

Astéroïdes, astrométrie et science participative

Daniel Descout, Deuil-la-Barre.

Une campagne de science participative (EROS 2019) a été organisée par l'IMCCE et pilotée par l'astronome Pascal Descamps. Cette opération avait pour but de mesurer la parallaxe d'Éros puis de calculer la parallaxe du Soleil et d'en déduire une valeur voisine de l'unité astronomique.

L'astéroïde (433) Éros

L'astéroïde (433) Éros a été découvert en 1898, conjointement par Carl Gustav Witt et Auguste Charlois. Il appartient au groupe des géocroiseurs, dont l'orbite est proche de celle de la Terre. Il possède une orbite quasi elliptique, décrite en 643,2 jours, et sa distance au Soleil varie du périhélie à 1,133 unité astronomique (ua) à l'aphélie à 1,783 ua (excentricité de 0,223). La figure 1 représente la projection de l'orbite d'Éros (en vert) sur le plan de l'écliptique, comparée à l'orbite de la Terre (en bleu). L'inclinaison de l'orbite d'Éros sur ce plan est environ $10,8^\circ$. Les trois autres orbites (traits fins en gris pâle) sont celles des planètes telluriques Mercure, Vénus et Mars. L'astéroïde et la Terre orbitent dans le même sens.

Les caractéristiques orbitales d'Éros l'amènent à se rapprocher de la Terre périodiquement, lors des oppositions qui se succèdent en moyenne tous les 845 jours environ (période synodique de l'astéroïde)¹. Les rapprochements optimaux se produisent quand, lors d'une opposition, Éros est à son périhélie et la Terre à son aphélie. Ces configurations se succèdent tous les 81 ans (Éros boucle 46 orbites pendant cette période). Le dernier rapprochement optimal a eu lieu en 1975, le prochain aura lieu en 2056. Si, de plus, le périhélie coïncide avec un nœud de l'orbite (passage de l'astéroïde dans le plan de l'écliptique), la distance d'Éros à la Terre est un minimum absolu et vaut 0,116 ua (16,9 millions de km).

Au cours de la période de 81 ans, la distance d'Éros à la Terre passe néanmoins par de nombreux minima relatifs, aux alentours des oppositions. Une configuration favorable (rapprochement serré) est survenue le 15/01/2019, avec un minimum de distance Terre - Éros de 0,21 ua, après l'opposition du 07/12/2018. Une campagne de science participative (EROS2019) a été organisée à cette

occasion par l'IMCCE², pilotée par l'astronome Pascal Descamps de l'observatoire de Paris. Le but de la campagne était la mesure de la parallaxe de l'astéroïde. Le résultat de cette mesure permet de calculer la parallaxe du Soleil, et d'en déduire la distance Terre - Soleil. Cette distance calculée doit être voisine de l'unité astronomique (ua), dont la valeur de référence (depuis 2012) est : $1 \text{ ua} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}$.

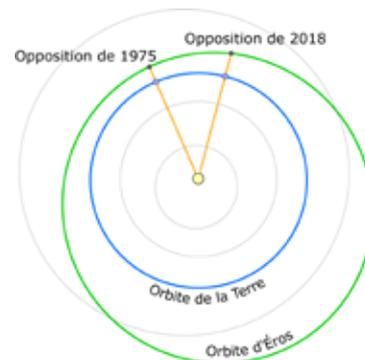


Fig.1. Orbites de la Terre et d'Éros. L'opposition périhélique de 1975 était un peu plus favorable que celle de 2018.

La parallaxe

Dans la vie courante, la vision stéréoscopique permet la perception du relief grâce à la parallaxe associée à la vision binoculaire. Sur le fond du paysage (très éloigné), la perception d'un point lumineux proche P est différente par l'œil droit et par l'œil gauche (figure 2).



Fig.2. Vision stéréoscopique.

L'angle que font entre eux les axes de visée du même point cible par les deux yeux est l'angle de parallaxe. Les centres des deux pupilles définissent la base d'un triangle dont le troisième sommet est le point visé. Lorsque l'éloignement du point visé P

¹ Éros est en opposition lorsque Soleil Terre et Éros sont alignés (figure 1).

² Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides.

est inconnu, la connaissance de l'angle de parallaxe et de la longueur de la base suffit pour calculer cet éloignement (méthode de triangulation).

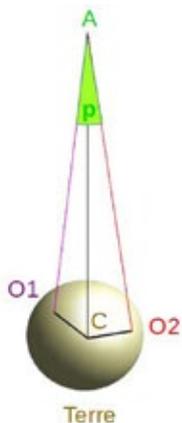


Fig.3. Parallaxe d'un astre A.

En astronomie, cette méthode est utilisée pour déterminer la distance inconnue des objets célestes inaccessibles, comme la Lune et les planètes (fig 3).

Si deux observateurs O_1 et O_2 se placent sur la Terre en deux sites quelconques éloignés l'un de l'autre de plusieurs milliers de kilomètres, et s'ils visent simultanément le même astre A, sur le fond des étoiles dites « fixes » (hors schéma), le triangle de parallaxe est AO_1O_2 . La parallaxe p est l'angle du triangle au sommet A.

La base b est la longueur du côté O_1O_2 du triangle. Connaissant les coordonnées géographiques (latitude et longitude) des points O_1 et O_2 , R (le rayon terrestre), et p , on peut calculer b , puis avec p et un autre angle (par exemple $\widehat{CO_1A}$), calculer la distance inconnue CA .

L'exemple de la mesure de la distance de la Lune est donné dans l'encadré page suivante.

Parallaxe de hauteur et parallaxe horizontale

Le couple d'observateurs (O_1 et O_2) peut être remplacé par un nouveau couple, constitué d'un observateur fictif C placé au centre de la Terre et d'un observateur P à la surface de la Terre (figure 4).

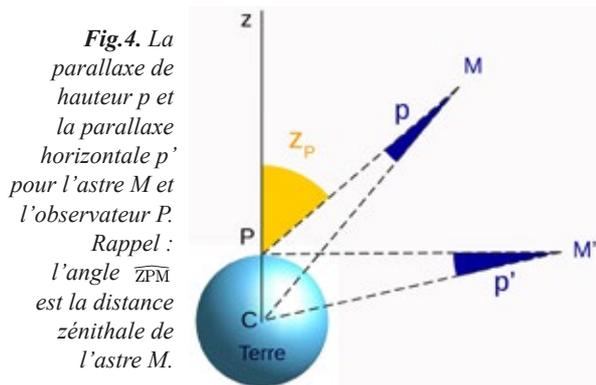


Fig.4. La parallaxe de hauteur p et la parallaxe horizontale p' pour l'astre M et l'observateur P. Rappel : l'angle \widehat{zPM} est la distance zénithale de l'astre M.

Par définition, on appelle parallaxe de hauteur de l'astre M l'angle \widehat{CMP} (noté p). Si l'astre M' est à l'horizon pour l'observateur P (et en l'absence de réfraction atmosphérique), la parallaxe de hauteur devient l'angle $\widehat{CM'P}$ et est nommée parallaxe horizontale de M' . Pour une cible à une distance CM donnée, la parallaxe horizontale est la plus grande des parallaxes de hauteur. Si l'astre M visé est au zénith du lieu P, sa parallaxe de hauteur est nulle.

Dans le cas de la Lune, on trouve :

$$p' = \widehat{CM'P} \approx \sin p' = CP/CM' = R/D.$$

Numériquement :

$$p' = 0,01654 \text{ rad} = 0,947^\circ = 56,8'$$

(avec les données des mesures de Lalande et La Caille de 1751 – voir encadré page suivante).

La parallaxe horizontale d'un astre peut être définie comme l'angle sous lequel un hypothétique observateur situé sur l'astre verrait le rayon CP de la Terre.

Mesure historique de la parallaxe martienne

Avec la méthode de triangulation, deux astronomes du XVII^e siècle, Jean Richer et Jean-Dominique Cassini, ont déterminé la parallaxe p de la planète Mars (astre en A sur la figure 3) lors de l'opposition de septembre 1672. Les sommets de la base du triangle de parallaxe étaient Paris et Cayenne, très éloignés en latitude et en longitude. Les astronomes en ont déduit la parallaxe horizontale de la planète Mars : $p' = 24 \pm 9$ secondes d'arc. En utilisant la troisième loi de Kepler, ils ont calculé ensuite la première évaluation historique satisfaisante de la distance de la Terre au Soleil : 140 ± 30 millions de km (une présentation détaillée de cette mesure se trouve dans un article de Béatrice Sandré édité dans le n° 137 des Cahier Clairaut³).

Pour la planète Mars, l'angle de parallaxe horizontale ($p = 0,000116$ rad) est beaucoup plus faible que pour la Lune, parce que la distance Terre-Mars valait (à l'opposition de 1672) plus de cent fois la distance Terre-Lune.

Pour le Soleil, la parallaxe horizontale de référence vaut 8,794 secondes d'arc.

Pour la parallaxe d'Éros, l'angle à mesurer est du même ordre de grandeur que l'angle de parallaxe de Mars.

Principe de la mesure de la parallaxe de l'astéroïde Eros

La campagne de science participative de 2019 reposait sur des protocoles développés en ligne par l'IMCCE⁴. La visée de l'astéroïde s'est faite quelques semaines après son opposition. Lors de son rapprochement serré, en janvier 2019, sa distance CM à la Terre était alors proche de 0,21 ua, correspondant à une parallaxe horizontale proche de 42 secondes d'arc.

3 Disponible sur le site du Clea (clea-astro.eu) à l'onglet archives des Cahiers Clairaut, année 2012.

4 <https://eros2019.imcce.fr/eros.html> et https://eros2019.imcce.fr/docs/protocole_observation_eros2019.pdf

Mesure historique de la parallaxe et de la distance lunaires

Au XVIII^e siècle, la distance Terre - Lune a été mesurée avec une assez bonne précision par la méthode de la triangulation par les astronomes J. J. Lefrançois de Lalande et Nicolas Louis de la Caille (1751).

Ils ont choisi deux sites aux longitudes voisines (Berlin : 13° 25' E et Le Cap : 18° 28' E) et aux latitudes λ très différentes (respectivement

$$\lambda_B = 52^\circ 31' \text{ N et } \lambda_C = 34^\circ 22' \text{ S}).$$

En supposant que la différence des longitudes est négligeable, un schéma simplifié de la triangulation peut être établi, dans le plan méridien commun des deux sites, supposés localisés à la même longitude (figure 5) ; sur cette figure, les proportions ne sont pas respectées, et l'angle \widehat{BLC} est exagérément grand).

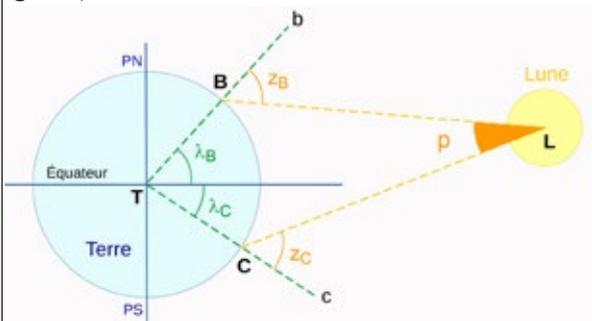


Fig.5. Visées de la Lune depuis Berlin (B) et Le Cap (C). La figure est faite dans le plan du méridien.

Les angles mesurés sont les hauteurs zénithales locales de la Lune, vue de Berlin ($z_B = \widehat{bBL}$) et du Cap ($z_C = \widehat{cCL}$). Les visées sont faites lorsque le centre de la Lune L passe au méridien commun de B et C. Le triangle de parallaxe est BCL. Son plan contient le centre de la Terre T. Sa base est BC. La parallaxe est l'angle \widehat{BLC} , noté p.

La parallaxe p étant un angle très petit (pour la Lune, de l'ordre du degré), les distances BL, CL et TL sont du même ordre de grandeur, et sont très supérieures au rayon terrestre (TB ou TC). Pour simplifier, la Terre est supposée sphérique, de rayon $TB = TC = R = 6\,378 \text{ km}$ (rayon équatorial).

La parallaxe p s'exprime simplement en fonction des quatre autres angles nommés sur la figure 5. Pour établir cette relation, on considère le quadrilatère TBLC comme l'assemblage de deux triangles ayant en commun le côté TL (TBL et TCL, figure 6). On nomme p_1 et p_2 les angles \widehat{TLB} et \widehat{TLC} :

$$p = p_1 + p_2.$$

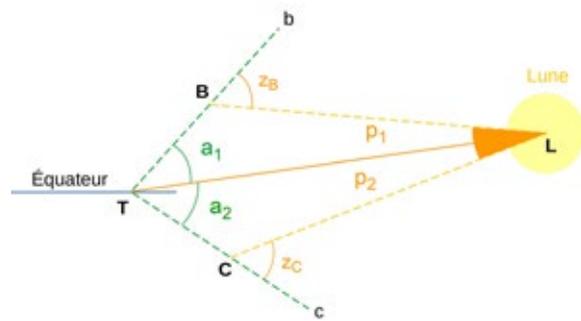


Fig.6. Calcul de la parallaxe p.

On nomme a_1 et a_2 les angles \widehat{LTb} et \widehat{LTc} .

Dans le triangle TBL : $z_B = a_1 + p_1$;

dans le triangle TCL : $z_C = a_2 + p_2$;

donc : $p = (z_B + z_C) - (a_1 + a_2)$.

Finalement : $p = (z_B + z_C) - (\lambda_B + \lambda_C)$.

Les mesures de z_B et z_C sont données dans le document du CNES cité en note⁵

$$z_B = 53^\circ 31' \text{ et } z_C = 34^\circ 40'.$$

Le calcul donne la parallaxe lunaire :

$$p = 1^\circ 18', \text{ ou } p = 0,0227 \text{ rad.}$$

Pour faire le calcul de la distance Terre-Lune ($D = TL$), on applique la loi des sinus dans les triangles TLB et TLC.

Dans le triangle TLB :

$$\frac{\sin p_1}{R} = \frac{\sin \widehat{B}}{D} \text{ ou } \frac{\sin p_1}{R} = \frac{\sin z_B}{D}$$

Dans le triangle TLC :

$$\frac{\sin p_2}{R} = \frac{\sin \widehat{C}}{D} \text{ ou } \frac{\sin p_2}{R} = \frac{\sin z_C}{D}$$

Approximation : les angles p_1 et p_2 sont petits par rapport à un radian (environ 0,01 rad). On fait une erreur très faible en confondant le sinus d'un petit angle avec sa valeur en radian :

$$\sin p_1 \approx p_1 \text{ (en rad) et } \sin p_2 \approx p_2 \text{ (en rad).}$$

En sommant les deux relations des sinus, on trouve :

$$p = p_1 + p_2 \approx \sin p_1 + \sin p_2 = \frac{R(\sin z_B + \sin z_C)}{D}$$

La formule qui permet de calculer D en fonction de la parallaxe est :

$$D \approx \frac{R(\sin z_B + \sin z_C)}{p} \text{ avec } p \text{ en radian}$$

Numériquement, $\sin z_B + \sin z_C = 1,3728$

$$D/R \approx 60,47 ; D \approx 3,857 \times 10^5 \text{ km}$$

⁵ <http://www.cnes-multimedia.fr/EDUTHEQUE/Universite2014/AC3.pdf> (page 5/21).

Les coordonnées célestes géocentriques de l'astéroïde sont supposées connues et accessibles dans les tables d'éphémérides (à tout instant et à toute date ; voir par exemple le site SSP de l'IMCCE⁶). La mesure de la parallaxe de hauteur d'Éros ne requiert donc plus que la contribution d'un seul observateur (le photographe placé en P, figure 4).

Voir Éros de près et imaginer la Terre vue depuis Éros

Contrairement aux conditions historiques des mesures des parallaxes martienne et lunaire, nous disposons, au XXI^e siècle, d'un observateur in situ. La sonde interplanétaire NEAR Shoemaker s'est posée sur l'astéroïde Éros en février 2001, après avoir orbité pendant une année autour de lui et l'avoir photographié (figure 7).

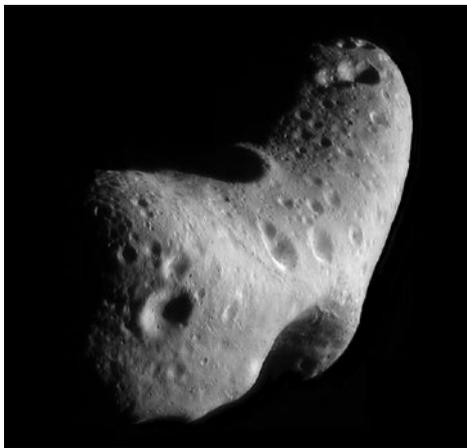


Fig.7. Vue rapprochée de l'astéroïde Éros, un objet de dimensions 34 km par 11 km par 11 km environ.

crédit NASA/JPL/JHU/APL

Vue par la sonde NEAR posée sur Éros, la Terre est un astre errant dont le déplacement sur le fond des étoiles est de l'ordre d'un degré en 24 heures (en février 2019), pendant que notre planète effectue un tour autour de son axe polaire. Grâce au logiciel Stellarium, il est possible de simuler ce que verrait la sonde NEAR avec un télescope orienté pour viser la Terre (figure 8). Un hypothétique observateur terrestre placé en G mesurerait les coordonnées géocentriques d'Éros, données dans les tables d'éphémérides.

Vu d'Éros, un observateur terrestre O parcourt un cercle parallèle à l'équateur (en vert). Il mesure les coordonnées topocentriques d'Éros (relatives à son site). L'angle sous lequel la sonde NEAR voit le segment GO est la parallaxe de hauteur en O de l'astéroïde (voir figure 4). Quand O est en T₁ ou

T₂, l'observateur terrestre voit Éros à l'horizon, et la parallaxe qu'il mesure est maximale (parallaxe horizontale d'Éros).

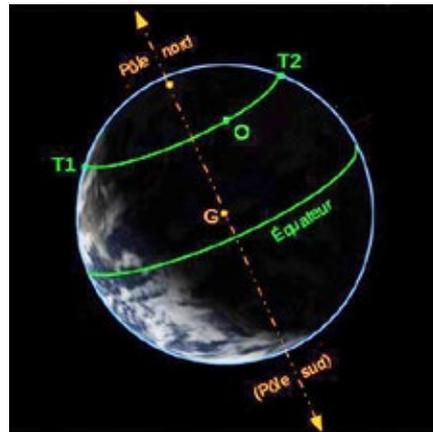


Fig.8. La Terre vue depuis Éros, le 24/02/2019 à 23 h UTC. (figure obtenue avec le logiciel Stellarium).

Quand O est en T₁, pour lui, Éros se lève ; quand O est en T₂, Éros se couche. Quand l'observateur O est à mi-distance de T₁ et T₂, Éros est dans le plan méridien de O (il s'agit du plan perpendiculaire à la figure 8 passant par Éros et les pôles terrestres), et la longueur du segment GO vu d'Éros est minimale. La parallaxe de hauteur d'Éros est minimale quand Éros est dans le plan méridien local de O. Dans cette configuration, les mesures de la parallaxe de hauteur d'Éros sont (a priori) les moins précises.

Les mesures

Le site d'observation

Il est situé en France, à proximité du village de Nerville-la-Forêt (95). Les données GPS du boîtier APN indiquent : latitude 49° 05' 25" N ; longitude 02° 17' 33" E ; altitude 129 m.



Fig.9. Le matériel en situation le 24 février 2019.

La pollution lumineuse du ciel de l'Île-de-France n'était pas un obstacle majeur pour cette expérience d'astrométrie de position (cible de magnitude 9,3).

La mission de l'observateur photographe est la détermination des coordonnées topocentriques de l'astéroïde Éros.

Champ céleste couvert par le capteur

Le capteur de l'APN (Pentax K-3 II) est au format APS-C. Il utilise une grille de 6016 pixels par 4 000 pixels sur une surface rectangulaire de côtés 23,4 mm par 15,6 mm. Le capteur de l'APN est placé au plan focal d'une lunette de diamètre d'objectif

⁶ <https://ssp.imcce.fr/forms/ephemeris>

D = 100 mm et de focale f = 555 mm. La portion de ciel photographiée est un rectangle de côtés 1,610° par 2,422°. Un extrait de cliché de forme carrée de 1 250 pixels de côté couvre une portion de ciel d'environ 30' par 30' (un cadre pour la pleine Lune). La portion de ciel vue par un pixel du capteur est un carré de côté e = 1,45''.

Identification de l'astéroïde sur les images

L'observateur photographe prend plusieurs clichés de la région du ciel supposée contenir la cible. Comme l'image de celle-ci ne se distingue pas de celle d'une étoile (tache blanche presque ponctuelle), l'identification du point image d'Éros se fait grâce à son déplacement par rapport aux étoiles, perceptible en comparant ou en empilant plusieurs clichés (figure 10). Le logiciel d'empilement des clichés est DeepSkyStacker (version 4.1.1), un logiciel libre⁷.



Fig.10. Superposition de 4 images montrant le déplacement d'Éros par rapport aux étoiles.

Calcul de la vitesse apparente d'Éros par rapport aux étoiles

La série de clichés la plus intéressante (datée du 24/02) est la série numérotée de 7 201 à 7 207, prise de 21 h 43 min 42 s à 22 h 13 min 42 s, à intervalles de 5 minutes, avec les paramètres suivants :

sensibilité s = 2 000 ISO ; temps de pose t = 15 s ; ouverture f/D = 5,55.

Par exemple, l'empilement des clichés 7 201, 7 203, 7 205 et 7 207 fait apparaître un pointillé de 4 images alignées (figure 10). Comme ces prises de vues sont faites de 10 en 10 minutes, les intervalles entre images sont égaux. La distance focale de l'instrument étant connue, la taille des pixels connue aussi (carrés de côté 3,90 μm), la mesure de la distance entre les centres des taches extrêmes (7 201 en haut à droite et 7 207 en bas à gauche) donne la vitesse apparente de l'astéroïde sur le fond des étoiles fixes :

$$V_{ap} = 2,12 \text{ minutes d'arc par heure.}$$

7 <http://deepskystacker.free.fr/french/index.html>

Localisation de l'astéroïde Éros sur une carte du ciel

Un extrait au format carré (de 1250 pixels) de l'empilement de 4 clichés est soumis au logiciel libre Astrometry.net⁸.

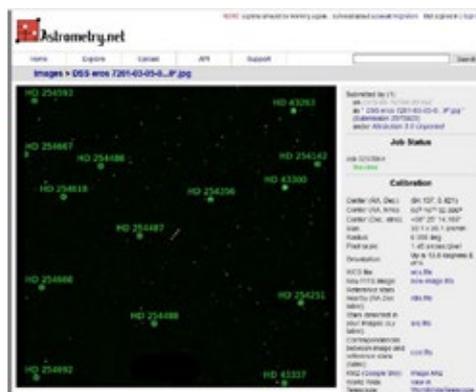


Fig.11. Localisation d'Éros avec Astrometry.net

Le logiciel réalise une calibration astrométrique de l'image, c'est-à-dire qu'« il détermine les coordonnées astrométriques J2000 du centre du champ, l'échelle sur le ciel du pixel ainsi que l'orientation des images (position du nord et de l'est) » (citation du protocole 2019 d'observation d'Éros de l'IMCCE, page 7, §4).

Le lien « WorldWideTelescope » donne accès à la carte du ciel interactive de l'AAS (The American Astronomical Society), sur laquelle est incrustée l'image calibrée.

Le logiciel fournit aussi une nouvelle image téléchargeable, dans un fichier nommé « new_image.FITS », avec un en-tête qui contient les paramètres de la calibration astrométrique. Grâce à ce fichier, les mesures astrométriques sont réalisables en utilisant un logiciel professionnel comme Aladin, développé par des astronomes de l'Université de Strasbourg (CNRS).

Astrométrie pratique avec le logiciel Aladin

Ce logiciel utilise des applets Java. Il faut donc éventuellement d'abord télécharger Java. La puissance de traitement de ce logiciel et le nombre élevé de ses fonctions oblige à un temps d'apprentissage notable. Néanmoins, grâce au pilote de l'IMCCE, la tâche est grandement facilitée. Les fonctionnalités du logiciel Aladin sont sur le site <https://projet-plume.org/fr/fiche/aladin>.

Le fichier « new_image.FITS », introduit dans l'environnement Aladin, permet d'y afficher le quadruplet d'images de l'astéroïde. La position

8 <http://nova.astrometry.net/upload>

de chaque image du quadruplet est analysée par la méthode du photocentre (figure 12). Cet outil graphique définit une zone circulaire de sélection (teinte rose, rayon réglable) que l'on amène sur l'image à analyser, de manière à envelopper le maximum de pixels blancs. Le bandeau inférieur (bleu) de l'écran affiche alors les coordonnées du centre du cercle, qui sont les coordonnées topocentriques d'Éros.

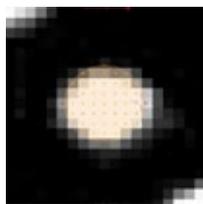


Fig.12. Repérage du photocentre sur le cliché 7 203 pris à 21 h 53 min 42 s. AD = 06 h 16 min 32,61 s et DEC = + 08° 25' 34,8". Le cercle enveloppe de l'image d'Éros a un diamètre de 7,6 pixels (11,0" compte tenu de l'échantillonnage).

Les coordonnées topocentriques des 4 taches images analysées avec Aladin (7 201, 7 203, 7 205 et 7 207) sont dans le tableau ci-dessous :

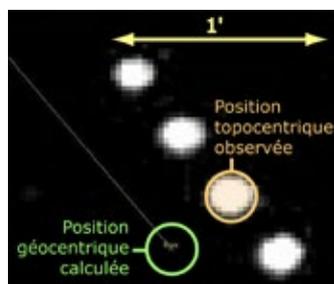
images	heure UTC (24/02/19)	ascension droite (AD)	déclinaison (DEC)
7201	21 h 43 m 42 s	06 h 16 m 31,44 s	08° 25' 47,7"
7203	21 h 53 m 42 s	06 h 16 m 32,61 s	08° 25' 34,8"
7205	22 h 03 m 42 s	06 h 16 m 33,73 s	08° 25' 22,3"
7207	22 h 13 m 42 s	06 h 16 m 34,85 s	08° 25' 09,5"

L'IMCCE a développé un outil nommé Skybot qui permet ensuite de calculer les coordonnées géocentriques d'Éros à l'instant du cliché soumis à calibration. La page écran d'Aladin (extrait en figure 13) montre la position d'Éros telle que vue du centre de la Terre pour l'image 7203 (rose), à côté du quadruplet d'images.

La parallaxe de hauteur de l'astéroïde est ainsi visualisée à l'écran de l'ordinateur pour l'image 7203. On constate que l'angle à mesurer est du même ordre de grandeur que le diamètre angulaire de la tache image de la cible !

La parallaxe en AD est 0,805 s, soit 12,08" et la parallaxe en DEC est 18,50". On en déduit (théorème de Pythagore) la parallaxe de hauteur d'Éros : 22,0".

Fig. 13. Positions d'Éros photographiées (taches) et calculée depuis le centre de la Terre (cercle vert)..



Calcul des parallaxes horizontales avec le calculateur de l'IMCCE

Le passage de la mesure de la parallaxe de hauteur à la parallaxe horizontale se fait avec le calculateur en ligne de l'IMCCE (<https://Eros2019.imcce.fr/formulaire.html>).

Il faut fournir la date et l'heure du cliché (UTC) puis les coordonnées géographiques du site (longitude et latitude). Ensuite, pour chaque cliché, il faut entrer les coordonnées d'Éros observées (AD et DEC), en conservant tous les chiffres significatifs des données recueillies avec Aladin.

La commande « Calculer » permet d'obtenir les réponses. Pour l'image 7 203, le calculateur trouve 29,358" pour la parallaxe horizontale d'Éros à partir de la parallaxe de hauteur en AD, et 30,062" à partir de la parallaxe de hauteur en DEC (la précision à 5 chiffres significatifs paraît illusoire...).

Calcul de la parallaxe de hauteur du Soleil, de la distance Terre-Soleil, et conclusion

Le calculateur de l'IMCCE fournit aussi les valeurs de la parallaxe de hauteur du Soleil à partir de celles de l'astéroïde Éros (8,266" et 8,464"). La valeur conventionnelle de cette parallaxe du Soleil est rappelée : 8,794".

En recommençant les prises de vues le 25 février (4 clichés) et le 26 février (6 clichés), il a été possible d'améliorer la précision des mesures.

La moyenne des 28 valeurs de la parallaxe horizontale du Soleil est $p_s = 8,69''$ (erreur relative de - 0,012). L'écart-type des 20 valeurs des 25 - 26 février est $s = 0,33''$.

De la parallaxe horizontale du Soleil (de son expression en radian), on déduit la distance Terre-Soleil d_{TS} en utilisant la valeur $R = 6378$ km pour le rayon équatorial terrestre : $d_{TS} = R / p_s$. La valeur moyenne $p_s = 8,69''$ donne :

$$d_{TS} = 151,4 \text{ millions de km.}$$

La valeur de référence pour le 25/02/2019 est $d_{TS} = 148,1$ millions de km (d'après Stellarium). L'erreur relative sur cette distance est 0,022.

L'unité astronomique (ua) est, à l'origine, la valeur moyenne annuelle de la distance d_{TS} ⁹. Cette distance varie au cours de l'année entre $1 - e$ et $1 + e$ (en ua), avec e l'excentricité de l'orbite terrestre ($e = 0,0167$). On peut admettre que l'activité de science participative relatée ici conduit à une bonne évaluation de l'unité astronomique. ■

Mes remerciements vont à l'astronome Pascal Descamps (OBSPM), qui m'a encouragé à photographier l'astéroïde Éros, et à participer à la campagne de mesures, malgré les capacités limitées de mon matériel.

⁹ Depuis 2012, la nouvelle définition, conventionnelle, de l'unité astronomique est $1 \text{ ua} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}$, exactement.