

faible : c'est la même que la probabilité d'avoir une quinte flush royale au poker. Pourtant, certains de mes collègues caractérisent les astéroïdes par leur potentiel explosif exprimé en mégatonnes, plutôt que par leur diamètre. Les astronomes voudraient que les astéroïdes intéressent pour ce qu'ils sont, mais c'est l'aspect spectaculaire dont le public est friand.

Sa curiosité a d'ailleurs déterminé les récentes explorations des comètes et des astéroïdes. Nous avons aujourd'hui des images d'une dizaine de ces objets et, chaque fois, nous sommes surpris par leurs caractéristiques inédites.

Des tas de cailloux

On pensait que les petits astéroïdes étaient durs et rocheux, car on supposait que les cailloux de leur surface qui s'en détachaient lors des collisions (le régolithe) s'en échappaient, la gravité étant trop faible pour les retenir. On pensait aussi que les petits corps n'étaient jamais des agrégats, car le moindre mouvement rotatif soutenu aurait séparé leurs fragments. Les observations et les simulations récentes ont obligé les astronomes à revoir leurs théories, et l'on considère maintenant que la plupart des astéroïdes de plus de un kilomètre de diamètre sont des assemblages de plusieurs morceaux.

Les images indiquent la présence de régolithe, malgré la faible gravité. La plupart de ces astéroïdes ont un ou plusieurs grands cratères : certains ont un rayon supérieur à l'astéroïde lui-même. Des impacts assez violents pour former de tels cratères ont-ils fragmenté les astéroïdes ? Les mesures de densité moyenne semblent le confirmer : les valeurs mesurées sont étonnamment faibles, ce qui indique que ces corps comportent des cavités.

Ainsi les astéroïdes de plus de un kilomètre de large sont probablement des agrégats sans aucun noyau rocheux. Cette hypothèse du «tas de cailloux» date d'une vingtaine d'années, mais on n'imaginait pas qu'elle s'appliquerait à de si petites échelles.

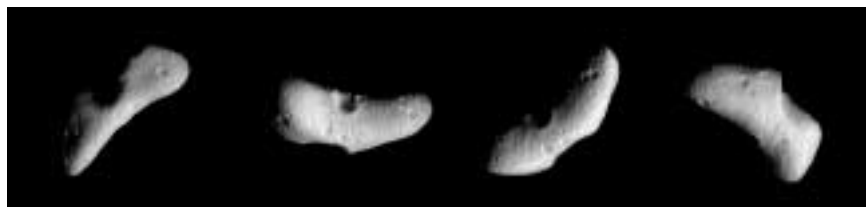
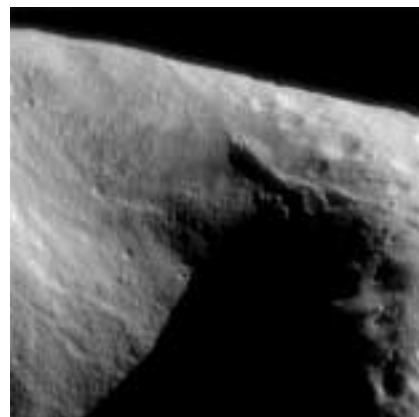
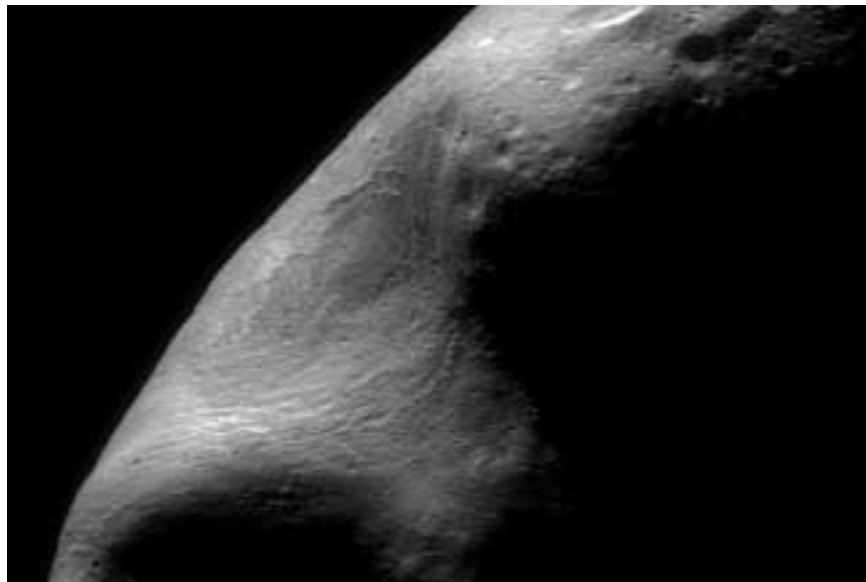
Il y a trois ans, quand la sonde NEAR a survolé l'astéroïde Mathilde, le planétologue Eugene Shoemaker a compris que les immenses cratères et la très faible densité observés s'expliquaient mutuellement : un tas de cailloux supporte beaucoup mieux les chocs qu'un objet d'un seul tenant ; il absorbe et dissipe l'énergie, de sorte que

la face opposée au choc reste inchangée. Les astéroïdes se comportent plutôt comme des sacs de sable frappés par une balle de revolver que comme des vases de cristal.

Pourquoi la plupart des astéroïdes ont-ils une forme si irrégulière ? Elle semble être l'apanage de corps solides, contrairement à l'hypothèse précédente. Toutefois, l'intuition a ses limites. D'après les clichés dont nous disposons, la surface des astéroïdes n'est jamais très inclinée, de sorte que les

débris qui s'y trouvent ne roulent pas. Dans les zones les plus inclinées, on voit des traces de glissements. De petites planètes constituées de roches, voire de sable, peuvent conserver une forme irrégulière (le sable du désert forme bien des dunes, sans être monolithique) ; une rotation rapide contribuerait à les allonger.

En 1992, l'observation de la comète Shoemaker-Levy 9 a corroboré l'hypothèse du tas de cailloux : en s'approchant trop de Jupiter, cette comète



4. ÉROS est composé de plusieurs morceaux, parcourus par des failles, des escarpements et des crêtes. Le relief le plus important est une dépression dont l'intérieur présente des marques inexplicables, mais pas de cratère. Le cratère le plus grand mesure six kilomètres de diamètre. Les débris déposés sur ses bords indiquent que les forces de gravité ont fait retomber les matières éjectées lors d'une collision avec un autre corps. Une arête parallèle aux marques précédentes suggère qu'Éros est parcouru par un système de failles. Il effectue un tour sur lui-même en cinq heures et demie.

Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory et NASA

Visite guidée des astéroïdes

ÉROS

Numéro du catalogue officiel : 433
Dimensions : $33 \times 13 \times 13$ kilomètres
Masse volumique : 2,7 grammes par centimètre cube
Type d'orbite : passe à proximité de celle de la Terre
Classe spectrale : S
Rotation : 5,27 heures

GASpra

Numéro du catalogue officiel : 951
Dimensions : $19 \times 12 \times 11$ kilomètres
Masse volumique : Inconnue
Type d'orbite : ceinture principale (famille de Flore)
Classe spectrale : S
Rotation : 7,04 heures

Gaspra est le premier astéroïde auquel une sonde ait rendu visite : *Galilée* l'a survolé en 1991 en se rendant vers Jupiter. Certains astronomes pensent que ses dépressions ne sont pas des cratères, mais des facettes qui se seraient formées quand Gaspra s'est détaché de son astéroïde parent. Cependant, la gravité faible et irrégulière de Gaspra donnerait naturellement à d'éventuels très gros cratères une forme aplatie et asymétrique correspondant aux observations.

CASTALIE

Numéro du catalogue officiel : 4769

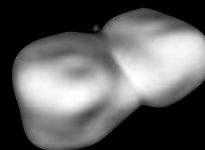
Dimensions : $1,8 \times 0,8$ kilomètre

Masse volumique : 2,1 grammes par centimètre cube (surface)

Type d'orbite : traversant l'orbite de la Terre

Classe spectrale : S

Rotation : 4 heures



Castalie est le premier astéroïde dont on a obtenu des images. En août 1989, il est passé à onze distances Terre-Lune de la Terre, encore trop loin pour les télescopes optiques, mais assez près pour les radars. Les images, réalisées avec le plus grand radiotélescope du monde (celui d'Arecibo, à Porto Rico), ont révélé que Castalie a la forme d'une cacahuète : il est probablement constitué de deux morceaux de 800 mètres de longueur, accolés malgré une gravité très faible. De nombreux autres astéroïdes passant régulièrement au voisinage de la Terre ont une configuration similaire.

TOUTATIS

Numéro du catalogue officiel : 4179

Dimensions : $4,5 \times 2,4 \times 1,9$ kilomètres

Masse volumique : 2,1 grammes par centimètre cube en surface

Type d'orbite : Traverse l'orbite de la Terre

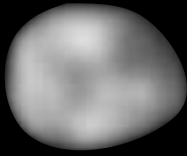
Classe spectrale : S

Rotation : Deux périodes distinctes (5,41 et 7,35 jours)



Fortement attiré par la Terre, Toutatis a une orbite chaotique. Il est animé de deux types de mouvements oscillatoires dont la combinaison aboutit à une rotation non périodique : de sa surface, on ne voit jamais deux fois le même horizon. Le 29 septembre 2004, Toutatis s'approchera à quatre fois la distance Terre-Lune de la Terre. Il sera alors visible aux jumelles.

VESTA



Numéro du catalogue officiel : 4
Dimensions : 525 kilomètres de diamètre
Masse volumique : 3,3 grammes par centimètre cube
Type d'orbite : ceinture principale
Classe spectrale : V
Rotation : 5,34 heures

Parmi les plus gros astéroïdes, Vesta est le seul dont la surface soit en basalte (en lave solidifiée). Dans un passé lointain, cet astéroïde a subi des bouleversements semblables à ceux qu'ont connus la Terre et Mars, peu après leur formation. Des dizaines d'astéroïdes semblables à Vesta existaient, à une époque reculée, mais ils se sont brisés, engendrant des familles d'astéroïdes plus petits. On pense que les météorites ferreuses étaient leurs noyaux et que les météorites ignées sont des morceaux de leur croûte. En 1996, le télescope spatial *Hubble* a pris cette image de Vesta, qui a révélé la présence d'un immense cratère de 430 kilomètres de diamètre. Les petits astéroïdes de type V que l'on observe aujourd'hui viennent peut-être de ce cratère, qui serait vieux d'un million d'années.

MATHILDE

Numéro du catalogue officiel : 253
Dimensions : 66 × 48 × 46 kilomètres
Masse volumique : 1,3 gramme par centimètre cube
Type d'orbite : ceinture principale
Classe spectrale : V
Rotation : 17,4 jours



Avant de rejoindre Éros, la sonde NEAR est passée près de Mathilde. C'était la première fois qu'une sonde spatiale recueillait des informations sur un aussi gros astéroïde primitif de type C. La rotation de ce sphéroïde est parmi les plus lentes, et son orbite est l'une des plus grandes de la ceinture principale. Mathilde a légèrement dévié la trajectoire de la sonde, ce qui nous donne une indication sur sa densité, inférieure de moitié à celle des météorites qui s'y apparentent le plus, des chondrites carbonées : si Mathilde est constituée du même matériau, celui-ci doit être très peu tassé. C'est également vrai pour Eugénie, un autre astéroïde de type C, récemment étudié grâce à un télescope terrestre équipé d'instruments d'optique adaptative puissants.

Mathilde est creusée de cratères géants, qui sont parfois plus grands que le rayon moyen de l'astéroïde. Pourtant, ils ne présentent pas les bords ni les débris typiques des grands cratères sur les autres astéroïdes. En outre, aucun cratère ne s'est formé dans un cratère plus ancien, de sorte qu'on ne sait pas lequel est le plus vieux.

IDA & DACTYLE

Numéro du catalogue officiel : 243
Dimensions : 56 × 24 × 21 kilomètres
Masse volumique : environ 2,7 grammes par centimètre cube
Type d'orbite : ceinture principale (famille de Koronis)
Classe spectrale : S
Rotation : 4,63 heures



Deux ans après avoir rendu visite à Gaspra, *Galilée* est passé à proximité de l'astéroïde Ida, qui fait partie de la ceinture principale. La sonde a alors découvert Dactyle, son satellite, dont le diamètre ne dépasse pas 1,4 kilomètre. À partir de l'orbite de Dactyle, on a calculé la masse d'Ida. Sa densité est bien inférieure à celle des météorites qui lui ressemblent, les chondrites ordinaires : soit Ida n'a pas la même composition, soit l'astéroïde est poreux. Dactyle s'est peut-être formé à partir de débris issus de l'un des plus grands cratères d'Ida ou au même moment qu'Ida, il y a au moins un milliard d'années, quand le corps qui lui a donné naissance s'est scindé.

s'est disloquée en plus d'une vingtaine de morceaux ; puis, deux ans plus tard, le « collier de perles » qui s'était formé a heurté la planète géante (voir *La comète Shoemaker-Levy 9*, par David Levy, Eugene Shoemaker et Caroline Shoemaker, *Pour la Science*, octobre 1995). Avec Willy Benz, de l'Université de Berne, nous avons calculé que la fragmentation s'explique par la constitution initiale de la comète, qui devait être faite de centaines de grains ; ceux-ci ont subi une sorte de glissement de terrain cosmique. Jupiter allongea la comète parce qu'il attirait plus les parties les plus proches de lui, créant une marée solide ; toutefois, les fragments qui s'attiraient mutuellement se sont rassemblés en petits groupes, un peu comme les gouttes d'eau d'une fontaine. Au total, la dissocation de Shoemaker-Levy 9 semble montrer que les comètes sont des agrégats dont la densité moyenne est égale aux deux tiers de celle de la glace. Les astéroïdes ont probablement une constitution analogue.

Quand rien n'est important, tout est important

Malgré les arguments en sa faveur, l'hypothèse du tas de cailloux pose des problèmes. La résistance mécanique d'un astéroïde est quasi nulle et la gravité est extrêmement faible, mais ni l'une ni l'autre ne sont négligeables. La gravité, en effet, assure la cohésion des morceaux. D'ailleurs, les enfants qui font des châteaux de sable savent bien que des forces de cohésion très faibles suffisent à faire tenir des édifices. Toutefois, les forces que l'on néglige habituellement deviennent alors importantes : les frottements lors des glissements, les liaisons chimiques, la dissipation de l'énergie cinétique, l'attraction électrostatique... Nous commençons seulement à comprendre comment elles interagissent.

Le type de forces prépondérantes dans les astéroïdes dépend de la taille de ces derniers. On l'étudie en analysant la vitesse de rotation des astéroïdes. Certaines collisions font tourner les astéroïdes plus vite, d'autres plus lentement. Or, si les astéroïdes étaient formés d'un seul bloc, le graphe de la répartition des corps selon leur vitesse devrait être une courbe de Gauss (une courbe en cloche) dont la « queue », à droite de la courbe, correspondrait à des astéroïdes tournant très rapidement sur

eux-mêmes. En revanche, si les astéroïdes sont bien formés de plusieurs fragments agglomérés, la queue de la courbe doit être absente : des astéroïdes tournant sur eux-mêmes en moins de trois heures se désintégreraient sous l'effet des forces centrifuges. Petr Pravec, de l'Académie des sciences de la République tchèque, Alan Harris, à Pasadena, et leurs collègues ont découvert que tous les astéroïdes, sauf cinq, tournent moins vite qu'un tour par 2 heures 12 minutes (voir la figure 2). Les astéroïdes exceptionnels ont un diamètre inférieur à 200 mètres environ.

La conclusion s'impose : les astéroïdes de plus de 200 mètres de diamètre sont des tas de cailloux. Les simulations de collisions récentes confirment l'existence d'un seuil de vitesse de rotation pour ce diamètre. Les collisions font exploser les gros astéroïdes, mais les débris ont généralement une vitesse inférieure à la « vitesse de libération » (celle à partir de laquelle ils s'échapperaient dans l'espace), soit environ un mètre par seconde et par kilomètre de rayon d'as-

téroïde. En quelques heures, la gravité rassemble les fragments (sauf les plus rapides) en un tas aggloméré (voir la figure 5). Comme les collisions entre astéroïdes sont courantes, la plupart des gros objets en ont déjà subi. Les petits astéroïdes, eux, sont probablement monolithiques, car les fragments d'impact sont moins retenus par la gravité (qui est alors très faible).

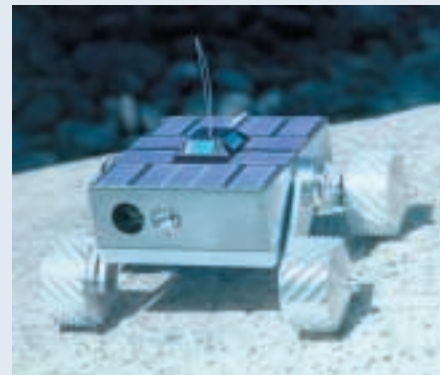
Ainsi les petits astéroïdes ont des formes spectaculaires, parce qu'ils ne retiennent pas les débris formés lors des collisions. Les gros astéroïdes sont des assemblages de morceaux plus petits, auxquels la gravité et les collisions aléatoires ont donné une forme arrondie ou, s'ils tournent sur eux-mêmes, une forme allongée. Leurs cratères ont des parois abruptes et ils contiennent des débris éjectés par les impacts, puis redéposés, tandis que leur surface est recouverte de régolithe. Évidemment, tous les intermédiaires sont envisageables. Notamment, selon ces critères, l'astéroïde Mathilde serait à la fois petit et gros, car ses énormes cratères n'ont pas de bords visibles ni de débris à l'intérieur,

Les missions futures

Six missions exploreront bientôt les astéroïdes et les comètes. La sonde *Stardust* de la NASA, lancée en février 1999, reviendra en 2006 avec quelques grains de poussière de la queue de la comète Wild 2. La sonde spatiale *MUSES-C* sera lancée en 2002 par l'Agence spatiale japonaise, et elle recueillera des échantillons sur Nérée, où elle déposera un robot, qui se déplacera en roulant si les frottements ont suffisants.

Contour, qui sera lancée en 2002, inspectera le noyau de deux comètes, en 2003 et 2006, et peut-être un troisième en 2008. En 2003, *Rosetta* sera lancée par l'Agence spatiale européenne vers la comète Wirtanen, qui voyage vers l'intérieur du Système solaire. Elle survolera également deux petits astéroïdes. *Rosetta* et son module d'atterrissage observeront Wirtanen lorsque la comète quittera le Système solaire externe en direction du point de sa trajectoire le plus proche du Soleil, avant d'exploser.

La sonde *Deep Impact* réalisera la première expérience géochimique sur un astéroïde : elle enverra un projectile de cuivre de 500 kilogrammes sur la comète Tempel 1. Le cratère d'impact nous renseignera sur la structure des comètes. Une autre sonde pourrait tirer dans un astéroïde des « balles intelligentes », c'est-à-dire des projectiles blindés contenant chacun un accéléromètre et un émetteur radio. Les accéléromètres enregistreraient le ralentissement lors du choc, indiquant si l'astéroïde s'apparente plus à du sable ou à un rocher ; on détecterait également les signaux sismiques dus aux autres balles qui s'écraseraient sur l'astéroïde. Cet ensemble de données révélerait la structure interne de l'astéroïde, de la même façon que les géologues ont découvert la structure terrestre en écoutant les tremblements de terre.



LE NANOROVER roulera à la surface de l'astéroïde Nérée. Si vous souhaitez des plans pour construire votre modèle, consultez <http://spaceplace.jpl.nasa.gov/muses3.htm>.