les deux corps peuvent être observés ; en 2008, les circonstances géométriques de l'observation étaient favorables pour enregistrer des chutes de luminosité de ~0,8 mag. Les données ont été recueillies avec le télescope amateur de 0,6 m de diamètre (T60) du Pic du Midi (Hautes-Pyrénées, France). (D'après Descamps *et al.*, 2009, *Icarus*, en préparation.).

Fauvaud:L'Astronomie n°16 13/05/2009 16:23 Page 34

Toutefois, il est parfois difficile de discerner la véritable nature de l'objet, car un corps unique ou un système double peuvent éventuellement conduire à des courbes de lumière qualitativement proches. Des observations photométriques complémentaires sont alors nécessaires pour discriminer l'une ou l'autre solution.

Rotation et structure interne des astéroïdes – La période de rotation, connue pour environ deux milliers d'astéroïdes, est typiquement de quelques heures, mais avec des valeurs extrêmes qui s'étendent de quelques secondes à quelques semaines. Une période de rotation limite d'environ 2 heures a néanmoins été mise en évidence, en relation avec la taille des objets ; en effet les corps de diamètre supérieur à 1 km ont une rotation plus lente, tandis que des objets plus petits peuvent tourner plus rapidement. Pour un objet sphérique de masse volumique moyenne typique de 2,7 g.cm^{-3}, dont la cohésion est assurée seulement par autogravité, la force centrifuge à l'équateur équilibre la force de gravité pour une période de rotation de l'ordre de 2 heures ; une rotation plus rapide disloquerait le corps. Cela suggère que les **astéroïdes de plus de 1 km seraient des "tas de débris"** (*rubble piles*), des milieux granulaires plus ou moins poreux dont la cohésion interne serait assurée par leur propre gravité. **Les objets en rotation rapide, plus petits que 200 m, pourraient être des blocs monolithiques**, issus de collisions catastrophiques de corps plus gros. Toutefois, la résistance d'un milieu granulaire n'est pas négligeable (des édifices en sable parviennent à se maintenir…) et la limite apparente de ~2 h ne semble pas être un critère suffisant pour conclure sur la nature de la structure interne des astéroïdes.

Altération de la rotation et effet YORP – Les périodes de rotation très rapides ou très lentes acquises par des astéroïdes de taille similaire peuvent être le résultat de chocs consécutifs à des collisions. Cependant, un mécanisme concurrent, l'effet Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack (YORP), a été observé et apporte une autre explication à ces disparités de périodes : une pression de radiation thermique, induite par la restitution anisotrope de l'énergie solaire absorbée en cours de rotation, créée sur un astéroïde de morphologie irrégulière un couple capable d'altérer sa rotation. Particulièrement efficace sur des corps de petites dimensions, jusqu'à quelques dizaines de kilomètres, l'effet YORP peut ainsi augmenter (ou réduire) le taux de rotation, modifier l'orientation des axes polaires, conduire à des pertes de masse et à la création d'un système double si le taux de rotation est accéléré.



3. Exemple d'une courbe de lumière de l'astéroïde binaire 1996 FG3. Cet objet est un système binaire asynchrone : la période de rotation du corps central est de 3,6 h et la période orbitale du satellite est de 16,15 h. *En haut* : courbe de lumière de l'astéroïde, où la ligne continue représente la composante périodique courte des mesures, attribuée à la rotation du corps primaire. *En bas* : la composante périodique courte de la courbe de lumière a été retirée ; la ligne continue modélise les phénomènes mutuels entre le corps parent et son satellite (D'après Mottola & Lahulla, 2000, *Icarus* 146, 556).

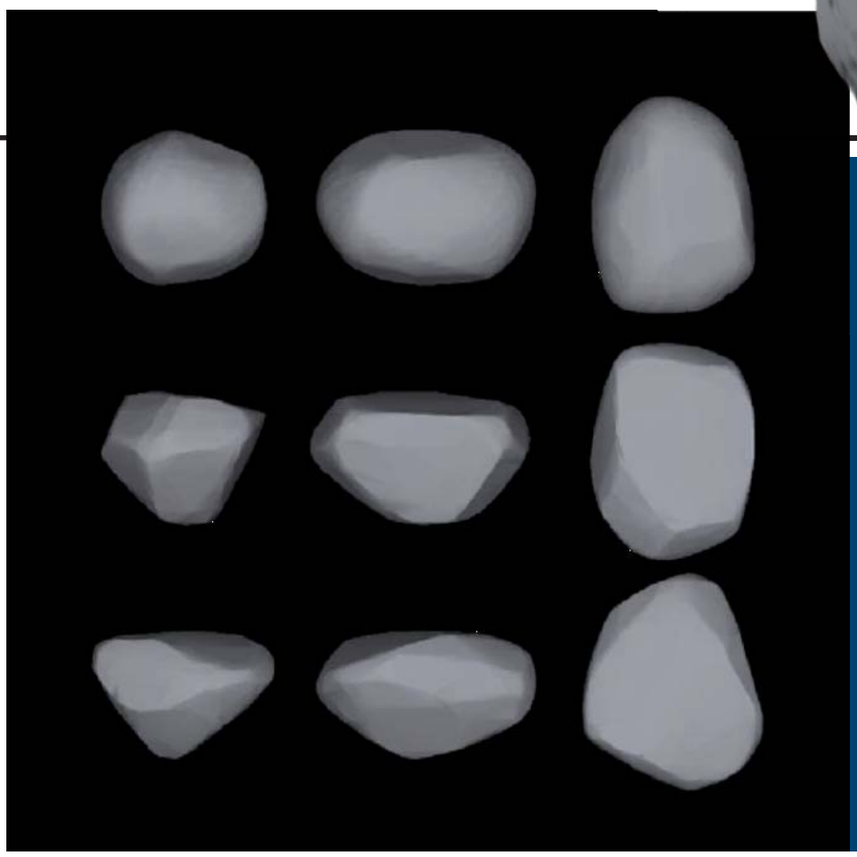
La contribution essentielle des astronomes amateurs

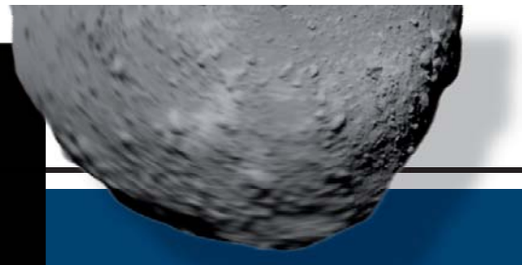
L'observation photométrique de centaines de milliers d'astéroïdes demande des milliers d'heures de temps de télescope. Comme les astronomes professionnels ne disposent pas des moyens suffisants pour satisfaire de telles exigences, le soutien des astronomes amateurs – nombreux, disponibles, réactifs – est essentiel.

Moyens à mettre en œuvre – Avec un télescope de 0,4 m de diamètre équipé d'une caméra CCD, des mesures photométriques précises peuvent être réalisées sur des objets plus brillants qu'une magnitude de 15 et des données importantes peuvent encore être obtenues avec un télescope de 0,2 m de diamètre, voire d'ouverture moindre. Le suivi temporel d'un objet nécessite un mode automatique d'acquisition des images et une base de temps fiable et précise. La courbe de lumière obtenue sera d'autant mieux décrite et détaillée que le nombre de mesures sera élevé (un échantillonnage de plusieurs dizaines de points par rotation, régulièrement répartis, semble être un optimum). La précision typique souhaitée pour les courbes est de l'ordre de 0,01 à 0,02 unité de magnitude, mais des courbes plus bruitées (~0,05 mag) contiennent aussi de l'information. L'utilisation d'un filtre V (ou R) large bande ou équivalent, très répandu, est conseillée. Le suivi du même objet durant plusieurs nuits consécutives, ou au moins proches les unes des autres, permet d'éliminer les biais ou artefacts dans la recherche de la période de rotation, en particulier si celle-ci est supérieure à la durée d'une seule nuit.

Sélection des cibles – Le choix des objets à observer peut répondre à divers objectifs. Une première courbe de lumière permet d'estimer la période de rotation d'un corps et d'obtenir quelques indications sur sa forme, augmentant les données statistiques ; de plus, un système double ou la présence d'un satellite peuvent être détectés ou suspectés. D'autre part, des mesures photométriques calibrées, réalisées sur une large gamme d'angles de phase solaire (jusqu'à 15° ou plus, de part et d'autre de l'opposition), fournissent une *courbe de phase*, caractéristique des propriétés physiques locales de la surface de l'astéroïde (texture, porosité, propriétés optiques...).
Le suivi régulier d'un objet au cours de ses différentes apparitions améliore ou complète des données déjà disponibles, et peut permettre d'établir un modèle morphologique. De plus, la préparation et l'interprétation d'observations recueillies par d'autres techniques (radar, occultations d'étoiles, radiométrie, polarimétrie, spectrophotométrie, interférométrie, imagerie directe, missions spatiales, etc.) nécessi-

Fauvaud:L'Astronomie n°16 13/05/2009 16:23 Page 35





4. Morphologie de l'astéroïde 130 Electre. En haut : modèle établi à partir de 49 courbes de lumière "standard" (i.e. résolues temporellement) observées au cours de 8 apparitions. Au milieu : modèle obtenu avec des données disparates (113 mesures) et une courbe de lumière "standard". En bas : modèle basé sur un nombre limité de mesures disparates (50) et 4 courbes de lumière "standard" observées lors de 2 apparitions. Les modèles montrent l'astéroïde sous des vues équatoriale (à gauche et au centre, avec une rotation de 90°) et polaire (à droite). L'écart sur la direction du pôle entre le modèle basé seulement sur les courbes de lumière "standard" et les modèles combinant les données (disparates et "standard") est de 7°. L'utilisation de données disparates conduit à une bonne approximation de l'allure globale de l'astéroïde. (D'après Ďurech *et al.*, 2009, *Astron. Astrophys.* 493, 291).

tent parfois de disposer de nouvelles courbes de lumière. Des liens entre astronomes professionnels et amateurs sont alors indispensables, à la fois pour optimiser le choix des cibles à observer, coordonner les observations et centraliser la collecte et l'analyse des données recueillies. Pour cela, deux groupes sont particulièrement actifs.

Le *Collaborative Asteroid Lightcurve Link* (CALL), animé par Brian D. Warner *(Palmer Divide Observatory*, États-Unis), présente des listes d'objets à observer et regroupe des programmes de recherche thématiques initiés par des professionnels (étude de populations et de familles d'objets particulières, préparation d'observations...).
En Europe, Raoul Behrend (observatoire de Genève, Suisse) compile de nombreux astéroïdes pour lesquels des observations sont souhaitées, et gère également une vaste base de données de courbes de lumière d'astéroïdes, comètes et étoiles variables ; les amateurs français, grâce à l'association des utilisateurs de détecteurs électroniques (AUDE) en particulier, contribuent largement à enrichir cette base.
Le nombre croissant de résultats présentés dans la revue T*he Minor Planet Bulletin,* mais aussi la publication d'articles cosignés par des amateurs dans de grandes revues internationales (*Astronomy & Astrophysics, Icarus*...), témoignent du dynamisme et de la forte implication des amateurs dans l'observation photométrique des astéroïdes.

Conclusion et perspectives

Indispensable pour la connaissance des petits corps du Système solaire, l'observation photométrique dans le domaine optique fournit des informations sur les caractéristiques physiques des astéroïdes – rotation, morphologie, densité lorsque des systèmes binaires sont détectés, etc. Les courbes de lumière améliorent en particulier la préparation et l'interprétation de données obtenues par d'autres techniques (radar, par occultation d'étoiles, radiométrique, missions spatiales...). Dans un futur proche, la surveillance et le relevé systématique de vastes parties du ciel, réalisés dans le cadre de projets tels que les télescopes Pan-STARRS, LSST, ou le satellite GAIA, vont apporter de nombreuses mesures astrométriques et photométriques, précises mais disparates. Ces données photométriques disparates, combinées avec des courbes de lumière "standard" (i.e. résolues temporellement) déjà disponibles ou complétées par des observations dédiées et ciblées depuis le sol, devraient permettre d'établir le modèle physique d'un nombre significatif d'astéroïdes ; dans le cas d'Electre, en effet, l'approche théorique et les simulations de formes basées sur des mesures disparates ont été validées avec des données observationnelles (fig. 4).

L'enregistrement de courbes de lumière d'astéroïdes à haute résolution temporelle est à la portée des observateurs amateurs (particuliers, clubs, étudiants) équipés de petits télescopes et d'une caméra CCD. Aussi, une coordination des moyens et des observations devrait pérenniser les échanges déjà existants entre astronomes amateurs et professionnels, et impulser de nouvelles collaborations sur des programmes de recherche spécifiques.

S. Fauvaud ■

Bibliographie
[**1**] Bottke, W. F., Paolicchi, P., Binzel, R. P., & Cellino, A. (eds.), 2002, *Asteroids III*, The University of Arizona Press.
[**2**] Durech, J. et al., 2009, "Asteroid models from combined sparse and dense photometric data", *Astronomy & Astrophysics* 493, 291-297.
[**3**] Fauvaud, S., 2001, "Photométrie et rotation des astéroïdes", *LAstronomie* 115, janv.-février, 68-76.
[**4**] Roy, R. 2004, "Amateurs, professionnels, exemples de collaboration", *L'Astronomie vol. 118,* fév.r, 92-94
[**5**] Warner, B. D., 2006, *A practical guide to lightcurve photometry and analysis,* Springer.
[**6**] Descamps, P., 2007, "Systèmes astéroïdaux doubles", *L'Astronomie, vol. 121, juin, p.270.*

Quelques sites Internet
[**7**] Behrend, R., Courbes de rotation d'astéroïdes et de comètes (CdR), http://obswww.unige.ch/~behrend/page_cou.html
[**8**] Durech, J., Database of asteroid models from inversion techniques, http://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/asteroids3D/web.php
[**9**] Kaasalainen, M., New worlds in our solar system, http://www.rni.helsinki.fi/~mjk/asteroids.html
[**10**] Pravec, P., Ondrejov asteroid photometry project, http://www.asu.cas.cz/~ppraved/
[**11**] *The Minor Planet Bulletin*, http://www.minorplanetobserver.com/mpb/default.htm
[**12**] Warner, B. D., *Collaborative Asteroid Lightcurve Link* (CALL), http://www.minorplanetobserver.com/astlc/default.htm