

Les astéroïdes sont des petits corps du Système solaire qui se concentrent pour la plupart dans la Ceinture principale, région de transition qui sépare les planètes terrestres des planètes joviennes, à des distances au Soleil comprises entre 2,2 et 3,3 unités astronomiques (UA). Ils sont généralement considérés aujourd'hui comme les résidus d'une planète avortée, peut-être en raison de la présence du proto-Jupiter proche qui aurait empêché l'accrétion des proto-astéroïdes. Le diamètre moyen des astéroïdes répertoriés s'étend de ~10 m à ~1000 km, soit sur cinq ordres de grandeur.

**A**près la découverte du premier astéroïde, 1 Cérès, le 1<sup>er</sup> janvier 1801 par Giuseppe Piazzi (1746-1826) depuis l'Observatoire de Palerme en Sicile, l'étude de ces objets s'est limitée essentiellement à des mesures astrométriques, destinées à décrire les orbites et à améliorer la connaissance de la dynamique de ces corps.

Longtemps jugés comme de simples curiosités pour mécaniciens célestes, ce n'est que depuis ces dernières décennies que des études systématiques de la physique des astéroïdes ont été entreprises et ont conduit à une meilleure compréhension de ces petits corps. Les astronomes ont en effet compris que ces objets, vraisemblablement peu évolués depuis leur formation compte tenu de leur faible taille, sont des témoins potentiels des conditions qui régnaient au sein de la nébuleuse primordiale lors de la formation du système solaire. Une meilleure connaissance des conditions de formation et d'évolution de la Ceinture principale des astéroïdes devrait donc conduire à mieux contraindre les modèles de formation du système solaire.

Malgré leurs dimensions trop petites pour être facilement résolues depuis la Terre, plusieurs techniques observationnelles sont utilisées pour l'étude des astéroïdes (Di Martino et al, 1990).

En particulier les courbes de lumière, essentiellement obtenues par photométrie photoélectrique et CCD, donnent une mesure directe de la période de rotation de l'astéroïde et les premières contraintes sur la forme globale et l'orientation du pôle de l'objet. La photométrie multi-

bandes (généralement en 3 ou 8 couleurs) permet d'estimer les variations d'albédo de la surface de l'objet (l'albédo est le rapport entre la quantité de lumière réfléchi et la quantité de lumière qu'il reçoit). La composition minéralogique de surface peut être déduite de l'étude des spectres de réflectance obtenus dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge ; ceux-ci peuvent être ensuite comparés aux spectres des météorites et des roches terrestres et lunaires. La radiométrie infrarouge permet de mesurer le diamètre moyen et l'albédo de l'astéroïde. L'observation des occultations d'étoiles par les astéroïdes, les observations radar, l'interférométrie des tavelures, l'imagerie avec optiques adaptatives et la polarimétrie permettent également de fournir des données significatives sur les dimensions, les formes, l'orientation des pôles et les propriétés physiques des astéroïdes.

Enfin, depuis 1991, les approches de quelques astéroïdes par les sondes spatiales *Galileo* et *NEAR-Shoemaker* ont permis d'effectuer des observations et des mesures détaillées des morphologies et compositions minéralogiques de surface, des formes et dimensions, des états rotationnels, des propriétés magnétiques, des masses, de confirmer l'hypothèse de la présence de satellites, etc.

Cependant, les connaissances des propriétés rotationnelles et les premières contraintes sur les formes des astéroïdes sont encore obtenues essentiellement par l'étude photométrique, depuis la Terre, des variations d'éclat de ces petits corps (Lecacheux, 1987).

# Photométrie et rotation des astéroïdes

par **Stéphane Fauvaud**  
stephane.fauvaud@wanadoo.fr

## Formes, état rotationnel des astéroïdes et courbes de lumière

### Variations d'éclat des astéroïdes

Depuis la Terre, de nombreux astéroïdes présentent un éclat qui varie périodiquement au cours du temps. En effet, la lumière solaire réfléchiée par un astéroïde est modulée notamment par : (i) les variations de distances entre l'astéroïde et la Terre, et l'astéroïde et le Soleil, qui entraînent des changements de la luminosité apparente de l'objet ; (ii) le changement de la configuration géométrique entre l'astéroïde et l'observateur, qui voit la fraction illuminée de l'astéroïde évoluer en particulier avec l'angle de phase (angle Soleil-astéroïde-Terre), qui induit des effets d'ombres projetées à la surface de l'objet ; (iii) la forme et l'orientation dans l'espace de l'objet en rotation, et ses caractéristiques de surface (variations d'albédo, compositions minéralogiques...).

### Courbes de lumière d'astéroïdes

Une courbe de lumière d'astéroïde représente les variations d'éclat de l'objet au cours du temps, par rapport à une source lumineuse constante (étoile de comparaison). Les caractéristiques d'une courbe de lumière (amplitude, période, nombre, niveaux et formes des minima et maxima), pour plusieurs configurations géométriques d'observations, et notamment pour différentes oppositions de l'astéroïde (c'est-à-dire lorsque l'angle de phase est proche de zéro), permettent de déduire des informations sur la forme globale et les caractéristiques de surface de l'objet, ainsi que sur son état rotationnel (période et sens de rotation, direction de l'axe de rotation).

De façon schématique, on peut séparer en trois principales catégories les courbes de lumière d'astéroïdes. On distingue (Zappalà, 1987) : (i) les courbes dominées par la forme allongée de l'astéroïde, et qui présentent deux minima et deux maxima bien marqués (corps triaxial ellipsoïdal) ; (ii) les courbes pour lesquelles des taches de surface viennent se superposer à la forme allongée de l'astéroïde, conduisant à des extrema de niveaux différents et/ou à des irrégularités ; (iii) les courbes irrégulières possédant un nombre aléatoire d'extrema, caractéristiques d'un corps quasi-sphérique où dominent les taches de surface.

Ainsi, pour une opposition donnée, une courbe de lumière montre des variations d'éclat majeures qui dépendent principalement de la forme globale de l'astéroïde, auxquelles viennent se superposer des variations d'éclat mineures liées aux propriétés de surface (taches de réflectivités et/ou de compositions différentes...) et à la topographie de l'objet (cratères, dépressions, bosses...).

L'étude des courbes de lumière disponibles a mis en évidence que les astéroïdes présentent une grande diversité de formes. Ceci a été confirmé et précisé en particulier par l'imagerie radar, le télescope spatial *Hubble* et les sondes spatiales *Galileo* et *NEAR-Shoemaker*. On rencontre ainsi des astéroïdes quasi-sphériques (4 Vesta) et allongés (951 Gaspra, 243 Ida) ; des objets avec des profils de cacahuètes (4 769 Castalia, 4 179 Toutatis), de cigares (1 620 Geographos), d'os (216 Kleopatra). On observe des corps avec des cratères immenses (433 Eros, 253 Mathilde) et des zones d'albédos différents (243 Ida). La présence d'un satellite autour de certains corps a été mise en évidence, par exemple autour de 3 671 Dionysus (photométrie au sol) ; autour de 45 Eugenia, (45) Eugenia I (Petit-Prince) (imagerie au sol) ; autour de 90 Antiope ; de 243 Ida (satellite Dactyl détecté par la sonde *Galileo*).

L'atlas de Lagerkvist et al (1987) et ses mises à jour (1989, 1992, 1993, 1996) rassemblent les courbes de lumière connues d'astéroïdes. Le catalogue de Harris (2000) donne les amplitudes et périodes d'astéroïdes déjà observés.

### Amplitudes des courbes de lumière d'astéroïdes

L'angle d'aspect (angle compris entre la ligne de visée et l'axe de rotation de l'astéroïde) module directement l'amplitude d'une courbe de lumière. En effet, si celui-ci est nul (vue polaire) ou égal à  $90^\circ$  (vue équatoriale), l'amplitude de la courbe de lumière sera respectivement nulle ou maximale.

La figure 1 illustre notre propos : un solide de forme sphérique ne présentera pas de variations sensibles d'éclat, sauf s'il possède des taches d'albédos différents à sa surface. Par contre, un solide triaxial parfaitement ellipsoïdal présentera une courbe de lumière possédant deux minima et deux maxima réguliers.

L'amplitude de la courbe de lumière donne ainsi une première contrainte sur la forme globale d'un astéroïde. Considérons un corps triaxial ellipsoïdal de demi-grands

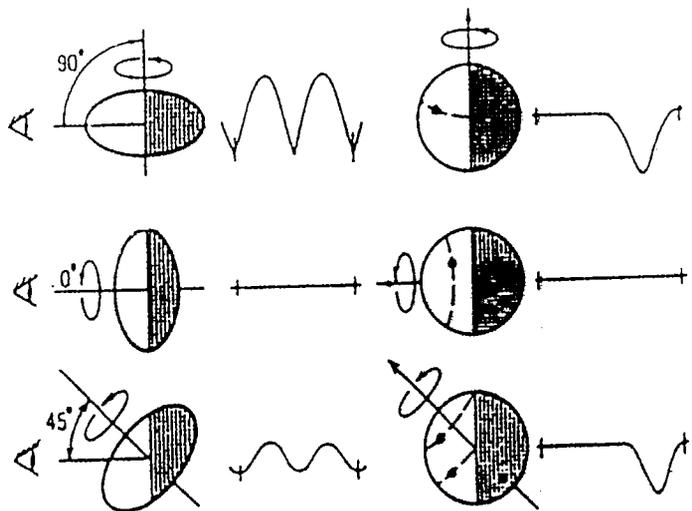


Fig. 1 – Relation entre la forme globale d'un astéroïde et les variations de luminosité observées : configurations simples de formes ellipsoïdale et sphérique (d'après Angeli-Bourget, 1995).

axes  $a$ ,  $b$  et  $c$ , qui tourne autour de sa plus petite dimension  $c$  ( $a > b > c$ ). Pour un angle de phase nul et une diffusion géométrique de la lumière, si l'angle d'aspect est égal à  $90^\circ$  (vue équatoriale), les flux perçus par l'observateur sont proportionnels aux sections maximale  $\pi ac$  et minimale  $\pi bc$  projetées. Selon Pogson, l'amplitude  $\Delta m$  (en magnitude) de la courbe de lumière peut s'écrire :  $\Delta m = 2,5 \log_{10} (\pi ac / \pi bc) = 2,5 \log_{10} (a/b)$ . Les courbes de lumière connues des astéroïdes ont généralement des amplitudes de l'ordre de 0,1 à 0,4 mag. Par exemple, une amplitude  $\Delta m = 0,3$  mag conduit à un rapport  $a/b = 1,3$ , caractérisant un corps dont la longueur dépasse de 30 % sa largeur. La détermination de  $c$  nécessite d'observer l'objet lors de plusieurs oppositions.

Remarquons que, pour une gamme d'amplitudes inférieures à 0,1 mag, le modèle du corps triaxial ellipsoïdal (deux maxima et minima par rotation) peut s'avérer erroné. Des objets quasisphériques, ou faiblement déformés mais couverts de taches et/ou d'aspérités, peuvent en effet produire des courbes à un, trois ou même quatre maxima et minima par cycle. Ces cas compliquent la détermination de la période réelle de rotation des objets (période simple ou période double par exemple ?...), et nécessitent des observations complémentaires, sous plusieurs configurations géométriques (oppositions) pour lever les ambiguïtés (Zappalà et al., 1983).

L'angle de phase a également une influence sur l'amplitude des courbes de lumière. En effet, il a été observé pour certains objets une relation amplitude-phase marquée par un accroissement de l'amplitude moyenne des courbes de lumière lorsque l'angle de phase augmente. Par exemple, pour 44 Nysa, la variation d'amplitude est de 0,1 mag pour une variation de  $10^\circ$  de l'angle de phase (Zappalà, 1987). Ceci traduit les effets combinés complexes de diffusion de la lumière, d'ombres projetées et de rugosité de surface.

#### **Périodes des courbes de lumière d'astéroïdes**

Les astéroïdes plus gros que ~200 mètres de diamètre possèdent des périodes de rotation supérieures à environ 2 heures, avec des valeurs typiques de ~6 à ~48 heures.

La période de rotation actuelle des objets est généralement la combinaison d'une rotation initiale acquise lors de la formation des objets, et modifiée lors de collisions avec d'autres corps. La limite supérieure probable du taux de rotation  $\omega_s$  d'un astéroïde est telle que la force centrifuge du corps est en équilibre avec sa force d'auto-gravité. Une augmentation de ce taux de rotation conduit à une perte de régolithe, une mise en tension ou même la rupture du corps. Pour un objet sphérique qui n'est pas en tension, de densité moyenne  $\rho$ , la période critique de rotation  $P_s = 2\pi/\omega_s \approx 3,3\rho^{-1/2}$  ( $P_s$  en heure et  $\rho$  en  $\text{g.cm}^{-3}$ ) (Weidenschilling, 1981). Ainsi, s'il est constitué d'un matériau géologique de densité moyenne  $\rho = 2,5 \text{ g.cm}^{-3}$  (valeur réaliste), un objet ne peut tourner plus rapidement que 2,1 heures au risque de se disloquer.

On pense que la plupart des objets de taille supérieure à quelques centaines de mètres ont subi au cours de leur vie des collisions. Selon les conditions de l'impact, le pro-

cessus collisionnel a conduit à une rupture – totale ou partielle – des corps en jeu (cible et impacteur) et a permis, dans certains cas, la formation d'un nouveau corps par réaccumulation gravitationnelle de la matière projetée. La structure ainsi obtenue, poreuse, à faible cohésion interne, est un agglomérat de matériaux ("tas de cailloux" *rubble-piles*) liés essentiellement par la force d'auto-gravité, et où des phénomènes physiques subtils (frottements lors de glissements, liaisons chimiques, attraction électrostatique...) jouent vraisemblablement un rôle non négligeable (Asphaug, 2000). Une rotation rapide pourrait contribuer à allonger de tels objets. Toutefois, Weidenschilling (1981) a montré que, pour ne pas se disloquer, le taux maximum de rotation d'un astéroïde possédant une structure de type "tas de cailloux" est de l'ordre de  $0,5\omega_s$ .

Ainsi, des corps de taille limitée ( $< \sim 200$  m), "éclats" multifformes de collisions d'objets plus importants, auraient pu conserver, dans certains cas, une structure compacte, monolithique (rocheuse ou métallique), à forte cohésion interne. Une telle hypothèse permet d'expliquer en effet des rotations particulièrement rapides, par exemple celle de l'astéroïde 1998 KY26, corps de l'ordre de 30 mètres de diamètre, qui tourne en 10,7 minutes !

D'après les observations, la plupart des astéroïdes doivent posséder un axe de rotation fixe dans l'espace. En effet, le mouvement de précession libre, c'est-à-dire l'oscillation libre de l'axe de rotation qui pouvait se superposer initialement à la rotation, s'est probablement dissipé en quelques centaines de milliers d'années par amortissement visqueux, conduisant à une configuration où les axes principaux d'inertie et de rotation du corps sont confondus. On ne peut toutefois écarter la possibilité de trouver des corps pour lesquels une précession libre subsisterait (Binzel et al., 1992).

De plus, certains astéroïdes ont montré des comportements rotationnels complexes (en particulier : rotation lente, éventuellement associée à une seconde période de rotation, non commensurable avec la période principale). Ces derniers peuvent être dus à des petits mouvements d'oscillations qui affectent les objets ( *tumbling asteroids* , par exemple 288 Glauke, 4 179 Toutatis), ou bien être la manifestation d'une précession forcée qui révélerait la présence d'un satellite autour du corps principal (par exemple 1 220 Crocus ou 3 671 Dionysus).

### **Observations photométriques des astéroïdes**

#### **Préambule**

Notre propos a ici pour objet la photométrie CCD différentielle d'ouverture synthétisée (d'objets qui ne présentent pas de surface apparente). Nous ne traiterons donc pas, en particulier, la méthode d'extraction des flux par ajustements des profils stellaires (photométrie PSF - Point Spread Function). Les capteurs CCD se distinguent notamment par l'information bidimensionnelle qu'ils délivrent, de hauts rendements quantiques, une réponse spectrale étendue et des qualités de linéarité sous différents flux, une bonne stabilité géométrique. Ces détec-

teurs sont donc bien adaptés à des travaux photométriques, en particulier pour l'étude d'objets peu lumineux ( $\text{mag} > \sim 11-12$ ). La description des systèmes photométriques (Johnson-Morgan, Cousins, Genève, Strömgren...) ainsi que les méthodes de raccordement des mesures aux différents systèmes sont décrites, par exemple, par Grégory (1987), Da Costa (1992), Henden et Kaitchuck (1990) ou Sterken et Manfroid (1992).

Le principe de la photométrie différentielle consiste à calculer la différence de magnitude, ou magnitude différentielle  $\Delta m$ , qui existe entre les magnitudes  $m_a = -2,5 \log_{10} F_a + C$  de l'astéroïde et  $m_e = -2,5 \log_{10} F_e + C$  de l'étoile de comparaison, de flux respectifs  $F_a$  et  $F_e$  ( $C$ , est une constante caractéristique du système instrumental ; elle n'influe pas en photométrie différentielle). La formule de Pogson conduit ensuite à :

$$\Delta m = m_a - m_e = -2,5 \log_{10}(F_a/F_e).$$

La photométrie différentielle peut être pratiquée même par nuits "non-photométriques", c'est-à-dire lorsqu'un léger voile uniforme de cirrus est présent dans le ciel. Elle évite l'étape délicate du raccordement des mesures à un système, qui nécessite toujours, pour être précise, l'observation d'un grand nombre d'étoiles "standards". En outre, elle permet d'assurer une bonne résolution temporelle pour les objets qui présentent des variations lumineuses rapides (astéroïdes à courtes périodes de rotation).

#### Remarques pour l'observation des astéroïdes

La détermination du temps de pose des images n'est pas triviale. On sait qu'une pose plus longue augmente le flux reçu, et par voie de conséquence, la qualité des mesures (pour un nombre  $N$  suffisant de photons, l'incertitude  $\sigma$  vaut, en première approximation,  $\sim$ racine de  $N$ ). Cependant, il est impératif - sous peine d'être contraint d'invalider, a posteriori, les mesures -, d'éviter la saturation des pixels au cas où les maxima de la courbe de lumière seraient observés. Pour cela, deux paramètres essentiels doivent être pris en compte : l'amplitude prévue (*a priori*) de l'astéroïde et le phénomène d'extinction de masse d'air.

Les amplitudes des astéroïdes déjà observés en photométrie lors d'oppositions précédentes seront obtenues en consultant des atlas et catalogues (Lagerkvist et al., 1987 et ses mises à jour de 1989, 1992, 1993, 1996 ; Harris, 2000). On gardera cependant en mémoire que ces amplitudes ne sont qu'indicatives. D'une opposition à l'autre, une courbe de lumière peut présenter des amplitudes plus faibles ou plus élevées, faire apparaître des inversions de maxima et de minima, ou des maxima et minima supplémentaires... Pour les astéroïdes qui n'ont pas encore été étudiés en photométrie, c'est l'aventure !

L'observation des astéroïdes nécessite souvent de suivre le plus longtemps possible (donc très bas sur l'horizon) les objets afin de disposer d'un maximum de mesures. La limite pratique de la durée maximale d'une séance d'observation est de l'ordre d'une dizaine d'heures, car, au-delà, la masse d'air augmente rapide-

ment et atteint des valeurs élevées qui détériorent fortement la qualité des mesures. Pour un objet donné, le flux perçu par l'observateur terrestre évolue selon l'épaisseur d'atmosphère traversée (masse d'air) : il est plus faible à l'horizon que lors de son passage au méridien. Ainsi, la différence de magnitude vaut  $k(X_H - X_M)$ , où  $k$ ,  $X_H$  et  $X_M$  sont respectivement le coefficient d'extinction (non connu en début de nuit) qui affecte l'objet, les masses d'air à l'horizon et au méridien. Par exemple, pour  $k = 0,2$  mag par masse d'air,  $X_H = 4$  et  $X_M = 1,5$ , l'objet sera vu plus brillant d'une valeur de 0,5 mag lors de son passage au méridien par rapport à l'horizon.

Le temps de pose des images doit donc tenir compte de ces deux contraintes, qui peuvent conduire à un effet cumulatif (amplitude maximale atteinte à un instant proche du méridien). Pratiquement, pour un astéroïde qui fait l'objet d'un premier suivi photométrique, on peut ajuster en début de première nuit le temps de pose de la séquence d'images pour que la moitié de la dynamique des pixels soit atteinte. En fin de nuit, un examen rapide des images permet de repérer les instants des maxima et minima (s'ils ont été observés) et d'estimer l'amplitude enregistrée afin d'optimiser les temps de pose des nuits suivantes. Enfin, notons que pour les astéroïdes qui présentent une rotation très rapide (quelques minutes), les temps de pose doivent être très courts pour ne pas introduire de biais dans les mesures (Pravec et al, 2000).

D'autre part, l'étude photométrique des astéroïdes présente une particularité essentielle par rapport à la photométrie des étoiles variables : les mouvements apparents des petits corps du système solaire sont perceptibles. Ainsi, le déplacement d'un astéroïde en cours de nuit doit être pris en compte pour que le centrage du champ observé anticipe le mouvement apparent de l'objet. De cette façon, les mêmes étoiles de comparaison seront conservées plus longtemps. Pour relier les portions de courbes d'une même nuit (cas des objets très rapides - géocroiseurs par exemple), on veillera à faire figurer des étoiles communes à deux champs successifs. Le recalage (*shift*) des portions de courbes, les unes par rapport aux autres, peut être effectué à partir d'une séquence d'images, effectuée lors du passage au méridien de l'ensemble des champs traversés par l'astéroïde (limitation des effets d'extinction par la réduction de la masse d'air). Cela suppose que, d'une part, l'ensemble du système instrumental n'a pas évolué au cours des observations et, d'autre part, que l'aspect physique de l'astéroïde n'a pas changé de façon significative pendant les périodes d'observations, en particulier que l'angle de phase de l'objet n'a pas trop varié (quelques degrés seulement).

#### Echantillonnages spatial et temporel des images

Même après un prétraitement soigné des images brutes (voir plus loin), il subsiste des inhomogénéités (variations résiduelles de sensibilité autour du niveau moyen du fond de ciel, inhomogénéités ponctuelles à l'intérieur d'un pixel). Pour réduire ces effets et obtenir des estimations précises des flux, il est essentiel que l'astéroïde et les étoiles s'étalent sur un nombre suffisant de pixels (largeur

à mi-hauteur – FWHM – typique de l'objet supérieure à ~2 pixels). L'échantillonnage spatial dépend de plusieurs facteurs, en particulier de la focale résultante du système optique, de la turbulence qui « étale » plus ou moins l'image (dilatation, déformation, fragmentation), de la précision du guidage, de la qualité de la mise au point... Aussi, toutes choses égales par ailleurs, l'échantillonnage peut être facilement maîtrisé par une défocalisation (limitée et contrôlée !) de l'image. Cette solution peut être utile, en particulier pour les instrumentations à courtes focales.

Un échantillonnage temporel élevé des images permet une description continue des variations lumineuses de l'objet, et donne également une première approximation sur la dispersion (incertitude) des mesures.

### Filtrage

L'utilisation d'au moins deux filtres facilite considérablement le traitement ultérieur des mesures. L'emploi d'un filtre rouge (R) est bien adapté à l'étude des astéroïdes qui réémettent la lumière solaire préférentiellement dans le rouge. D'autre part, un filtre rouge permet d'assombrir le fond de ciel (réduction des émissions infrarouges du ciel nocturne) et de minimiser, s'il est étroit, les effets d'extinction atmosphérique liés, notamment, aux différences de couleurs entre l'astéroïde et les étoiles de comparaison (extinction plus faible en rouge qu'en bleu).

Il est également intéressant de réaliser, lors du passage au méridien du champ observé (minimisation de la masse d'air), quelques clichés à travers un autre filtre, visible (V) par exemple. À partir des flux des objets à travers les deux filtres, il sera possible de déterminer les indices de couleurs des étoiles du champ et de l'astéroïde et d'apporter les corrections d'extinction adéquates.

### Prétraitement des images

Les images brutes contiennent les défauts systématiques (bruits spatiaux) de la caméra CCD : différences de sensibilité des pixels, bruits thermique et électronique. Avant même d'envisager de faire des mesures sur les images, il est indispensable d'éliminer leurs défauts (correction radiométrique) au moyen, respectivement, des cartes de plage de lumière uniforme (PLU), de noir et de précharge (Buil 1989).

La carte de PLU est délicate à élaborer. Elle peut être réalisée notamment : (i) à partir d'images prises sur le fond de ciel du soir ou du matin, ou d'un écran uniformément éclairé ; ou (ii) en effectuant une pile médiane à partir d'images réalisées en cours de nuit. Cette deuxième méthode est très efficace mais impose que les champs soient, d'une part, exempts d'objets étendus et, d'autre part, décalés aléatoirement. Ainsi, en élaborant une carte PLU à partir d'un nombre élevé d'images (> 60), la correction radiométrique apportée à nos images brutes est telle que les variations résiduelles typiques du niveau moyen du fond de ciel ne dépassent pas quelques millimagnitudes ( $2\sigma$ ).

### Réduction des images

L'étape suivante consiste à déterminer les flux de l'astéroïde et des étoiles environnantes. Les flux sont mesurés par photométrie d'ouverture synthétisée (génération d'un diaphragme) avec retrait du fond de ciel. Pour améliorer la précision des mesures, une solution consiste à retirer à l'estimation brute du flux de l'objet la valeur médiane du fond de ciel au voisinage de l'objet.

La taille du diaphragme doit être ajustée pour ne pas tronquer arbitrairement le pied de la distribution spatiale du flux de l'astéroïde ou des étoiles. Pour cela, une solution (Howell, 1992) consiste à tracer la courbe de crois-

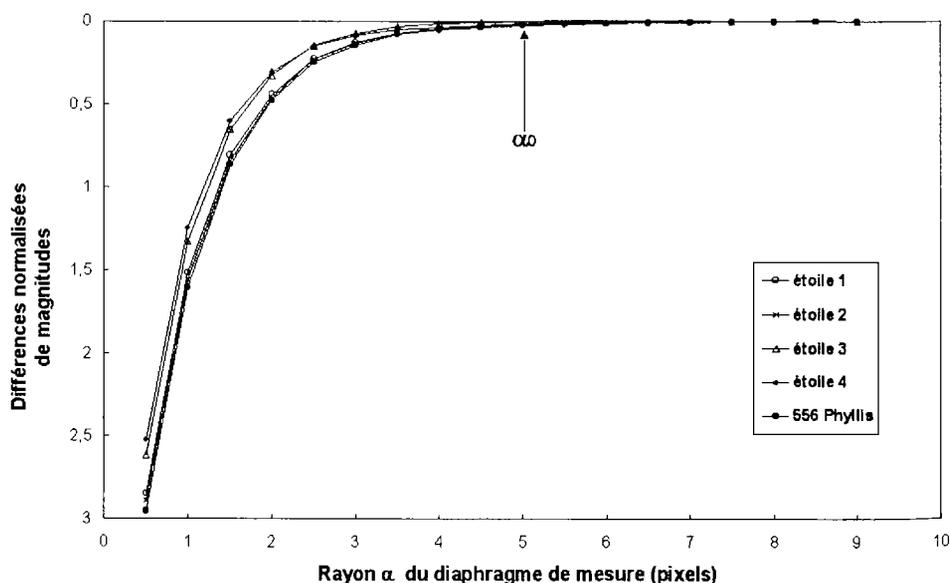


Fig. 2 – Courbes de croissance de lumière pour la détermination de la taille du diaphragme de mesure des flux des objets : exemple de l'astéroïde 556 Phyllis et d'étoiles du champ. Dans notre exemple, le diaphragme de mesure avait un rayon  $\alpha_0 = 5$  pixels.

sance de lumière (*growth curve*) des objets destinés à être mesurés. Cette courbe représente l'évolution de la magnitude de l'objet avec l'accroissement du rayon  $\alpha$  du diaphragme de mesure. Le rayon  $\alpha_0$  pour lequel la courbe atteint une asymptote correspond à la taille du diaphragme qui englobe l'essentiel du flux de l'objet. La figure 2 montre un faisceau de courbes de croissance normalisées, relatives à l'astéroïde 556 Phyllis et à des étoiles du champ. Le diaphragme utilisé pour l'astéroïde avait un rayon  $\alpha_0 = 5$  pixels ( $6''$ ).

### Traitement des mesures

La comparaison directe des magnitudes de l'astéroïde et de l'étoile de comparaison, à partir de leurs flux mesurés sur les images prétraitées, impose que deux conditions soient satisfaites simultanément : d'une part, que l'astéroïde et l'étoile de comparaison soient situés sur le même point dans le ciel (masses d'air identiques) et, d'autre part, que ces deux objets possèdent exactement la même couleur (indices de couleur semblables). La première condition est satisfaite avec une bonne approximation si l'image a une dimension réduite (quelques minutes d'arc sur le ciel). Par contre, rien ne permet de dire, et de justifier a priori, que l'astéroïde et l'étoile de comparaison ont la même couleur (ou indice de couleur). Du fait que les observations sont souvent effectuées bien au-delà de part et d'autre du méridien, il est indispensable d'apporter des corrections afin de réduire les effets d'extinction.

La procédure décrite ci-après présente une solution destinée à traiter chaque nuit. Elle consiste à estimer séparément les magnitudes hors-atmosphère instrumentales des objets, c'est-à-dire les magnitudes qui seraient mesurées en l'absence d'atmosphère terrestre, puis de les comparer selon la relation de Pogson pour obtenir les magnitudes différentielles hors-atmosphère. On dispose typiquement d'une série d'images réalisées dans le rouge (R) et de quelques images effectuées dans le visible (V).

*Première étape : correction des effets d'extinction sur les étoiles du champ :*

– on détermine les coefficients d'extinction moyens  $k_{er}$  (en magnitude par masse d'air) des étoiles dans le rouge à partir des droites de Bouguer. Pour une étoile donnée, la droite de Bouguer représente les magnitudes rouges  $m_{er}$ , calculées à partir des flux mesurés sur les images en rouge, en fonction des masses d'air  $x_0$  traversées (Henden et Kaitchuck, 1990). Le coefficient d'extinction moyen  $k_{er}$  est la pente de la droite de Bouguer. La valeur extrapolée de la magnitude pour la masse d'air nulle est la magnitude hors-atmosphère ;

– on calcule ensuite les magnitudes rouges hors-atmosphère  $(m_{er})_0$  des étoiles :  $(m_{er})_0 = m_{er} - k_{er}X_0$  ;

– on sélectionne l'étoile de comparaison pour laquelle la dispersion ( $\sigma$ ) autour de sa valeur moyenne  $(m_{er})_0$  est minimale. On cherchera une étoile telle que  $\sigma < \sim 0,01-0,015$  mag, ou mieux selon les conditions d'obser-

– on trace le graphe couleur-extinction des coefficient d'extinction  $k_{er}$  des étoiles en fonction de leurs indices de couleur instrumentaux  $(v-r)_e$  (figure 3). Ces derniers sont mesurés sur les images en V et R ;

*Deuxième étape : correction des effets d'extinction sur l'astéroïde :*

– on trace le graphe couleur-extinction des coefficient d'extinction  $k_{ar}$  des étoiles en fonction de leurs indices de couleur instrumentaux  $(v-r)_e$  (figure 3). Ces derniers sont mesurés sur les images en V et R ;

– à partir du graphe couleur-extinction, on interpole le coefficient d'extinction moyen  $k_{ar}$  de l'astéroïde d'après son indice de couleur instrumental moyen  $(v-r)_a$  ;

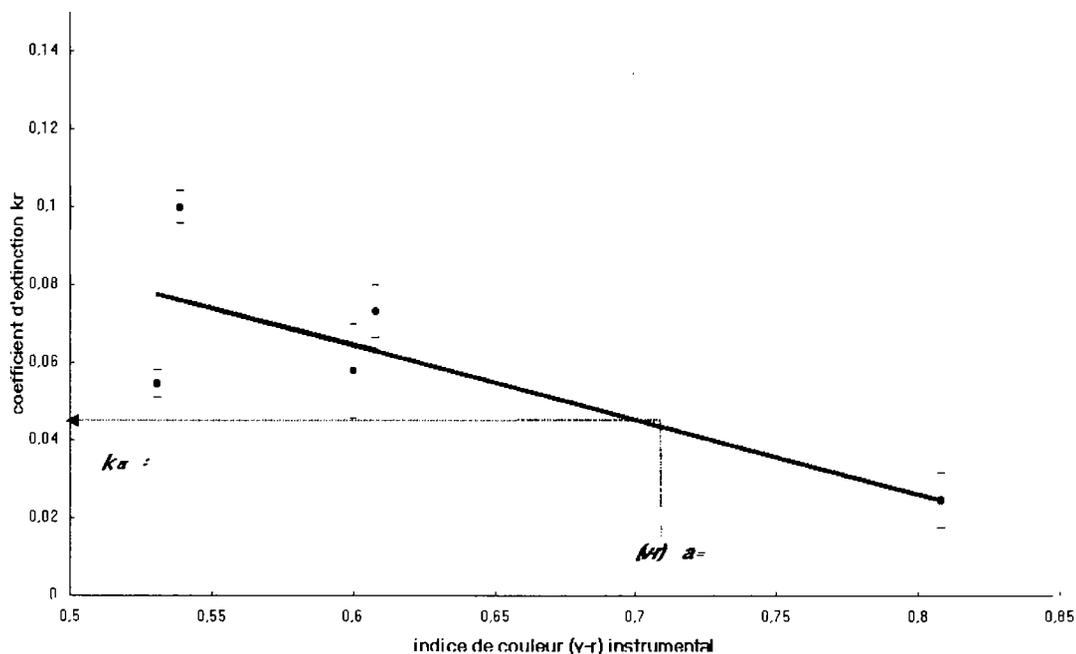
– on calcule les magnitudes hors-atmosphère instrumentales  $(m_{ar})_0$  de l'astéroïde :  $(m_{ar})_0 = m_{ar} - k_{ar}X_a$ , où  $X_a$  sont les masses d'air traversées par l'astéroïde.

*Troisième étape : calcul de la magnitude différentielle rouge hors-atmosphère  $(\Delta m_r)_0$  de l'astéroïde :*  $(\Delta m_r)_0 = (m_{ar})_0 - (m_{er})_0 = m_{ar} - m_{er} - (k_{ar}X_a - k_{er}X_e) \approx [m_{ar} - m_{er} - (k_{ar} - k_{er})X]$  (car  $X_e \approx X_a = X$  dans le cas d'un champ réduit).

Le traitement de l'extinction ne peut plus être écarté dès lors que les observations sont effectuées à des masses d'air supérieures à environ 1,5. Par exemple, l'astéroïde 556 Phyllis (figure 4) a été observé jusqu'à des masses d'air proches de 5, et traité selon la procédure décrite ci-dessus. Avec  $k_{ar} = 0,043$  et  $k_{er} = 0,1$ , la valeur maximale  $(k_{ar} - k_{er})X$  de la correction apportée pour  $X = 5$  atteint 0,3 mag. En d'autres termes, si l'astéroïde avait été comparé directement à l'étoile, sans prise en compte des effets d'extinction, la courbe de lumière aurait présenté une erreur progressive atteignant 0,3 mag en fin d'observation, ce qui est inacceptable.

Le traitement des mesures qui vient d'être décrit s'attache essentiellement à corriger les effets d'extinction sur les flux des objets observés. Toutefois, deux remarques sont à formuler. D'une part, pour tenir compte des variations des conditions d'observation en cours de nuit, plusieurs coefficients d'extinction peuvent être déterminés pour chaque étoile. Le graphe extinction-couleur est alors tracé à partir du coefficient moyen pondéré de chaque étoile. D'autre part, l'interpolation du coefficient d'extinction de l'astéroïde s'appuie sur l'hypothèse (réaliste) d'un indice de couleur sensiblement constant, ou qui présente des variations du même ordre de grandeur que l'incertitude interne des mesures ( $\sigma < \sim 0,03$  mag).

La précision intrinsèque typique finale d'observations photométriques CCD est de l'ordre de 0,02 mag ( $1\sigma$ ) pour un rapport signal sur bruit (statistique de photons) de l'astéroïde et de l'étoile de comparaison de  $\sim 300$ . Cette valeur ne tient pas compte des incertitudes apportées par les différentes corrections décrites plus haut. Pour une nuit donnée, la dispersion de la différence de magnitude



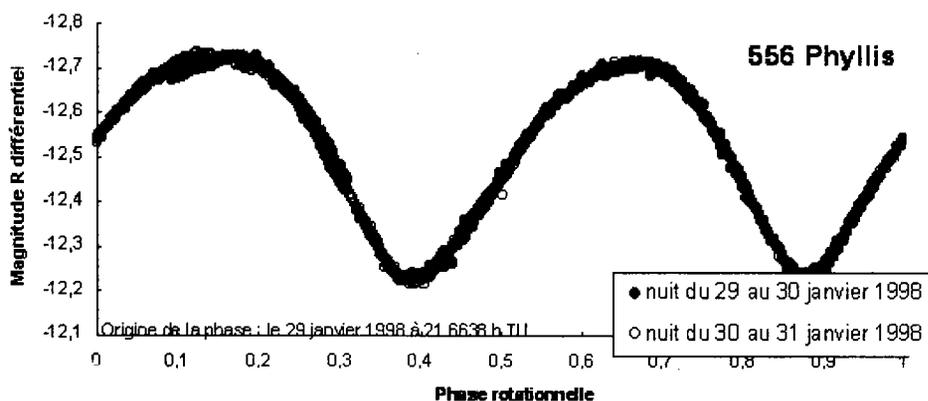
**Fig. 3** – Graphe couleur-extinction qui représente les coefficients d'extinction  $k_{gr}$  des étoiles environnant l'astéroïde 556 Phyllis, en fonction de leurs indices de couleur instrumentaux  $(v-r)_e$  (graphe valable pour la nuit du 29 au 30 janvier 1998). La régression linéaire tient compte des barres d'incertitude des points (Neully et CETAMA, 1998). On note que les étoiles sont d'autant moins affectées par l'extinction qu'elles sont plus rouges (indices de couleur élevés). L'indice de couleur moyen  $(v-r)_\alpha = 0,712$  de l'astéroïde, mesuré sur les images en V et R, permet d'interpoler un coefficient d'extinction moyen  $k_{gr} = 0,043$  et d'appliquer des corrections d'extinction à l'astéroïde.

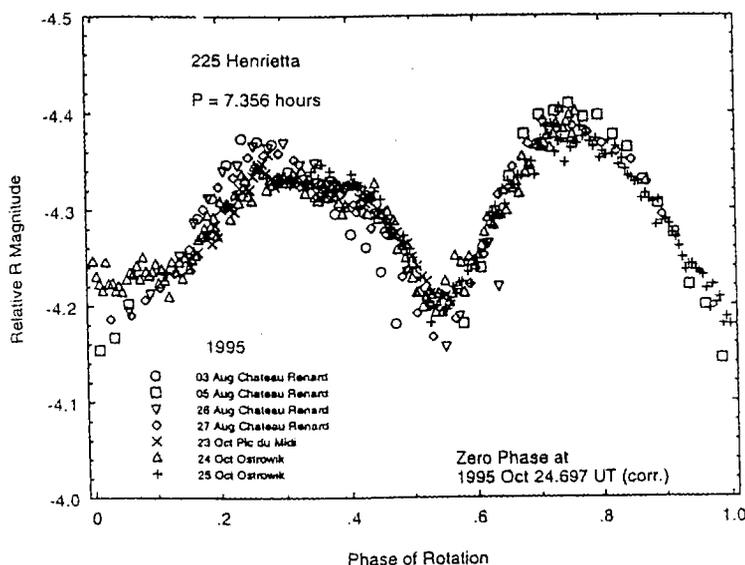
hors-atmosphère entre deux étoiles du champ, d'éclats comparables à celui de l'astéroïde, donne une indication approximative de la précision intrinsèque des mesures ; "l'épaisseur" des maxima et des minima de la courbe de lumière de la nuit en donne également une approximation. Cependant, il faut rester prudent et modeste lorsque l'on parle de la qualité des mesures, car les paramètres qui élargissent les barres d'incertitude sont nombreux.

Une règle d'or est à garder à l'esprit : pour obtenir une bonne qualité des mesures, il faut recueillir suffisamment de flux...

Après avoir fait apparaître les variations lumineuses  $(\Delta m)_0$  de l'astéroïde au cours du temps, il est nécessaire d'en rechercher leurs périodicités. Fullerton (1986) et Harris et Lupishko (1989) donnent des éléments pour traiter la recherche de caractéristiques périodiques d'un ensemble de mesures. Une mise en phase des mesures met alors en évidence la périodicité des variations d'éclat de l'objet. Par exemple, la figure 4 montre le compositage de deux nuits d'observation de l'astéroïde 556 Phyllis (1 070 mesures) à partir de la période de 4,293 heures

**Fig. 4** – Courbe de lumière composite de l'astéroïde 556 Phyllis (magnitude 12), basée sur la période donnée par Harris (2000). L'incertitude intrinsèque de cette courbe composite est estimée à  $\pm 1\sigma \sim \pm 0,02$  mag. Données obtenues depuis l'Observatoire du Pic de Château-Renard (Saint-Véran, Hautes-Alpes), à l'aide du télescope de 620 mm de diamètre équipé d'une caméra CCD Hi-SIS 22, d'un filtre R de Cousins et d'un réducteur de focale Optec Max-field 0,33x (focale résultante de 3070 mm) (S. Fauvaud, F. Bererd, D. Jolivet et M. Fauvaud).





**Fig. 5** – Courbe de lumière composite de 225 Henrietta observé dans le cadre d'une coopération amateurs-professionnels lors de l'opposition de 1995. Les mesures d'août 1995 ont été obtenues depuis l'Observatoire du Pic de Château-Renard (Saint-Véran, Hautes-Alpes) à l'aide d'un télescope de type flat-field de 190 mm de diamètre (F/4) équipé d'une caméra CCD Hi-SIS 22 et d'un filtre R de Cousins (Michalowski et al, 2000).

(Harris, 2000). La phase rotationnelle égale à 1 correspond à une rotation complète du corps sur lui-même.

#### Thèmes d'études

Les thèmes d'observation sont nombreux. Par exemple, l'étude des familles d'astéroïdes (Benest et al., 1995 ; Froeschlé, 1999), qui peut être assimilée à une expérimentation grandeur nature de collisions entre astéroïdes, peut apporter un éclairage nouveau pour l'interprétation des résultats d'expérimentations en laboratoire, et la déduction toujours délicate des lois d'échelle.

L'étude d'objets de groupes taxonomiques (C, D, S, M...) et orbitaux (Troyens, Hilda, géocroiseurs, Centaures, trans-neptuniens...) particuliers, de même que l'observation des corps de petites tailles (typiquement de diamètres  $\sim 50$  km) augmentent les données relatives à la distribution statistique des périodes de rotation des petits corps (diminution des biais observationnels), et apportent des contraintes sur les modèles de formation et d'évolution collisionnelle de la population astéroïdale (Farinella et al, 1999).

Des observations photométriques complémentaires peuvent, pour certains objets, permettre la détermination des caractéristiques physiques globales : période et sens de rotation, orientation de l'axe principal de rotation et forme globale de l'objet (Michalowski et Kryszczyńska, 1993). Le nombre d'astéroïdes pour lesquels il a été déterminé l'orientation de l'axe principal de rotation est de l'ordre d'une centaine seulement. Pour l'astéroïde 225 Henrietta par exemple (figure 5), qui a fait l'objet d'une collaboration amateurs-professionnels lors de son opposition de 1995, l'interprétation de l'ensemble des courbes de lumière disponibles (1982, 1983, 1987 et 1995) a conduit à une solution compatible avec une forme telle que  $a/b = 1,23$  et  $b/c = 1,08$  (Michalowski et al, 2000).

Des campagnes d'observation coordonnées en longitude sont également nécessaires pour les astéroïdes à périodes de rotation longue et/ou commensurable avec celle de la Terre.

Enfin, les astéroïdes particuliers tels que les objets très rapides, les objets à périodes de rotation très longue ou complexe, susceptibles de présenter une précession (Binzel et al, 1992), les astéroïdes binaires, les astéroïdes qui ont, ou peuvent, avoir des relations avec les comètes (944 Hidalgo, 2 060 Chiron, 3 200 Phaethon...), les corps candidats pour être approchés par des sondes spatiales (par exemple 140 Siwa et 4 979 Otawara dans le cadre de la mission Rosetta), les objets très peu observés (incertitude sur la période)... sont autant de cibles qui apportent des informations sur la physique de la population astéroïdale.

Il existe plusieurs outils qui permettent de dresser des éphémérides d'astéroïdes. Sans être exhaustif, citons Guide (Project Pluto), Ceres (institut d'astronomie théorique de Saint-Petersbourg) ou encore Minor Planet Software (Sergio Foglia - voir liste des adresses).

#### Publication des résultats

La revue *The Minor Planet Bulletin*, qui intéresse notamment les professionnels spécialistes des astéroïdes, est le vecteur principal pour la publication de résultats d'études photométriques de petits corps obtenus par des amateurs. Des collaborations entre les amateurs et les professionnels peuvent également être engagées sur des sujets d'étude particuliers (exemple de 225 Henrietta, figure 5). Notons enfin que, depuis 1987, Lagerkvist et ses collaborateurs, de l'Observatoire d'Uppsala en Suède, ont initié un atlas régulièrement mis à jour (1989, 1992, 1993, 1996) qui compile plus de 6 700 courbes de lumière réparties dans plus de 400 publications.

## Conclusion

La photométrie des astéroïdes est un des moyens qui permet d'appréhender les formes globales et les propriétés rotationnelles des astéroïdes. Compte tenu de la facilité de mise en œuvre des techniques photométriques, les astronomes amateurs peuvent apporter une contribution utile à la connaissance de la physique et de la statistique de population de ces objets. L'utilisation de procédures rigoureuses pour la réduction et le traitement des données permet de garantir la qualité et la fiabilité des mesures.

L'envoi de sondes spatiales à la rencontre d'un astéroïde

est trop peu fréquent pour ne pas être préparé avec le plus grand soin. Dans ce contexte, les études photométriques au sol peuvent contribuer à apporter des renseignements sur la morphologie générale de l'objet. La planification des plans de vols de la sonde peut alors être optimisée (observation sous des angles favorables). En retour, l'imagerie directe depuis la sonde précise ou valide les modèles théoriques de traitement des mesures obtenues au sol. C'est ainsi que, pour 951 Gaspra, la comparaison des résultats photométriques obtenus depuis le sol et l'espace (sonde spatiale Galileo) a conduit à un bon accord entre les deux techniques d'investigation. ■

**Remerciements.** Je remercie Jean-Claude Merlin pour être à l'origine de cet article et pour ses remarques constructives lors de la relecture du manuscrit.

## Bibliographie

- Angeli-Bourget, C., 1995, Détermination des propriétés rotationnelles d'astéroïdes : des indices pour interpréter leur histoire évolutive, Thèse, Observatoire de Paris.
- Asphaug, E., 2000, « Astéroïdes et comètes : des tas de cailloux », Pour la Science, N° 273, juillet 2000, pp. 42-51.
- Benest, D., Farinella, P. et Froeschlé, C., 1995, « L'esprit de famille chez les astéroïdes », La Recherche, N° 275, avril 1995, 394-401.
- Binzel, R. P., Xu, S., Bus, S. J. et Bowell, E., 1992, « Small main-belt asteroid lightcurve survey », Icarus 99, 225-237.
- Buil, C., 1989, Astronomie CCD, S.A.P., pp. 238-248.
- Da Costa, G. S., 1992, « Basic photometry techniques », in : Astronomical CCD observing and reduction techniques, S. B. Howell (Ed), ASP Conference Series, vol. 23, pp. 90-104.
- Di Martino, M., Barucci, M. A. et Fulchignoni, M., 1990, « Asteroids : a key to understand the evolution of the solar system », The Messenger, N° 60, 50-55.
- Farinella, P., Froeschlé, C. et Michel, P., 1999, « Les propriétés physiques des astéroïdes », in : Astéroïdes, météorites et poussières interplanétaires, Benest, D., Froeschlé, C. (Eds), Editions ESKA, pp. 117-162.
- Froeschlé, C., 1999, « Les familles dynamiques d'astéroïdes », in : Astéroïdes, météorites et poussières interplanétaires, Benest, D., Froeschlé, C. (Eds), Editions ESKA, pp.45-79.
- Fullerton, A. W., 1986, « Searching for periodicity in astronomical data », in : The study of variable stars using small telescopes, J. R. Percy (Ed), Cambridge University Press, pp. 201-218.
- Grégory, C., 1987, « La photométrie photoélectrique », in : Astronomie-Le guide de l'observateur, P. Martinez (Ed), tome 2, S.A.P., pp. 977-1036.
- Harris, A. W. et Lupishko, D. F., 1989, « Photometric lightcurve observations and reduction techniques », in : Asteroids II, RP. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews (Eds), The University of Arizona Press, pp. 39-53.
- Harris, A. W., 2000, Minor planet lightcurve parameters, site Internet : <http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/LightcurveDat.html>.
- Henden, A. A. et Kaitchuck, R.H., 1990, Astronomical photometry, Willmann-Bell.
- Howell, S. B., 1992, « Introduction to differential time-series astronomical photometry using charge-coupled devices », in : Astronomical CCD observing and reduction techniques, S. B. Howell (Ed), ASP Conference Series, vol. 23, pp. 105-129.
- Lagerkvist, C.-I., Barucci, M.A., Capria, M. T., Fulchignoni, M., Guerriero, L., Perozzi, E. et Zappalà, V., 1987, Asteroid photometric catalogue, Consiglio Nazionale Delle Ricerche, Rome.
- Lecacheux, J., 1987, « Les astéroïdes », in : Astronomie-Le guide de l'observateur, P. Martinez (Ed), tome 1, S.A.P., pp. 285-328.
- Michalowski, T. et Kryszczyńska, A., 1993, « Poles and shape studies of asteroids », Minor Planet Bull. 20, 14-15.
- Michalowski, T., Pych, W., Berthier, J., Kryszczyńska, A., Kwiatkowski, T., Boussuge, J., Fauvaud, S., Denchev, P. et Baranowski, R., 2000, « CCD photometry, spin and shape models of five asteroids : 225, 360, 416, 516, and 1223 », Astron. Astrophysics Suppl. Series 146, 471-479.
- Neuilly, M. et CETAMA, 1998, Modélisation et estimation des erreurs de mesure, Techniques & Documentation Lavoisier, pp. 382-397.
- Pravec, P., Hergenrother, C., Whiteley, R., Sarounova, L., Kusnirak, P. et Wolf, M., 2000, « Fast rotating asteroids 1999 TY2, 1999 SF10 and 1998 WB2 », Icarus 147, 477-486.
- Sterken, C. et Manfroid, J., 1992, Astronomical photometry, a guide, Kluwer Academic Publishers.
- Weidenschilling, S. J., 1981, « How fast can an asteroid spin ? », Icarus 46, 124-126.
- Zappalà, V., 1987, « Physical and statistical interpretations of asteroids lightcurves », in : The evolution of the small bodies of the solar system, Proceedings of the international school of physics Enrico Fermi, Course XCVIII, M. Fulchignoni and L. Kresak (Eds), Italian physical society, pp. 91-110.
- Zappalà, V., Di Martino, M. et Cacciatori, S., 1983, « On the ambiguity of rotational periods of asteroids : the peculiar case of 52 Europa », Icarus 56, 319-324. Quelques adresses et sites Internet
- The Minor Planet Bulletin. Editeur scientifique : Richard P. Binzel. Contact : Derald D. Nye, 10385 East Observatory Drive, Corona de Tucson, AZ 85641-2309, USA ([nye@kw-obsv.org](mailto:nye@kw-obsv.org)). Publications de résultats photométriques et astrométriques d'amateurs et de professionnels. Chronique trimestrielle « Asteroid photometry opportunities » de P. Pravec et A. W. Harris (sélection de cibles photométriques accessibles aux amateurs, mag < ~15).
- Site de Petr Pravec (observatoire de Ondrejov, République tchèque) : <http://sunkl.asu.cas.cz/ppravec/neo.htm>. Essentiellement dédié aux géocroiseurs (Near-Earth Objects).
- The Collaborative Asteroid Lightcurve Link (CALL). Site de Brian Warner : <http://www.MinorPlanetObserver.com/astlc/default.htm>. Sélection de cibles photométriques accessibles aux amateurs, mag < ~15.
- Minor Planet Software : [http://www.uai.it/sez\\_ast/](http://www.uai.it/sez_ast/). Logiciel de calcul d'éphémérides développé par Sergio Foglia (observatoire Serafino Zani, Milan, Italie).
- Site de l'observatoire d'Uppsala (Suède) : <http://www.astro.uu.se/planet/>. Initialisation et mise à jour d'un atlas de courbes de lumière d'astéroïdes (Asteroid photometric catalogue).
- Minor Planet Mailing List (MPML), <http://www.bitnik.com/mp/>. Site Web et liste de diffusion sur laquelle passent des quantités de messages non exclusivement dédiés à la photométrie.