

MESURE DE LA PARALLAXE D'UN ASTÉROÏDE

*(astrophotographie avec un matériel d'amateur –
traitement d'images avec des logiciels professionnels)*

PLAN

Avertissement	Page 2
Les astéroïdes : des cibles particulières	
Prérequis	
Que cherche-t-on à mesurer ?	Page 3
La parallaxe en astronomie	
<i>parallaxe de hauteur et parallaxe horizontale</i>	
<i>parallaxes stellaires – le parsec</i>	
L'instrument	Page 4
<i>le trépied</i>	
<i>la monture (équatoriale)</i>	
<i>le viseur polaire</i>	
<i>l'alimentation de la monture</i>	
<i>la raquette de commande</i>	Page 5
Mise en station de l'instrument	
<i>mise en station sommaire (théorie)</i>	
<i>mise en station sommaire (pratique)</i>	
Équilibrages statiques de l'instrument	Page 6
Alignement de l'instrument	
Présentation du matériel d'astrophotographie	
<i>APN</i>	
<i>lunette et chercheur</i>	
<i>interface lunette - APN</i>	
Préparation d'une séance d'astrophotographie avec Stellarium	Page 7
<i>localisation de la cible</i>	
<i>mouvement apparent de la cible (par rapport aux étoiles)</i>	
<i>champ céleste couvert par le capteur</i>	
<i>évaluation du flou de bougé sur un cliché longue pose</i>	
Exploitation des premiers clichés (soirée du 24/02)	Page 8
<i>paramètres des clichés</i>	
<i>identification de l'image d'Eros</i>	
<i>logiciels d'empilement des clichés et post-traitement</i>	
Mise en œuvre des logiciels professionnels	
<i>(Astrometry.net) calibration astrométrique des images</i>	
<i>(Aladin) mesure de la position astrométrique d'Eros</i>	Page 9
<i>(Aladin) calcul des coordonnées théoriques d'Eros</i>	
Calcul des parallaxes horizontales avec le calculateur de l'IMCCE	Page 10
Affinement de la pratique expérimentale	Page 11
<i>rôle de la position de l'astéroïde par rapport au méridien de l'observateur</i>	
<i>qu'en dit la sonde NEAR installée sur Eros ?</i>	
Analyse des clichés des soirées du 25 et du 26/02	Page 12
Bilan de l'expérimentation	
Détermination de la distance Terre – Soleil	
Remerciements	

Avertissement

Les performances modestes du matériel utilisé limitent le choix des cibles possibles. La méthode exposée ici a été testée dans son intégralité en février 2019, lors d'une campagne de « Science participative » organisée par un astronome professionnel de l'OBSPM (observatoire de Paris) (<https://eros2019.imcce.fr/>). L'astéroïde visé et suivi au cours de trois soirées consécutives (24, 25 et 26 février) était (433) Eros, de magnitude proche de 10. Sa parallaxe horizontale était proche de 30 arcsec. La précision des mesures faites permet de calculer un bon ordre de grandeur de la parallaxe horizontale du Soleil, et d'en déduire la distance de la Terre au Soleil.

Les astéroïdes : des cibles particulières

Avec un matériel d'astronomie amateur, il est possible de photographier deux grandes catégories d'objets célestes : les objets et astres visibles à l'œil nu (*) (le Soleil, la Lune, les 6 planètes du système solaire les plus proches du Soleil, les étoiles autres que le Soleil, les comètes, les météores, certains satellites artificiels) et les astres invisibles à l'œil nu (la planète Neptune, les satellites des planètes, les anneaux de Saturne, les « petits corps » du système solaire, les objets du « ciel profond » extérieurs au système solaire, appartenant à notre galaxie la Voie Lactée (nébuleuses), ou extérieurs à notre galaxie (autres galaxies))

(* : la visibilité des astres à l'œil nu dépend de la luminosité du ciel nocturne).

Les astéroïdes appartiennent à la famille des « petits corps » du système solaire, et sont invisibles à l'œil nu. La découverte du premier astéroïde (Cérès en 1801 par G. Piazzi) fut suivie en quelques années par la découverte d'autres objets de la même famille (Pallas, 1802, Vesta, 1807 par H. W. Olbers ; Junon, 1804, par C. L. Harding).

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/decouverte-du-premier-asteroide/>

La dénomination « astéroïde » a été proposée par W. Herschel (1802).

En deux siècles, la famille des astéroïdes connus s'est agrandie. D'une part, entre les orbites des planètes Mars et Jupiter est localisée la « ceinture principale d'astéroïdes » du système solaire, dans laquelle on a référencé plus d'une centaine de milliers d'objets.

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/asteroides/>

D'autre part, certains objets célestes apparentés (par leur luminosité et leur constitution) possèdent des orbites en partie situées à l'intérieur de l'orbite de Mars. Se rapprochant périodiquement suffisamment de la Terre, on les désigne comme « géocroiseurs » ou « géofrôleurs ». L'astéroïde (433) Eros est un géofrôleur de la famille « Amor », l'une des 3 familles de N.E.A. (comme « Near Earth Astéroïds »).

Le 15 janvier 2019, la distance [Terre – Eros] est passée par un minimum évalué à 31,2 millions de km, soit environ 80 fois la distance moyenne de la Terre à la Lune (ci-dessus l'orbite d'Eros comparée à celles des 4 planètes telluriques ; crédit NASA/JPL/CalTech).

<https://www.universalis.fr/classification/astronomie-et-astrophysique/systeme-solaire/asteroides/>

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/asteroides/5-les-asteroides-aten-apollo-et-amor/>

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/near-earth-asteroid-rendezvous/>

Au cours du dernier demi-siècle, l'exploration du système solaire par des sondes automatisées a permis de photographier de très près certains astéroïdes. La sonde « NEAR Shoemaker » s'est même posée sur Eros en février 2001, après avoir orbité pendant une année autour de l'astéroïde.

(ci-contre, une vue rapprochée de l'astéroïde Eros – crédit IMCCE / NASA).

Comme les planètes et les comètes, observés de la Terre (avec un instrument), les astéroïdes sont des « astres errants » qui ont un déplacement apparent appréciable sur le fond des étoiles. Par exemple, lors de son passage de janvier 2019, la vitesse apparente d'Eros était proche d'un degré par jour.

Prérequis

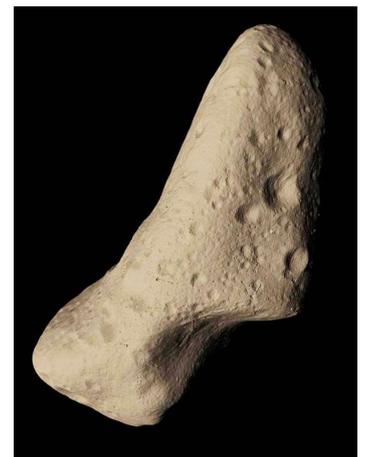
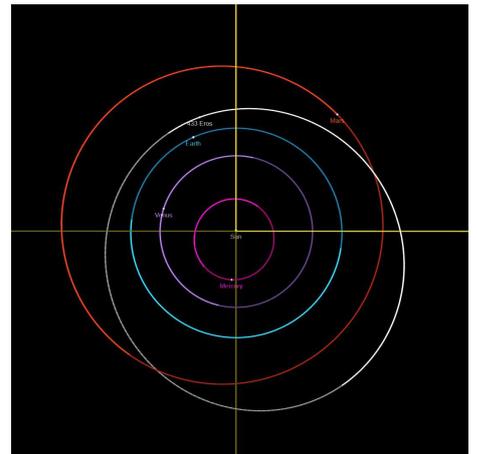
Connaître le principe d'une monture équatoriale.

Connaître les propriétés d'une lunette astronomique (réfracteur).

Connaître les fonctions de base d'un APN (reflex).

Savoir utiliser le logiciel de carte du ciel « Stellarium ».

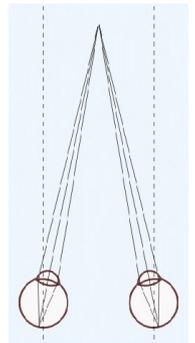
Installer un logiciel professionnel de traitement d'images d'astronomie (sur un ordinateur personnel).



Que cherche-t-on à mesurer ?

L'activité décrite ici est la mesure de la *parallaxe horizontale d'un astéroïde*. En astronomie, la parallaxe est un angle très petit, qui est l'intermédiaire (accessible) pour procéder à l'évaluation des distances qui (nous, Terriens) nous séparent des objets célestes (inaccessibles).

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 est différente par l'œil droit et par l'œil gauche. 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 (schéma ci-contre). En supposant que l'éloignement du point visé est inconnu, la connaissance de l'angle de parallaxe et de la longueur de la base suffit pour calculer cet éloignement (calcul trigonométrique).



La parallaxe en astronomie

En astronomie, cette méthode est transposée pour déterminer la distance inconnue des objets célestes inaccessibles. Si deux observateurs (O_1 et O_2) se placent sur la Terre en deux sites éloignés l'un de l'autre de plusieurs milliers de km (schéma ci-contre), et s'ils visent simultanément le même astre (A), sur le fond des étoiles dites « fixes » (hors épure), le triangle de parallaxe est AO_1O_2 . La parallaxe (p) est l'angle interne du triangle au sommet A . La base (b) est la longueur du côté (O_1O_2) du triangle. Connaissant R (rayon terrestre), p , et les coordonnées géographiques (latitude et longitude) des points O_1 et O_2 , on peut calculer b et la distance inconnue CA .

Avec cette méthode, deux astronomes du XVII^e siècle (J. Richer et J.D. Cassini) ont

déterminé la parallaxe de la planète Mars (en A) lors de l'opposition de 1672

(17 ± 4 arcsec), en utilisant comme base le couple [Paris – Cayenne].

Ils en ont déduit (*) la première évaluation historique satisfaisante de la distance de la Terre au Soleil (140 ± 30 millions de km).

(* : cette déduction repose sur l'utilisation de la troisième loi de Kepler).

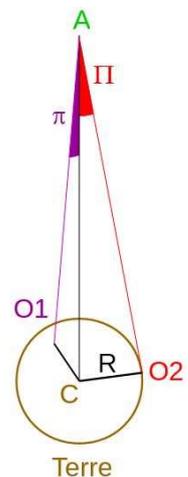
http://clea-astro.eu/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_137_05.pdf

http://www.astrosurf.com/aphelie/compte_rendu/CR_2012/mesure_ua.pdf

Parallaxe de hauteur et parallaxe horizontale :

Pour un observateur donné (O_1), la « parallaxe de hauteur » (π) de l'astre A est l'angle [CAO_1]. Un observateur O situé sur le segment CA voit l'astre A au zénith local et lui attribue une parallaxe de hauteur nulle. L'observateur O_2 voit l'astre A à l'horizon : la parallaxe de hauteur (Π) est alors la « parallaxe horizontale » (angle [CAO_2] dans le triangle rectangle). La parallaxe horizontale est la plus grande des valeurs des parallaxes de hauteur.

Pour le Soleil, la parallaxe horizontale de référence vaut 8,794 arcsec (correspondant à la valeur de l'unité astronomique : $CA = 1 \text{ ua} = 149\,597\,870,700 \text{ km}$, et au rayon équatorial terrestre $CO_2 = R = 6378,0 \text{ km}$).



Les parallaxes stellaires et le parsec :

La méthode précédente appliquée aux étoiles extérieures au système solaire ne permet pas de déterminer leur parallaxe car celle-ci est beaucoup trop faible. Nous savons que l'étoile la plus proche du Soleil est Proxima Centauri. Pour avoir une idée de son éloignement, on peut remarquer que la lumière, qui met environ 500 s pour parcourir une unité astronomique, met plus de quatre années (4,24) pour venir de cette étoile.

Pour que la parallaxe des étoiles « lointaines » soit mesurable, il faut disposer d'une base beaucoup plus étendue que le rayon terrestre, mais qui reste opératoire. Cette base est l'unité astronomique. Et ce choix induit la définition d'une nouvelle unité de longueur, **le parsec**, abréviation de « **parallaxe seconde** ».

On modifie le triangle [CAO_2] du schéma, en plaçant le centre du Soleil en C , en plaçant le centre de la Terre en O_2 , en remplaçant le cercle brun par l'orbite de la Terre, et en remplaçant le rayon terrestre [CO_2] par le rayon de l'orbite terrestre autour du Soleil (R est remplacé par une ua, l'orbite terrestre est assimilée à un cercle).

Par définition, le parsec est la distance (CA) d'un objet (A) à partir duquel l'unité astronomique est vue sous un angle (parallaxe Π) d'une seconde (1 arcsec ou 1 "). Avec cette définition, la parallaxe de Proxima du Centaure vaut 0,769 arcsec (ou 769 milliarcsec (mas)), et sa distance est 1,30 parsec.

Historiquement, le premier astronome qui réussit à mesurer la parallaxe d'une étoile autre que le Soleil fut F.W. Bessel. Grâce à un ensemble de mesures étalées sur 18 mois (1837 et 1838), il obtint la valeur 0,31 arcsec pour la parallaxe de l'étoile 61 Cyg (valeurs actuellement admises parallaxe de 287 mas et distance de 3,48 parsec). Bessel utilisa pour ses mesures un instrument de grande précision, l'héliomètre de Fraunhofer (précision 0,1 ").

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/premiere-determination-de-la-distance-d-une-etoile/>

L'instrument (in situ – photographie ci-contre)

C'est l'ensemble autonome constitué d'une part du trépied, de la monture, de son alimentation et de sa raquette de commande, et d'autre part de l'ensemble de prise de vues [lunette + APN]. À chaque séance d'astrophotographie en extérieur, l'instrument est transporté et installé, c'est-à-dire que ses éléments sont assemblés, que la monture est équilibrée et mise en station. On procède ensuite à l'opération d'alignement sur le ciel, ce qui permet de viser finalement une cible donnée sans dérive notable pendant plusieurs heures, grâce à une compensation automatique du mouvement de rotation de la Terre autour de son axe des pôles. La mise en œuvre de ce protocole prend environ une heure.

Le trépied possède une platine supérieure que l'on doit régler à l'horizontale (niveau à bulle). Il reçoit le socle de la monture et reste fixe par rapport au sol.

La monture est un bloc massif (20 kg), fermement verrouillé sur le trépied, et incluant un viseur polaire et une tête orientable motorisée sur deux axes (sur la photo, modèle NEQ6Pro de « Sky-Watcher »).

Le premier axe (*en bleu* sur l'image ci-contre) doit être réglé parallèle à l'axe des pôles terrestres (ou « axe polaire »). Ce réglage se fait avec le viseur polaire intégré (voir « mise en station de l'instrument »). La flèche bleue pointe vers le pôle nord céleste. Le mouvement de rotation de la monture autour de cet axe à la **vitesse sidérale** permet la compensation exacte du mouvement de rotation de la Terre. Dans ces conditions, l'axe optique de la lunette installée sur la monture vise constamment le même point du ciel, par exemple une étoile. Ce mouvement très particulier, s'effectuant à AD (ascension droite) et DEC (déclinaison) constantes, rend la **lunette virtuellement solidaire de l'ensemble des étoiles**.

Il est possible de choisir une vitesse de rotation différente de la vitesse sidérale (en général plus grande), et de faire varier l'ascension droite du point visé (par valeurs croissantes, vers l'est, ou par valeurs décroissantes, vers l'ouest), en gardant constante la déclinaison. Si un tel mouvement est déclenché alors que l'axe optique de la lunette est perpendiculaire à l'axe polaire, la déclinaison des points visés est nulle, et ces points sont tous sur l'Équateur céleste. Ce qui illustre la dénomination « monture équatoriale ».

Afin de pouvoir viser tous les points du ciel situés au-dessus de l'horizon à un instant donné, il faut pouvoir faire tourner la tête orientable autour du second axe (*en rouge* sur l'image). Un mouvement de rotation autour de cet axe permet à l'axe optique de la lunette de balayer une ligne de coordonnées célestes à AD constante, et de faire varier la déclinaison. La vitesse de rotation autour de cet axe est réglable aussi.

L'instrument a une vocation de nomadisme. Il est destiné à être installé dans des sites variés, sous des latitudes variées (*). L'axe de symétrie du trépied étant localement toujours vertical, le bloc moteur de la monture (et donc l'axe polaire *bleu*) est réglable en inclinaison. Lors de l'installation, en un lieu de latitude λ , et grâce à un petit compas (peu précis), on règle approximativement l'angle entre l'axe polaire et la verticale locale en affichant la latitude (précision de l'ordre du degré). Ce réglage sera affiné au cours de la « mise en station ».

(* dans l'hémisphère nord, et avec une restriction pour les faibles latitudes ; dans ce cas, la quasi horizontalité de l'axe polaire *bleu* peut conduire à une limitation de la rotation de la monture, gênée en butée par une clé ou par un pied).

Le viseur polaire est une petite lunette intégrée dans la monture.

Pour le mettre en œuvre, il faut ôter le bouchon supérieur et dévisser la demi-sphère inférieure qui protège son oculaire. Il faut aussi faire tourner le bras qui porte les surcharges (il est perforé pour permettre le passage de la lumière de l'objectif du viseur jusqu'à son oculaire). Si une étoile assez lumineuse occupait exactement la position du pôle nord céleste, il suffirait de la centrer dans le champ du viseur polaire pour réaliser la « mise en station » de l'instrument. Mais l'Étoile Polaire (ou Polaris), qui sert de guide pour la mise en station, est distante du pôle d'environ 39' (DEC = 89° 20' 44"). Grâce à une mire adaptée incluse dans le champ du viseur polaire, l'amenée de l'image de Polaris au centre d'un petit cercle conduit à une mise en station précise (l'axe mécanique *bleu*, pointe alors vers le pôle nord céleste). Le réglage de l'axe optique du viseur, qui doit être confondu avec l'axe mécanique *bleu*, a été fait une fois pour toutes lors de la première mise en station de la monture.

L'alimentation de la monture est un « booster » de Norauto (12 V / 17 Ah) possédant une autonomie très largement suffisante (plusieurs heures, à condition que les équilibrages statiques de l'instrument soient corrects).



La raquette de commande « SynScan » permet, pour chaque séance, de mémoriser les coordonnées célestes de l'astéroïde, et de cadrer efficacement la région du ciel intéressante (à la limite entre les constellations d'Orion et de la Licorne pour Eros fin février).

Le logiciel « Stellarium » apporte une aide très appréciable pour la préparation de chaque séance. Elle possède de multiples fonctions, qu'il serait trop long d'énumérer ici.



Mise en station de l'instrument

La « mise en station » est l'ensemble des manœuvres destinées à rendre parallèles l'axe polaire de la monture et l'axe des pôles terrestres. Le mieux est de la réaliser alors que l'instrument est complètement installé et équilibré (lunette et APN en place). Mais il est parfois pratique de faire une mise en station sommaire sans charge, ce qui peut être suffisant dans les cas où la précision de pointage requise n'est pas la précision maximale.

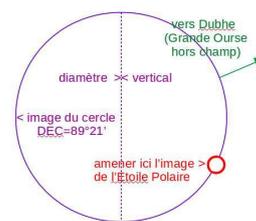
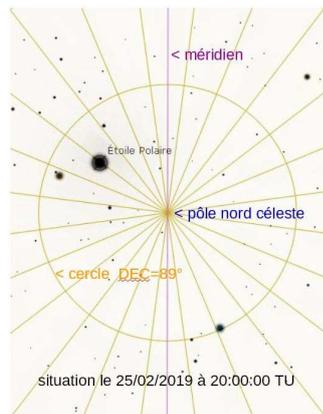
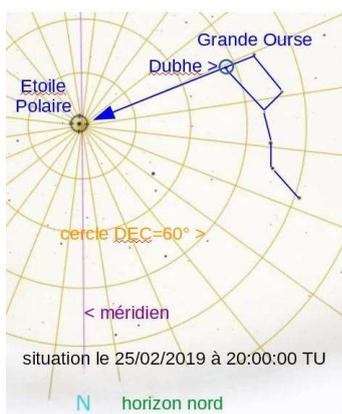


Schéma de la mire du viseur polaire

Mise en station sommaire hors charge (théorie) :

La méthode présentée ici est utilisable en toute saison (latitude > 40° N). Les 2 écrans Stellarium utilisés ont été préparés au cours d'une journée qui précède la sortie nocturne, pour la date et l'heure prévues de la mise en station (par exemple, le 25 février 2019 à 21h locales, UTC + 1:00h). Sinon, il faut disposer de son PC allumé à proximité (Stellarium en mode nuit). On passe, en zoomant, de l'écran de gauche à l'écran du centre, sans modifier l'orientation du méridien (nord N en bas). On mémorise d'une part (écran gauche) la position de l'étoile Dubhe (alpha de la Grande Ourse, éloignée d'environ 30° de l'Étoile Polaire ; parmi les 7 étoiles de la « grande casserole », c'en est l'étoile la plus proche) et d'autre part (écran du centre) la position de l'Étoile Polaire par rapport au pôle nord céleste et au méridien. En particulier, on évalue l'angle aigu A dont il faut faire tourner le méridien (autour du pôle, ici dans le sens antihoraire) pour l'amener à porter Polaris (un peu plus de 45° ici).

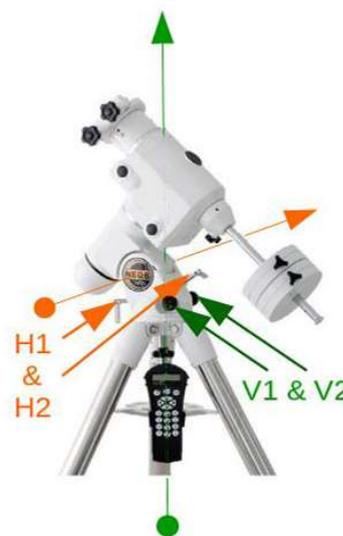
Le schéma de la mire (à droite des écrans Stellarium ci-dessus) montre deux cercles sécants figurés dans le champ du viseur polaire. Le grand cercle (mauve) sera l'image du cercle céleste de déclinaison DEC = 89° 21', lorsque le réglage sera terminé. Le centre du petit cercle (rouge) est le point où il faut amener l'image de Polaris pour que le centre du grand cercle coïncide avec l'image du pôle céleste.

Le viseur produit un effet d'inversion de champ par symétrie centrale. Après réglage, si l'on superposait l'écran Stellarium du centre et le schéma de la mire du viseur, Polaris (étoile) et son image sur la mire seraient diamétralement opposées sur le grand cercle de la mire. Sur le schéma de la mire, on appelle B l'angle aigu dont il faudrait faire tourner le diamètre vertical (autour du centre du grand cercle dans le sens antihoraire) pour l'amener à porter le centre du petit cercle.

Mise en station sommaire hors charge (pratique) :

En un site de latitude 49° N, le pôle nord céleste est à la hauteur 49° au-dessus du point cardinal nord. Faire face à l'horizon nord et repérer la constellation de la Grande Ourse (circumpolaire en France, donc visible en toute saison). Vérifier que sa position est conforme à l'écran Stellarium (de la date et de l'heure).

Puis trouver Polaris. Aucune étoile n'est plus brillante qu'elle à 10° à la ronde). Ensuite, orienter le trépied pour que l'image de Polaris apparaisse dans le champ du viseur polaire. Puis, il faut faire pivoter la tête de la monture autour de l'axe du viseur (axe bleu) pour que la mire se présente comme sur le schéma (ci-dessus à droite). La première condition à respecter est l'égalité des angles A et B.



Dernière étape : pour amener l'image de Polaris dans le petit cercle rouge (son centrage est facultatif ici), on dispose de 2 degrés de liberté de rotation, de faible amplitude, grâce à 2 couples de vis antagonistes. Le couple de vis **H1** et **H2** permet d'incliner correctement et précisément l'axe du viseur par rapport à la verticale locale (rotation autour de l'axe horizontal avant arrière, légende page 5 couleur orange). Le couple de vis **V1** et **V2** permet de faire tourner légèrement la monture autour de l'axe vertical du trépied (légende page 5 couleur verte). Après réglage, ces 4 vis doivent être finalement bloquées, ainsi que la vis verticale de verrouillage du trépied.

Mise en station précise :

Se reporter au manuel de la monture, qui développe en détail les étapes du protocole de cette opération. Elle ne réclame que la connaissance de la date et de l'heure de la mise en station (précision d'une minute de temps).

Équilibrages statiques de l'instrument

Cette opération préalable à l'alignement de l'instrument ne doit pas être négligée, sous peine de contraintes mécaniques non maîtrisées et d'une consommation électrique exagérée. Elle doit être faite pour les deux axes.

Axe polaire (bleu) : la lunette étant fortement décalée par rapport à l'axe polaire (« monture allemande »), un bras (escamotable et confondu avec le second axe, rouge) permet d'ajouter des surcharges d'équilibrage statique (un ou deux cylindres de 5 kg).

Second axe (rouge) : la lunette est maintenue par deux anneaux et peut coulisser en maintenant son axe optique dans une direction fixe. Ce contrôle doit être fait après la mise en place du boîtier APN.

L'équilibrage statique parfait n'est pas atteint, car le chercheur de la lunette ne possède pas de surcharge d'équilibrage (le perfectionnisme inciterait à en installer une ...).

Alignement de l'instrument

L'opération a pour but de fournir au calculateur de la raquette de commande la position réelle actuelle de 2 ou 3 étoiles, afin qu'il puisse remplir avec succès la fonction de pointage automatique des cibles. Il est judicieux de choisir 2 étoiles assez éloignées (angulairement ...) et situées du même côté du méridien que la ou les cibles visées. Quand la raquette affiche « successful », la rotation à vitesse sidérale est en marche, et l'instrument est prêt pour recevoir une commande de pointage vers une cible (Lune, planète, étoile (par son nom), objet du ciel profond (par son numéro dans un catalogue), ou un objet dont on aura préalablement fourni les coordonnées (AD, DEC). La première cible doit être choisie pour faire la mise au point soignée de l'APN.

Présentation du matériel d'astrophotographie [lunette + APN]

Le boîtier APN est un « Pentax K-3 II ». Il est équipé d'un GPS et d'une boussole électronique. La fonction « Intervallomètre » permet (en mode « M ») de commander automatiquement des séries de clichés en nombre choisi, à intervalles de temps réglable et régulier, avec des temps de pose au maximum égaux à 30 s (ci-contre).



Le mode « autofocus » est abandonné ; la mise au point se fait en réglant le tirage du porte-oculaire de la lunette, et est contrôlée grâce à l'activation du mode « Liveview ». La fonction « réduction du bruit » est activée (ce qui impose de choisir un intervalle entre débuts de clichés supérieur au double du temps de pose).

Afin de limiter les vibrations induites par les actions sur le déclencheur, on utilise une télécommande filaire. La fonction « stabilisateur » doit être débrayée.

L'horloge du boîtier peut être réglée avec une précision d'une seconde (par exemple en photographiant l'écran d'un PC connecté à l'horloge parlante ; ci-contre).



La lunette joue, vis-à-vis du boîtier APN, le rôle d'un téléobjectif (de focale fixe).

C'est un modèle « Esprit » de « Sky-Watcher ». Le diamètre de l'objectif est $D = 100$ mm ; sa distance focale est $f = 555$ mm. Elle comprend en sortie un bloc optique correcteur-aplanisseur de champ, solidaire du porte-oculaire. Le coulisement axial du porte-oculaire permet une mise au point précise grâce à une crémaillère et une commande démultipliée. Une fois faite la mise au point à l'infini, le porte-oculaire peut être bloqué. Un cabestan permet de faire pivoter l'ensemble [aplanisseur + APN] autour de l'axe optique de la lunette, sans dérégler la mise au point.

Le chercheur (petite lunette annexe ; oculaire avec mire) permet, grâce à son large champ, de sélectionner visuellement les champs stellaires utiles. Il est impératif de bien régler le parallélisme des axes optiques du chercheur et de la lunette. Il est aussi l'accessoire de contrôle de l'alignement de l'instrument sur le ciel.

L'interface entre le boîtier et la lunette est un adaptateur à deux éléments : une bague « T2 » et une bague d'adaptation de diamètre qui se visse en aval du correcteur-aplanisseur de la lunette et assurent la rigidité du lien. On n'utilise aucun filtre optique additionnel.

Préparation d'une séance d'astrophotographie avec « Stellarium »

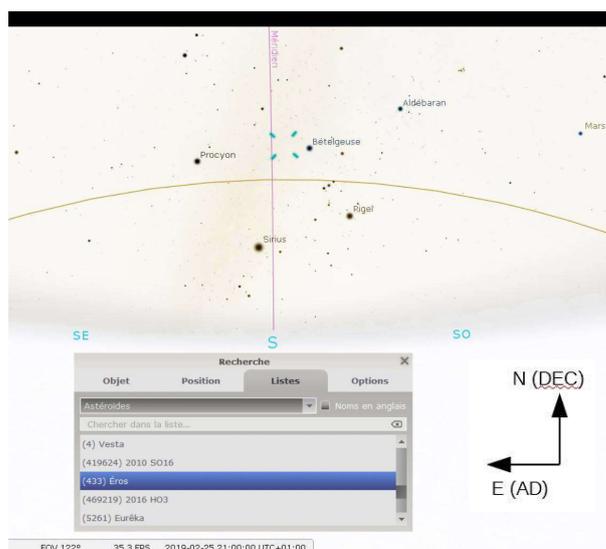
Le site d'observation est au voisinage du village de Nerville-la-Forêt (95590).

Les coordonnées géographiques du site (déterminées avec le GPS du boîtier APN) sont : latitude $49^{\circ} 05' 26''$ N ; longitude $02^{\circ} 17' 33''$ E ; altitude 129 m.

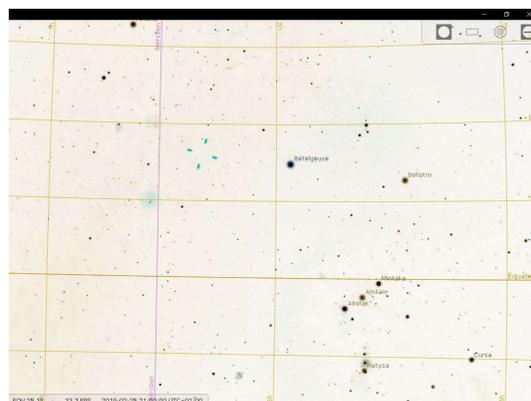
Un arcsec ($1''$) correspond à une distance de 31 m environ en latitude, et à 20 m environ en longitude.

Localisation de la cible :

Dans le menu « Recherche », ouvrir la « liste » des types de cibles, et choisir « Astéroïdes ». La nôtre est répertoriée (par chance). En l'appelant (clic), la carte du ciel de Stellarium glisse jusqu'à ce que la position de la cible soit centrée. Le point-cible est entouré de 4 petits traits rouges (bleus en négatif) qui attirent l'attention (écran ci-contre en négatif). L'astéroïde est à quelques degrés à l'Est de Bételgeuse (constellation d'Orion) à la date et à l'heure choisies (2019/02/25_20:00:00 TU), et à quelques degrés au nord de l'Équateur céleste. Stellarium affiche ses coordonnées célestes (« de la date ») : AD = 06h 19m 42s et DEC = + 08° 03' 07". AD (ou alpha/ α) est l'ascension droite ; DEC (ou delta/ δ) est la déclinaison, positive au nord de l'Équateur céleste.



Un zoom sur la cible donne des précisions sur l'environnement stellaire de l'astéroïde (ci-contre). Le méridien, l'Équateur et les lignes de maillage de coordonnées célestes sont affichées. Les AD sont croissantes de l'ouest vers l'est (en passant par le sud). Sur l'Équateur, 1 h en AD vaut 15° , 1 minute vaut 15 arcmin, 1 s vaut 15 arcsec. À la déclinaison δ , il faut corriger les angles : par exemple, 1 s en AD vaut $\cos(\delta) \times 15$ arcsec.



Mouvement apparent de la cible (par rapport aux étoiles) :

Le montage expérimental prévoit un suivi céleste aussi précis que possible. Une série de clichés à intervalles réguliers doit montrer alors un fond de ciel étoilé immuable. Et l'astéroïde est le seul astre qui imprimera sa trace en des points différents.

Les coordonnées célestes d'Eros à minuit sont : AD = 06h 20m 09s et DEC = + 07° 58' 04".

La variation (v) des coordonnées en 4 heures est donc : $v(\alpha) = + 27$ s et $v(\delta) = - 05' 03'' = - 303''$. Pour corriger les angles en AD, on prendra la valeur moyenne de DEC ($\delta = 08,01^{\circ}$; $\cos(\delta) = 0,990$) ; donc $v(\alpha) = + 401''$. La faiblesse des valeurs de ces variations justifie l'application du théorème de Pythagore pour le calcul de la longueur de l'arc décrit par l'astéroïde, comme hypoténuse d'un triangle rectangle plan. Finalement, le déplacement angulaire d'Eros par rapport aux étoiles fixes est de $503''$. On en déduit la vitesse apparente V_{ap} d'Eros par rapport aux étoiles fixes : $V_{ap} = 2,094$ arcsec par minute (de temps).

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 sur 4000 pixels (résolution maximum de 24 mégapixels), sur une surface rectangulaire de côtés 23,4 mm sur 15,6 mm.

La lunette utilisée a une distance focale $f = 555$ mm.

Donc la portion de ciel photographiée est un rectangle de côtés $1,610^{\circ}$ sur $2,422^{\circ}$. Un extrait du cliché de forme carrée et de 1250 sur 1250 pixels couvre une portion de ciel d'environ 30 sur 30 arcmin.

Les pixels (photosites) sont des pastilles carrées de côté $a = 3,90$ μm . Chaque pixel du capteur reçoit donc la lumière en provenance d'une partie du ciel d'étendue angulaire ε sur ε (ε est l'échantillonnage), telle que $\varepsilon = a/f$. Numériquement : $\varepsilon = 1,45$ arcsec.

Évaluation du flou de bougé sur un cliché longue pose :

Pour que le flou de bougé soit inférieur à un pixel, il faut choisir un temps de pose inférieur à $\varepsilon / V_{ap} = 0,692$ min = 41,5 s. En pratique, les temps de pose adoptés seront compris entre 15 s et 20 s.

Exploitation des premiers clichés (soirée d'observation et de photographie du 24/02)

Paramètres des clichés :

Le format d'enregistrement des images est JPEG, ce qui simplifie grandement le post-traitement.

La série de clichés la plus intéressante est la série numérotée de 7201 à 7207, pris de 21h 43m 42s à 22h 13m 42s, à intervalles de 5 minutes, avec les paramètres suivants :

sensibilité $s = 2000$ (ISO) ; temps de pose $t = 15$ s ; coefficient d'ouverture $o (= f/D) = 5,55$.

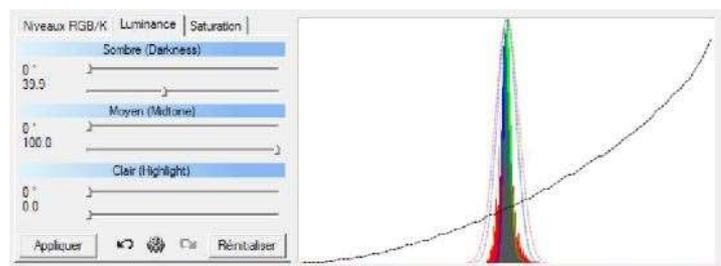
Identification de l'image d'Eros :

En faisant défiler les 7 images à l'écran de l'ordinateur, il est (assez) aisé de repérer le point mobile. En opérant un empilement des 7 clichés, les positions successives de l'astéroïde sont bien mises en évidence (ci-dessous).

L'extrait ci-contre couvre un champ de 48' sur 48' (2000 sur 2000 pixels).

Logiciels d'empilement des clichés et de post-traitement :

« DeepSkyStacker » (ou DSS) est un logiciel libre (version utilisée 4.1.1).



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

Le mode d'empilement des images choisi est « Maximum ».

Afin d'obtenir une image finale d'un contraste suffisant, et après avoir superposé les canaux couleurs R, V et B (ci-dessus), il convient de bien placer les curseurs de « Luminance ». La sauvegarde du résultat donne un fichier TIFF très volumineux (137 Mo). Ce fichier est converti au format JPEG (2,30 Mo) et son image est post-traitée avec le logiciel « Adobe Photoshop Elements 15 », en particulier pour atténuer la luminosité du fond de ciel (ci-dessus).



Les 7 taches images de l'empilement des 7 vues espacées de 5 minutes s'avèrent trop proches pour une exploitation efficace. Un nouvel empilement de 4 images est réalisé avec les clichés 7201, 7203, 7205 et 7207, correspondant à des intervalles de 10 minutes entre prises de vue (ci-contre, extraits en 500 sur 500 pixels, soit un champ de 12' sur 12'). La distance entre les centres des taches extrêmes (7201 en haut à droite et 7207 en bas à gauche) est 43,4 pixels, ce qui permet de calculer la vitesse apparente de l'astéroïde sur le fond des étoiles fixes : $V_{ap} = 2,098$ arcsec par minute (écart relatif de 0,002 par rapport aux prévisions Stellarium).



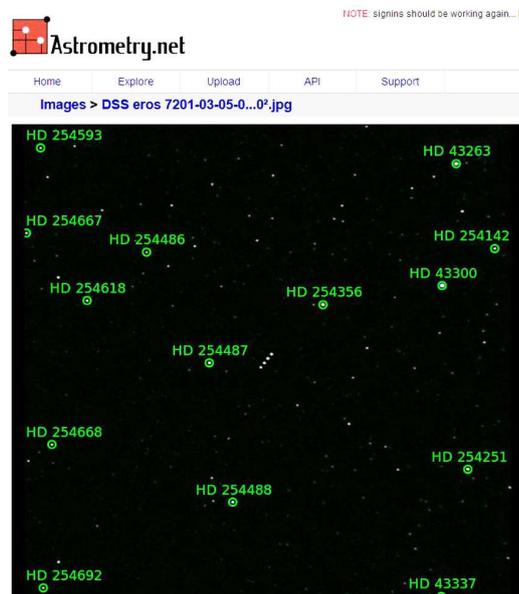
Mise en œuvre des logiciels professionnels

Le protocole d'observation élaboré par l'IMCCE est un document complet de 13 pages dédié à la « Mesure de la parallaxe d'Eros ». Le principe de la méthode et les formules des parallaxes sont données en pages 4 à 6. Les deux étapes de la méthode sont la calibration astrométrique des images (logiciel en ligne « Astrometry.net ») et la mesure de la position astrométrique d'Eros (logiciel « Aladin » à télécharger sur le site <https://aladin.u-strasbg.fr/>).

« Astrometry.net »

Calibration astrométrique des images :

En appelant le site <http://nova.astrometry.net/upload>, on accède à la page d'accueil du premier logiciel. Une version 1250 sur 1250 pixels (champ d'environ $(0,5^\circ)^2$ sur le ciel) de l'empilement de 4 images lui est soumise (bouton « upload » ; résultat affiché ci-contre).



Les coordonnées expérimentales du centre du cliché sont affichées à côté de l'image précédente (avec une précision illusoire) : AD = 06h 16m 32,9s et DEC = + 08° 25' 14,17s. L'échantillonnage est confirmé (« Pixel scale » : 1,45 "/pix). L'orientation du cliché (« Up is 13,8° E of N ») fait appel au compas géographique (bandeau vertical bleu ci-contre ; sens positif horaire). C'est déroutant, car les cartes du ciel (la sphère céleste étant vue de l'intérieur) sont orientées avec la convention opposée (sens positif antihoraire).

Un lien donne accès au « WorldWide Telescope » (de l'AAS) où le cliché est incrusté sur la carte du ciel, correctement placé et orienté (le fond de la page 1, « sous » le plan, est un écran du WWT). Le logiciel permet de télécharger un fichier « new-image.fits » destiné à l'étape suivante du traitement.

« Aladin »

Mesure de la position astrométrique d'Eros :

Les fonctionnalités du logiciel (libre) « Aladin » sont sur le site : <https://projet-plume.org/fr/fiche/aladin> (logo ci-contre).

L'utilisation du logiciel exige le chargement préalable du logiciel « Java ». Le fichier « new-image.fits » est chargé dans l'environnement « Aladin » (v 10.0).

La position de chaque image du quadruplet est analysée par la méthode du photocentre. Dans le sous-menu « Mesure photométrique » du menu « Image », choisir « par cercle ». On dispose d'une zone circulaire de sélection (teinte orange, rayon réglable) que l'on amène sur l'image à analyser, de manière à envelopper le maximum de pixels blancs. Le bandeau inférieur (bleu) affiche alors les coordonnées du centre du cercle, que l'on prend comme position d'Eros (coordonnées expérimentales). Ci-contre pour l'image 7203 (21h 53m 42s UTC) : AD = 06h 16m 32,61s et DEC = + 08°25'34,8". Le cercle enveloppe de l'image 7203 a un diamètre de 10,5 arcsec, soit 7,2 pixels.

Calcul des coordonnées théoriques d'Eros (image 7203) :

« Ouvrir le sélecteur de serveurs » dans le menu « Fichier » et sélectionner (colonne de droite) l'outil « SkyBot » (de l'IMCCE). Dans la nouvelle fenêtre, entrer les données (ligne1, la cible « eros », ligne 3 (« Epoch »), la date et l'heure, en respectant le format 2109-02-24T21:53:42) et commander « Obtenir les coordonnées pour cet objet ».

La ligne supérieure les affiche (copie d'écran ci-contre) : AD = 06h 16m 33,415s et DEC = + 08° 25' 53,30". Ensuite, cliquer (en bas) sur le bouton « **CHERCHER** », et revenir à l'image pour découvrir affichée la position théorique d'Eros (écran à gauche). La parallaxe de l'astéroïde est ainsi visible et mesurable. Avec un double-décimètre et l'échelle de l'écran, on trouve environ 22,5 arcsec (pour la parallaxe de hauteur d'Eros). La parallaxe en AD est - 0,805s, soit 12,075" et la parallaxe en DEC est 18,50". On trouve une différence de coordonnées et de parallaxes en entrant l'heure de la fin du cliché (21h53m57s) : p(AD) = - 0,835s, soit 12,525" et p(DEC) = 18,18", ce qui conduit (par application du théorème de Pythagore) à une parallaxe de hauteur de 22,0" dans les deux cas (la différence est seulement de 0,02").

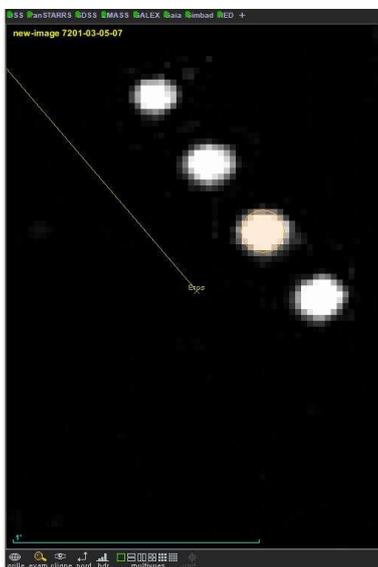
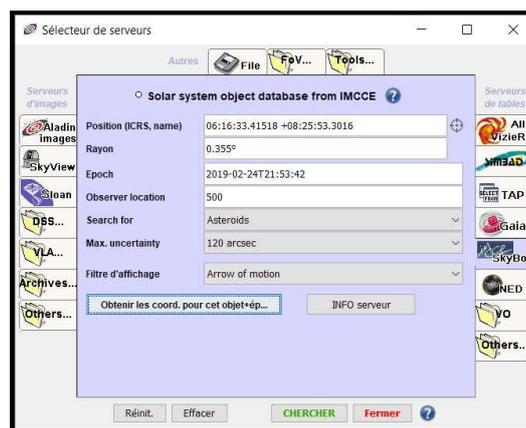
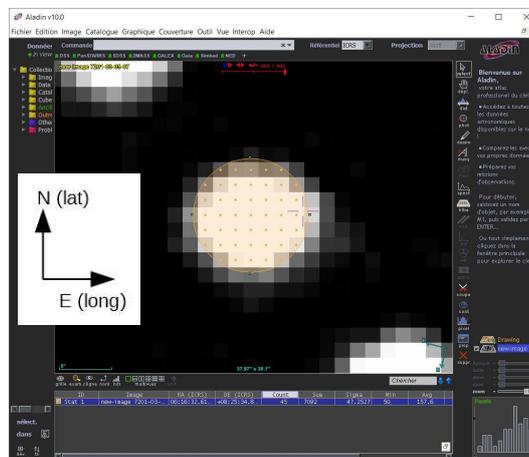
Submitted by (1)
on 2019-03-10T04:30:45Z
as "DSS eros 7201-03-05-0..0s.jpg"
(Submission 2575923)
under Attribution 3.0 Unported

Job Status

Job 3257064:
Success

Calibration

Center (RA, Dec): (94.137, 8.421)
Center (RA, hms): 06h 16m 32.899s
Center (Dec, dms): +08° 25' 14.169"
Size: 30.1 x 30.1 arcmin
Radius: 0.355 deg
Pixel scale: 1.45 arcsec/pixel
Orientation: Up is 13.8 degrees E of N
WCS file: wcs.fits
New FITS image: new-image.fits



Calcul des parallaxes horizontales avec le calculateur de l'IMCCE

Les coordonnées expérimentales des 4 taches images sont rassemblées dans le tableau ci-dessous (heures UTC).

images	heure (24/02/19)	ascension droite	déclinaison
7201	21h43m42s	06h 16m 31,44s	08° 25' 47,7''
7203	21h53m42s	06h 16m 32,61s	08° 25' 34,8''
7205	22h03m42s	06h 16m 33,73s	08° 25' 22,3''
7207	22h13m42s	06h 16m 34,85s	08° 25' 09,5''

The screenshot shows the 'OBSERVATION' section of the calculator. It includes fields for 'Date UTC' (2019-02-24T21:53:42), 'Longitude' (02 17 33 Est), and 'Latitude' (49 05 26 Nord). Below this is the 'MESURE ASTROMÉTRIQUE' section with fields for 'Ascension droite' (06 16 32.41) and 'Déclinaison' (08 25 34.80). A 'Calculer' button is at the bottom.

Le calculateur de l'IMCCE se trouve sur le site « EROS2019 »

<https://eros2019.imcce.fr/formulaire.html> (copie ci-contre en haut).

Il faut fournir les coordonnées précises du site d'observation (latitude et longitude), ainsi que l'heure précise du cliché (respecter le format). Puis il faut fournir les coordonnées expérimentales d'Eros. Le calcul est quasi instantané, et les résultats sont détaillés (image ci-contre en bas).

On note la valeur de la distance du centre de la Terre à Eros ($d = 0,28156$ ua), que l'on peut exprimer autrement : $d = 42,121$ Mkm (millions de km).

La parallaxe horizontale d'Eros peut être déduite de sa parallaxe en ascension droite ($p_\alpha = 10.048''$) ou de sa parallaxe en déclinaison ($p_\delta = 19.888''$). Plus la valeur de la parallaxe est élevée, meilleure est sa précision.

Le calcul de la parallaxe du Soleil ($\Pi(\text{Soleil})$) est fait en appliquant la formule :

$\Pi(\text{Soleil})/\Pi(\text{Eros}) = d / 1,0000$ (rapport des distances en unités astronomiques).

Les valeurs trouvées sont à comparer à la valeur de référence $\Pi(\text{Soleil}) = 8,794''$.

Les erreurs relatives sur les valeurs de $\Pi(\text{Soleil})$ issues des mesures sont

respectivement : $-0,060$ (à partir de p_α) et $-0,038$ (à partir de p_δ).

En considérant $\Pi(\text{Eros})$ comme l'inconnue dans la formule ci-dessus, en prenant $\Pi(\text{Soleil}) = 8,794''$ et la distance d du tableau, on trouve : $\Pi(\text{Eros}) = 31,23''$.

Le calcul peut être renouvelé pour les trois autres images du quadruplet du 24/02/19 (résultats ci-dessous). Les résultats des colonnes 2 et 3 sont calculés avec p_α , et ceux des colonnes 4 et 5 avec p_δ . Les erreurs relatives sur les valeurs moyennes de $\Pi(\text{Soleil})$ issues des mesures sont respectivement : $-0,030$ (à partir de p_α) et $-0,048$ (à partir de p_δ).

The screenshot shows the 'PARALLAXES' section of the calculator. It displays theoretical and observed positions for Eros and the Sun, along with calculated parallaxes. Key results include: Parallaxe en ascension droite d'Eros ($p_\alpha = 10.048''$), Parallaxe horizontale d'Eros ($\Pi_{\text{EROS}} = 29.358''$), Parallaxe horizontale du Soleil ($\Pi_{\text{SOLEIL}} = 8.266''$), Parallaxe en déclinaison d'Eros ($p_\delta = 19.888''$), Parallaxe horizontale d'Eros ($\Pi_{\text{EROS}} = 30.062''$), and Parallaxe horizontale du Soleil ($\Pi_{\text{SOLEIL}} = 8.464''$). A 'VALEUR CONVENTIONNELLE DE LA PARALLAXE' for the Sun is also shown as $\Pi_{\text{SOLEIL}} = 8.794''$.

images	Π (Eros)	Π (Soleil)	Π (Eros)	Π (Soleil)
7201	31,01''	8,73''	30,09''	8,47''
7203	29,36''	8,27''	30,06''	8,46''
7205	30,03''	8,46''	29,43''	8,29''
7207	30,67''	8,64''	29,24''	8,24''
moyennes	30,27''	8,53''	29,71''	8,37''

Le calculateur « Miriade » de l'IMCCE fournit aussi les éphémérides des astéroïdes (ci-dessous celles d'Eros à la date du 24/02/2019 et à 21:53:42 UTC) <http://vo.imcce.fr/webservices/miriade/?forms>.

Miriade - Positional ephemeris

Provided by IMCCE/CNRS/OBSPM

Asteroid (433) Eros

Target	Date	RA	DEC	Distance	Mv	Phase	Elongation	dRAcosDEC	ϵ
		"h:m:s"	"d:m:s"	au		deg	deg	arcsec/min	arc
Eros	2019-02-24T21:53:42.00	06 16 33.27948	+08 25 54.7870	0.281564378	10.06	49.97	117.45	0.17573E+01	-0.1

- Type of coordinates: Equatorial
- Reference frame: Astrometric J2000
- Frame center: Geocenter

Affinement de la pratique expérimentale

En page 7 (§3) du protocole d'observation d'Eros est donné le conseil suivant :

« Il est recommandé d'effectuer des images d'Eros dès la tombée de la nuit, bien avant son passage au méridien, ainsi que des images aussi proches que possible du méridien ».

https://eros2019.imcce.fr/docs/protocole_observation_eros2019.pdf

Rôle de la position de l'astéroïde par rapport au méridien de l'observateur :

Sur un site déterminé, le méridien local sur la voûte céleste (assimilée à une demi-sphère) est un demi-cercle qui relie les points cardinaux nord et sud, et qui passe par le zénith. Cette « ligne méridienne » est l'intersection de la demi-sphère céleste avec le plan vertical local orienté pour contenir les points cardinaux nord et sud, ou « plan méridien » local. Ce plan contient l'observateur et le centre de la Terre. Le plan méridien partage le ciel observable en un demi-ciel est (limité par l'horizon est) et un demi-ciel ouest (limité par l'horizon ouest). Le plan méridien, ainsi défini, contient aussi le méridien géographique du site d'observation.

Le 24 février 2019, l'astéroïde Eros est passé dans le plan méridien de Nerville à 19h 49m 42s (UTC).

Tous les clichés analysés précédemment cadraient une portion du ciel située à l'ouest du méridien. La mesure de l'écart entre la position d'Eros et le méridien est l'angle horaire (H = 02h 04m 15s, page bleue « PARALLAXES »).

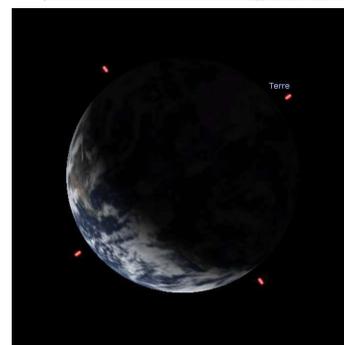
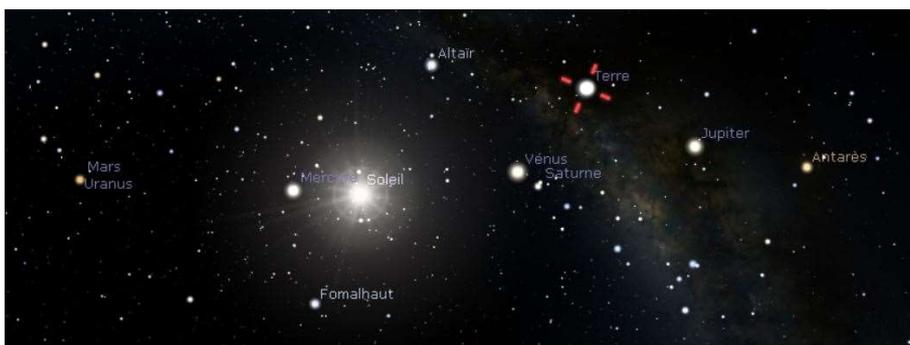
Qu'en dit la sonde NEAR, installée sur Eros ?

Le logiciel Stellarium offre la possibilité de choisir un site d'observation extraterrestre (fenêtre « Situation », rubrique « Planète » ; chercher « (433) Eros »).

Stellarium (v. 0.18.3) n'offre pas la possibilité de choisir l'astéroïde B 612 (ci-contre).

Choisissons donc Eros, situé à la distance 0,2816 ua de la Terre (cette distance ne varie que de 1/1000^e de sa valeur en 8 heures environ). Vue d'Eros, et sans instrument, la

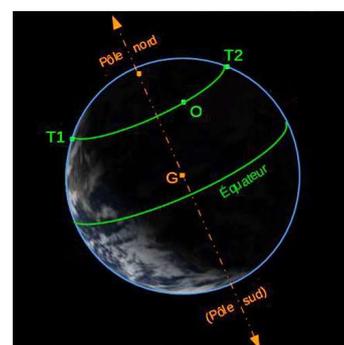
Terre est un point lumineux, comme Vénus vue de la Terre (écran ci-dessous à gauche). Elle est vue sous un angle égal au double de la parallaxe horizontale que l'on cherche à mesurer ici, soit environ 1,0 arcmin (ci-dessous à droite).



Vue par la sonde NEAR, la Terre est un astre errant dont le déplacement (en 24 heures environ) sur le fond des étoiles est de l'ordre d'un degré, pendant qu'elle effectue une rotation propre d'un tour autour de son axe polaire.

Il est possible de matérialiser sur un schéma (ci-contre couleur orange) le plan qui contient NEAR (Eros), le centre de la Terre (G) et les pôles terrestres (schéma qui tient compte de la faible valeur ($\sim + 8,5^\circ$) de la déclinaison d'Eros le 24/02). Un observateur terrestre hypothétique placé en G mesurerait les coordonnées d'Eros dites « coordonnées théoriques » (données dans les éphémérides de l'IMCCE).

Vu d'Eros, un observateur terrestre (O) parcourt un cercle parallèle à l'Équateur. Il mesure les coordonnées expérimentales d'Eros relatives à son site. L'angle sous lequel la sonde NEAR voit le segment GO est la parallaxe de hauteur en O. Quand O est en T1 ou T2, l'observateur voit Eros à l'horizon, et la parallaxe qu'il mesure est maximum (parallaxe horizontale d'Eros). Quand l'observateur O est à mi-distance de T1 et T2, la longueur du segment GO (vu d'Eros) est minimum. Puisque le plan méridien de l'observateur terrestre est le plan qui contient GO et les 2 pôles, **la parallaxe de hauteur d'Eros est minimum quand Eros est dans le plan méridien local de O.** C'est dans cette configuration que les mesures de la parallaxe de hauteur d'Eros sont (a priori) les moins précises.



Le 03 janvier 2019, lors de son passage au méridien (vers 21h 13m), la déclinaison d'Eros ($48^\circ 51'$) était voisine de la latitude de Nerville ($49^\circ 05'$). Eros est passé à moins de $0,25^\circ$ du zénith. G, O et Eros étaient presque alignés. La parallaxe de hauteur d'Eros, inférieure à $0,2$ arcsec, n'était pas mesurable.

Analyse des clichés des soirées du 25 et du 26 février

Avec l'espoir d'améliorer la précision des mesures, les séries de clichés des deux autres soirées ont été plus longues d'une part, et d'autre part plus tardives (pour augmenter l'angle horaire, la cible étant à l'ouest du méridien).

Le 25/02/2019 a été prise une série de 15 clichés espacés de 5 minutes, de 21h 53m 22s à 23h 03m 22s (fichiers IK3P7247 à 7261.jpg). Les images du quadruplet 7249-53-57-61 sont choisies pour être soumises à l'empilement (DSS), à la calibration (Astrometry.net) et aux calculs (Aladin et IMCCE) ; résultats ci-dessous :

images	heure (UTC)	ascension droite	déclinaison	Π (Eros)	Π (Soleil)	Π (Eros)	Π (Soleil)
7249	22h03m22s	06h 19m 24,26s	07° 54' 54,4''	32,05''	9,13''	30,52''	8,70''
7253	22h23m22s	06h 19m 26,51s	07° 54' 29,5''	32,82''	9,35''	30,08''	8,57''
7257	22h43m22s	06h 19m 28,81s	07° 54' 04,5''	32,03''	9,13''	29,78''	8,49''
7261	23h03m22s	06h 19m 31,13s	07° 53' 39,4''	31,00'	8,84''	29,62''	8,44''
moyennes				31,98''	9,11''	29,71''	8,55''

Au cours de la nuit du 26 au 27 février a été prise une série de 41 clichés espacés de 6 minutes, de 20h 51m 22s (UTC) à 00h 51m 22s (fichiers IK3P7275 à 7315.jpg). Les temps de pose sont de 20 s. Les images de la première heure (7275 à 7284) n'ont pas été retenues (angle horaire trop faible). Une sélection de 7 vues, couvrant une période de 3 heures, a été soumise à l'empilement (DSS). L'image 7315 montre plusieurs anomalies (non circularité, non alignement avec les 6 autres), ce qui conduit à l'éliminer. La calibration (Astrometry.net) et les calculs (Aladin et IMCCE) sont faits sur 6 clichés (7285 à 7310, de 5 en 5). Les résultats sont ci-dessous :

images	heure (UTC)	ascension droite	déclinaison	Π (Eros)	Π (Soleil)	Π (Eros)	Π (Soleil)
7285	21h51m22s	06h 22m 13,69s	07° 25' 28,1''	31,73''	9,15''	29,85''	8,61''
7290	22h21m22s	06h 22m 17,08s	07° 24' 52,2''	32,43''	9,35''	28,49''	8,22''
7295	22h51m22s	06h 22m 20,56s	07° 24' 14,9''	30,58''	8,82''	29,18''	8,42''
7300	23h21m22s	06h 22m 24,03s	07° 23' 37,8''	29,91'	8,63''	29,54'	8,52''
7305	23h51m22s	06h 22m 27,41s	07° 23' 00,8''	32,16''	9,28''	29,76''	8,59''
7310	00h21m22s	06h 22m 30,95s	07° 22' 24,0''	30,72'	8,87''	29,68''	8,57''
moyennes				31,26''	9,02''	29,42''	8,49''

Bilan de l'expérimentation

La moyenne des 14 valeurs de Π (Soleil) issues des mesures de p_α est 8,91'' et celle des 14 valeurs issues des mesures de p_δ est 8,47''. **La moyenne des 28 valeurs de Π(Soleil) est 8,69'' (erreur relative de - 0,012).**

La moyenne des 20 valeurs de Π(Soleil) des 25 - 26 février est 8,785'' (erreur relative de - 0,001 !).

Les mesures faites à partir de p_α sont presque toutes supérieures à la valeur de référence (8,794''), contrairement aux mesures faites à partir de p_δ , qui sont presque toutes inférieures. Ce phénomène n'a pas d'explication. Et ceci est associé à une grande dispersion des valeurs. **L'écart-type des 20 valeurs des 25 - 26 février est $\sigma = 0,33''$.**

Détermination de la distance Terre-Soleil

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 : $d_{TS} = R / (\Pi \text{ (Soleil)})$.

La valeur moyenne $\Pi \text{ (Soleil)} = 8,69''$ donne **$d_{TS} = 151,4$ Mkm**. La valeur de référence pour le 25/02/2019, empruntée à Stellarium, est : $d_{TS} = 148,1$ Mkm. L'erreur relative sur cette distance est 0,022.

Remerciements

Cette expérimentation n'aurait jamais été entamée sans les encouragements de l'astronome Pascal Descamps (OBSPM), pilote de l'initiative de « Science participative » EROS2019, destinée à mesurer la parallaxe de l'astéroïde éponyme. Ses encouragements ont été déterminants, et je l'en remercie.

Les logiciels de calculs astronomiques, ceux de l'IMCCE en particulier, par leur facilité d'accès et d'usage, constituent une aide précieuse pour la compréhension des phénomènes et pour l'interprétation des mesures.

Daniel Descout - 08 avril 2019 - daniel.descout@wanadoo.fr