

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 dissociation 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).

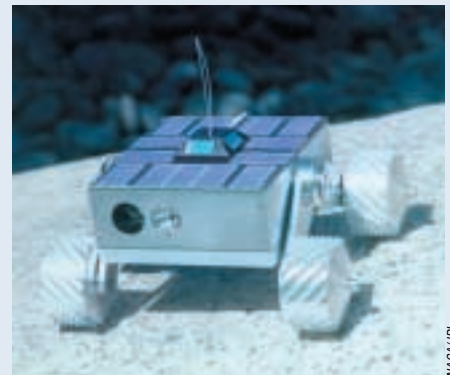
Ainsi les petits astéroïdes ont des formes spectaculaires, parce qu'ils ne retiennent pas les débris formés lors des collisions. Les gros astéroïdes sont des assemblages de morceaux plus petits, auxquels la gravité et les collisions aléatoires ont donné une forme arrondie ou, s'ils tournent sur eux-mêmes, 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 suffisans.

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>.

mais sa forme est sphéroïdale. Le minuscule astéroïde Dactyle serait «gros», car il est sphéroïdal et ses cratères sont nets. Manifestement, la théorie des astéroïdes reste incomplète.

État de choc

Ce constat n'a rien de surprenant : même sur la Terre, les physiciens comprennent encore mal le comportement des tas de sable ou les glissements de terrain. En revanche, deux types d'études commencent à éclairer le comportement des astéroïdes au cours des collisions.

Derek Richardson et ses collègues de l'Université de Washington simulent les astéroïdes par des piles de sphères discrètes. Telles des boules de billard cosmiques sur une table bancale (ce défaut correspondant à la gravité), ces sphères se heurtent, rebondissent et ralentissent en raison des frottements

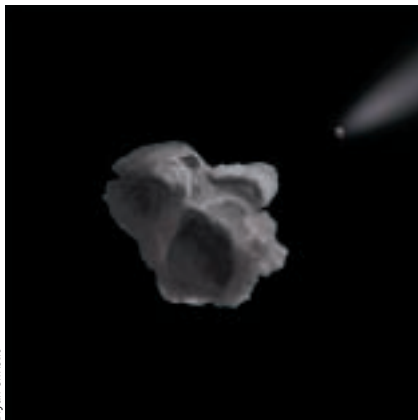
et d'autres formes de dissipation de l'énergie. Quand les chocs donnent aux boules assez d'énergie, elles se dispersent, mais, en général, elles finissent par se regrouper. Les simulations de D. Richardson s'appliquent à l'étude des collisions peu violentes qui ont abouti à l'accrétion des astéroïdes dans le Système solaire primitif, avant que la vitesse des petits corps n'augmente sous l'influence gravitationnelle de la planète Jupiter, alors naissante. Cependant, dans ce modèle, on constate que l'accrétion de matériel sur les planétésimaux est difficile, même après les collisions les moins violentes.

La description des collisions à grande vitesse, telles qu'elles eurent lieu lors des quatre derniers milliards d'années, est plus compliquée, parce que de nombreux phénomènes ont alors joué : la cohésion des astéroïdes, leur friabilité, les changements de

phase, la génération et la propagation des ondes de choc...

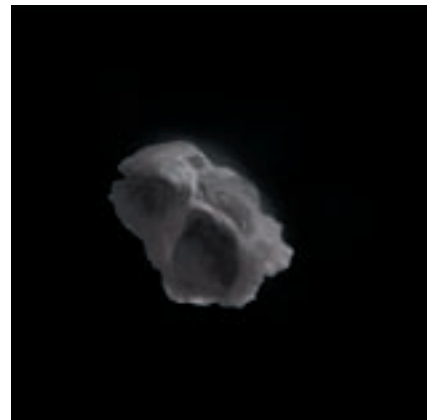
Avec W. Benz, j'ai cherché de nouvelles techniques de calcul pour traiter ce genre de cas. Au lieu de considérer les astéroïdes comme des assemblages de sphères, nous les traitons comme des corps continus faits de plusieurs couches, avec des fissures et des cavités.

Nous avons notamment simulé l'impact d'un objet de 6 000 tonnes sur l'astéroïde Castalie (de masse égale à un milliard de tonnes), à une vitesse de cinq kilomètres par seconde. Cette collision libère une énergie égale à 17 kilotonnes, soit autant que l'explosion d'Hiroshima. C'est assez pour briser Castalie, constituée, dans notre simulation, de deux morceaux soudés par la gravité. Nous observons également que le projectile, ainsi qu'une partie de Castalie de même masse



Bryan Christie

5. UN ASTÉROÏDE FORMÉ DE MORCEAUX AGGLOMÉRÉS et dont la structure témoigne des collisions passées rencontre un astéroïde plus petit, qui se déplace à grande vitesse. De tels chocs sont courants. Ils ne provoquent qu'une désagrégation localisée. En quelques minutes, les débris les plus petits et les plus rapides



s'échappent. Les plus gros dérivent lentement vers l'extérieur. Certains finissent par s'échapper, mais d'autres reviennent vers l'astéroïde. Quelques jours plus tard, la situation s'est stabilisée et, progressivement, les débris issus de collisions ultérieures recouvriront les traces de celle-ci.



Bryan Christie

6. UN ASTÉROÏDE MONOLITHIQUE ne réagit pas à une collision comme un astéroïde formé de morceaux agglomérés, de même qu'une bûche ne réagit pas à un coup de hache comme un tas de copeaux de bois. L'onde de choc se propage en profondeur, faisant éclater l'astéroïde entier. Les débris les plus rapides s'échappent. Les plus gros gravi-



tent lentement autour de l'astéroïde pendant plusieurs heures. Beaucoup se rassemblent, formant un nouvel astéroïde. Les astéroïdes monolithiques se transforment donc souvent en astéroïdes agglomérés. Peu d'astéroïdes monolithiques de plus de quelques centaines de mètres subsistent.