

Astéroïdes

Recherche de cibles

Nous souhaitions également obtenir la courbe de lumière d'un astéroïde. Mais pour apporter quelque chose de nouveau, nous avons eu l'idée de mesurer cette courbe de lumière avec plusieurs filtres de couleurs simultanément. L'objectif était d'observer des variations dans les courbes de lumière entre les différents filtres. Ces variations seraient la trace de variations de couleur de l'astéroïde avec sa rotation, et donc possiblement de zones à sa surface de couleur et chimie différentes.

Nous avons alors cherché dans la littérature des astéroïdes à variations de couleur connues. Il nous fallait trouver une (ou plusieurs) cible(s) respectant les critères suivants :

- Variations de luminosité suffisantes pour être observables ;
- Variations de couleur avec la rotation suffisantes pour être détectables ;
- Observable depuis C2PU pendant les semaines d'observation ;
- Période de rotation assez courtes (<8 h) pour mesurer la courbe de lumière complète en une ou deux nuits.

Ces différents critères ont restreint notre liste de cibles potentielles à (3) Juno et (6) Hebe. Les deux astéroïdes possèdent des propriétés très similaires : période de 7,21h pour (3) Juno et 7,2745h pour (6) Hebe ; magnitude apparente de 10.4 pour (3) Juno et 10.2 pour (6) Hebe ; amplitude de la courbe de lumière de 0,18mag pour les deux ; variations de couleur de 0,02mag pour les deux^{1 2}. Au final, nous avons choisi **(6) Hebe** car il était observable une heure de plus par nuit que (3) Juno.

Observations

Notre objectif était d'obtenir la courbe de lumière complète de (6) Hebe avec trois filtres de couleur : SDSS-gp+, SDSS-rp+, SDSS-ip+. Nous souhaitions ainsi pouvoir les comparer et repérer des différences qui témoigneraient de différences de surface sur l'astéroïde. Pour cela, tout au long de l'observation, nous avons dû changer manuellement de filtres entre chaque image. Etant donné la magnitude importante de (6) Hebe (mag 10.2), nous avons choisi de défocaliser le télescope afin de rester dans la zone de linéarité du capteur CCD.

Afin d'obtenir une courbe de lumière complète, une nuit n'aurait pas suffi. En effet, (6) Hebe atteignait 20° d'altitude aux alentours de 1h40 UTC. Les observations ne pouvant pas commencer avant 20h00 UTC car le ciel n'est pas assez sombre avant, cela ne laisse qu'environ 5h par nuit (même avant d'atteindre 20° d'altitude, l'airmass est trop importante pour permettre d'obtenir des données propres). Nous avons donc dû calculer quelles nuits choisir pour observer deux morceaux complémentaires de courbe de lumière. La période de (6) Hebe étant de 7,2745h, il est possible de calculer qu'observer l'astéroïde 24h après une première observation, revient à observer à une phase 107,7° plus loin dans la courbe de lumière (et 3 rotations de l'astéroïde plus tard). Nous avons ainsi réalisé les deux observations décrites dans le tableau 1.

Jour	Heure (UTC)	Phase (°)	Exposition (s)	SDSS-gp+	SDSS-rp+	SDSS-ip+
2024-05-31	19h58 - 00h57(+1)	0-246	1	345	343	352
2024-06-05	20h46 - 23h59	218-17(+1)	1	141	142	142

TABLE 1 – Observations de l'astéroïde (6) Hebe les nuits du 2024-05-31 et 2024-06-05. La phase de la courbe de lumière observée est prise avec une référence arbitraire. Les colonnes SDSS-gp+, SDSS-rp+ et SDSS-ip+ donnent le nombre d'images prises avec ces filtres à chaque nuit.

Résultats et analyse

En deux nuits d'observations, nous avons acquis un total de 1465 images, que nous avons ensuite réduites pour les analyser et en tirer notamment des courbes de lumière. Pour la réduction des images, j'ai codé mon propre programme Python, disponible sur ce dépôt public GitHub : <https://github.com/AstroAure/AstroCal>. Je compte continuer de le développer pour en faire un package que je pourrai utiliser à l'avenir pour mes propres observations scientifiques, et partager. Avec celui-ci, j'ai généré les fichiers de calibration (master dark et master flat) et réduit les images de science en détectant et masquant également les pixels chauds et morts. J'ai également pu calculer la résolution astrométrique de

1. Gaffey+96, *Asteroid 6 Hebe : Spectral Evaluation of the Prime Large Mainbelt Ordinary Chondrite Parent Body Candidate with Implications from Space Weathering of Gaspra and the Ida-Dactyl System*, 1996LPI....27..391G

2. Schroll+81, *Evidence for color variations on the surface of 3 Juno - New photoelectric UVB-observations*, 1981A&A...104..296S

chaque image grâce au package `astroquery.astrometry_net`. Cette dernière étape sera notamment utile dans la suite pour pouvoir aligner les images d'une même nuit. J'ai également réalisé la photométrie d'ouverture de toutes les sources du champ de vue pour toutes les images avec la librairie `photutils`. Enfin, grâce à la résolution astrométrique, j'ai calculé la magnitude apparente de chaque source pour chaque image à partir de la magnitude instrumentale calculée précédemment et en utilisant le catalogue SDSS, interrogé via `astroquery.vizier`, pour ajuster un modèle RANSAC de régression linéaire (en prenant soin de sélectionner le même filtre que celui utilisé pour l'image en question). A la fin de ces étapes, je disposais donc d'un catalogue de sources calibrées pour chacune des 1465 images.

L'objectif était ensuite de calculer la courbe de lumière de toutes les sources présentes dans le champ. Pour cela, il faut pouvoir trouver les sources des différents catalogues qui correspondent à une seule et même source astronomique. J'ai décidé de concaténer tous les catalogues et ensuite d'utiliser l'algorithme de clustering DBSCAN, implémenté dans `sklearn.cluster`, pour créer des groupes en fonction des coordonnées RA-Dec de toutes les sources. De plus, en indiquant un nombre minimum de 5 sources à regrouper pour classifier un groupe comme une véritable source, on peut éliminer les fausses détections sur une image unique.

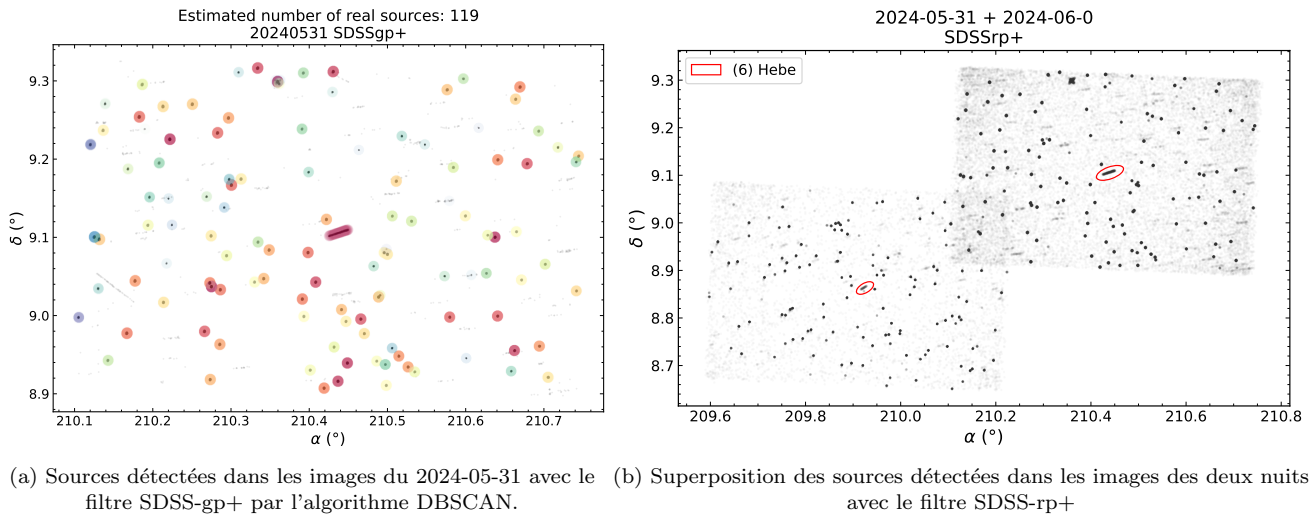


FIGURE 1 – Regroupement des sources par l'algorithme DBSCAN. Chaque point gris correspond à une source détectée sur une image. Dans la figure (a), les cercles colorés montrent les sources détectées sur plusieurs images et regroupés comme une unique source. Dans la figure (b), on observe bien le mouvement de (6) Hebe entre les deux nuits.

L'intérêt d'utiliser cette méthode pour regrouper les sources est de pouvoir tracer les courbes de lumière de toutes les sources visibles dans le champ de vue. Il est donc notamment possible de corriger les magnitudes instrumentales des sources pour tenir compte de l'airmass. Pour cela, j'ai normalisé toutes les courbes de lumière par leur moyenne et j'ai calculé la courbe médiane. On obtient donc les courbes corrigées visibles sur la figure 2. Un phénomène intéressant est d'observer la nuit tomber et révéler des sources de plus grandes magnitudes, ce qui explique que les courbes de lumière des sources les moins lumineuses ne commencent pas toutes au début de l'observation.

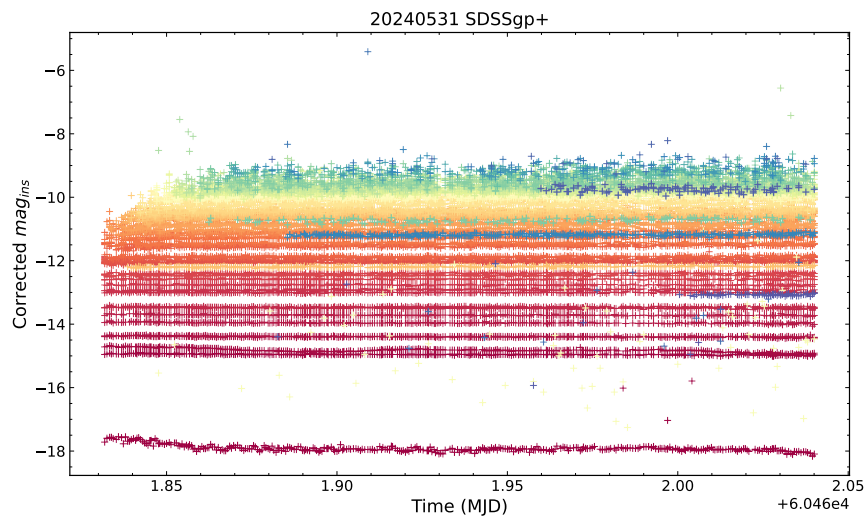


FIGURE 2 – Courbes de lumières de toutes les sources détectées pendant la nuit du 2024-05-31 avec le filtre SDSSgp+. Les magnitudes sont exprimées en magnitudes instrumentales, corrigées pour l’airmass.

En plus des mesures photométriques, le regroupement des sources sur plusieurs images permet des mesures astrométriques. Ainsi, on peut étudier les variations de coordonnées RA-Dec en fonction du temps (figure 3). On peut alors identifier immédiatement les petits corps du système solaire, et dans notre cas, l’astéroïde (6) Hebe. De plus, on peut mesurer le mouvement propre de l’astéroïde les deux nuits (table 2). On trouve des valeurs en accord à moins de 1% avec celles fournies par l’IMCCE.

Source	2024-05-31		2024-06-05	
	$d\alpha \cos \delta$ (″/h)	$d\delta$ (″/h)	$d\alpha \cos \delta$ (″/h)	$d\delta$ (″/h)
Ce rapport	-18.0 ± 0.15	-6.0 ± 0.05	-14.0 ± 0.15	-8.4 ± 0.10
IMCCE	-18.018	-6.031	-13.937	-8.480

TABLE 2 – Mouvement propre de (6) Hebe mesuré sur les deux nuits d’observation et comparé aux éphémérides d’IMCCE. Les valeurs trouvées dans ce rapport sont en accord à moins de 1%.

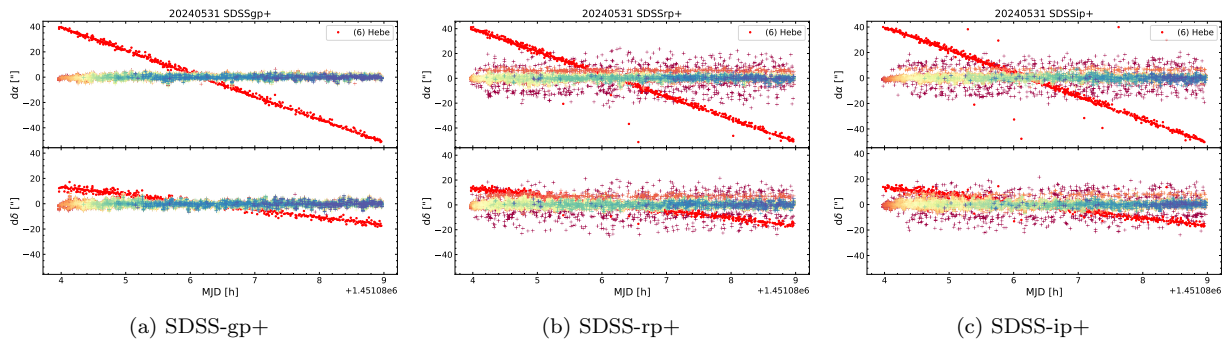


FIGURE 3 – Mouvement propre des sources identifiées le 2024-05-31. La seule source à avoir un mouvement propre notable est (6) Hebe. Sur les filtres rp+ et ip+, la source très bruitée est une étoile saturée dont les pics de diffraction ont faussé la détection.

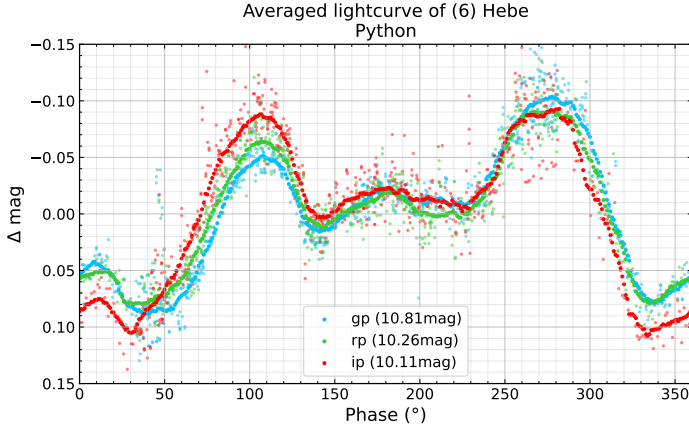
On s’intéresse maintenant aux courbes de lumière de (6) Hebe, avec les trois filtres et sur les deux nuits. Avant de pouvoir les étudier, il faut les raccorder pour obtenir la courbe complète. Pour ce faire, on cherche à faire coller au mieux le début et la fin de chaque nuit. On trouve ainsi une période de 7.275 ± 0.010 h. Cette valeur est en très bon accord avec celle communément admise de 7.2745h. Pour raccorder au mieux les deux courbes, j’ai appliqué un décalage de -0.06 mag aux données du 2024-06-05 par rapport à celui du 2024-05-31. Cela se justifie par une illumination du Soleil plus faible la seconde nuit, due à l’orbite de l’astéroïde. On retrouve bien cette valeur dans le calcul de la magnitude absolue H pour un angle de phase de 16° , réalisé plus loin. Pour la suite, on utilisera des courbes raccordées en utilisant une période de 7.2745h.

Grâce à la calibration photométrique réalisée précédemment, on a la magnitude apparente de (6) Hebe avec les trois filtres, présentée figure 4. On observe notamment les différences de magnitude entre les trois filtres SDSS (dus principalement au spectre solaire). De plus, même si les filtres sont différents, les magnitudes mesurées ici sont compatibles avec la magnitude des éphémérides IMCCE. Enfin, on note une amplitude de la courbe de lumière dans les trois filtres de 0.2 mag, proche de la valeur de 0.18 mag admise. Les courbes de lumière ont également été réalisées parallèlement avec AstroImageJ en flux relatif pour valider les résultats obtenus par mon programme Python. On obtient des courbes et des variations similaires.

A partir des éphémérides NASA/JPL Horizons, on peut connaître les distances Soleil-(6) Hebe et Terre-(6) Hebe. Ces distances, ainsi que la pente de magnitude $G = 0.24$ mag³ permettent de calculer la magnitude absolue H de l’astéroïde avec les trois filtres : $H_{g'} = 6.16 \pm 0.1$ mag, $H_{r'} = 5.61 \pm 0.1$ mag et $H_{i'} = 5.46 \pm 0.1$ mag. Enfin, en connaissant l’albedo géométrique de (6) Hebe, $p = 0.2679$ ⁴, on peut calculer le diamètre de l’astéroïde : $D = \frac{1329}{\sqrt{p}} 10^{-0.2H} km$. On obtient : $D_{g'} = 150 \pm 2$ km, $D_{r'} = 194 \pm 2$ km et $D_{i'} = 208 \pm 2$ km. Cela n’a pas vraiment de sens que le diamètre soit différent suivant la couleur, mais indique certainement qu’il faut prendre en compte des différences d’albedo suivant la couleur. On obtient cependant des valeurs proches des valeurs de NASA/JPL Horizons : $H = 5.61$ mag et $D = 185$ km.

3. NASA/JPL Horizons

4. NASA/JPL Horizons



	2024-05-31	2024-06-05	Source
$mag_{g'}$	10.81 ± 0.1	10.87 ± 0.1	Ce rapport
$mag_{r'}$	10.26 ± 0.1	10.32 ± 0.1	Ce rapport
$mag_{i'}$	10.11 ± 0.1	10.17 ± 0.1	Ce rapport
mag_V	10.35	10.43	IMCCE

FIGURE 4 – Courbes de lumière raccordées et magnitudes apparentes de (6) Hebe comparées aux données IMCCE. Les magnitudes moyennes sont précisées dans la légende entre parenthèses et ont été soustraites des courbes.

Sur cette courbe de lumière tri-couleur, on observe bien des différences de couleurs, notamment sur le premier pic à 100° et sur le petit pic à 10° . Pour quantifier ces variations, on trace les courbes de couleurs $g'-i'$ et $r'-i'$. La variation de couleurs observée par Gaffey+86 est $\Delta(U - V) = 0.02\text{mag}$. Sur la figure 5, on observe des variations de couleur de $\Delta(g' - i') = 0.09\text{mag}$ et $\Delta(r' - i') = 0.06\text{mag}$. Il existe de nombreuses formules pour convertir les couleurs SDSS en couleurs Johnson-Cousin, mais celles-ci nécessitent le filtre u' pour obtenir des couleurs avec U . Les variations de couleurs que nous observons ici sont cependant du même ordre de grandeur que celles de la littérature.

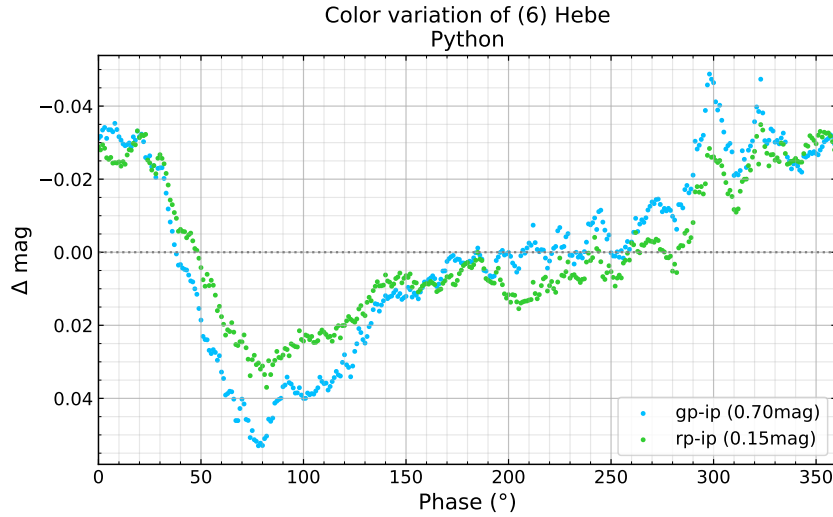
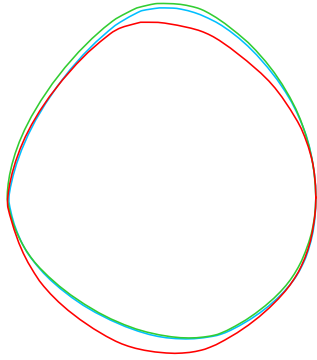


FIGURE 5 – Variations de couleurs observées avec la rotation de (6) Hebe. La couleur moyenne est précisée dans la légende entre parenthèses et a été soustraite des courbes.

A partir des courbes de lumière complètes, il est possible de calculer un profil convexe moyen de (6) Hebe. J'ai ainsi implémenté la méthode décrite par Ostro et Connelly⁵. Celle-ci consiste à calculer la transformée de Fourier de la courbe de lumière complète puis à multiplier les coefficients par des valeurs calculées à partir de l'angle de phase au moment de l'observation (dans notre cas 17°) pour tenir compte de l'illumination. On obtient ainsi les coefficients de la transformée de Fourier du rayon de courbure du profil de l'astéroïde. Afin de s'assurer que celui-ci sera convexe et fermé, on cherche en réalité les coefficients les plus proches qui assurent ces deux paramètres. On peut ensuite tracer le profil à partir du rayon de courbure, et ce pour chaque filtre (figure 6). On observe alors que la forme est similaire pour les trois filtres (ce qui est attendu car les variations de couleurs sont faibles par rapport aux variations de luminosité) mais avec des différences dues aux variations de couleur. Ces différences peuvent indiquer les zones de (6) Hebe colorées différemment du reste de l'astéroïde, et donc possédant une chimie de surface potentiellement différente.

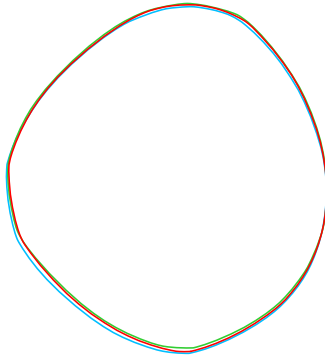
5. Steven J. Ostro et Robert Connelly, *Convex Profiles from Asteroid Lightcurves*, 1983

Convex profile of asteroid (6) Hebe
Python



(a) Python

Convex profile of asteroid (6) Hebe
AstroImageJ



(b) AstroImageJ



(c) DAMIT

FIGURE 6 – Profils convexes de (6) Hebe calculés par inversion des courbes de lumière pour chaque filtre. L'inversion a été réalisée à partir des mesures de flux faites avec mon programme Python (a) et avec AstroImageJ (b). Le profil (c) est un profil convexe 3D tiré de DAMIT⁶.

6. DAMIT, Torppa+2003, https://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/damit/asteroid_models/view/106