FEUILLETON

# À la Mesure du Ciel

**Ce feuilleton est consacré à l'une des disciplines sans doute les plus méconnues sinon les plus austères de l'astronomie : l'astrométrie ou la mesure de la position des astres dans le ciel. Elle est aussi l'une des premières activités des astronomes de l'Antiquité. Elle est au fondement de l'astronomie. Sans elle et sans le gain en précision associé à cette branche, acquis au fil du temps jusqu'à nos jours, l'astronomie n'aurait pu se développer. Il était donc urgent de revenir aux racines de l'astronomie.**

*— par Pascal Descamps*

ÉPISODE 12

# LA PROIE ET L'OMBRE

**Dans ses *Fables***, Jean de La Fontaine se plaît à nous montrer nos travers, nos faiblesses toutes humaines. Les plus familières de ces fables sont d'une telle justesse que leurs titres sont devenus des expressions idiomatiques classiques de la langue française. Qui ne sait ce que l'expression *lâcher sa proie pour l'ombre* signifie ? Le chien de la fable, trompé par le reflet de sa proie dans l'eau, « la quitta pour l'image », et faillit se noyer. Pour La Fontaine, « chacun se trompe ici-bas » en lâchant sa proie pour l'ombre. En revanche, *là-haut*, dans les cieux, il en va tout autrement, La Fontaine l'ignorait, et les astronomes ont appris à lâcher leur proie pour l'ombre qu'elle projette. La *proie* des astronomes, ce sont ces étoiles, ces petites planètes, si insaisissables au foyer d'un télescope qu'elles échappent à toute mesure directe de leur taille ou de leur forme. Il est alors nécessaire de lâcher sa proie pour ne plus se soucier que de son ombre qui viendra alors balayer la surface de la Terre, pour peu que l'on sache se trouver au bon endroit au bon moment. L'astronome se fait maintenant chasseur d'ombre.

Nous entrons dans le territoire des phénomènes astronomiques, événements survenant entre au moins deux corps célestes. À ce titre, ils sont prédictibles. Tout un chacun connaît les plus célèbres de ces phénomènes, les éclipses de Soleil ou de Lune, et aussi, plus rares, les passages de Vénus ou de Mercure devant le Soleil que nous avons déjà abordés (voir l'épisode 5 : « Deux planètes dans le Soleil » paru dans la Lettre d'information de juin 2023). Aux côtés de ces célèbres phénomènes qui ont fasciné l'humanité durant des siècles, d'autres, bien que peu familiers des feux de la rampe, plus discrets et plus réfractaires à se laisser observer, ont ouvert un autre champ d'investigation pour les astrométristes du XX^e^ siècle épris de précision et de nouveaux défis observationnels.

## De la Terre à la Lune, les révélations des éclipses

**Les éclipses**, qu'elles soient de Soleil ou de Lune, constituent les phénomènes célestes les plus spectaculaires qu'il soit donné d'observer à l'œil nu. Dès que l'homme a disposé de l'écriture, il s'est mis à consigner ces événements historiques depuis les plus anciennes civilisations – babyloniennes, chinoises... – en passant par les civilisations médiévales. En tout, près de 2 500 années d'observations archivées. Consigner un tel événement revient à noter une date d'observation, voire un instant en un lieu donné, surtout pour les éclipses totales de Soleil, dont la totalité n'est visible que depuis une bande étroite sur Terre balayée par l'ombre de la Lune (fig. 1).

La survenue de ces phénomènes et leur visibilité sur Terre mettent en jeu les mouvements simultanés de trois corps célestes : le déplacement orbital de la Terre autour du Soleil ; la rotation de la Terre autour de son axe de figure ; et le déplacement de la Lune le long de son orbite autour de la Terre. Leur prédiction exige donc de connaître parfaitement chacun de ces mouvements, et par conséquent de

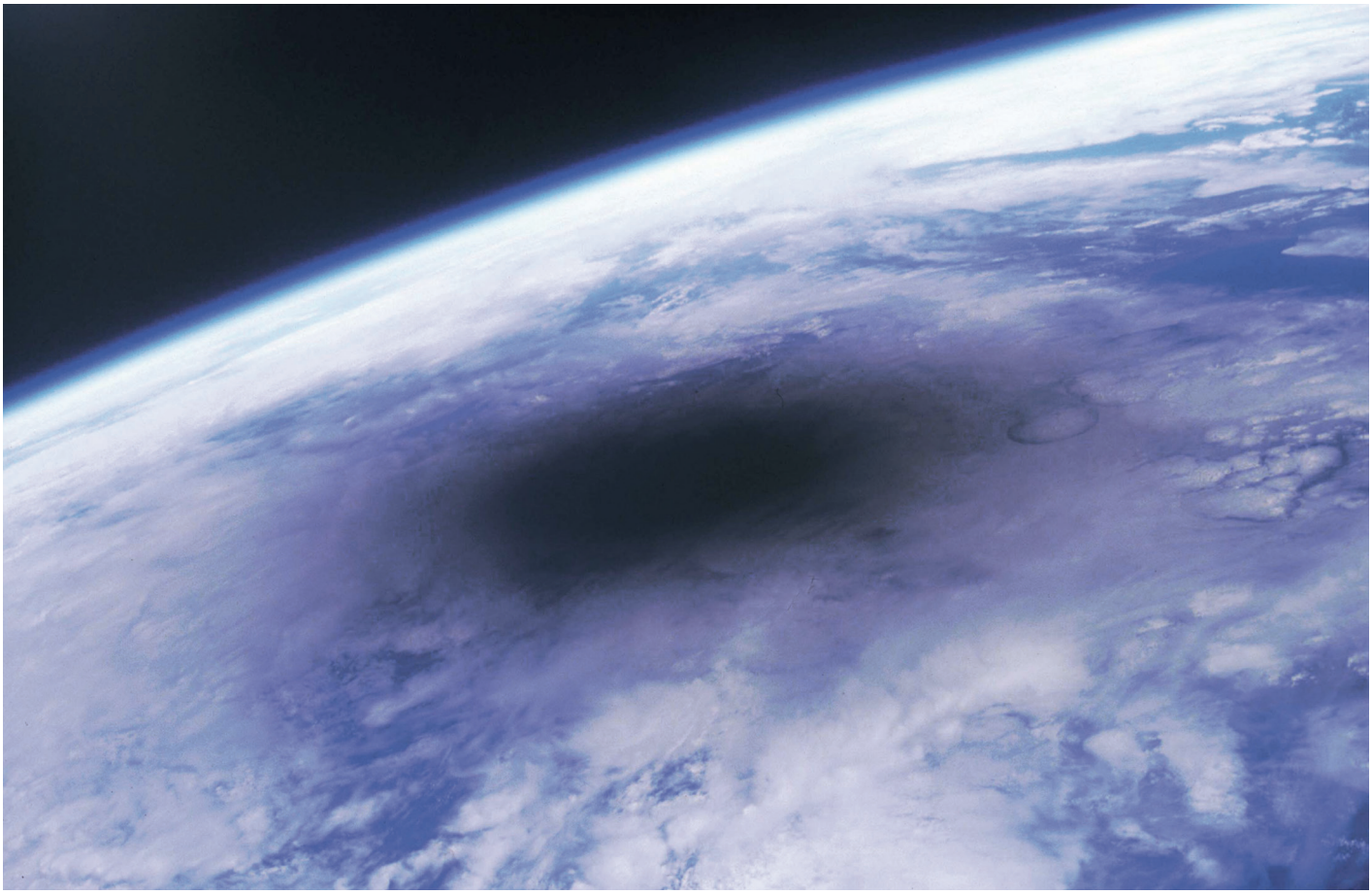

***Fig. 1 – Photographie du passage de l'ombre de la Lune sur la Terre lors de l'éclipse totale de Soleil du 11 août 1999 prise depuis la station MIR par l'astronaute français Jean-Pierre Haigneré.***

L'ombre se déplace à la surface de la Terre à près de 2000 km/h. L'éclipse est vue comme totale uniquement pour un observateur placé dans la zone plongée dans l'ombre de la Lune.

*Crédits CNES/J.-P. Haigneré*

disposer d'une théorie du mouvement de la Terre, d'une théorie du mouvement de la Lune et d'une connaissance précise de la rotation de la Terre. Cela fait beaucoup d'exigences à remplir simultanément. Cependant, si l'on dispose de tout ce matériel théorique, quiconque ou presque peut alors mettre en marche la machine à remonter le temps et retrouver ainsi, par le biais du calcul, les éclipses observées dans un passé lointain. Si tout est parfaitement huilé, les calculs rejoignent les observations. Mais il y a toujours des grains de sable par-ci, par-là, dans les rouages de la mécanique céleste, et ce sont les éclipses – en particulier l'ombre immense de la Lune sur la Terre –qui vont nous les révéler.

En 1695, à partir d'anciennes éclipses de Lune de l'*Almageste* de Ptolémée, Edmund Halley (1656-1742) découvre une accélération apparente dans le mouvement de la Lune. Mathématiquement, cela se traduit par la présence d'un terme proportionnel au carré du temps – dit *terme quadratique* –dans la longitude moyenne de la Lune. Cela s'appelle une « inégalité » – c'est un grain de sable. Attention, le terme proportionnel au carré du temps est parfois confondu avec l'accélération séculaire, dont il ne vaut en réalité que la moitié. L'une des conséquences d'une telle accélération serait une variation dans la durée de la lunaison (mois synodique de 29,5 jours). Il n'est apparemment jamais revenu sur le sujet, malgré ses recherches approfondies ultérieures sur le mouvement lunaire.

Peu à peu, cependant, d'autres astronomes s'intéressent à la question de savoir s'il existe réellement

une variation séculaire du mouvement de la Lune – la vitesse de la Lune sur son orbite croît-elle avec le temps ? Au milieu du XVIII^e siècle, cette question est devenue un thème important de l'astronomie. Le premier à donner une valeur à ce terme quadratique est Richard Dunthorne (1711-1775) en 1749 avec une valeur de 10″/siècle$^2$. La découverte et la mesure de l'accélération séculaire de la Lune reposent sur l'étude des observations anciennes et médiévales des éclipses de Lune et de Soleil. Ces « vestiges sacrés de l'Antiquité », comme les appelle Richard Dunthorne, étaient peu nombreux – les éclipses décrites dans l'*Almageste* de Ptolémée, une éclipse de Soleil observée par Théon d'Alexandrie au IV^e siècle de notre ère, et une poignée d'observations faites par des astronomes islamiques de la période médiévale étaient tout ce dont on disposait. Cette accélération séculaire de la Lune est faible, mais elle a un effet cumulatif significatif sur la position de la Lune lorsqu'elle est extrapolée sur plusieurs siècles. Une simple erreur de 1″/siècle$^2$ conduit ainsi à une incertitude de 100″ sur la position de la Lune au bout de 10 siècles, soit environ 3 minutes sur la prédiction des éclipses.

Le grand mathématicien Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), fondateur de la mécanique céleste, pour qui toutes les inégalités, apparentes ou non, observées dans les mouvements célestes peuvent être expliquées par la seule loi de la gravitation universelle de Newton, est le premier à considérer la question de l'accélération séculaire de la Lune par le moyen de la seule théorie. Le 23 octobre 1787, il présente devant l'Académie des sciences un « Mémoire sur les inégalités séculaires des planètes et des satellites ». Il montre que l'accroissement séculaire du moyen mouvement de la Lune (sa vitesse orbitale en somme) peut être parfaitement expliqué par la combinaison de l'action du Soleil sur la Lune et de la diminution de l'excentricité de l'orbite terrestre, qui a pour conséquence immédiate d'accélérer le mouvement orbital de la Lune. Cependant, on pourrait être tenté de penser qu'une telle accélération – synonyme de rapprochement de la Lune avec la Terre d'après la troisième loi de Kepler –devrait mener inexorablement à l'écrasement de la Lune sur la Terre. Laplace rassure et montre par l'analyse que ce mouvement séculaire en apparence est en vérité un mouvement périodique à très longue période : une fois parvenue à son minimum, l'excentricité de l'orbite terrestre repartira à la hausse, la Lune sera alors ralentie sur son orbite et prendra de nouveau ses distances avec la Terre. Son calcul le mène à une valeur du terme quadratique de 11,135″/siècle$^2$ – valeur qu'il ramènera à 10,18″/siècle$^2$ quelques années plus tard –, en très bon accord avec la mesure observationnelle de Dunthorne. Une fois de plus, le calcul a rendu compte de l'observation. Les observations anciennes d'éclipses sont par conséquent retrouvées par le calcul. Tout peut rentrer dans l'ordre. En corolaire, ce résultat conforte Laplace dans l'idée que la longueur du jour n'a pas varié de plus de 1/100^e de seconde depuis Hipparque, près de 2000 ans plus tôt. Il ajoute cependant que « si par des causes quelconques inconnues cette durée éprouvait quelque altération sensible, on le reconnaîtrait par le mouvement de la Lune, dont les observations, d'ailleurs si utiles, acquièrent par cette considération une nouvelle importance ». Pourtant, le grand Laplace s'est trompé… Une petite erreur de calcul aux conséquences très fâcheuses.

En 1853, dans un mémoire présenté devant la *Royal Astronomical Society* le 6 juin 1853, John Couch Adams (1819-1892) (fig. 2) – le grand rival anglais de Le Verrier lors de l'épisode tumultueux de la découverte de la planète Neptune en 1846 –pointe une erreur dans les calculs de Laplace. Celui-ci a intégré les équations différentielles du mouvement comme si l'excentricité de l'orbite de la Terre était constante. Adams rectifie le tir et parvient à une valeur de 8,3″/siècle$^2$ dans un premier temps, ramenée un peu plus tard à 5,78″/siècle$^2$, soit une valeur moitié moindre de celle calculée par Laplace ! Il l'écrit dans une lettre adressée à Charles-Eugène Delaunay (1816-1872) publiée en 1859. Delaunay est alors le grand spécialiste de la théorie de la Lune, membre du Bureau des longitudes, mais aussi grand

opposant à Le Verrier, alors directeur de l'Observatoire. Delaunay se fait donc un plaisir de confirmer les calculs d'Adams en 1859 en obtenant une nouvelle valeur de 6,11″/siècle[2].

***Fig. 2 – John Couch Adams (1819-1892).***
*Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris*

Que Laplace se soit trompé importe peu, ce qui compte, c'est l'impossibilité d'expliquer par la seule mécanique céleste la valeur totale de l'accélération séculaire mesurée un siècle plus tôt. Le doute s'installe. Une accélération apparente du moyen mouvement de la Lune pourrait aussi être la conséquence naturelle de l'augmentation progressive de la durée du jour sidéral, et donc d'un ralentissement de la rotation de la Terre. Souvenons-nous, l'erreur de Laplace et la coïncidence heureuse entre son résultat et l'observation l'avaient conduit à conclure à la constance de la rotation de la Terre. La variable donnant le temps dans les équations – l'argument temps dans le langage des mécaniciens célestes – découlait directement de la rotation de la Terre. Cette variable se doit d'être un temps newtonien idéal, parfaitement uniforme, sans aucune variation intrinsèque. La Terre était à cet effet la seule référence temporelle à disposition permettant de définir le temps solaire moyen par la durée du jour de 24 heures. Si la Terre ne tourne plus parfaitement uniformément, alors le temps de la théorie n'est plus un temps newtonien idéal, et tout se complique… Si la Lune semble parcourir en un jour sidéral des arcs de plus en plus longs, c'est que la durée du jour pourrait elle-même croître par suite d'un ralentissement de la rotation de la Terre. Ce n'est donc plus la Lune qui avancerait, mais ce serait l'horloge Terre qui retarderait, produisant une accélération *fictive*. Où est la vérité ? En 1865, Delaunay produit une nouvelle explication. Il avance l'hypothèse selon laquelle un ralentissement de la rotation terrestre par l'effet dissipatif des marées lunaires produirait une apparente accélération de la Lune.

***Fig. 3 – Charles-Eugène Delaunay (1816-1872).***
*Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris*

Vraisemblablement, les deux hypothèses sont à la manœuvre : la Lune aurait un mouvement séculaire variable et la Terre ralentirait dans sa rotation propre. Mais comment dans ce cas démêler cet imbroglio céleste ?

Jusqu'à une date récente, l'analyse des éclipses anciennes comportait deux inconnues principales : l'accélération de la Lune due aux marées et les changements à long terme de la rotation de la Terre. Ces deux phénomènes étaient fortement corrélés et toutes les tentatives pour les séparer n'étaient pas satisfaisantes, ce qui entraînait des estimations peu fiables pour les deux inconnues, même si certaines des données étaient potentiellement d'une bonne précision intrinsèque. Les mesures directes de l'accélération ne seront possibles qu'à partir de 1969, grâce aux rétroréflecteurs Apollo laissés sur la Lune. On s'est alors mis à tirer au laser sur la Lune, de façon très pacifique, afin de mesurer très précisément sa distance. Les résultats du LLR (*Lunar Laser Ranging*) montrent que la distance moyenne de la Lune par rapport à la Terre augmente de 3,8 cm par an.

De ces mesures, Michelle Chapront-Touzé et Jean Chapront (1939-2019) de l'IMCCE (Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides) ont montré en 2002 que l'accélération correspondante de la longitude écliptique de la Lune est de – 25,858″/siècle$^2$. Dans la théorie analytique complète du mouvement de la Lune qu'ils ont développée (ELP2000), la valeur actuelle du coefficient du terme quadratique est de – 6,870″/siècle$^2$ (en siècles d'années juliennes de 365,25 jours avec une origine en J2000). Ce terme est le fruit de trois contributions principales : les perturbations planétaires qui se montent à 5,8665″/siècle$^2$ (principalement la variation séculaire de l'excentricité solaire), les perturbations dues à la figure de la Terre (0,1925″/siècle$^2$) et celles dues aux marées, dont la valeur est de – 12,8125″/siècle$^2$ (forces dissipatives induites par les marées, donc l'accélération proprement dite). Ces contributions doivent être multipliées par 2 si nous voulons parler d'« accélération séculaire ». Ainsi, l'accélération séculaire de la Lune proprement dite est de – 25,858″/cy2. L'accélération est négative : en d'autres termes, il s'agit d'une décélération de la Lune qui s'accompagne d'un éloignement inexorable de la Lune, puisqu'elle provient des forces dissipatives induites par les marées luni-solaires. Ces valeurs et résultats ont bien évidemment été obtenus avec une nouvelle échelle de temps, introduite dans les éphémérides à partir de 1984, le Temps terrestre (TT), qui est une échelle de temps uniforme construite par les physiciens à partir du temps atomique. Les astronomes ont donc cessé simultanément d'être les « gardiens du temps » qui dérivait jusqu'alors de la rotation de la Terre qui elle-même, nous le rappelons, dérivait lentement.

Le plein potentiel des observations d'éclipses pouvait alors être réalisé et il était devenu possible de mesurer la vitesse de ralentissement de la Terre autour de son axe de rotation. En reprenant l'ensemble des éclipses observées, Morrison et Stephenson ont alors pu estimer en 2001 le ralentissement de la rotation de la Terre par l'augmentation de la durée du jour (DDJ) qui est de 1,7 ms/siècle par rapport à la durée standard de référence d'une journée qui est de 86 400 secondes SI (Système international). Sur la figure 4, les lignes droites correspondent à l'effet de la friction de marée seule (représentée par une ligne pointillée) et la tendance moyenne observée à long terme de la DDJ (ligne brisée). Le taux d'augmentation de la DDJ dû aux seules marées lunaires et solaires est de + 2,3 ± 0,1 millisecondes par siècle (ms/siècle). Ces valeurs ont été obtenues en adoptant une accélération séculaire de la Lune de – 26″/siècle$^2$. Il est clair qu'il existe une autre composante agissant dans le sens opposé qui diminue la vitesse de – 0,6 ± 0,1 ms/siècle. Cette accélération peut être associée au taux de changement de l'aplatissement de la Terre, attribué au rebond visqueux de la Terre solide suite à la diminution de la charge sur les calottes polaires après la dernière déglaciation.

Que signifie dire que la durée du jour augmente de 1,7 ms/siècle ? Au bout d'un siècle de 365,25 jours,

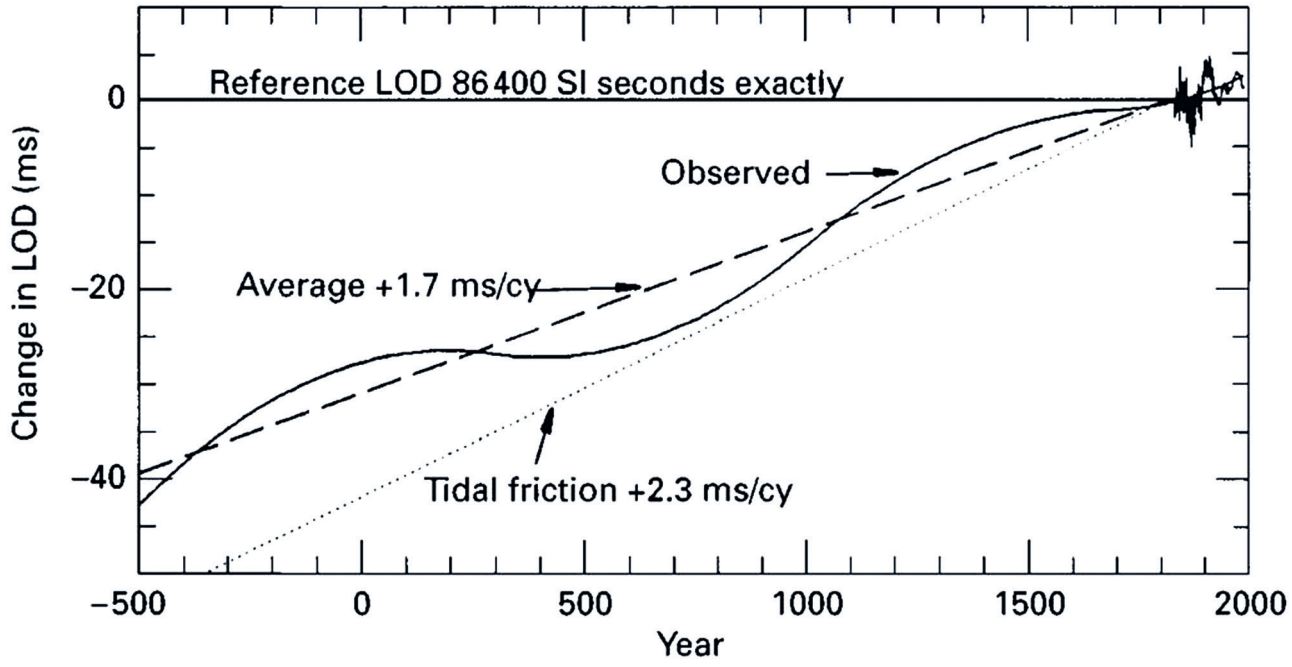


***Fig. 4 – Évolution du changement de la durée du jour (DDJ ou LOD en anglais) entre – 400 et + 1996.***
L'effet provenant de la seule friction de marée est de + 2,3 ms/siècle. La valeur mesurée est de + 1,7 ms/siècle.
*D'après Morrison et Stephenson, 2001*

la durée du jour sera donc de 86 400 s SI ou 24 h + 1,7 ms. Notre horloge se sera décalée de 100 × 365,25 × 0,0017 = 62 s. Cet effet est cumulatif : par conséquent, au bout d'un nombre *n* de siècles, le décalage de l'horloge sera de

$$62\,\mathrm{s} \times \sum_{k=1}^{n} \frac{k(k+1)}{2}$$

Pour *n* = 20, ou 2000 ans, cela donne un décalage de 3,6 h. On retrouve ce résultat dans l'analyse des éclipses anciennes (fig. 5). La différence de longitude entre les trajectoires calculées et observées, convertie en temps, est une mesure de la différence à cette époque entre le temps sur l'échelle de temps uniforme *Terrestrial Time* (TT) et l'échelle de temps de rotation de la Terre, le Temps universel (UT). De nombreux enregistrements fiables d'observations d'éclipses ont été effectués dans les quatre civilisations suivantes : l'ancienne Babylone, la Chine ancienne et médiévale, le monde arabe médiéval et l'Europe ancienne et médiévale. Le cas des éclipses de Soleil totales est particulièrement intéressant en termes de précision. Il n'est alors même pas nécessaire de connaître le moment exact de la journée auquel l'éclipse s'est produite, car le chemin de la totalité est étroit et cela fixe en soi la position de la Terre. L'incertitude de l'observation est la largeur projetée de la ceinture de totalité parallèle à l'équateur. Il suffit de connaître la date et le lieu où l'éclipse a été déclarée totale. Cependant, il est essentiel que l'éclipse ait été effectivement totale, et pas seulement presque totale. Dans le cas contraire, l'incertitude de l'observation serait beaucoup plus grande.

De nos jours, la connaissance précise du taux de ralentissement de la rotation terrestre et de l'accélération séculaire de la Lune permet aux astronomes de faire de la chronologie d'événements historiques anciens pour lesquels il a été fait mention d'une éclipse. Par exemple, l'historien antique Hérodote rapportait que « Durant la sixième année de la guerre entre les Lydiens et les Mèdes, lors d'une bataille l'obscurité se fit ». La machine astronomique à remonter le temps nous permet de nos jours de dater précisément cette bataille : elle eut lieu le 28 mai – 584 (calendrier julien), date à laquelle une éclipse totale se produisit.

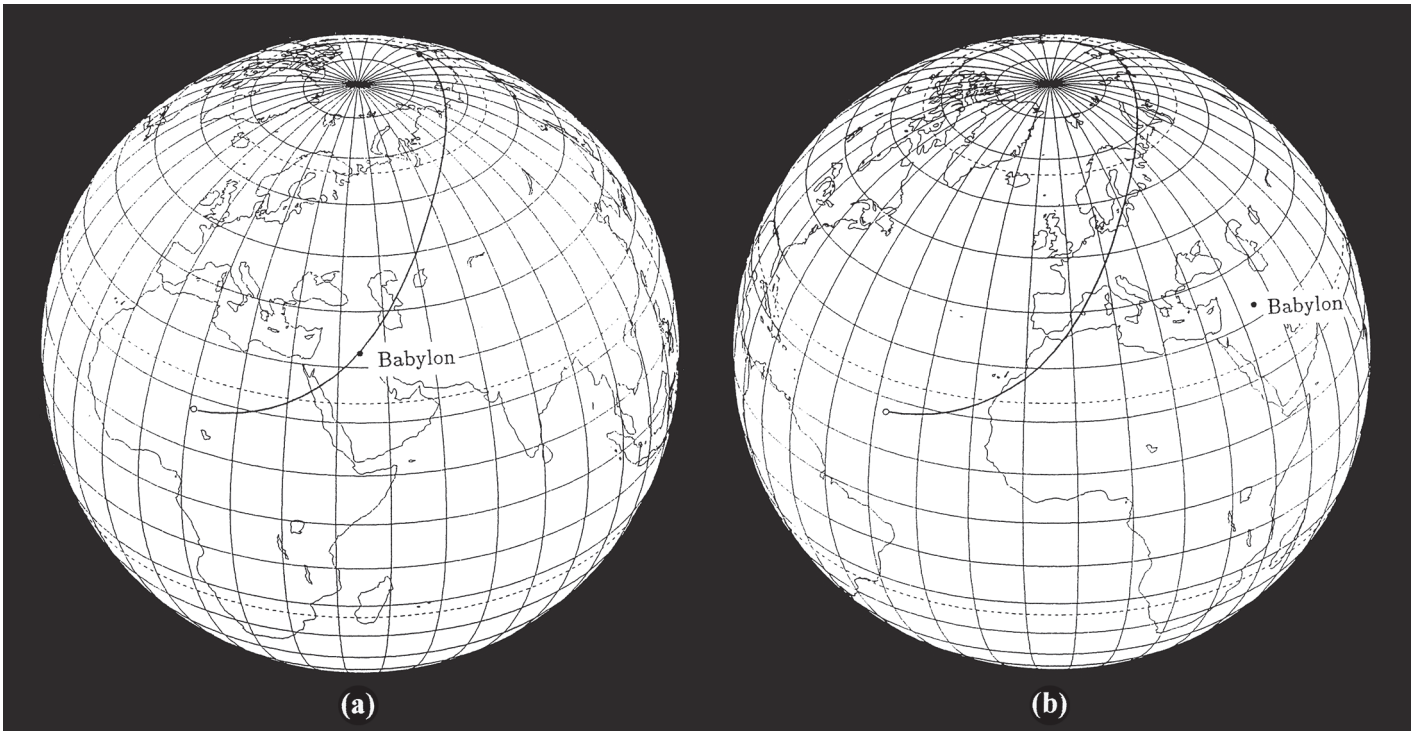


***Fig. 5 – (a) trajectoire observée de l'éclipse totale de Soleil de 136 av. J.-C. passant au-dessus de Babylone et (b) trajectoire calculée avec l'hypothèse d'une durée du jour constante.***

La différence en longitude terrestre est de 48,8°, ce qui est équivalent à un décalage de 3,25 h dans l'instant de survenue de l'éclipse (d'après Morrison et Stephenson, 2001). La Terre tournait donc plus *rapidement* que de nos jours.

*Crédits Morrison et Stephenson, 2001*

## Au bord de l'ombre

En 1818, le jeune physicien Augustin Fresnel (1788-1827) (fig. 6), né avec la Révolution, écrit : « Rien ne devrait être plus simple que le phénomène des ombres portées, surtout quand l'objet éclairant est réduit à un point lumineux ; et cependant rien n'est plus compliqué. » Cette sentence frappe l'esprit, elle est en préambule de la première section de son mémoire sur la diffraction de la lumière. Quoi de plus *naturel* pour une ombre d'être d'une sombre obscurité, éventuellement légèrement diffuse vers ses contours ? C'est du moins l'idée que nous pouvons nous en faire spontanément à partir de notre expérience sensible quotidienne. Pourtant, Fresnel poursuit et nous dit que ces ombres nous trompent, car « elles sont bordées de trois franges colorées très distinctes, quand on se sert de la lumière blanche, et d'un bien plus grand nombre encore de bandes obscures et brillantes, lorsque la lumière qu'on emploie est sensiblement homogène ». Ainsi, trouve-t-on de la lumière vers les bords de l'ombre. Cette lumière provient de la source même, Fresnel ne le découvre pas, mais sera le premier à l'expliquer complètement et précisément.

Ce phénomène singulier a été découvert un peu plus de 150 ans auparavant, par Francesco Maria Grimaldi (1618-1663). Réalisant de nombreuses expériences sur le comportement de la lumière pour tenter d'en comprendre la nature, il découvre que l'ombre d'un objet placé dans un faisceau lumineux étroit est plus grande que ne l'indique la géométrie de l'objet (*Physico-Mathesis de lumine* […], Bologne, 1665, œuvre posthume). Honoré Fabri (1607-1688) exprime l'interprétation de Grimaldi de ce résultat comme suit :

> [La lumière incidente] *ne tombant pas sur un corps réfléchissant ne peut pas être réfléchie ; elle ne peut pas non plus*

*être réfractée, car elle se prolonge à travers le même milieu ; l'expérience ne peut tenir ni être expliquée en aucune façon, à moins que nous ne disions que la lumière est un corps ténu fluide qui est dispersé lorsqu'il se heurte à l'obstacle, et qui, de ce fait, heurte et dévie les rayons adjacents.*

Remarquons l'analogie faite avec le mouvement des vagues dans l'eau. Henry Oldenburg (1619-1677) lui a accordé un compte-rendu modérément long de près de trois pages. Il note que Grimaldi a introduit un quatrième mode de propagation de la lumière, c'est-à-dire « non seulement directement, et par réfraction et réflexion, mais aussi par diffraction », inventant ainsi un nouveau mot technique pour le caractériser, celui de *diffraction*. Cependant, l'essence même d'une expérience de diffraction typique du XVII[e] siècle – un faisceau étroit de lumière partiellement obstrué par un bord tranchant –n'est même pas mentionnée.

Quand Fresnel propose une interprétation simple du phénomène, permettant de comprendre les figures de diffraction observées à grande distance des obstacles. Il s'appuie notamment sur la théorie ondulatoire de la lumière proposée par Christian Huygens (1629-1695), publiée en 1690. Fresnel est convaincu de la validité de la théorie ondulatoire de la lumière. Il calcule les effets produits par deux ondes se rencontrant et formule trois hypothèses :

- Les vibrations lumineuses sont sinusoïdales ;
- La diffraction est due à la superposition d'ondes provenant toutes de la source et d'ondelettes réémises par les bords de l'écran diffractant ;
- Les vibrations se renforcent lorsqu'elles sont dans le même état vibratoire – différence de marche valant un nombre entier de longueurs d'onde, Fresnel dit qu'elles sont en phase –et au contraire, se détruisent lorsqu'elles s'opposent – différence de marche valant un nombre impair de demi-longueurs d'ondes, elles sont en *opposition de phase*.

Il conduit ses calculs, les compare à ses expériences, et finalement confirme ainsi ses trois hypothèses de départ. Il énonce le principe (principe de Fresnel) : « Les points lumineux, dans les expériences de diffraction, sont toujours un assemblage d'une infinité de centres de vibration. »

***Fig. 6 – Augustin Fresnel (1788-1827).***
*Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris*

À l'Académie, les sceptiques sont nombreux et l'un deux, le mathématicien Siméon Poisson (1781-1840), fait même une prédiction, conséquence directe de la théorie de Fresnel si celle-ci est vraie : le centre de l'ombre d'un écran circulaire doit être éclairé comme si l'écran n'existait pas, du moins lorsque les rayons y pénètrent sous des incidences

peu obliques. Voici donc une expérience cruciale à mener que François Arago (1786-1853) réalise victorieusement sur l'ombre d'un écran de 2 mm de diamètre. Fresnel a raison.

Par la suite, avec l'avènement de la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell (1831-1879), la diffraction apparaît comme une conséquence directe des équations de Maxwell. On peut observer le phénomène de diffraction lorsqu'une onde, qu'elle soit électromagnétique ou mécanique, rencontre un obstacle qui masque une partie du front d'onde. La diffraction est perceptible dès que les dimensions caractéristiques de l'obstacle ne sont pas grandes vis–à-vis de la longueur d'onde.

La diffraction est longuement perçue par les astronomes comme un obstacle à la perception des détails fins d'un objet astronomique quelconque au foyer d'un télescope. L'image d'une source ponctuelle – ce à quoi peut être assimilée une étoile –n'est pas ponctuelle, elle a l'aspect d'une tâche circulaire – si l'ouverture de l'instrument est circulaire, ce qui est assez souvent le cas en astronomie –auréolée d'anneaux concentriques alternativement sombres et brillants. En cause, la diffraction de la lumière par le bord circulaire de l'objectif. Cette tache est connue sous le nom de « tache d'Airy ». La seule façon de réduire la taille de cette tache est d'augmenter l'ouverture du télescope. La diffraction est donc limitative de la résolution maximale accessible d'un instrument astronomique. On ne peut s'y soustraire, on ne peut que s'y soumettre.

Toutefois, près de 150 ans après la théorie de Fresnel, les astronomes s'aperçoivent que la diffraction n'est en définitive pas si gênante que cela et qu'elle pourrait même être mise à profit pour *voir* les étoiles, c'est-à-dire pour en mesurer le diamètre, si petit qu'il est inaccessible au foyer de tout télescope. La diffraction permettrait donc de descendre à des niveaux de résolution, et donc de détails, bien en deçà de la limite fixée par la diffraction elle-même. Comment un tel paradoxe est-il possible ?

## *La Lune, mesureur d'étoiles*

Les expériences de Grimaldi et de Fresnel ont montré que le passage de la lumière d'une source ponctuelle sur une arête vive engendre un réseau de franges de diffraction au niveau d'un écran récepteur. Ce schéma expérimental se retrouve à l'identique dans une catégorie très particulière de phénomènes célestes : les occultations d'étoiles par la Lune. L'astronomie se distingue des autres sciences dans son incapacité à réaliser des expériences sur les objets célestes. La seule façon d'expérimenter est d'observer un phénomène. Le phénomène est à l'astronome ce que l'expérience est au physicien. L'occultation d'une étoile par la Lune revient à intercepter la lumière d'une source stellaire, assimilée à un point, par le limbe lunaire. Elle doit donc s'accompagner d'un réseau de franges de diffraction qui se déplacent à la surface de la Terre à la vitesse prodigieuse d'environ 900 m/s – la Lune se déplaçant à une vitesse de 0,5″/s, vue depuis le centre de la Terre (fig. 7). N'y aurait-il pas moyen d'extraire quelque information physique cachée sur l'étoile émettrice au sein de ces franges d'interférence ?

Depuis l'époque de Ptolémée, les occultations d'étoiles constituent une méthode simple et efficace pour suivre le mouvement angulaire de la Lune par rapport à l'arrière-plan stellaire. Les observations à l'œil nu de quelques étoiles brillantes réalisées il y a environ deux mille ans ont été utilisées pour étudier les changements séculaires du mouvement de la Lune dont nous avons déjà parlé précédemment. Les données d'occultation lunaires enregistrées après 1955, couplées à des observations de passages de Mercure couvrant un intervalle de temps de deux siècles environs, ont ainsi permis à Morrison et Ward d'obtenir en 1975 une valeur de l'accélération séculaire très proche de la valeur moderne (voir ci-dessus) de – 26″/siècle$^2$.

En 1908, le mathématicien Percy McMahon (1854-1929) a l'idée de se servir de la Lune pour mesurer

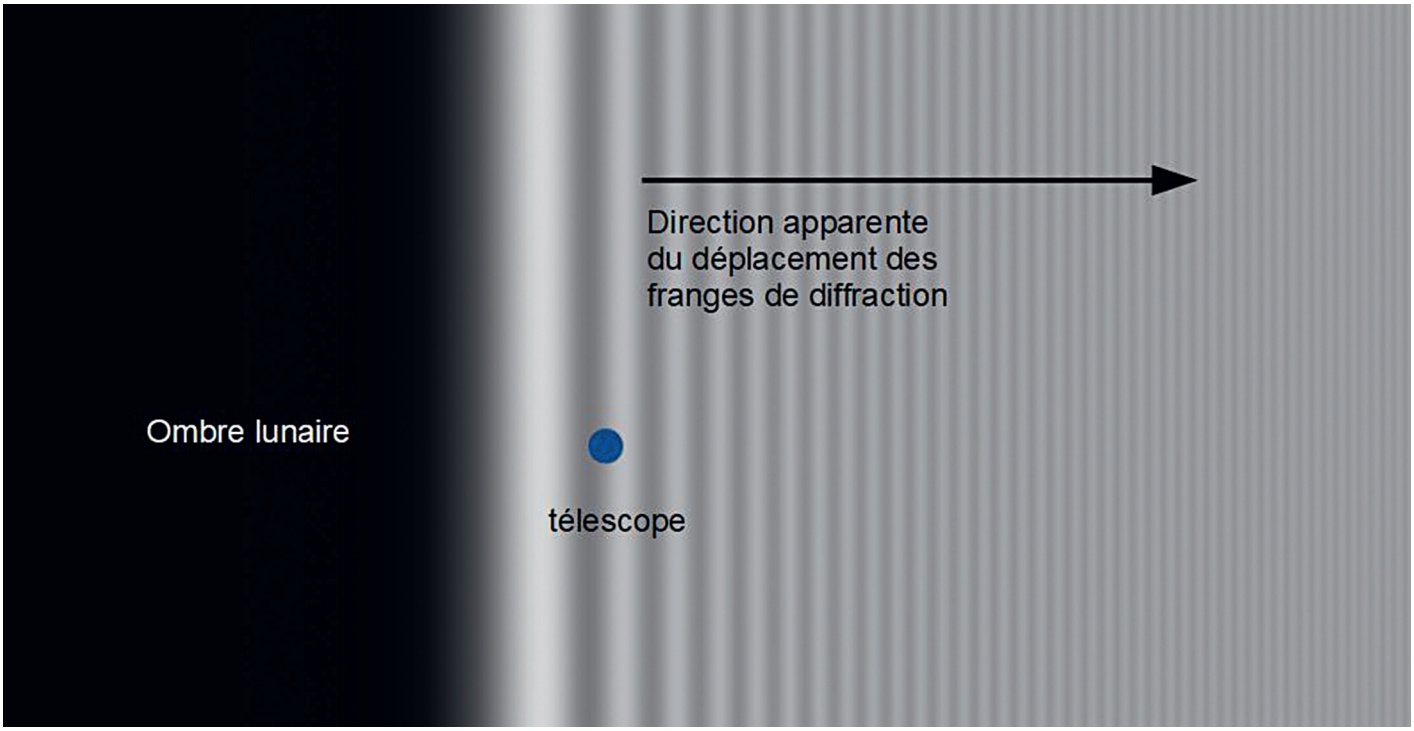


***Fig. 7 – Franges de diffraction engendrées par l'occultation d'une étoile par le bord lunaire.***

Un photomètre rapide placé au foyer du télescope enregistre le passage des franges de diffraction sous la forme d'une variation rapide du flux lumineux.

*Crédits P. Descamps/IMCCE*

une donnée physique des étoiles, leur diamètre. Il écrit :

> *Le temps nécessaire à la Lune pour occulter une étoile fixe a été qualifié d'"instantané" ou de "moins d'un clin d'œil", et d'autres termes indiquant également l'opinion que le temps en question est à la fois inappréciable et incommensurable. Des intervalles de temps très courts sont cependant mesurables.* [ … ] *La question se pose alors de savoir combien de temps il faut probablement à la Lune pour occulter une étoile moyenne assez brillante.* [ … ] *Si l'on suppose que le diamètre apparent de l'étoile est de l'ordre de 1/1000", le temps mis par la Lune pour l'occulter serait d'environ 1/500 s si l'étoile était dans l'axe de déplacement du centre de la Lune. Cette occultation directe est la plus défavorable pour satisfaire notre objectif. En général, l'occultation sera oblique et le temps d'occultation plus long.*

Le diamètre de certaines étoiles vient d'être mesuré par interférométrie (voir épisode 11 : « L'ère des coudés » paru dans la Lettre d'information de janvier 2024) et la chronographie rapide se développe, ce qui rendrait possible une telle mesure. Mais McMahon néglige l'effet de la diffraction que vient lui rappeler un an plus tard Arthur Eddington (1882-1944) :

> *L'affaiblissement de la lumière d'une étoile à l'instant de sa disparition derrière la Lune était traité* [par McMahon] *comme un simple problème d'optique géométrique. Lorsque l'on tient compte de la diffraction de la lumière de l'étoile par le limbe de la Lune, ses résultats nécessitent quelques modifications.*

Eddington ne perçoit cependant pas le potentiel qu'il y a à tirer des franges de diffraction, se contentant de rectifier l'approche de MacMahon. Il estime qu'une étoile ponctuelle aurait un diamètre trompeur de 0,008″ correspondant au temps de dispari-

tion donné par la première frange ; par conséquent, l'approche du problème du point de vue de l'optique géométrique est plutôt désespérée, sauf dans le cas d'une étoile ayant un très grand diamètre angulaire.

Il faudra encore attendre vingt ans pour que Williams et Whitford montrent en 1939, indépendamment l'un de l'autre, que les franges de diffraction changent d'aspect dès lors que la source n'est plus considérée comme parfaitement ponctuelle. Williams complète l'argument d'Eddington. S'il est vrai que l'échelle de temps du phénomène demeure inchangée pour des étoiles dont le diamètre apparent est compris entre 0,001″ et 0,01″ de degré, en revanche, la forme même du motif de diffraction est modifiée selon la valeur du diamètre apparent de l'étoile. Il pose le principe de la nouvelle méthode proposée :

Si l'on admet que l'effet de la lune, en ce qui concerne la diffraction, est le même que celui d'un écran plan perpendiculaire à la ligne de visée et situé de telle sorte que son bord soit tangent au limbe de la lune à l'endroit où se produit l'occultation le phénomène se réduit au problème familier de la diffraction sur un bord droit. Pour une source lumineuse ponctuelle, l'intensité de l'éclairage augmente de zéro à l'intérieur de l'ombre géométrique de l'écran, atteint un quart de l'intensité de l'onde libre au bord et, au-delà de l'ombre, présente une série d'oscillations qui convergent rapidement vers l'intensité de l'onde libre. Le point à soulever est simplement que le caractère des oscillations pour la lumière provenant d'une source étendue n'est pas le même que pour une source ponctuelle et qu'il dépend, de manière prédictible, du diamètre de la source. En fait, le problème peut être inversé de telle sorte que si la variation d'intensité des franges est observée, il est possible d'estimer le diamètre de l'étoile.

L'observation d'une occultation lunaire revient à obtenir une séquence photométrique rapide d'une étoile disparaissant (ou réapparaissant) derrière le limbe lunaire avec un échantillonnage en temps de 1-10 ms et une durée inférieure à 0,5 s. Les premiers succès arrivent dans les années 1950 sur une série d'occultations de l'étoile supergéante Antarès. Le diamètre de l'étoile est si grand (0,040″) que finalement les effets de diffraction n'ont joué qu'un rôle mineur.

La figure 8 montre la courbe de variation d'intensité lumineuse des franges que l'on peut attendre pour des étoiles présentant des disques uniformément éclairés de différentes tailles. Il apparaît que l'écart entre les différentes configurations de diamètre d'étoile et celles dues à une source ponctuelle est le plus marqué dans les franges les plus fines, et devient significatif dans les franges les plus larges à mesure que le diamètre apparent augmente. Pour les diamètres apparents supérieurs à 0,010″, le motif des franges est essentiellement obscurci, il devient extrêmement difficile de les distinguer, mais les effets de diffraction jouent encore un rôle dans la définition de la forme générale des courbes de lumière. On note également que la limite de sensibilité – autrement dit la résolution –est autour de 0,001″-0,002″, ce qui comparativement est la résolution théorique (uniquement limitée par la diffraction sur l'ouverture d'un télescope soit le diamètre de la tache d'Airy) d'un télescope de 125 m d'ouverture ! Il est possible de mesurer des diamètres stellaires jusqu'à ~1 mas (1/1000$^{e}$ de seconde de degré) avec une précision de 0,1-0,2 mas. De là, on peut en déduire la température effective de l'étoile à partir de son flux bolométrique $F$ (flux rayonné par unité de surface) et de son diamètre angulaire $\phi$. Comme les étoiles ont des diamètres inférieurs à 0,05″, c'est une source majeure de détermination de $T_{eff}$. La température effective est l'une des quelques quantités physiques essentielles caractérisant une étoile, elle peut être obtenue au moyen de la relation suivante :

$$F = \sigma \left[ \frac{\phi}{2} \right]^2 T_{\text{eff}}^4$$

Dans $\sigma$ la constante de Stefan-Boltzman.

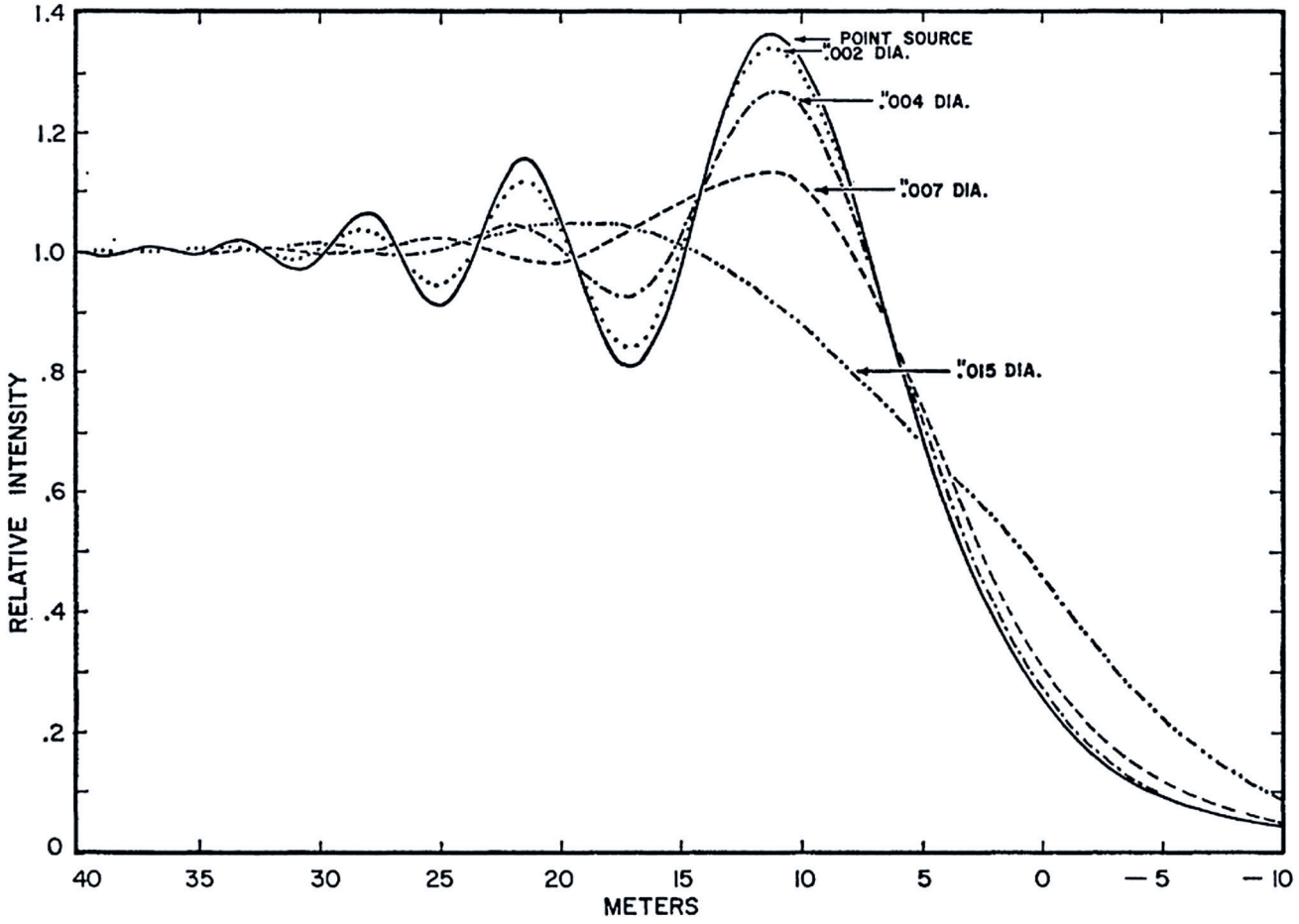


***Fig. 8 – Courbe de lumière d'une occultation par la Lune pour différents diamètres apparents d'étoiles.***

Le procédé est efficace pour des diamètres compris entre 0,002″ et ~0,03″. Au-delà, la mesure de la durée de disparition de l'étoile selon l'optique géométrique suffit à accéder à la valeur du diamètre apparent.

*Crédits Nather et Evans, 1970*

En résumé, deux faits importants doivent être reconnus : premièrement, le phénomène de diffraction en jeu lors d'occultations stellaires par la Lune se produit bien en dehors de l'atmosphère terrestre et, deuxièmement, l'ouverture du télescope n'y joue aucun rôle. Le limbe lunaire se comporte comme une frontière franche qui va diffracter la lumière de l'étoile en arrière-plan. Dans le motif de franges se trouve enchâssée l'information à haute résolution recherchée.

Le grand succès des occultations lunaires tient également à une combinaison heureuse entre la distance et la taille de la Lune. Si la Lune était plus proche, le phénomène serait probablement trop rapide pour être enregistré. Si la Lune était plus éloignée, les phénomènes seraient plus faciles à observer, mais aussi plus rares puisque couvrant une zone du ciel plus petite. Pour une Lune plus grande, il aurait fallu en outre s'accommoder autant que faire se peut avec une atmosphère lunaire ! Autres avantages, des télescopes d'une taille de 1 à 2 mètres suffisent avec une instrumentation simple, un photomètre rapide. Les observations sont insensibles aux turbulences atmosphériques. Il est même possible d'enregistrer des courbes de lumière à travers les nuages. Et cela ne demande que quelques dizaines de minutes de temps de télescope !

Bon, il y a quand même des inconvénients : seules les étoiles se trouvant sur le chemin de la Lune sont susceptibles d'être occultées, mais aussi un tel événement se produit nécessairement à un instant très précis qu'il importe de ne pas manquer. La Lune couvre sur son orbite environ 10 % du ciel, il y a

donc de grandes chances qu'un événement intéressant se produise à une époque quelconque. Si l'événement est manqué – pour raisons météo ou autres obéissant à la fameuse loi de Murphy –tout n'est pas perdu pourvu que l'on soit patient, puisque les mêmes circonstances se reproduiront 18 ans plus tard conformément au cycle lunaire de Méton.

## Ombres chinoises sur la Terre

Le 5 mars 1901, Charles André (1842-1912), directeur de l'observatoire de Lyon depuis 1879 après avoir commencé sa carrière en 1865 comme astronome adjoint à l'Observatoire de Paris du temps de la direction de Le Verrier, publie une observation photométrique de l'astéroïde Éros dont l'intérêt astronomique pour la détermination de la parallaxe solaire a déjà été évoqué à plusieurs reprises dans les chapitres précédents (voir l'épisode 6 : « Des oppositions constructives » paru dans la Lettre d'information de juillet-août 2023, et l'épisode 10 : « Le ciel à la carte » dans celle de décembre 2023). Son rapprochement avec la Terre en cette année 1901 est scruté par les astronomes du monde entier. André est un familier des étoiles doubles photométriques. Par conséquent, la courbe de lumière d'Éros lui rappelle indubitablement celle d'un système stellaire binaire dont chacune des composantes s'occulte de façon successive et réciproque (fig. 9). André n'imagine à aucun moment que l'allure de la courbe de lumière puisse être engendrée par un objet unique, mais dont la forme s'éloigne très notablement d'une sphère, voire est très allongée. Ainsi, il appelle les astronomes à poursuivre le suivi photométrique d'Éros avant qu'il ne redevienne « semblable d'aspect aux autres petites planètes » en raison du déplacement relatif de la Terre et d'Éros. Cependant, moins de trois mois

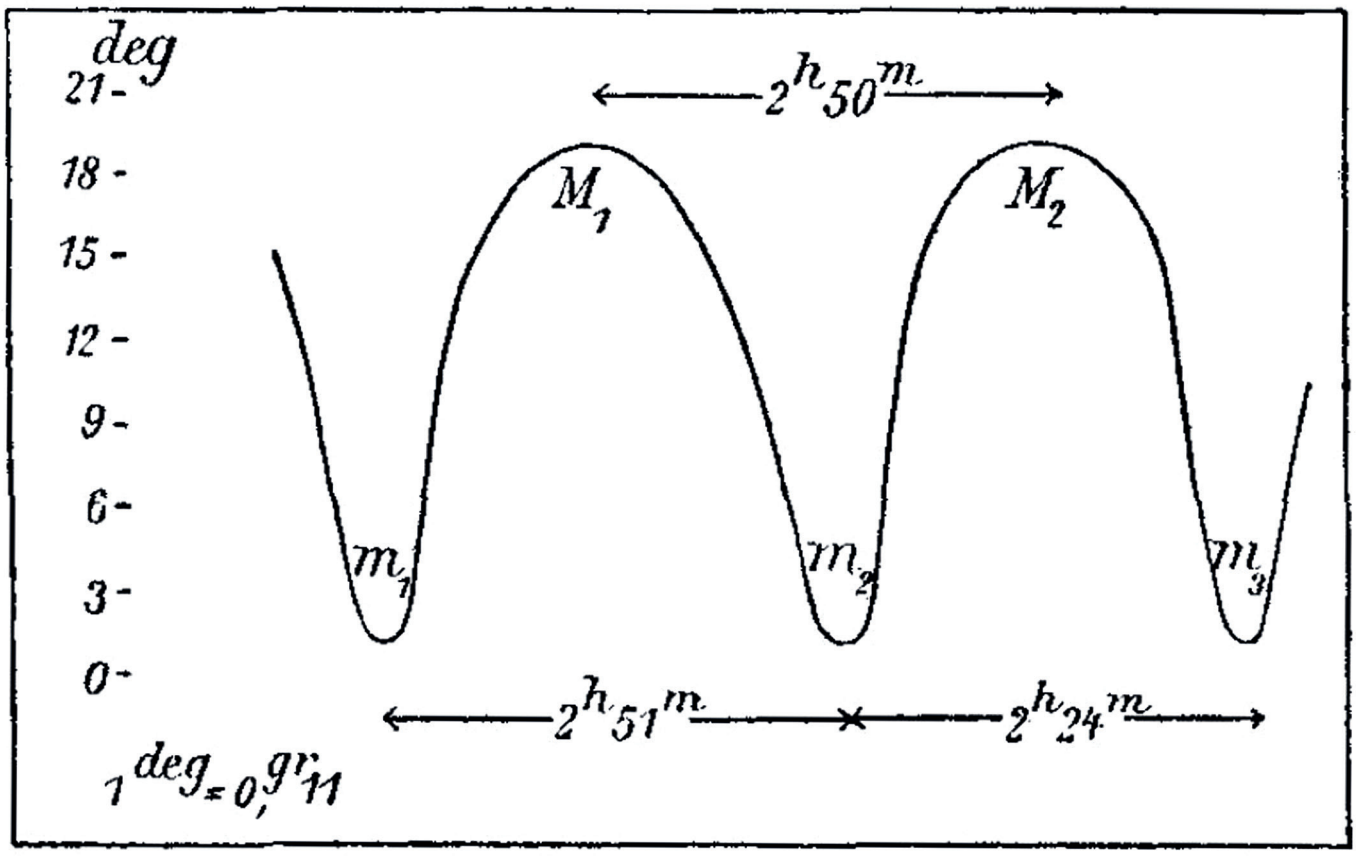


*Fig. 9 – Courbe de lumière de l'astéroïde Éros publiée par Charles André en 1901.*
*Domaine public*

plus tard, dès le 23 mai 1901, l'astronome autrichien Egon von Oppolzer (1869-1907) doute du caractère double de l'astéroïde et propose d'attribuer ces variations d'éclat à la rotation d'un corps irrégulier.

Les astéroïdes n'ont effectivement pas une forme sphérique ou même approchant une sphère, à l'exception du premier d'entre eux, Cérès. À la problématique de leur taille s'en ajoute donc une nouvelle, celle de leur forme. Gordon Taylor (1925-2020) de l'observatoire royal de Greenwich a le premier l'idée de publier en 1952 une série de prédictions d'occultations d'étoiles par les principales petites planètes Cérès, Pallas, Juno et Vesta. L'orbite de ces quatre petites planètes est déjà suffisamment bien connue pour permettre des prédictions relativement fiables. En outre, leur diamètre a déjà pu être évalué de façon micrométrique ou interférentielle (voir l'épisode 11 : « L'ère des coudés » paru dans la Lettre d'information de janvier 2024), mais leur forme demeure très incertaine. Réussir à prédire l'occultation d'une étoile brillante par un petit corps revient à calculer sur Terre la trace par laquelle l'ombre de celui-ci viendra à passer (fig. 10). L'étoile est si lointaine que l'ombre du petit corps formée par le faisceau de lumière parallèle provenant de l'étoile correspondra exactement à son contour géométrique, tel qu'il serait obtenu si l'on pouvait le tracer au crayon sur une grande feuille blanche perpendiculaire à la direction étoile-astéroïde-Terre.

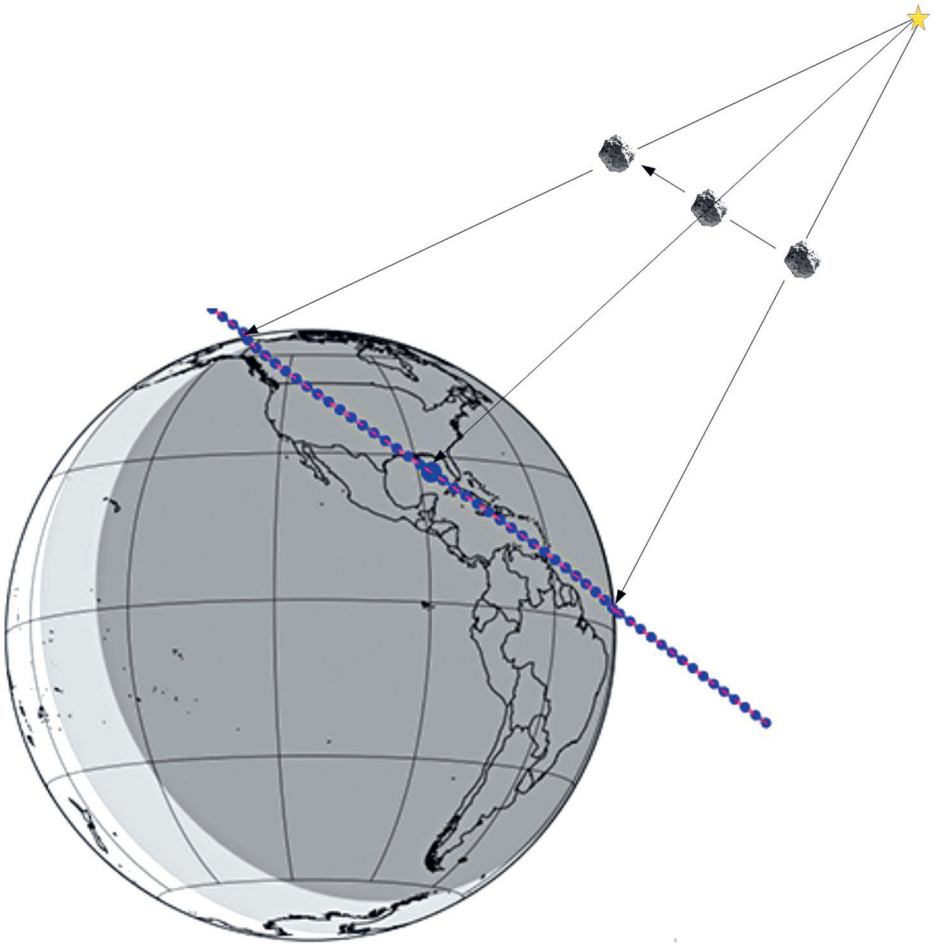

***Fig. 10 – Schéma de l'occultation d'une étoile par un astéroïde.***

L'ombre portée de l'astéroïde traverse la Terre sur une bande étroite qui oblige les observateurs à se déplacer au sein de cette bande en espérant que la prédiction relative à la trace de l'ombre sur Terre soit fiable. Celle-ci requiert bien évidemment deux exigences sur la précision de la connaissance des positions respectives de l'étoile occultée et de l'astéroïde.

*Crédits P. Descamps/IMCCE*

Avec les occultations stellaires, une nouvelle méthode de mesure du diamètre et de la forme est ainsi proposée, dont la précision astrométrique attendue est très élevée, quelques centaines de mètres à quelques kilomètres seulement. Cependant, la méthode a son revers de médaille, qui finalement en fait aussi tout l'attrait : elle nécessite des moyens télescopiques mobiles et des réseaux d'observateurs volontaires et disponibles. Taylor exprime parfaitement cette nécessité :

> *Ce type d'observation, qui ne nécessite que de petits télescopes, est facilement réalisable par les astronomes amateurs. En fait, on peut dire qu'il n'est pas seulement souhaitable, mais essentiel, que les astronomes amateurs coopèrent pour que ce projet aboutisse. Sauf peut-être en Europe, les observatoires professionnels sont si peu dispersés par rapport à la largeur de « l'ombre » de l'occultation que cette ombre pourrait traverser une grande région sans couvrir un seul observatoire professionnel.*

La première observation fiable rapportée est celle d'une occultation par Pallas le 2 octobre 1961. Elle a été prédite dans une circulaire de Taylor. À l'observatoire de l'État d'Uttar Pradesh, l'occultation est observée visuellement et photoélectriquement. L'occultation dure 25,54 s, durée à partir de laquelle Gordon Taylor déduit un diamètre d'au moins 430 km à comparer avec la meilleure mesure micrométrique réalisée alors, 490 km (la valeur moderne est de 498 km).

La seconde observation publiée est celle du 24 janvier 1975. Elle concerne notre désormais emblématique petite planète, Éros, qui cette fois s'apprête à passer devant κ Gem (Mv = 3,7). Elle fait l'objet d'une campagne d'observation sur plusieurs sites et permet d'obtenir pour la première fois un profil de la petite planète la présentant sous une forme très allongée d'environ 20 km de long sur 8 km de large (fig. 11). L'exploit mérite d'être souligné, car Éros est réellement une petite planète, et il aura fallu la mobilisation d'une vingtaine d'observateurs répartis sur un petit ruban de terre du Connecticut, large de 20 km, pour y arriver. Brian O'Leary, Brian Marsden et leurs collègues concluent ainsi sur la réussite de l'entreprise grâce à la mobilisation d'astronomes amateurs dont elle avait fait l'objet :

On espère que cet événement suscitera chez les professionnels et les amateurs un intérêt accru pour la prévision et l'observation de futures occultations de planètes mineures, car elles ne sont pas particulièrement rares. La faible précision de la majorité des éphémérides des planètes mineures rend très difficile la tâche de prédire les occultations de tous les objets, à l'exception de quelques-uns.

Les premières campagnes d'envergure se développeront par la suite et se focaliseront autour d'une sélection d'astéroïdes dont le diamètre est estimé – par des considérations purement photométriques –supérieur à 150 km. Ceci parce que leur forme ne s'écarte que peu d'un ellipsoïde et parce que la probabilité d'observer un tel événement est bien plus grande du fait d'une trace au sol plus large.

La connaissance des diamètres des astéroïdes est essentielle pour comprendre leur évolution dynamique et morphologique, pour en faire des destinations potentielles pour les missions spatiales. Le diamètre est généralement rapporté à son volume sous la forme d'un diamètre équivalent à une sphère ayant le même volume que ledit astéroïde. Quand on ne dispose que d'une mesure de l'éclat d'un astéroïde, connaissant sa distance et moyennant certaines hypothèses sur la façon dont sa surface absorbe, réfléchit et réémet la lumière solaire reçue, il est possible d'estimer ce diamètre. On parle alors de *diamètre photométrique*. La plupart des diamètres connus d'astéroïdes sont incertains à plus de 50 % en raison des difficultés liées au calcul du diamètre à partir de la luminosité apparente du petit corps. Le

problème principal provient du fait que la luminosité apparente d'un astéroïde est une fonction complexe de la géométrie d'observation, de sa forme irrégulière, de la phase de rotation, de l'albédo, de l'absence d'atmosphère et de l'aspect de surface rugueux recouvert par un régolithe.

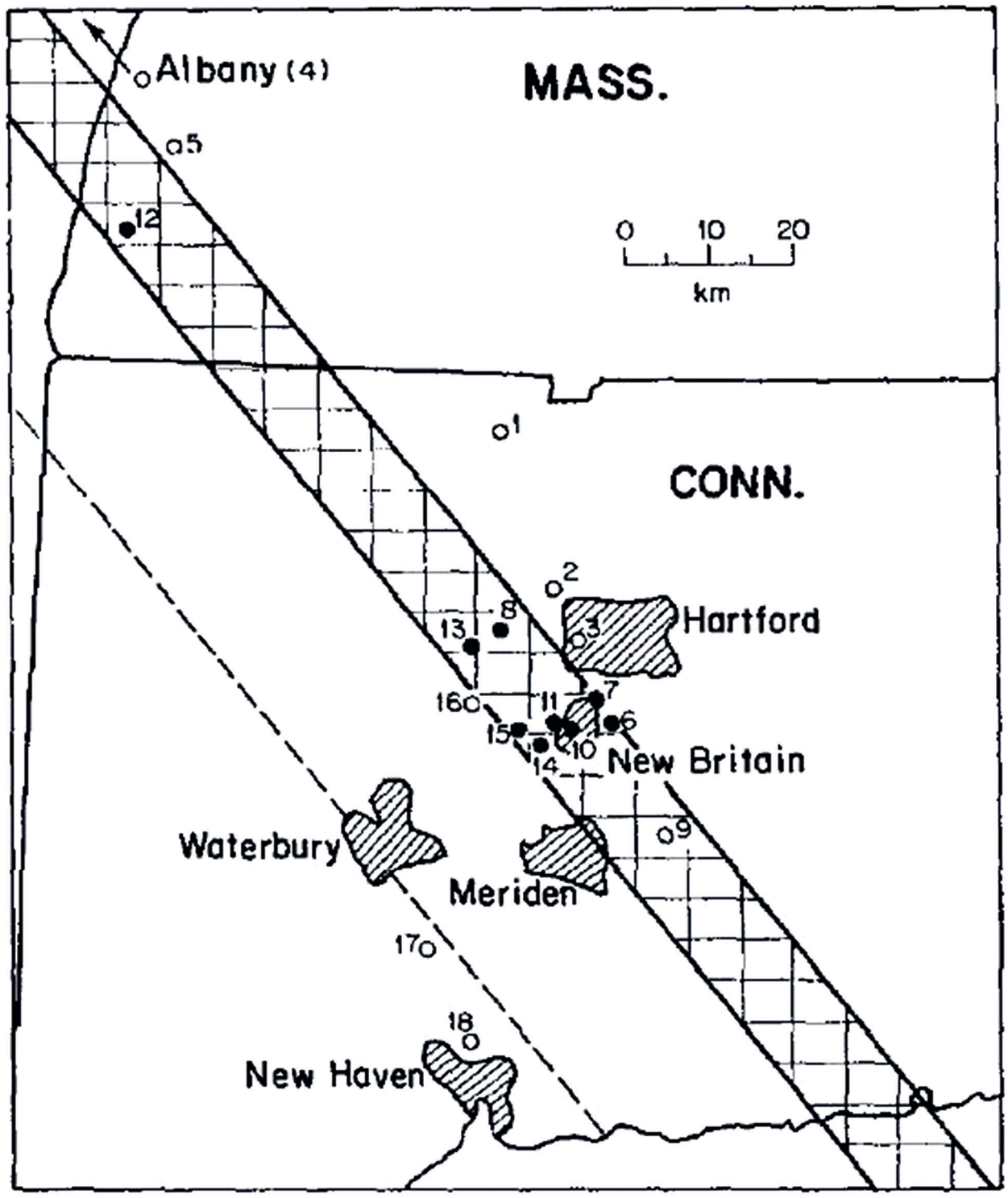


***Fig. 11 – Trajectoire de l'occultation de κ Gem par Éros le 24 janvier 1975 vers 0 h 20 UTC, au-dessus de la Nouvelle-Angleterre.***

Les cercles ouverts indiquent des observations négatives, et les cercles fermés, des observations positives. La zone hachurée correspond à la solution elliptique ou graphique ; la ligne brisée indique la limite ouest pour une solution circulaire. Il apparaît clairement que l'ombre portée d'Éros sur la Terre est fortement non circulaire.

*Crédits O'Leary et al., 1976*

## *Les chasseurs d'ombre, des amateurs éclairés*

Le succès des occultations astéroïdales dépend significativement du nombre d'observateurs qui se déploient au sein de la bande par laquelle passe l'ombre de l'astéroïde. Ces observateurs sont majoritairement des astronomes amateurs passionnés, formés et particulièrement bien équipés en termes d'instrumentation. Ce sont des chasseurs d'ombre agissant au sein de différents réseaux et capables de se mettre en mouvement très rapidement. Pour un événement donné, les observateurs se coordonnent et doivent se déplacer pour se placer sur la trajectoire prévue de l'occultation sur Terre. Les stations mobiles à petite ouverture (< 20 cm) sont donc idéales pour enregistrer les occultations stellaires. De nombreuses observations sont effectuées à partir du domicile de l'observateur. Certains observateurs sont mobiles et se rendent sur le lieu de la trajectoire prévue. Grâce à ces évolutions, la fiabilité des observations rapportées est passée de 50 % en 1990 à plus de 96 % à partir de 2008. Dans le même temps, le nombre annuel d'événements signalés est passé d'environ 10 en 1990 à 586 en 2019. La plupart d'entre eux sont affiliés à un ou plusieurs des réseaux suivants :

- Réseau européen d'occultation des astéroïdes (EAON)
- *International Occultation Timing Association* (IOTA)
- *International Occultation Timing Association – European Section* (section européenne) (IOTA-ES)
- Réseau japonais d'information sur les occultations (JOIN)
- *Trans Tasman Occultation Alliance* (TTOA)

Concrètement, l'observation d'une occultation stellaire consiste à enregistrer la durée de la disparition d'une étoile derrière un astéroïde. Connaissant le mouvement apparent de l'astéroïde sur le plan du ciel, obtenu à partir de son éphéméride, cette durée peut être ensuite convertie en une longueur physique sur le disque de l'astéroïde, appelée *corde*. Si plusieurs observateurs enregistrent le même événement à partir de différents endroits sur Terre, ils verront chacun une corde différente, le profil bidimensionnel de l'astéroïde pourra ainsi être dessiné sur le plan du ciel. La principale différence avec l'imagerie à haute résolution réside dans le profil, constitué uniquement du limbe pour les occultations, et du limbe et du terminateur (ligne de séparation entre le jour et la nuit, entre la partie dans la lumière solaire et la partie dans l'ombre) pour l'imagerie. Les deux techniques fournissent le profil bidimensionnel de la cible tel qu'il est projeté sur le plan du ciel à l'époque des observations.

En raison des incertitudes liées à la position des étoiles et des astéroïdes sur le ciel, il existe généralement une incertitude de quelques dizaines de kilomètres dans la localisation de la trajectoire de l'occultation sur Terre, ce qui oblige les observateurs à se disperser sur une grande zone pour couvrir l'événement. Cela empêche généralement une couverture dense du profil de l'astéroïde. Lorsque seules quelques cordes sont disponibles, l'événement ne fournit que des informations limitées sur la taille, et peu ou pas sur la forme de l'astéroïde. Les prédictions d'occultation actuelles suffisamment précises ne concernent que les étoiles du catalogue Hipparcos et les astéroïdes de grande taille (au moins quelques dizaines de kilomètres). Une incertitude de 50 ms dans les temps se traduit par une incertitude de seulement 300 m dans la longueur de la corde, typique pour un astéroïde de la ceinture principale (à 1,5 au de la Terre avec un mouvement apparent de 10″/h). Le plus grand défi reste l'incertitude de l'éphéméride pour l'astéroïde. Pour un astéroïde de la ceinture principale, un déplacement angulaire de 0,01″ (1 mas) équivaut grossièrement à un déplacement de l'ombre de l'astéroïde d'environ 1 km. L'incertitude des éphémérides pour la

plupart des astéroïdes de la ceinture principale est généralement supérieure à environ 40 mas, ce qui signifie que l'incertitude de la position de la trajectoire est généralement supérieure à 40 km. Avec le catalogue stellaire Gaia de l'Agence spatiale européenne (ESA) et la mise à jour des orbites des astéroïdes, cette incertitude sur la position a diminué de manière significative de façon à se réduire au niveau du kilomètre, rendant les futures occultations plus faciles à prédire, et donc à observer.

Une autre source d'incertitude résulte de la synchronisation absolue de chaque corde, nécessaire pour les aligner correctement sur le plan du ciel. Les occultations observées à l'œil nu souffraient du fait que la synchronisation absolue était médiocre. Depuis une dizaine d'années, grâce à la disponibilité de systèmes de positionnement et de chronométrage peu coûteux (par exemple, le *Global Positioning System* – GPS), les occultations stellaires deviennent de plus en plus précises.

Globalement, les occultations stellaires peuvent fournir des mesures précises de la taille et de la forme d'un astéroïde, telles qu'elles sont projetées sur le plan du ciel. Cependant, les événements sont rares pour une cible donnée. Les occultations sont donc très utiles dans les ensembles de données combinées, par exemple pour donner une échelle à des modèles de forme tridimensionnels autrement sans dimension (par exemple, les modèles de forme tridimensionnelle qui sont maintenant obtenus par inversion des courbes de lumière de rotation des astéroïdes).

L'ensemble des données collectées jusqu'à présent contient plus de 15 000 observations effectuées par plus de 3 300 personnes du monde entier, concernant plus de 4 400 événements sur une période de plus de 40 ans. La grande majorité des observateurs ont effectué ces observations à leurs propres frais, y compris lorsqu'ils ont parcouru des distances considérables. Leur observation a également permis de découvrir 76 nouvelles étoiles doubles. De ces données, il a été possible d'accéder au diamètre soit par ajustement d'un modèle de forme tridimensionnelle, soit par l'ajustement d'une simple ellipse bidimensionnelle capable d'enserrer l'ensemble des cordes d'occultation. La figure présente quatre observations d'occultation stellaire pour lesquelles un modèle de forme 3D était déjà disponible pour chaque astéroïde impliqué. Ainsi, son ajustement aux cordes enregistrées permet de *gonfler* ou *dégonfler* le petit corps jusqu'à ce qu'il s'adapte parfaitement aux cordes. Le diamètre équivalent est alors déterminé avec une précision exceptionnelle et également le centre de masse qui pourra être utilisé pour une astrométrie de position (fig. 12).

Trois exemples significatifs :

- **Cérès** : la mission spatiale Dawn (NASA, 2007-2018) a été l'occasion de déterminer les dimensions de Cérès : 964,4 × 964,2 × 891,8 km, soit un diamètre équivalent en volume de 939 km. L'occultation du 13 novembre 1984, avec seulement 13 cordes, a permis la mesure d'un diamètre équivalent de 937 ± 3 km.
- **Vesta** : la mission Dawn a également permis de déterminer ses dimensions : 570,4 × 555,4 × 447,6 km pour un diamètre à volume équivalent de 521,5 km. L'occultation du 4 janvier 1991, avec 19 cordes, a permis après ajustement d'aboutir à un diamètre de 524 km, à peine 0,5% plus grand que le diamètre obtenu par Dawn.
- **Éros** : la mission spatiale Near Shoemaker (NASA, 1996-2001) qui a survolé Éros lui a mesuré un diamètre équivalent de 16,8 km. Les occultations du 13 décembre 2011 et du 12 mars 2019 ont quant à elles résulté en une mesure du diamètre ajusté de 16,7 km.

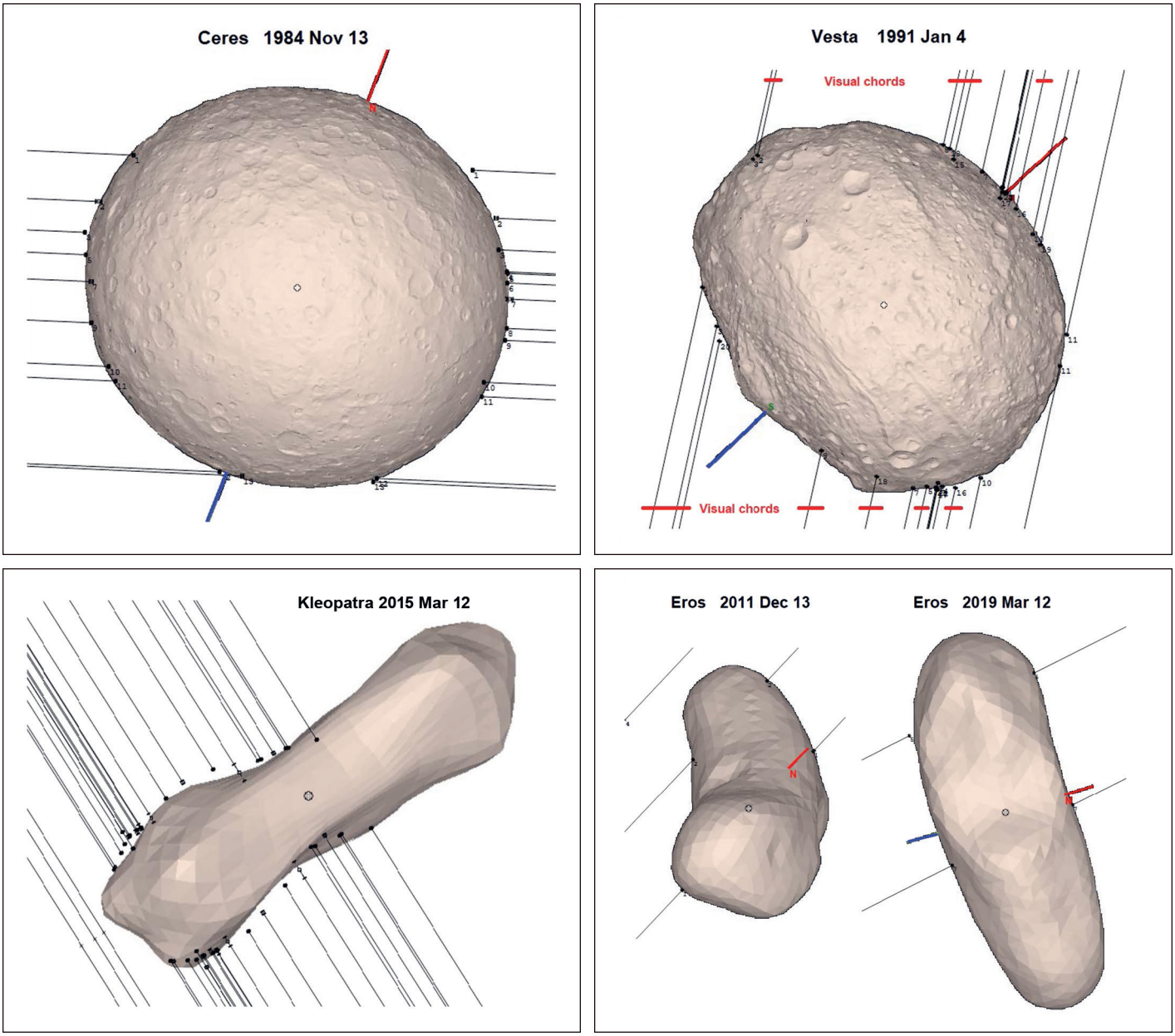


***Fig. 12 – Occultations par quatre planètes mineures pour lesquelles un modèle de forme 3D était disponible.***

Les cordes d'occultation pour différents observateurs sont reportées. Lors de l'occultation, la corde est interrompue. Pour chacun, le centre de masse résultant de l'ajustement du positionnement et du diamètre du modèle aux cordes observées est visualisé par un cercle.

*Crédits Herald et al., 2020*

## *Le futur de l'ombre : l'exploration du Système solaire lointain*

L'ombre est devenue l'une des clés de la connaissance scientifique pour peu qu'on sache l'appréhender. Depuis les temps les plus reculés, seule l'ombre de la Lune était l'objet de l'attention des hommes. Ce n'est que vers la moitié du siècle dernier que l'ombre a été réellement découverte. Si l'astronomie est le plus généralement racontée comme issue de la lumière, véritable *messager céleste* – titre de l'un des ouvrages les plus emblématiques de Galilée écrit en 1610 –, elle se raconte aussi à travers l'ombre. Kepler l'avait très bien compris lorsque, dans son *Paralipomena* (1604), il écrit que « toutes les observations célestes se font au moyen de la lumière et de l'ombre ».

La traque de l'ombre nécessite de très hautes précisions astrométriques dans la connaissance de la position des étoiles et des objets du Système solaire pour être en mesure de réaliser des prédictions d'une très haute fiabilité. Plus l'astrométrie de ces objets progresse, plus les potentialités d'exploration du Système solaire par le biais des occultations stellaires se développent. Soixante-dix ans après les premières prédictions qui ne concernaient alors que les objets les mieux connus et les plus imposants en taille du Système solaire – les astéroïdes de la ceinture principale dont la taille dépasse les 500 km –et les étoiles les plus brillantes, il est maintenant possible de prédire et d'observer ces phénomènes pour des corps très petits, de taille inférieure au kilomètre – ou très éloignés, comme certaines planètes naines au-delà de Neptune. Trois exemples majeurs viennent illustrer les pleines potentialités des occultations stellaires de ces dix dernières années.

Le 3 juin 2013, Chariklo, petit corps de 124 kilomètres de rayon orbitant entre Jupiter et Saturne à 2 milliards de kilomètres de la Terre, classé dans la famille des Centaures, révèle, à la surprise gé-

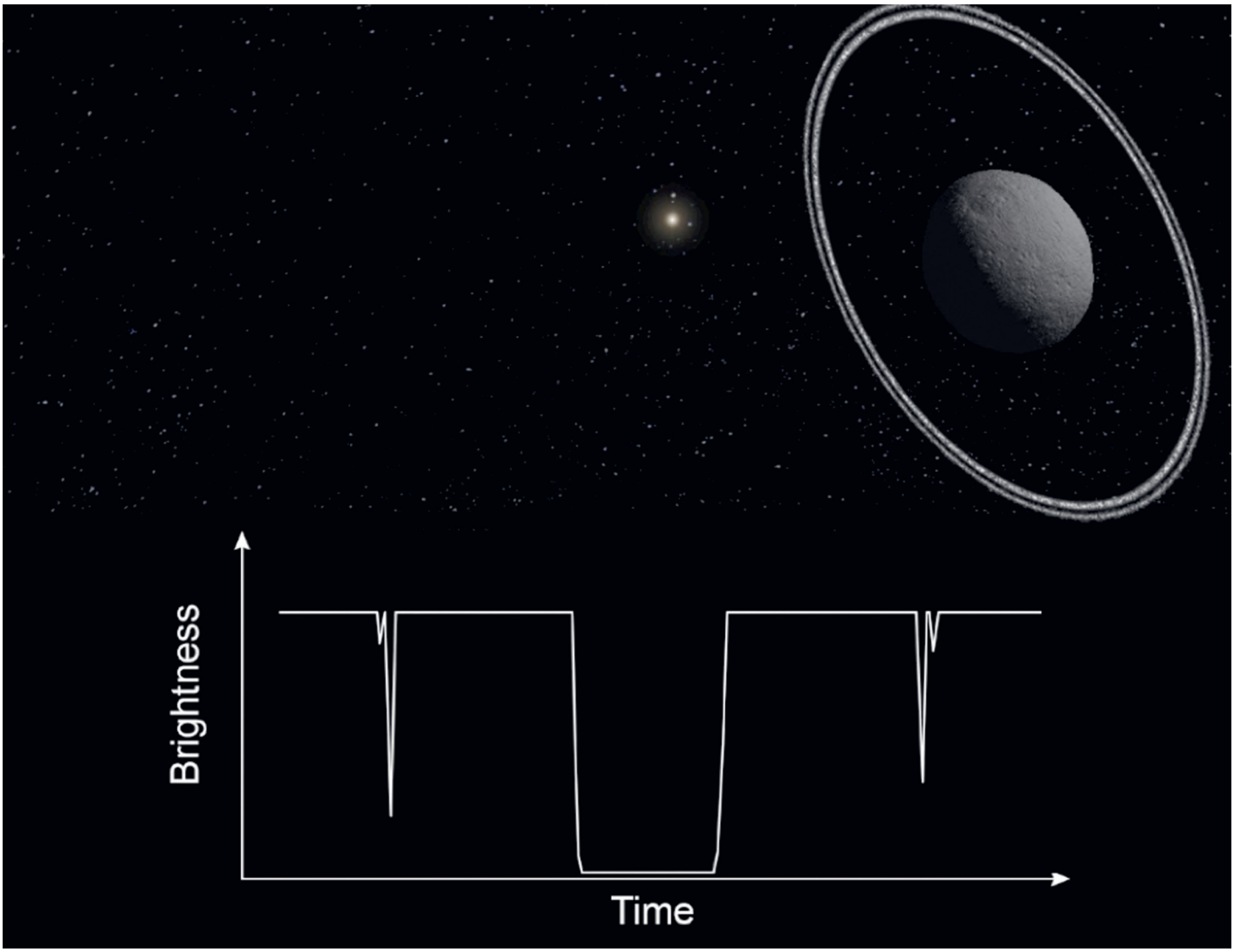


***Fig. 13 – Chariklo.***

La courbe de lumière représente la luminosité de l'étoile en fonction du temps. Les deux premiers petits pics révèlent le passage des deux anneaux une première fois devant l'étoile, puis l'absence de luminosité correspond à l'occultation stellaire par Chariklo. Enfin les deux derniers petits pics, symétriques aux premiers, attestent du second passage des deux anneaux devant l'étoile.

*Crédits L. Maquet/IMCCE*

nérale, qu'il est pourvu, tout comme la géante Saturne, d'un système d'anneaux. Ces anneaux sont découverts à l'occasion d'une occultation observée depuis une quinzaine de sites situés en Amérique du Sud (au Brésil, en Argentine, en Uruguay et au Chili). Deux brèves diminutions de la luminosité de l'étoile, symétriquement avant et après le passage de Chariklo devant l'étoile, indiquent avec certitude la présence d'anneaux. Ce système d'anneaux présente un rayon d'environ 400 kilomètres et est constitué de deux anneaux minces, homogènes et circulaires, séparés de 8 kilomètres (fig. 13).

Le 21 janvier 2017, l'occultation de l'étoile URAT1 533-182543 par Hauméa, l'une des cinq planètes naines officiellement répertoriées par l'Union astronomique internationale (UAI), donne lieu en Europe à une vaste campagne d'observation. Ces observations ont permis d'affiner et de révéler des caractéristiques étonnantes d'Hauméa, déjà connue pour sa forme ellipsoïdale faisant penser à un cigare, et pour sa rotation rapide qui en est la cause. Hauméa est un ellipsoïde dont les trois axes ont pour longueur respective : 2 320 km, 1 705 km et 1 025 km. La valeur de 2 320 km est en fait une limite inférieure ; par ces dimensions, elle s'avère ainsi presque plus grande que Pluton (d'un diamètre de 2 375 km). Les observations ont permis de mettre au jour l'existence d'un anneau dense autour de la planète naine, une première concernant les objets transneptuniens (fig. 14). D'un rayon de 2 290 km, l'anneau est situé dans le plan équatorial de la planète ; il semble également coïncider avec le plan orbital de Hi'iaka, son satellite principal. Sa largeur est d'environ 70 km et son opacité est d'environ 50 %. Par conséquent, il a absorbé environ la moitié du flux lumineux de l'étoile lors de l'occultation.

Enfin, tout récemment, une limite a été repoussée, celle de la prédiction réussie de l'occultation stellaire par un très petit corps, l'astéroïde géocroiseur Apophis. Cet astéroïde fascine et inquiète, car il effectue régulièrement des passages proches de la Terre : par exemple à 16,8 millions de kilomètres en mars 2021, ou bien sûr en avril 2029, période à laquelle sa venue est attendue à une distance très rapprochée de la Terre, à seulement 31 000 km, soit 12 fois plus proche que la Lune et un peu à l'extérieur de la zone des satellites géostationnaires. Sa trajectoire est donc surveillée de près depuis sa découverte en 2004. Les 7 et 22 mars 2021, deux occultations stellaires par Apophis sont observées pour la première fois, aux États-Unis. Apophis devient ainsi le premier objet de quelques centaines de mètres – 380 m de diamètre seulement –à être observé par occultation stellaire. Les positions déduites sont complémentaires et équivalentes en précision aux observations radars, avec l'avantage d'être beaucoup moins coûteuses. Cette détection n'a été rendue possible que par la précision du catalogue stellaire Gaia, dont nous parlerons dans le prochain chapitre, et par des mesures radars réalisées aux premiers jours de mars 2021 de façon à améliorer encore davantage la précision de la connaissance de son orbite et de son éphéméride. Le dernier ingrédient de cette réussite a été la participation d'astronomes amateurs équipés de télescopes mobiles. Au total, 3 stations ont enregistré l'événement du 7 mars et une station a enregistré celui du 22 mars, qui a duré moins de 0,1 seconde.

De grandes ambitions sont formées grâce à la méthode des occultations stellaires. Elle pourrait permettre de sonder les profondeurs du Système solaire, à commencer par le monde des objets transneptuniens (OTN ou TNO en anglais pour *Trans-Neptunian Objetcs*) qui se situe au-delà de l'orbite de la planète Neptune. Les objets lointains du Système solaire sont essentiels pour mieux comprendre l'histoire et l'évolution de sa périphérie. Ce monde nous est cependant encore en grande partie inconnu. Il est peuplé d'une myriade de petits corps, mais aussi de planètes comme les planètes naines Éris et Hauméa. Il pourrait également abriter en son sein, aux confins du Système solaire, une neu-

vième planète selon l'hypothèse avancée par deux Américains en 2016. Cette planète serait une sorte de super-Terre – dix fois plus grande que la Terre – et orbiterait autour du Soleil en dix ou vingt mille ans à la distance faramineuse de 380 au (380 fois la distance Terre-Soleil) !

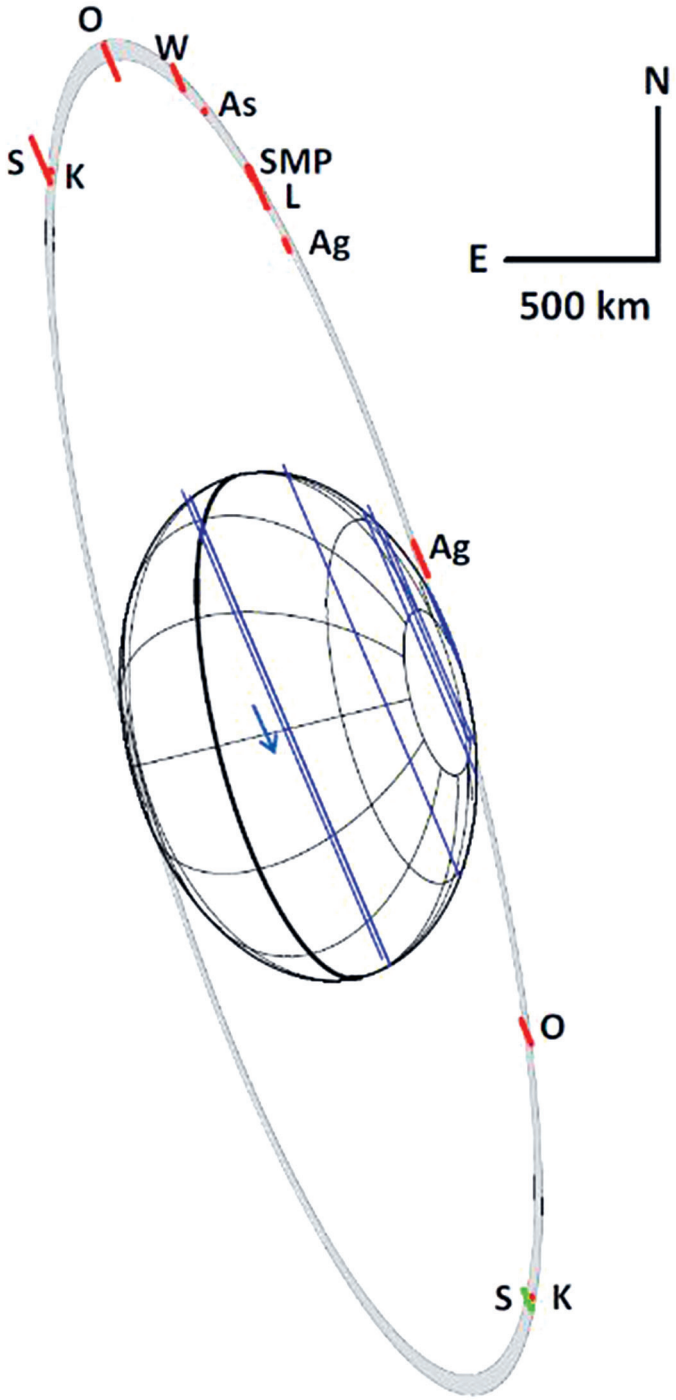


***Fig. 14 – Forme projetée du système d'Hauméa formé de la planète naine et de ses anneaux.***

Les lignes bleues sont les cordes d'occultation du corps principal projetées dans le plan tangent du ciel, telles que vues depuis neuf sites d'observation. Les segments rouges sont les cordes secondaires relatives aux anneaux. Les lettres renvoient aux initiales des noms des observateurs.

*Crédits Ortiz et al., 2017*

La prédiction de la survenue de ces événements est un point clé de cette exploration, mais des prédictions suffisamment précises ne sont actuellement disponibles que pour une poignée d'objets. Grâce à l'astrométrie de la mission spatiale Gaia et à des relevés du ciel profond, une avancée considérable dans cette recherche est plus proche que jamais. Gaia fournit plus d'un milliard d'étoiles avec une précision astrométrique sans précédent (de l'ordre de la milliseconde à la microseconde d'arc). D'un autre côté, en 2023 a commencé un grand inventaire du Système solaire profond grâce au *Legacy Survey of Space and Time* (LSST). Il s'agit de l'un des objectifs principaux du tout nouveau télescope géant Vera Rubin installé sur le Cerro Pachon. Il est doté d'un miroir primaire de 8,4 m et d'un miroir secondaire de 3,42 m et équipé d'une caméra monstrueuse de 3,2 milliards de pixels couvrant un champ sur le ciel de 3,5° x 3,5° avec une taille du pixel sur le ciel de 0,2''. Depuis sa position, le télescope balayera l'ensemble du ciel austral deux fois par semaine pendant dix années de suite et sera en mesure d'observer des millions d'objets du Système solaire jusqu'à la magnitude 24,5, dont 40 000 objets transneptuniens. Cela permettra d'obtenir des prédictions au niveau de la milliseconde d'arc (mas) – ou mieux –pour des dizaines de milliers de TNO. Le *Minor Planet Center* (MPC) recense à ce jour environ 2 600 objets transneptuniens (TNO) et Centaures. Le LSST viendra abondamment alimenter le MPC en données de position des TNO.

Par ce gain sans précédent en précision astrométrique provenant à la fois de Gaia et du LSST, plusieurs milliers de TNO devraient faire l'objet de plus d'une centaine d'observations d'occultation au cours des dix prochaines années d'exploitation du télescope Vera Rubin.

## Références


C. André, « Sur le système formé par la Planète double (433) Éros », *Astronomische Nachrichten*, vol. 155, iss. 1, 1901, p. 27.

R.P. Binzel, « Pluto-Charon Mutual Events », *Geophysical Research Letters*, vol. 16, iss. 11, 1989, p. 1205-1208.

J.I.B. Camargo et al., « The Future of Stellar Occultations by Distant Solar System Bodies: Perspectives from the Gaia Astrometry and the Deep Sky Surveys », *Planetary and Space Science*, vol. 154, 2018. p. 59-62.

C.E. Delaunay, « Sur l'existence d'une cause nouvelle ayant une influence sensible sur l'équation séculaire de la Lune », *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. 61, 1865. p. 1023-1032.

D. Herald *et al.*, « Precise Astrometry and Diameters of Asteroids from Occultations – A Data Set of Observations and Their Interpretation », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 499, iss. 3, 2020. p. 4570-4590.

K.R. Lang, *Lunar Occultation Theory and Techniques. Photoelectric Observations of Stellar Occultations*, 1971, p. 626-635.

P.A. MacMahon, « On the Determination of the Apparent Diameter of a Fixed Star, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 69, 1908, p.126-127.

L.V. Morrison and S.F. MacBain, « An Analysis of Lunar Occultations 1960-66 », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 144, 1969, p. 129.

L.V. Morrison, « The Role of Occultations in the Improvement of the Lunar Ephemeris », *The Moon*, Proceedings from IAU Symposium n° 47 held at the University of Newcastle-Upon-Tyne England, 22-26 March, 1971, Edited by S. K. Runcorn and Harold Clayton Urey, International Astronomical Union, Symposium n° 47, Dordrecht, Reidel, 1972, p. 395

L.V. Morrison, « The Secular Accelerations of the Moon's Orbital Motion and the Earth's Rotation », *The Moon*, vol. 5, iss. 3-4, 1972, p. 253-264.

L.V. Morrison and F.R. Stephenson, « Historical eclipses and the variability of the Earth's rotation », *Journal of Geodynamics*, vol. 32, iss. 1, 2001, p. 247-265.

R.E. Nather and D.S. Evans, « Photoelectric measurement of lunar occultations. I. The process », *Astronomical Journal*, vol. 75, 1970, p. 575.

B. O'Leary, B. Marsden and collegues, « The Occultation of κ Geminorum by Eros », *Icarus*, vol. 28, iss. 1, 1976, p. 133-146.

J.L. Ortiz and collegues, « The Size, Shape, Density and Ring of the Dwarf Planet Haumea from a Stellar Occultation », *Nature*, vol. 550, iss. 7675, 2017, p. 219-223.

A. Richichi, « Lunar Occultation Measurements of Stellar Angular Diameters », *International Astronomical Union Symposium*, n° 189, 1997, p. 45-50.

A.E. Whitford, « Photoelectric Observation of Diffraction at the Moon's Limb», *Astrophysical Journal*, vol. 89, 1939, p.472.