



Le projet RUSTICCA

20 ans d'observation avec le télescope Schmidt de l'Observatoire royal de Belgique

Thierry Pauwels et Peter De Cat

Les origines

L'Observatoire royal de Belgique a une longue tradition en astrométrie de pointe des corps célestes de notre système solaire, en particulier des astéroïdes et des comètes. L'astrométrie est la détermination de la position des objets dans le ciel. Elle est nécessaire pour calculer les orbites et les éphémérides des objets de notre système solaire, afin que les astronomes sachent où pointer leurs télescopes pour observer un objet particulier. Les astéroïdes et les comètes sont de petits objets qui, comme les planètes, tournent autour du Soleil. Leur diamètre varie de quelques milliers de kilomètres pour les plus grands à quelques mètres pour les plus petits qui peuvent être observés avec les moyens actuels. L'intérêt de ces objets est qu'ils nous révèlent des éléments sur la formation du système solaire. De manière plus pratique, il est aussi important de disposer d'une liste complète des orbites de ces objets, afin de pouvoir émettre des avertissements à temps et, si nécessaire, de prendre des mesures si l'un d'entre eux s'avère être sur une trajectoire de collision avec la Terre et donc constituer une menace pour l'humanité.

Les observations astrométriques de ces objets à Uccle commencèrent en 1924, d'abord avec le Triplet, un télescope photographique à grand champ mais doté d'une optique de qualité assez médiocre, et plus tard, à partir de 1933, avec le Double Astrographe, muni d'une optique bien meilleure et offrant un champ de vue encore plus grand sur le ciel. Les découvertes les plus marquantes faites avec le Double Astrographe furent l'astéroïde (2101) Adonis par Eugène Delporte en 1936 et la comète Arend-Roland en 1956, que l'on a pu admirer à l'œil nu en 1957. Adonis est un des premiers géocroiseurs découverts et fut mis en scène en 1953 par Hergé dans son album de Tintin *On a marché sur la Lune*.

Le télescope Schmidt, dans lequel est montée la caméra CCD du projet RUSTICCA. La caméra CCD est fixée au centre du tube, à mi-longueur, soit approximativement au niveau de l'ouverture circulaire visible ici sur le flanc du télescope.

>>

Durant les premières années, avec des temps d'exposition d'une heure, le fond du ciel était encore parfaitement transparent sur les plaques photographiques. Or, après la Seconde Guerre mondiale, la qualité du ciel se détériora rapidement en raison de l'augmentation de l'éclairage public, si bien qu'on dut raccourcir les temps de pose pour ne pas surexposer le fond du ciel dans l'image photographique. Dès lors, il devint impossible d'observer des objets peu lumineux, et la précision des positions mesurées en souffrait également. En effet, les plaques étaient encore mesurées visuellement sous un microscope, et, en raison du contraste réduit entre le fond du ciel et l'objet à mesurer, il devenait de plus en plus difficile d'estimer l'emplacement exact du centre de l'image. Entre-temps, ailleurs dans le monde, des télescopes plus performants étaient construits dans des lieux plus sombres et étaient utilisés pour balayer systématiquement le ciel à la recherche d'astéroïdes. Par conséquent, tous les objets qui étaient encore à portée du Double Astrographe étaient déjà découverts, et les objets connus étaient observés ailleurs avec beaucoup plus de précision. Les astronomes de l'Observatoire royal allaient donc observer depuis d'autres sites, tels La Silla au Chili, l'Observatoire de Haute Provence, ou Rozhen en Bulgarie. La dernière fois qu'un astéroïde fut découvert d'Uccle, c'était en 1965, et, même si des observations sporadiques ont été encore menées jusqu'à la première moitié des années 1990, les possibilités d'observation d'astéroïdes semblaient s'être épuisées à Uccle.

1993 : lancement du projet RUSTICCA

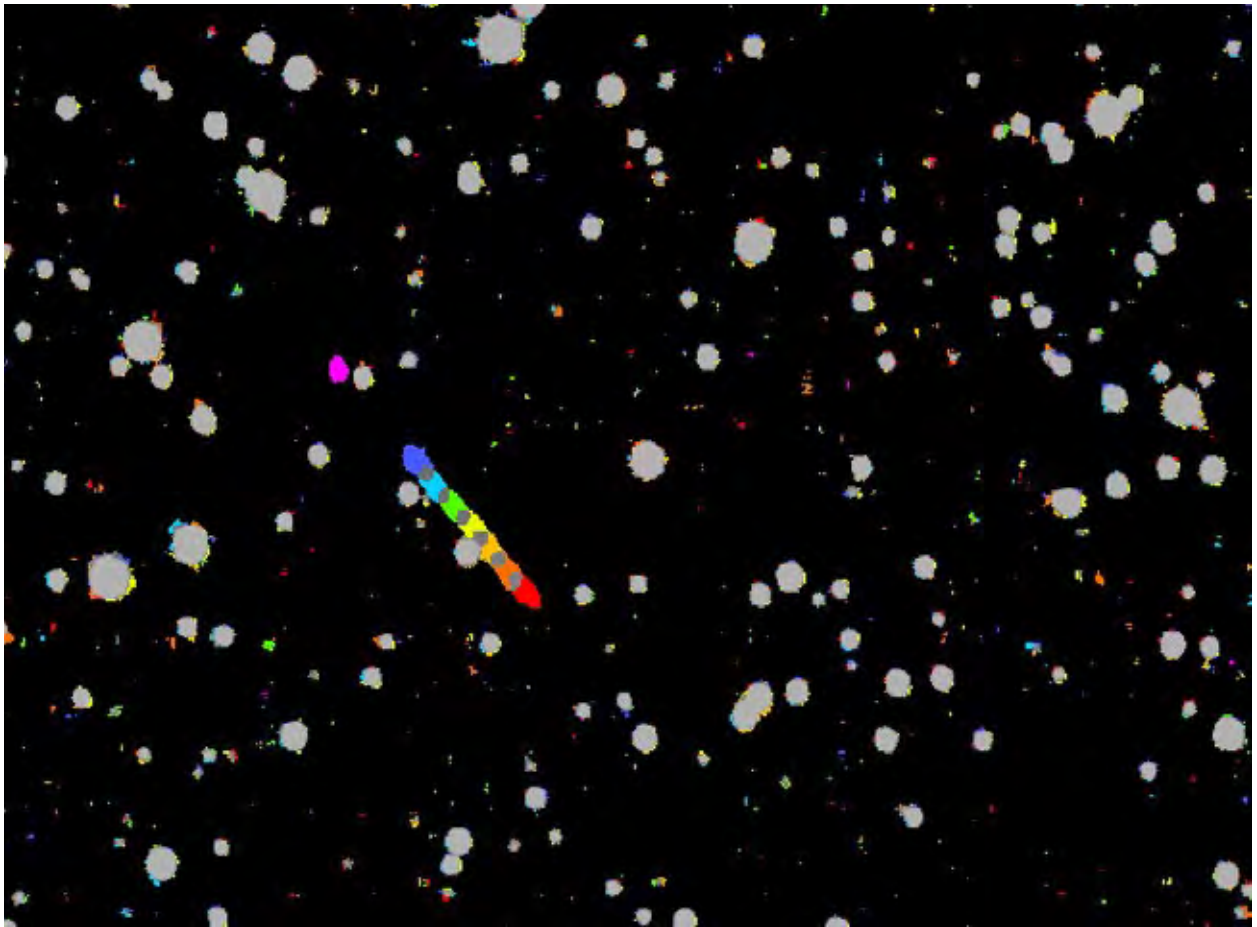
Le tournant se produisit en 1993, lorsqu'un subside du Lotto fut obtenu pour acquérir une caméra CCD. Observer avec une telle caméra, dotée d'un capteur électronique au lieu de la traditionnelle plaque photographique, ouvrait un monde de nouvelles possibilités. Comme le signal est électronique, il peut être traité par un logiciel. Le fond du ciel peut être soustrait de l'image et le contraste augmenté avec un simple clic de souris, révélant ainsi beaucoup plus de détails et d'objets moins lumineux. Encore mieux : on peut prendre plusieurs images successives et les additionner, ce qui permet d'augmenter le rapport signal/bruit et de révéler des objets encore plus ténus. En outre, le fait qu'un pixel d'un capteur CCD peut prendre 30 000 valeurs de gris, alors qu'un grain sur une plaque photographique ne peut être que blanc ou noir, donne lieu à beaucoup plus de nuances dans l'image. Enfin, comme la réponse d'une caméra CCD est linéaire en fonction de la quantité de lumière, il est possible de faire non seulement de l'astrométrie, mais aussi de la photométrie précise des objets célestes, c'est-à-dire la détermination de leur luminosité apparente.

La caméra CCD ne fut pas montée sur le Double Astrographe. L'optique de ce dernier était optimisée pour produire des images assez nettes en lumière bleue, la couleur à laquelle les plaques photographiques de l'époque étaient sensibles, alors qu'un détecteur CCD est surtout sensible à la lumière rouge. Par conséquent, les images CCD prises au Double Astrographe auraient été complètement floues. En revanche, le télescope Schmidt n'était pas utilisé à l'époque, et la caméra CCD pouvait être montée sur celui-ci. Comme l'élément principal de ce télescope est un miroir

et non une lentille, il n'a pas de problème d'effets de couleur. De plus, par sa conception, un télescope Schmidt produit des images beaucoup plus nettes qu'un astrographe. Avec un miroir principal de 1,2 m de diamètre, dont l'ouverture est réduite à 85 cm par un diaphragme, le télescope Schmidt peut capter plus de quatre fois plus de lumière que le Double Astrographe et acquérir des images à une cadence plus que quatre fois plus rapide.

Le Double Astrographe, utilisé entre 1933 et 1995, avec lequel la comète Arend-Roland a été découverte.





Les astéroïdes sont indistinguables des étoiles sur les images brutes. Tous les deux sont des sources ponctuelles, et la présence des premiers n'est révélée qu'en mettant en évidence leurs mouvements dans le ciel. Plusieurs images sont donc prises l'une après l'autre, puis elles sont superposées et colorisées chacune avec un code de couleur différent, ce qui fait ressortir les objets en mouvement. Ainsi, les étoiles apparaissent sur cette image comme des cercles gris, et les astéroïdes comme un collier de perles aux couleurs de l'arc-en-ciel.

Le choix, la commande et la livraison de la caméra, la remise en service du télescope, l'installation de la caméra et la remise en fonctionnement du système prirent un certain temps, mais, dans le courant de l'année 1996, les véritables observations purent commencer. Les premiers tests après le démarrage du projet se révélèrent tout de suite très prometteurs. Les premières images montraient des objets plus de 200 fois moins lumineux que ce qui pouvait être observé avec le Double Astrographe. De plus, les positions mesurées des astéroïdes brillants étaient 20 fois plus précises. Ainsi, alors que les erreurs de positions mesurées sur les plaques photographiques du Double Astrographe pouvaient facilement s'élever jusqu'à 2 secondes d'arc, on atteignait ici une précision allant jusqu'à 0,1 seconde d'arc, ce qui pouvait à nouveau rivaliser avec les observations couramment réalisées ailleurs dans le monde.

De nouvelles découvertes redevinrent possibles. Au milieu des années 1990, on connaissait environ 20 000 astéroïdes, dont tout au plus quelques milliers étaient suffisamment brillants pour être observés avec le Double Astrographe. Mais une petite extrapolation montra qu'environ 300 000 astéroïdes devaient être

observables avec la nouvelle configuration. Cela signifie que, pour chaque astéroïde connu présent dans une image, on pouvait y découvrir environ 15 nouveaux.

Le projet fut nommé 'RUSTICCA', acronyme de 'Revalorising the Uccle Schmidt Telescope by Installing a Ccd CAmera', et son logo est entièrement construit à partir des lettres du mot RUSTICCA, représentant schématiquement le télescope et la caméra CCD. >>



Le logo de RUSTICCA est entièrement constitué des lettres du mot RUSTICCA et représente le télescope et sa caméra : R = colonne de la monture, U = la caméra CCD, S = la lame correctrice (en réalité, elle a la forme d'un double S), T = paroi droite du tube du télescope et bras de la monture, I = paroi gauche du tube du télescope, C = le contrepois, C = le miroir, A = fenêtre d'entrée et rayons lumineux convergeant vers la caméra.



Vue aérienne du site d'Uccle avec les coupoles du Double Astrographe (1) et du Télescope Schmidt (2). © Régie des Bâtiments

RUSTICCA en vitesse de croisière

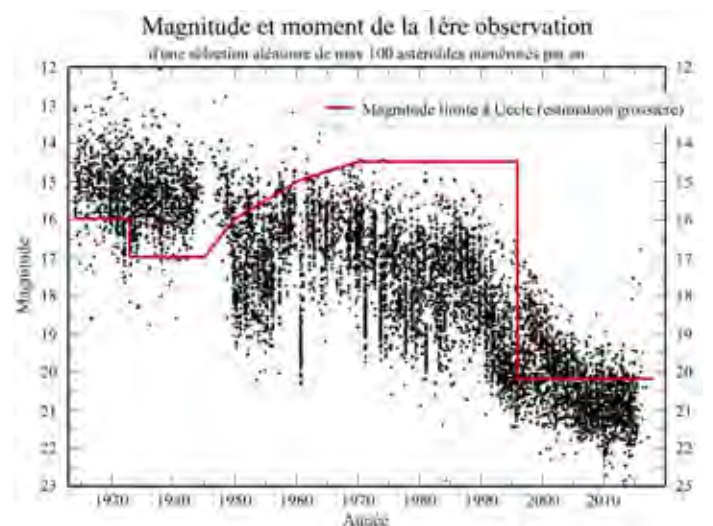
Peu après les premières observations opérationnelles, on détecte de nouveaux astéroïdes, qui furent immédiatement objets d'un suivi laborieux. En effet, pour pouvoir compiler des éphémérides, il faut calculer une orbite, ce qui nécessite un nombre d'observations suffisant. Si un objet inconnu n'est pas observé à nouveau dans les jours qui suivent, l'incertitude quant à sa position augmente rapidement et sa trace se perd, jusqu'à ce qu'il soit redécouvert par hasard. Bien que le champ couvert par la caméra CCD de RUSTICCA ne soit que de $0,75^\circ \times 0,5^\circ$ (contre $8^\circ \times 8^\circ$ pour les plaques photographiques du Double Astrographe), il n'était pas rare, dans les premières années du projet, de trouver 10 nouveaux astéroïdes sur une seule image. Ils devaient tous être suivis, mais, comme ils avaient chacun leur propre orbite dans le ciel, quelques jours plus tard, ils ne rentraient plus dans le même champ. Il fallait donc prendre plusieurs images de champs différents dans lesquels étaient entrés d'autres nouveaux objets, de sorte qu'un nombre toujours plus grand d'images était nécessaire pour suivre tous les nouveaux objets. Ce cercle vicieux ne prenait fin que lorsque la majeure partie de ces nouveaux objets avait disparu de la vue. Le temps nuageux belge et le fait que les objets moins lumineux ne sont pas détectables aux alentours de la pleine lune rendaient le défi de tout suivre encore plus difficile.

En effet, les astéroïdes sont observables de façon optimale lorsqu'ils sont en opposition, c'est-à-dire diamétralement opposés au Soleil dans le ciel, ce qui est aussi le moment où ils sont les plus proches de la Terre et donc les plus brillants. La période la plus favorable est d'environ deux mois aux alentours de l'opposition, après quoi ils sont difficiles ou impossibles à observer pendant environ 14 mois. Ils gravitent alors loin de la Terre, sont moins lumineux, et sont trop proches du Soleil dans le ciel. Au cours de cette période favorable, ils sont d'abord observables durant la seconde moitié de la nuit puis deviennent plus lumineux et sont observables au milieu de la nuit. Enfin, leur éclat retombe et ils ne sont plus observables qu'en début de nuit. Les objets trouvés durant la seconde moitié de la nuit peuvent donc être suivis plus longtemps que ceux trouvés avant minuit. Dès lors, il est important de faire suffisamment d'observations au cours des deux mois autour de l'opposition pour pouvoir retrouver l'objet 14 mois plus tard, lors de la prochaine opposition. Ce n'est que lorsque l'objet a été observé pendant au moins 4 oppositions et lorsque son orbite est déterminée avec suffisamment de précision (dans certains cas, seulement après 20 ans), qu'il est officiellement annoncé comme découvert, qu'un numéro permanent lui est attribué et que l'on détermine qui est le découvreur. La première personne qui a détecté un astéroïde mais qui n'a pas réussi à le suivre n'entre pas en ligne de compte pour être reconnue comme découvreur. Ceci afin d'encourager les découvreurs potentiels à suivre de près les objets nouvellement détectés et d'éviter que les catalogues soient remplis d'objets perdus.

>>



La Terre et l'astéroïde sont tous deux en orbite autour du Soleil. Les astéroïdes de la ceinture principale sont plus éloignés du Soleil que la Terre et gravitent donc plus lentement autour du Soleil que celle-ci. La Terre va donc dépasser l'astéroïde. Avant l'opposition, nous avons la configuration avec l'astéroïde à gauche dans la figure. L'astéroïde est encore assez éloigné de la Terre (flèche rouge) et est donc encore peu lumineux. Il est alors visible dans le ciel du matin. Quelques mois plus tard, la Terre a rattrapé l'astéroïde, et nous obtenons la configuration avec l'astéroïde au-dessus dans la figure. L'astéroïde est au plus proche de la Terre (la flèche verte) et atteint donc sa luminosité maximale. Il se trouve à l'opposé du Soleil et peut être observé presque toute la nuit. Après quelques mois de plus, la Terre a dépassé l'astéroïde, et celui-ci se trouve derrière la Terre (à droite dans la figure). L'astéroïde s'est maintenant éloigné à nouveau de la Terre et sa luminosité décline. Il n'est plus visible que dans le ciel du soir, et il disparaîtra progressivement au crépuscule, s'il n'est pas déjà devenu trop peu lumineux pour être détecté. Dans toute la zone sur fond jaune, l'astéroïde est difficile ou impossible à observer, et il faudra attendre que la Terre ait fait une nouvelle révolution autour du Soleil pour le voir réapparaître dans le ciel du matin.

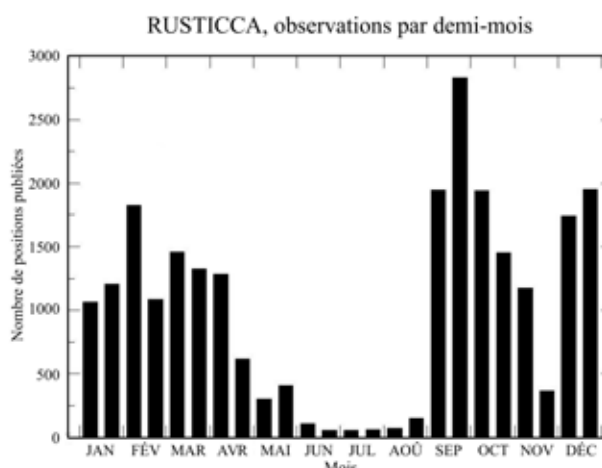


Cette figure montre, pour une sélection d'astéroïdes, la luminosité au moment de leur première observation. Pour chaque année, 100 astéroïdes ont été choisis au hasard. Pour la période 1930-1940, chaque point ne représente environ qu'un seul astéroïde, alors que, pour la période 2000-2010, les points représentent 100 astéroïdes ou plus, afin de ne pas surcharger la figure. Les astéroïdes nouvellement découverts sont de moins en moins lumineux, en partie parce que les plus brillants ont déjà été découverts, en partie parce que les télescopes deviennent plus efficaces. La ligne rouge est une estimation des limites de l'équipement d'Uccle : d'abord le Triplet, puis le Double Astrographe et enfin RUSTICCA. Jusqu'en 1950, on pouvait découvrir de nouveaux astéroïdes en abondance, mais, après cela, la situation s'est rapidement détériorée. Grâce à l'équipement de RUSTICCA, les nouvelles découvertes étaient à nouveau possibles jusqu'en 2015 environ.

Quelques faits et événements marquants

La période 1999-2005 fut la plus productive pour RUSTICCA. Avant 1999, nous étions dans un processus d'apprentissage pour rendre les observations aussi optimales que possible. De plus, le logiciel de traitement des observations devait être développé afin de déterminer les positions exactes des astéroïdes à partir des images brutes, et ce sur des ordinateurs qui étaient loin d'être aussi performants qu'aujourd'hui. Au cours des premières années, il fallait souvent mobiliser 3 à 5 ordinateurs en parallèle, et chacun d'entre eux avait besoin de 18 heures pour traiter ensemble les observations d'une seule nuit. Plus tard, un seul PC a suffi pour traiter les observations deux fois plus vite qu'elles n'arrivaient.

Les observations n'étaient pas réparties uniformément sur toute l'année. Tout le monde peut constater que juillet et août sont les mauvais mois. D'autre part, les mois de mai et juin ne sont pas très exploitables, non seulement à cause des nuits courtes, mais aussi parce que les astéroïdes sont bas dans le ciel et donc difficiles à observer. Pour rappel, les astéroïdes sont suivis principalement du côté opposé au Soleil, soit durant l'été, dans la zone du ciel où le Soleil se trouve en hiver. En revanche, il est moins évident de comprendre pourquoi on récoltait moins de résultats de janvier à avril que de septembre à décembre. Il y a une explication simple à cela. Nous avons déjà mentionné que les nouveaux objets sont trouvés de préférence durant la seconde moitié de la nuit. De septembre à décembre, l'écliptique, la ceinture du ciel où se concentrent le Soleil, les planètes, mais aussi les astéroïdes, est haut dans le ciel durant la seconde moitié de la nuit, si bien que les astéroïdes sont faciles à détecter. En outre, la durée des nuits s'allonge, de sorte que les nouveaux objets peuvent être suivis plus longtemps. À partir de janvier, c'est l'inverse qui se produit. L'écliptique est haut dans le ciel durant la première moitié de la nuit, mais bas dans le ciel durant sa seconde moitié. En outre, les nuits raccour-



Nombre de positions d'astéroïdes publiées au cours du projet RUSTICCA par tranches d'un demi-mois. Ce nombre fluctue fortement au cours de l'année. Voir le texte pour plus d'explications.

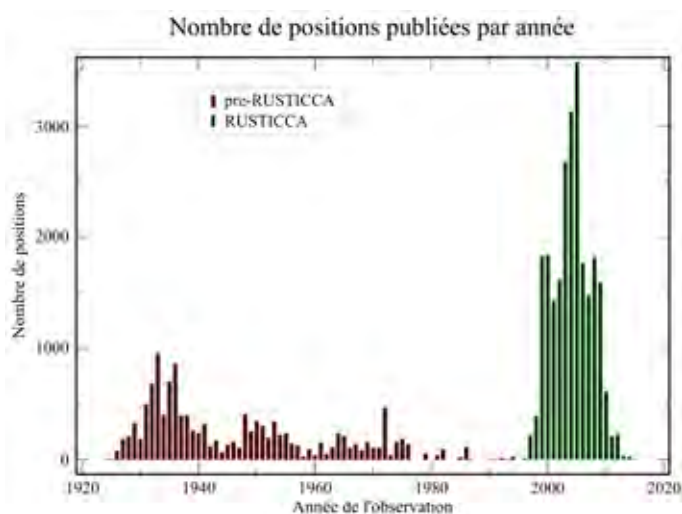
issent. Les nouveaux objets sont donc soit difficiles à détecter, soit difficiles à suivre. Ainsi, la période de septembre à décembre est la meilleure pour les observations astrométriques des astéroïdes. Nous ne pouvons pas expliquer pourquoi il y a nettement moins d'observations en novembre, sinon par le plus petit nombre de nuits claires en cette période.

Un moment fort du projet fut la découverte en 2005 de (314082) Dryope. Il s'agit d'un astéroïde classé 'potentiellement dangereux' (PHA en anglais pour *Potentially Hazardous Asteroid*). En effet, il peut se rapprocher suffisamment de la Terre pour y entrer en collision, tout en étant assez massif pour constituer une menace globale pour l'humanité. Donc, à surveiller de très près ! Cette découverte fut vécue comme un 'thriller' et n'aurait pas été possible sans la coopération de tous les observateurs de l'équipe. La découverte ne fut rendue officielle qu'en 2012.

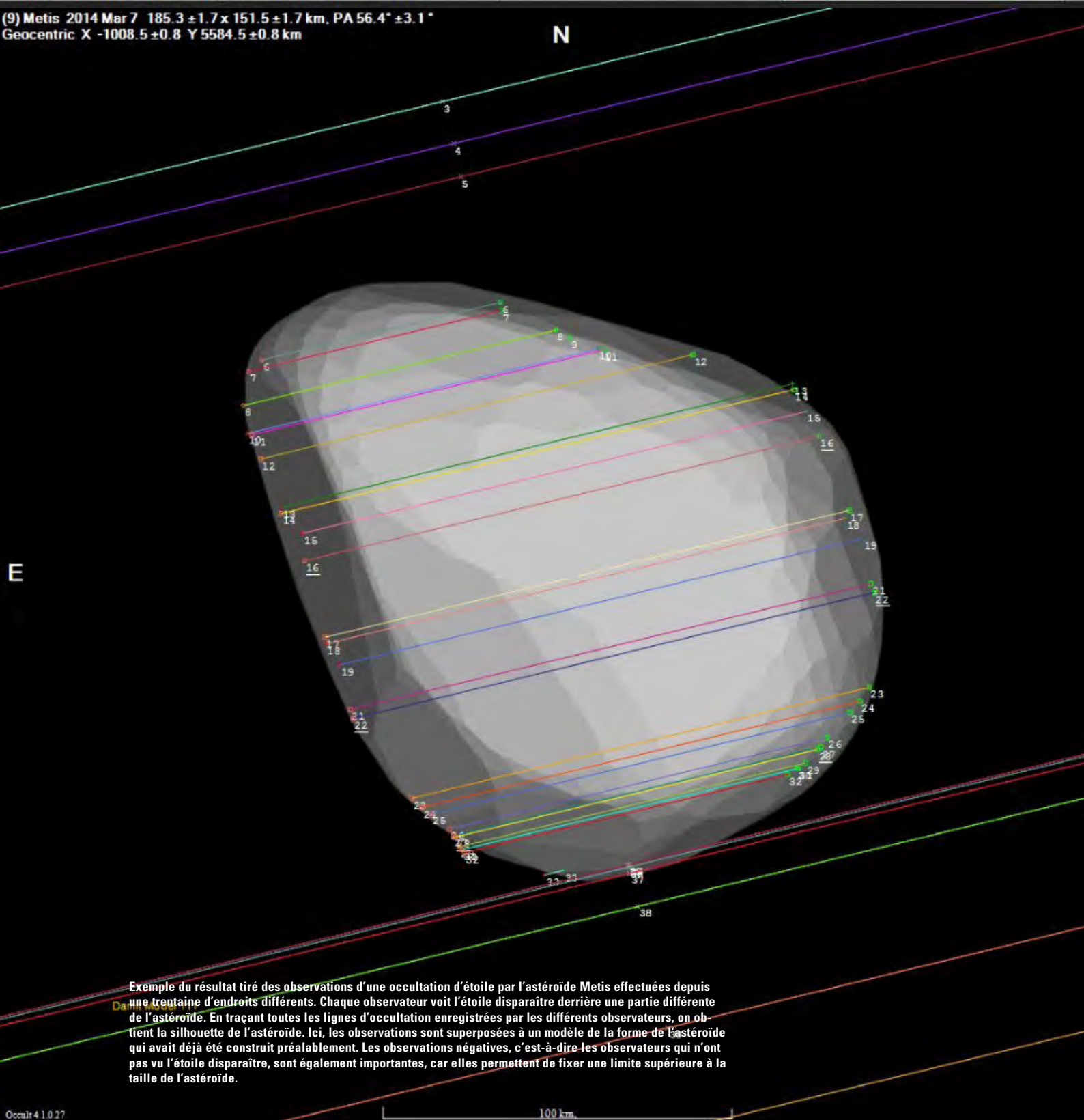
D'autres types d'observation

L'astrométrie des astéroïdes était le but initial de RUSTICCA, et l'ensemble du dispositif était optimisé dans ce but. Toutefois, d'autres observations furent aussi réalisées au cours de ce projet. Ainsi, à la fin des années 1990, sous l'impulsion d'Henri Boffin, il y eut des observations photométriques de variables cataclysmiques.

À partir de 1997, sous l'impulsion de Pierre Vingerhoets, on observa des phénomènes dits PHEMU (PHÉnomène MUtuel), durant lesquels un des grands satellites de Jupiter occulte ou éclipse un autre. La photométrie d'un tel phénomène nous permet de déterminer la position des satellites avec une précision sans précédent. Ces phénomènes se déroulent au cours de 'saisons' qui durent chacune environ un an, et se produisent tous les 6 ans. Avec le projet RUSTICCA, des PHEMU furent observés durant les 'saisons' 1997, 2003, 2009 et 2015. Ces observations n'étaient pas faciles, car ni l'installation ni le logiciel de traitement n'étaient optimisés pour cette tâche, et il fallait souvent faire preuve de créativité pour les mener à bien.



Nombre de positions d'astéroïdes publiées annuellement à partir des données d'Uccle. Le CCD est clairement beaucoup plus efficace que la technique photographique.

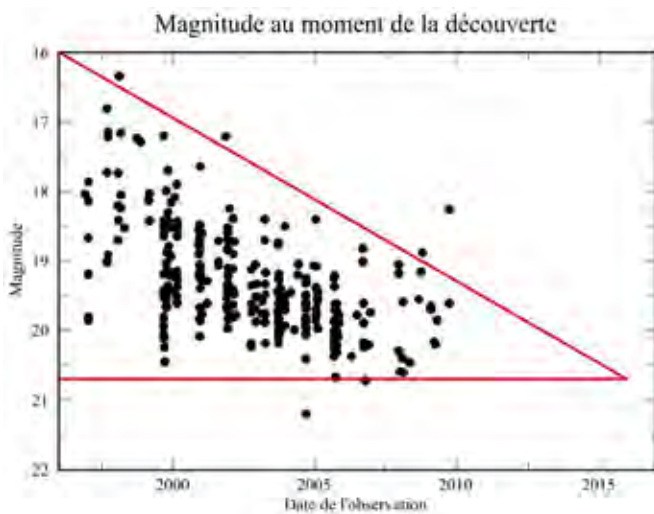


Exemple du résultat tiré des observations d'une occultation d'étoile par l'astéroïde Metis effectuées depuis une trentaine d'endroits différents. Chaque observateur voit l'étoile disparaître derrière une partie différente de l'astéroïde. En traçant toutes les lignes d'occultation enregistrées par les différents observateurs, on obtient la silhouette de l'astéroïde. Ici, les observations sont superposées à un modèle de la forme de l'astéroïde qui avait déjà été construit préalablement. Les observations négatives, c'est-à-dire les observateurs qui n'ont pas vu l'étoile disparaître, sont également importantes, car elles permettent de fixer une limite supérieure à la taille de l'astéroïde.

En revanche, l'observation des occultations d'étoiles par des astéroïdes, phénomènes qui durent quelques secondes, se montre un peu plus simple. Le chronométrage de tels phénomènes permet de déterminer très précisément la position de l'astéroïde. En outre, si un nombre suffisant d'observateurs ont noté les moments de disparition et de réapparition de l'étoile depuis différents endroits de la Terre, le long du trajet d'occultation, on peut obtenir la silhouette de l'astéroïde, et reconstruire sa taille et sa forme. Comme l'incertitude sur la position d'un astéroïde est souvent plus grande que son diamètre, l'endroit sur Terre où le phéno-

mène sera visible est difficile à prévoir avec précision, et chaque observateur n'a a priori qu'une chance limitée de se trouver dans la zone d'occultation. Malgré cela, nous avons pu déterminer les instants précis de disparition et de réapparition de l'étoile lors de huit occultations par un astéroïde entre 2003 et 2016, sur un total de 82 phénomènes de ce type observés dans le cadre du projet RUSTICCA.

>>



Évolution de la magnitude (luminosité) des astéroïdes découverts au cours du projet RUSTICCA en fonction du moment de la découverte. L'échelle de magnitude est logarithmique, ce qui signifie que si la magnitude augmente de 1, l'objet est environ 2,5 fois moins lumineux. La ligne horizontale inférieure montre la limite observable avec l'équipement RUSTICCA. Les objets situés en-dessous de cette ligne sont trop faibles et ont peu de chance d'être détectés par notre équipement. La ligne diagonale supérieure est la ligne de complétude. Les objets situés au-dessus de cette ligne sont déjà découverts, à part quelques cas passés entre les mailles du filet. Ces deux lignes se croisent autour de 2016. Mais dès 2010, on constate une diminution brutale des découvertes.

Le crépuscule de RUSTICCA... et sa suite

RUSTICCA fut une mise à niveau à faible coût d'un télescope existant, qui serait sinon resté obsolète. Cependant, il était clair dès le départ que, en raison des conditions météorologiques et de la pollution lumineuse en Belgique, cet instrument ne pourrait jamais obtenir le même rendement qu'un télescope moderne placé dans un endroit sombre, au sommet d'une montagne dans un désert. RUSTICCA, en seulement un peu plus de 10 ans, a déterminé deux fois plus de positions qu'en 40 ans d'observations photographiques. Or, même cela n'était pas suffisant pour être compétitif. Au début du projet RUSTICCA, Uccle était encore le 17e site mondial, classé par le nombre d'astéroïdes découverts. Cependant, le projet RUSTICCA n'a pas pu empêcher Uccle de descendre peu à peu dans la liste, jusqu'à ne plus figurer dans le top 50 des sites produisant le plus de découvertes d'astéroïdes. Pourtant, Uccle avait réussi à détenir un autre record pendant un certain temps : avec des découvertes débutant en 1924 et se poursuivant jusque dans les années 2000, il était le seul site au monde où des astéroïdes avaient été découverts sur une période de près de 80 ans. Néanmoins, lorsque Heidelberg-Königstuhl, où des astéroïdes avaient été découverts de 1891 à 1962, redevint actif en 2003, Uccle perdit également ce record.

Après 2005, la productivité commença à baisser. Nous estimons qu'il y a environ 300 000 astéroïdes observables avec l'équipement RUSTICCA. Lorsque le projet avait démarré au milieu des années 1990, seuls 20 000 étaient connus. Aujourd'hui, on connaît de façon précise les orbites de plus de 500 000 astéroïdes. On peut donc dire que presque tout ce qui se trouve à portée de nos appareils a déjà été découvert. La précision des positions mesurées augmente également dans le monde entier. En particulier, la nouvelle norme sera établie par le satellite Gaia (voir plus loin), avec une précision 100 fois supérieure à ce qui est possible avec RUSTICCA.

Le projet connut un dernier événement marquant en 2012, lorsque nous avons détecté pour la dernière fois un objet inconnu, et ceci dans des conditions similaires à celles dans lesquelles Gaia ferait ses observations. Entre-temps, un réseau d'observateurs avait été mis en place pour suivre les astéroïdes inconnus qui figureraient dans les données de Gaia. Ainsi, près de deux ans avant le lancement du satellite, une occasion unique s'est présentée pour organiser une répétition générale du réseau d'observateurs, laquelle s'est déroulée avec succès.

Le coup de grâce fut donné en 2017, lorsque le télescope resta inutilisable durant une année complète suite à des travaux de rénovation de la coupole. Les observateurs perdirent la routine, l'instrument ne fut plus entretenu, et, à la fin des travaux, le télescope ne fut plus mis en service. Les observations d'occultation d'étoiles par les astéroïdes sont les seules qui pourraient encore être utiles, mais les résultats scientifiques limités ne justifient plus le coût du maintien opérationnel de l'instrument.

Néanmoins, l'ensemble du projet s'est avéré très utile dans le cadre de la mission Gaia, un satellite de l'ESA, dont le but est de cartographier notre Voie lactée avec une extrême précision en trois dimensions. Comme Gaia balaie systématiquement le ciel, les astéroïdes entrent également dans son champ de vision, et une équipe du consortium de traitement et d'analyse des données de Gaia (DPAC en anglais pour *Data Processing and Analysis Consortium*) s'occupe du traitement des observations d'astéroïdes. L'expérience acquise au cours du projet RUSTICCA s'est avérée très utile, de sorte qu'un membre de l'équipe RUSTICCA a pu devenir le chef de l'unité de développement DU454 'Réduction astrométrique des objets du système solaire'. Ainsi, l'Observatoire royal a encore un rôle important dans l'astrométrie des astéroïdes.

Les auteurs

Thierry Pauwels et Peter De Cat sont astronomes à l'Observatoire royal de Belgique.