

## **Astéroïdes géocroiseurs et surveillance du ciel en temps réel**

Alain Maury

*Projet EROS2 – CNRS*

### **1. Généralités**

L'exploration in situ des planètes a apporté plusieurs révolutions dans notre compréhension du Système solaire :

- Comme le reste de l'Univers, celui-ci est en évolution.
- L'observation de la surface des corps du Système solaire montre des cratères d'impacts très anciens (datant du début du Système solaire), mais aussi des impacts beaucoup plus récents.
- La ceinture principale des astéroïdes est la source principale de régénération de la population d'astéroïdes géocroiseurs.
- Dans cette zone interne du Système solaire, la durée de vie moyenne d'un corps est inférieure à 10 millions d'années, avant qu'il ne tombe sur le soleil, qu'il soit éjecté du Système solaire par Jupiter, ou beaucoup plus rarement qu'il ne tombe à la surface d'une des planètes internes.

Les progrès réalisés dans l'observation de la Terre ainsi que dans le domaine de la physique et de la géologie des impacts ont permis la découverte de plus de 150 cratères d'impacts à la surface de la Terre, contribuant à bouleverser la perception de notre environnement :

- Les impacts d'astéroïdes ont marqué l'évolution de la vie sur Terre, et entre les très gros impacts très rares (disparitions des dinosaures), et les impacts d'objets beaucoup plus petits qui ont marqué nos cultures (apocalypse, légende de "feu qui tombe du ciel", peur des comètes), on retrouve leur trace dans la géologie, la paléontologie, et l'histoire.
- Même si la probabilité d'impact d'un astéroïde avec la Terre est très très faible, les conséquences en sont tellement énormes que la réalisation d'un inventaires des objets proches est économiquement rentable.

Si cette perspective "prévention contre une catastrophe naturelle" n'est pas dans la culture de l'astronomie (alors qu'elle l'est dans le domaine de la géologie : volcans, tremblements de terre), il est néanmoins

de la responsabilité des astronomes de s'assurer qu'aucun astéroïde géocroiseur n'est dangereux sur le court terme.

## 2. Population et probabilités d'impacts sur Terre

La population d'astéroïdes géocroiseurs (en nombre et en distribution) est aujourd'hui connue à un facteur deux près. Cette connaissance est principalement issue pour les objets les plus gros des mesures de cratérisation des corps du système solaire comparées à la population connue d'objets géocroiseurs, et pour les plus petits, des observations directes de météores sur Terre, soit par observation au sol, soit par observation par les satellites militaires américains.

La courbe suivante donne les valeurs utilisées par le rapport Spaceguard de la NASA en 1992.

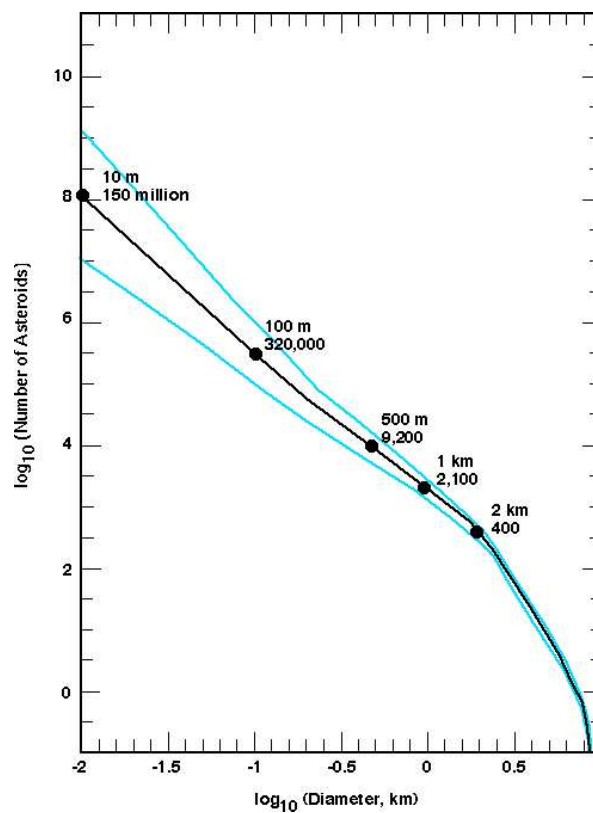


Figure 1.: Nombre d'astéroïdes en fonction du diamètre de l'objet (rapport Spaceguard, NASA, 1992).

### 3. Les programmes de détection d'astéroïdes géocroiseurs

Plusieurs programmes ont été lancés dans le but de cataloguer les corps du système solaire interne (tout en générant un inventaire complet des astéroïdes de la ceinture principale). Un aspect intéressant de ces recherches est que les données sont partagées et que plusieurs étapes de la caractérisation des objets découverts sont entreprises par des groupes spécialisés. Après avoir assuré la détection des objets, on passe à leur suivi, au calcul d'orbite, à la recherche d'images dans les archives, et au calcul de la probabilité éventuelle d'impact, le tout étant réalisé de façon quasi automatique et en mettant en jeu des compétences diverses.

Dans les années 1970, des géologues de la NASA, ayant étudié le comptage et la datation des cratères lunaires, ont entrepris le premier relevé destiné aux astéroïdes géocroiseurs en utilisant le petit télescope de Schmidt du Mont Palomar (45cm de diamètre). Ce programme a ensuite été partagé sur deux groupes, toujours sur le même télescope. La détection était réalisée par l'examen visuel de paires de films avec un stéréoscope.

Le premier programme utilisant à la fois des CCDs et des logiciels de détection automatique a été le programme *Spacewatch*, de l'Université d'Arizona à partir de 1983. Ce programme n'a donné des résultats tangibles qu'à partir de 1989, date à laquelle le CCD utilisé a été de taille suffisante pour couvrir une surface importante chaque nuit. Ensuite le programme NEAT du Jet Propulsion Laboratory, le programme franco-allemand ODAS, SCAP (Pékin), Catalina Sky Survey (Lunar and Planetary Lab), LONEOS (Lowell Observatory), puis LINEAR (Lincoln Laboratory) ont emboîté le pas. Depuis peu, le programme le plus efficace est NEAT (Near Earth Asteroid Tracking) qui utilise une caméra à 3 CCDs de  $4096 \times 4096$  pixels sur le télescope de Schmidt de 1.2m du Mont Palomar (champ de 3.75 degrés carrés, avec des pixels de 1"). L'ensemble du ciel visible depuis l'hémisphère nord est couvert chaque mois au moins jusqu'à la magnitude 19, avec une bonne portion jusqu'à la magnitude 20. Le programme NEAT devrait servir également à la détection de supernovae relativement proches.

### 4. Les logiciels de détection

Les programmes utilisent des logiciels de détection suffisamment rapides pour pouvoir tenir la cadence "temps réel". Un grand nombre de programmes utilisent le logiciel SExtractor (Bertin et Arnouts 1996). Lorsque plusieurs observations du même champ avec un intervalle de temps suffisamment court ont été obtenues, les catalogues qui en découlent sont comparés, les sources fixes sont éliminées et on détecte

les objets se déplaçant linéairement au cours du temps. Le nombre d'observations varie typiquement de 3 à 5, sachant qu'avec 5 observations on peut utiliser un seuil de détection beaucoup plus faible qu'avec 3.

La comparaison avec un catalogue astrométrique permet ensuite la réduction en temps réel des observations. Le Guide Star Catalog a été longtemps utilisé, mais aujourd'hui la plupart des groupes utilisent le catalogue USNO A2.0. Les catalogues astrométriques de précision ne contiennent généralement que des étoiles très brillantes, et sont par conséquent inutilisables à cause de la saturation des images.

Une étape de confirmation visuelle des sources détectées par le logiciel est réalisée pour les petits programmes. Elle n'est pas effectuée par les gros programmes qui détectent trop de sources pour pouvoir prendre le temps de les vérifier toutes (plusieurs milliers de nouveaux astéroïdes par nuit). C'est la réobservation ultérieure de l'objet qui permet sa confirmation, sauf dans le cas beaucoup plus rare des objets dont le mouvement est atypique. Ces objets sont généralement placés sur la *NEO confirmation page* du Minor Planet Center<sup>1</sup>.

## 5. Le suivi des objets découverts

Une communauté composée de professionnels et d'amateurs prend alors en charge le suivi de l'objet. Il est assez fréquent que parmi les objets détectés "en aveugle", par LINEAR notamment, se trouvent des comètes, dont l'aspect cométaire est alors confirmé par le site réalisant le suivi.

Ted Bowell de l'observatoire Lowell (Arizona) a démontré qu'un suivi optimal, permettant d'obtenir des éléments orbitaux suffisamment précis pour identifier avec certitude l'objet lors de l'opposition suivante, s'obtient en utilisant une progression géométrique. Deux nuits successives d'observation permettent de déterminer les premiers éléments, puis une nuit 2 nuits plus tard, puis 4, 8, 16 et idéalement un mois plus tard. Lors des premières nuits d'observation on utilise simplement une interpolation linéaire de la position, puis une des méthodes qui permettent de calculer une estimation des éléments orbitaux à partir de deux observations comme la méthode de Väisälä, puis ensuite un jeu d'éléments orbitaux qui, même s'ils ne sont pas très précis, permettent de retrouver l'objet assez facilement lors de la campagne d'observation.

Dans la plupart des cas, les programmes d'observations ne calculent pas les éléments orbitaux de leurs découvertes, le Minor Planet Center se chargeant de ce travail.

---

<sup>1</sup><http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/NEO/ToConfirm.html>

Il existe une communauté de calculateurs d'orbites, réalisant le lien entre plusieurs observations d'un même objet sous des dénominations successives différentes. Lorsque les résidus des éléments orbitaux sont suffisamment faibles, ou, ce qui revient au même, lorsqu'ils sont assez précis pour que l'objet ne dérive pas de plus de quelques secondes d'arc de sa position calculée et ce sur plusieurs dizaines d'années, il reçoit une dénomination définitive et le découvreur peut éventuellement le baptiser. On peut noter le fait qu'il a fallu de 1801 à 1998 pour arriver à numéroter les 10 000 premiers astéroïdes, et que nous venons de dépasser les 30 000 tout récemment (20 000 de plus en deux ans). L'explosion récente du nombre d'objets découverts n'est pas prête de s'arrêter, et on pense que très rapidement, ce seront plus de 100 000 objets qui seront repertoriés.

Dans le cas d'un objet géocroiseur, plusieurs groupes travaillent sur la détermination des approches serrées de la Terre. Ce travail mathématique complexe compare la position estimée de l'objet à celle de la Terre. Ces objets qui ont une période relativement courte (de quelques mois à quelques années), réalisant des approches fréquentes des planètes telluriques, ont généralement une orbite chaotique. L'incertitude sur la position de l'objet croît énormément avec le temps. Lorsque la zone d'incertitude sur la position future inclut la Terre, on peut envisager un impact. Une telle éventualité s'est déjà présentée à plusieurs reprises, mais, dès que de nouvelles observations ont été obtenues (soit à partir d'archives, soit en réobservant l'objet), la probabilité d'impact est toujours aussitôt retombée à zéro (voir par exemple le site du Neodys<sup>2</sup>).

## 6. L'utilisation des archives

Les astéroïdes géocroiseurs sont pour la plupart des corps dont l'orbite est assez excentrique, ce qui signifie qu'ils sont proches de la Terre au périhélie, et qu'ils passent leur aphélie dans la ceinture principale, où ils apparaissent comme des astéroïdes "ordinaires". Il est donc très fréquent que l'on puisse retrouver dans les archives des images d'objets géocroiseurs photographiés à un moment où leur vitesse ne les distinguait pas du lot. Comme l'objet ressemblait alors à un objet de la ceinture principale, sa position n'avait pas été mesurée, ou encore l'objet n'avait pas été suivi, et donc les éléments orbitaux n'avaient pas pu être calculés.

Plusieurs groupes utilisent des programmes spéciaux qui comparent la position instantanée d'un objet aux catalogues d'archives, en fonction de ses éléments orbitaux. Il est alors possible, assez fréquemment, de retrouver des positions anciennes d'un objet, ce qui permet d'améliorer

---

<sup>2</sup><http://newton.dm.unipi.it/cgi-bin/neodys/neoibo>

considérablement la qualité de l'orbite. Internet et la possibilité d'interroger des serveurs à distance ont considérablement facilité ce genre de travail. Les bases de données utilisées sont principalement celles des grands relevés Schmidt (Palomar, Schmidt anglo-australien et ESO pour l'hémisphère sud), les images photographiques obtenues au petit Schmidt de Palomar par Helin et Shoemaker, et plus récemment les relevés CCDs.

## 7. Les relevés futurs

Dans ce domaine comme dans d'autres, il existe beaucoup plus de projets que de programmes qui verront réellement le jour. Il est probable que la communauté va tenter d'utiliser les données issues des futurs grands télescopes à grand champ, mais tout travail visant à déterminer des éléments orbitaux utiles doit se faire avec un télescope réservé. Le plus grand télescope régulièrement utilisé dans le domaine est le nouveau télescope Spacewatch de 1,80 mètre à Kitt Peak. Suite à une action de longue haleine de l'association anglaise Spaceguard (<http://nearthobjects.uk/>) il est probable qu'un nouveau télescope de la classe des trois mètres soit construit dans les années qui viennent. Par ailleurs, les observations des futurs grands télescopes à grand champ (VST, VISTA) seront examinées pour détecter tous les objets proches. Pour un futur plus lointain, il est à noter que le "NRC Astronomy and Astrophysics Survey Committee" (le même qui a recommandé en son temps la construction d'un télescope spatial, ou encore du VLA) a recommandé la construction d'un télescope de 6.5 mètres de diamètre pour la surveillance des plus petits astéroïdes. Le LSST devrait ainsi permettre un inventaire complet des objets jusqu'à 300 mètres de diamètre. Les données seraient rendues disponibles dans le cadre de l'Observatoire Virtuel américain.

*" The Large-aperture Synoptic Survey Telescope (LSST) is a 6.5-meter-class optical telescope designed to survey the visible sky every week down to a much fainter level than that reached by existing surveys. It will catalog 90 percent of the Near-Earth Objects larger than 300 meters and assess the threat they pose to life on Earth. It will find some 10,000 primitive objects in the Kuiper Belt, which contains a fossil record of the formation of the solar system. It will also contribute to the study of the structure of the universe by observing thousands of supernovae, both nearby and at large redshift, and by measuring the distribution of dark matter through gravitational lensing. All the data will be available through the [proposed] National Virtual Observatory, providing access for astronomers and the public to very deep images of the changing night sky. [The estimated cost] of the LSST is \$170 million. "*

Dans le même ordre d'idées, on peut noter que la mission Beppi Colombo d'exploration de Mercure devrait embarquer un télescope permet-

tant la détection d'astéroïdes de type Aten (dont la période de révolution est inférieure à un an, donc orbitant la plupart du temps à l'intérieur de l'orbite terrestre). De la même façon, GAIA pourrait lui aussi participer à l'inventaire des objets jusqu'à une magnitude apparente de 20, ce qui, au moment du lancement de cette mission, ne devrait que compléter la population connue (le programme NEAT par exemple atteint déjà cette magnitude et Spacewatch travaille à la magnitude 21,5).

## 8. Les retombées des programmes de surveillance du ciel en temps réel

Le but principal de ces programmes est de s'assurer qu'aucun astéroïde n'est susceptible de frapper la Terre dans le siècle qui vient. Ce terme de "s'assurer" est presque à prendre dans le sens habituel du terme comme lorsque, pour sa maison ou son véhicule, on choisit de dépenser une petite somme qui nous permet d'en économiser une beaucoup plus grande en cas de malchance. Il est fréquemment opposés qu'il ne serait pas possible de faire grand chose si un objet sur une orbite de collision venait à être détecté. Tout dépend en fait de l'intervalle de temps qui nous sépare de l'impact, d'où l'intérêt de faire une surveillance des objets à courte période complète jusqu'à la plus faible magnitude possible. Il est clair qu'un objet sur une orbite à longue période (plusieurs centaines d'années et au-delà) s'il était détecté, ne nous laisserait que peu de temps pour faire quoique ce soit. Pour un objet à courte période, il est très facile de calculer la zone d'impact, de faire évacuer la zone, de stocker des vivres. En allant au-delà, il est faisable d'aller étudier l'objet de près, d'y déposer un transpondeur qui permettrait de connaître très précisément l'orbite, la masse de l'objet, sa forme et sa structure interne (solide ou constitué d'agrégats). Ce problème a fait l'objet de plusieurs études détaillées, et très souvent, lorsque l'on a plusieurs années d'avance (donc en général encore plusieurs passages à proximité de la Terre), l'impulsion à donner à l'objet est de l'ordre de quelques dizaines de microns par seconde. Une telle impulsion peut être donnée par la chute d'un objet de quelques tonnes à la vitesse de quelques kilomètres par seconde (la sonde Rosetta par exemple pèse dans les quelques tonnes). On voit donc que l'on est bien loin des scénarios de science-fiction où le héros (américain et blanc) sauve le monde. Quand bien même on viendrait à se trouver devant un cas plus défavorable, il semble évident que face au danger, la race humaine trouverait le moyen de l'écartier (il a suffi de quelques années pour développer la bombe atomique, et moins de 10 ans pour aller sur la Lune alors que l'on avait pourtant du mal à placer des hommes en orbite basse).

Entre l'école de Goutelas et la rédaction de cet article s'est passé le 11 Septembre 2001. Cet évènement a permis de réaliser que par moments dans l'histoire l'impensable se produit. De nombreuses personnes ont découvert les images de la ville de New York en feu en pensant qu'il s'agissait d'une quelconque fiction ; hélas, ce n'était pas le cas. Or, l'énergie totale résultant d'une part de la collision des avions sur les tours, puis de l'écroulement des tours a été de l'ordre d'une demie kilotonne. C'est peu, comparé aux 5 mégatonnes du plus petit impact d'astéroïde susceptible de causer la formation d'un petit cratère sur Terre. En dessous de 5 mégatonnes, l'objet se volatilise dans l'atmosphère. Durant les deux derniers siècles, on a recensé 5 cas d'objets ayant explosé dans l'atmosphère avec une puissance supérieure à une mégatonne. Heureusement, les régions ainsi frappées étaient à chaque fois des zones désertiques ou quasi désertiques (Gorelli 1997). Alors qu'il est très probable que nous ayons détecté tous les objets de taille suffisante pour causer des extinctions, nous mesurons aujourd'hui l'impact que pourrait avoir la chute d'un objet, même de petite taille, sur une zone habitée.

Dans un contexte plus scientifique, ces programmes d'observation nous permettent de détecter un grand nombre d'objets passant à proximité de la Terre, ce qui en fait de très bons candidats pour des missions spatiales d'exploration. Dans le futur, ces objets, dont la composition est très variée, pourraient être exploités in situ pour leurs ressources minières (astéroïdes métalliques, comètes éteintes pour les matériaux volatiles, etc.).

Si le but principal des programmes de détection est la réalisation d'un inventaire aussi complet que possible des astéroïdes qui croisent à proximité de la Terre, ils sont aussi le moteur d'une amélioration importante de notre connaissance de la population des autres corps du Système Solaire. Nous avons ainsi un nombre suffisant d'objets pour affirmer que la population d'objets troyens de Jupiter (orbitant autour des points L4 et L5 de Lagrange de Jupiter) sont aussi nombreux que les objets dans la ceinture principale même. Nous avons détecté de nombreux astéroïdes de type centaures, c'est à dire orbitant entre Jupiter et la ceinture des transneptuniens. Nous connaissons actuellement 3 astéroïdes qui possèdent une orbite rétrograde (donc tournant "en sens inverse" des autres objets dans le système solaire). La population globale des astéroïdes de la ceinture principale est passée de quelques milliers il y a une vingtaine d'années à plus de 100 000 objets aujourd'hui permettant une modélisation beaucoup plus fine des interactions entre ces différents corps (étude des familles). Le nombre de comètes connues est lui aussi en constante évolution.

Par ailleurs ces programmes sont également souvent utilisés par d'autres programmes de recherches en astronomie, comme la détection



de nouvelles variables, de supernovae, ou d'étoiles proches à grand mouvement propre.

### Références

- [1] Bertin E., Arnouts S., 1996, A&AS 117, 393
- [2] Gorelli Roberto, Real frequency of meteoritical events of megatonic class. Published in W.G.N., Journal of the International Meteor Organization (I.M.O.), 25-1, February 1997, pp. 57-58
- [3] Index du Minor Planet Center :  
<http://cfa-www.harvard.edu/iau/TheIndex.html>
- [4] Page de confirmation des NEOs du MPC :  
<http://cfa-www.harvard.edu/iau/NEO/ToConfirm.html>
- [5] NEODYS :  
<http://newton.dm.unipi.it/cgi-bin/neodys/neoibo>
- [6] Spaceguard Foundation :  
<http://spaceguard.ias.rm.cnr.it/SGF>
- [7] Site NEO du JPL :  
<http://neo.jpl.nasa.gov/>
- [8] Site des impacts de la NASA Ames :  
<http://impact.arc.nasa.gov/> (contient entre autres le rapport Spaceguard de 1992)
- [9] Résolution du Conseil de l'Europe sur la détection des astéroïdes potentiellement dangereux :  
<http://stars.coe.fr/ta/ta96/FRES1080.HTM>
- [10] Rapport du gouvernement anglais sur les astéroïdes géocroiseurs :  
<http://www.nearearthobjects.co.uk>
- [11] Archives du Cambridge Conference Network :  
<http://abob.libs.uga.edu/bobk/cccmenu.html>
- [12] Page web de l'UAI sur les astéroïdes géocroiseurs :  
<http://www.iau.org/FAQ/neo.html>
- [13] Spacewatch :  
<http://www.lpl.arizona.edu/spacewatch>
- [14] NEAT :  
<http://neat.jpl.nasa.gov/>
- [15] LONEOS :  
<http://asteroid.lowell.edu/asteroid/loneos/loneos.html>
- [16] LINEAR :  
<http://www.ll.mit.edu/>
- [17] SCAP :  
<http://vega.bac.pku.edu.cn/~zj/scap/scap.html>