



Jean-François Rigot

7. DANS CERTAINS BÉTONS, un réseau de contacts directs entre grains de sable et de cailloux leur confère les propriétés d'une pâte granulaire.

À des vitesses supérieures, la pâte réagit autrement : le couple des forces par unité de surface de mélange nécessaire à la mise en rotation de l'ensemble ne dépend pas de la hauteur de pâte. De surcroît, ce couple est proportionnel à la vitesse. Cela correspond au comportement d'un fluide classique (newtonien) pour lequel les efforts à fournir sont proportionnels à la vitesse d'écoulement. Dans ce cas, les particules sont maintenues à distance (aussi faible soit-elle) les unes des autres par de fines couches de liquide. Le liquide interstitiel impose son comportement à l'ensemble de la pâte, puisque c'est lui qui est sollicité lors des mouvements relatifs des particules. Cette transition de comportement peut paraître anodine, voire simpliste ; pourtant elle établit un pont crucial entre la mécanique des sols, où les grains imposent leur comportement, et la mécanique des fluides, où le liquide dicte sa loi.

Suspensions concentrées

Au sein des pâtes à grains fins, le liquide ne peut plus migrer facilement, car le réseau de conduites formées par les vides laissés par les grains est trop étroit : quelques micromètres de diamètre tout au plus. Or, la différence de pression à appliquer pour déclencher un écoulement dans une conduite est inversement proportionnelle au rayon de la conduite à la puissance quatrième. Dans les conditions ordinaires de déformation du mélange, où les pressions sont peu élevées, la circulation du liquide à travers ce réseau est lente.

Ces matériaux à grains fins ont alors un comportement particulier. Dans un

premier temps, ils se comportent comme des fluides à seuil, c'est-à-dire que, lorsqu'on les étale sur un plan inclinable, l'écoulement ne se déclenche qu'au-dessus d'un seuil d'inclinaison. Le réseau de particules solides ou enchevêtrées rigidifie l'ensemble. En revanche, après un temps de repos, ces pâtes sédimentent, de sorte que l'on voit apparaître une couche de liquide à leur surface : la matière solide s'est tassée. Ainsi, la structure, que l'on croyait rigide, peut s'effondrer sur elle-même.

Ces pâtes à grains fins peuvent aussi se fracturer facilement. Imaginons l'expérience simple suivante : on écrase d'abord une couche de pâte (sans exsudation) entre deux plateaux, puis on écarte les plateaux progressivement (voir la figure 5). C'est par exemple ce que nous faisons lorsque nous ne sommes pas satisfaits de l'emplacement du carreau de faïence qui vient d'être posé et que nous le retirons. Avec un liquide ordinaire, ce geste engendre l'écoulement de la couche liquide vers le centre des plaques et il se forme un filet fluide qui s'étire de manière continue et finit par se rompre (comme une goutte d'huile étirée entre le pouce et l'index). Dans le cas d'une pâte granulaire suffisamment concentrée et fine, l'évolution est brusque : après le début de l'écoulement, la couche se fracture sur toute sa surface ; les deux surfaces de fracturation ressemblent alors à des massifs montagneux (voir la figure 6). Pourtant tout enfant sait qu'il est possible d'étirer continûment un cylindre de pâte à modeler sans le fracturer. Il suffit d'écraser en même temps latéralement le cylindre, de même qu'un cuisinier étale une pâte à tarte progressivement avec un rouleau. Cette technique a cependant l'inconvénient de consommer beaucoup d'énergie.

Comment expliquer cette différence de comportement ? Lors d'un étirement, les particules solides se gênent mutuellement, car la place est restreinte, et les modifications de configuration sont difficiles compte tenu de la migration trop lente du liquide. L'écartement des plaques engendre une dépression dans la couche, d'autant plus importante que l'épaisseur de la couche est faible et que la vitesse d'écartement des plaques est élevée. Cette dépression peut devenir si grande qu'elle déclenche un phénomène de cavitation au sein du liquide (lorsque l'on tire sur un liquide, on écarte les

molécules au point de le transformer en gaz, c'est la cavitation). Il se forme alors des bulles de vapeur ou d'air. Cette cavitation démarre en de nombreux endroits. La coalescence de ces cavités à l'intérieur du matériau brise la pâte en deux fragments.

En revanche, si l'on fournit suffisamment d'énergie afin que les particules puissent se réarranger continuellement à mesure de l'étirement, la fracturation ne se produit pas. À l'inverse, quand on cherche à former une seule boule avec deux morceaux de pâtes à modeler, on ne perçoit plus aucune trace de la séparation initiale en deux morceaux, à condition de bien malaxer la pâte. Pourtant, si l'on colle l'un contre l'autre les deux morceaux sans malaxage, cette trace subsiste longtemps. Le malaxage de la pâte aide la migration du liquide, ce qui réorganise le réseau de particules, en faisant notamment s'interpénétrer les deux réseaux.

L'étude de l'écoulement de pâtes granulaires aux comportements en apparence différents fait apparaître une unité des mécanismes physiques. C'est la collaboration de chercheurs de spécialités variées qui a permis l'identification de cette unité. Les pâtes fascinent par ces comportements étranges dont les sables mouvants ou les écoulements de cendres sont les manifestations les plus dramatiques. Même un simple mélange d'eau et de farine de maïs permet d'obtenir un comportement étrange : en apparence liquide, ce mélange semble solide lorsqu'on le heurte. Toutefois, outre les mécanismes décrits dans cet article, ce comportement fait intervenir des effets colloïdaux. C'est la meilleure compréhension de tous ces mécanismes qui permettra, par exemple, de mieux couler du béton (voir la figure 7) ou de canaliser les écoulements de cendres.

Philippe COUSSOT est chercheur au Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil de Champs-sur-Marne (LCPC-CNRS). Henri VAN DAMME est physicien au Laboratoire de physico-chimie macromoléculaire de l'ESPCI. Christophe ANCEY est chercheur au Cemagref de Grenoble.

Ph. COUSSOT et Ch. ANCEY, *Rhéophysique des pâtes et des suspensions*, EDP-Sciences, 1999.

J. DURAN, *Sables, poudres et grains*, Eyrolles, 1997.

Astéroïdes et comètes : des tas de cailloux

ERIK ASPHAUG

Les astéroïdes menacent la Terre, mais ils détiennent des informations précieuses sur l'origine des planètes.

Au début de la conquête spatiale, personne n'avait entendu parler des astéroïdes. Les astronomes connaissaient mal ces petits corps célestes. Aujourd'hui, on commence tout juste à comprendre de quoi ils sont faits et comment ils se sont formés. Cependant, leur comportement reste énigmatique.

Bien qu'aucune sonde n'ait observé un astéroïde de près, on pense que les plus gros sont des versions miniatures et cabossées de la Lune. La pesanteur y est réduite : quand le diamètre est inférieur à quelques dizaines de kilomètres, elle est trop faible pour leur donner une forme sphérique, et ils ressemblent alors à un haricot sec, à une molaire, à une cacahuète... En raison de cette irrégularité, les objets peuvent même être attirés vers d'autres directions que celle du centre de masse. De surcroît, leur rotation parfois complexe contribue à produire des effets contraires à l'expérience quotidienne : sur certains astéroïdes, le bas n'est plus le bas, on y «tomberait» parfois vers le sommet d'une montagne, et des sauts trop vigoureux conduiraient soit dans l'espace infini, soit sur une orbite chaotique qui, après plusieurs jours, ramène en un endroit complètement imprévisible de la surface. Un caillou que l'on jette devant soi peut retomber sur la tête. Un petit saut conduit parfois à 100 mètres de la position initiale, voire modifie la forme de l'astéroïde. Le plus discret des visiteurs laisserait sur son passage un nuage de poussière qui subsisterait pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines.

Des sondes spatiales, telle NEAR (*Near Earth Asteroid Rendezvous*, soit «rendez-vous avec un astéroïde proche

de la Terre»), mise en orbite autour d'un astéroïde, améliorent notre compréhension de ces objets déroutants. Toutefois, malgré quelques observations lors du passage occasionnel de tels objets à proximité de la Terre, nous connaissons moins bien les astéroïdes (et les comètes, leurs cousines) que nous ne connaissons la Lune à l'aube de l'exploration spatiale. Ces petits corps sont le théâtre d'interactions subtiles entre des forces mineures, dont aucune n'est négligeable ni facile à simuler sur la Terre. Sont-ils solides ou constitués de cailloux agglomérés? Quelle est leur composition? Comment survivent-ils aux collisions avec les autres corps de petite taille? Une sonde ou un astronaute pourraient-ils s'y poser?

Des gâteaux mal cuits

À la fin des années 1980, les astéroïdes n'étaient encore que des points lumineux (environ un millier) formant une ceinture entre Mars et Jupiter ; on en connaissait quelques-uns plus près de la Terre et l'on savait leur parenté avec les comètes, venues des confins du Système solaire. Comme leur couleur et leur luminosité variaient périodiquement, on avait déduit que ces corps avaient des formes irrégulières et une taille comprise entre celle d'une maison et celle d'un pays, avec une période de quelques heures à quelques jours.

Les analyses et observations des dernières décennies ont précisé les idées. En général, les astéroïdes proches de Mars et de la Terre sont faits de roches et de fer, tandis que les astéroïdes proches de Jupiter, sombres et rouges, semblent avoir une composition plus «primitive», c'est-à-dire ana-

logue à celle de la nébuleuse à partir de laquelle les planètes se sont formées, il y a 4,56 milliards d'années. La date de cette coalescence des planètes, naguère incertaine, a été précisée par l'analyse des isotopes du plomb (les produits de la désintégration radioactive de l'uranium) dans les plus vieilles météorites. En fait, on a longtemps pensé que ces roches tombées du ciel étaient des fragments d'astéroïdes ; la comparaison du spectre lumineux émis par les météorites et les astéroïdes a confirmé cette intuition.

De ce fait, de nombreux astronomes ont pensé que l'on éluciderait l'histoire du Système solaire si l'on observait les astéroïdes au télescope et si l'on analysait les météorites. La mise en œuvre de ce programme a été difficile, mais elle a conduit à une théorie bien acceptée de l'histoire du Soleil et de son cortège de corps. La formation des planètes à partir d'une nébuleuse de gaz et de poussières a commencé avec l'aggrégation de grains minuscules en «planétésimaux», les briques élémentaires des planètes. Au-delà de Mars, l'attraction exercée par Jupiter a bloqué la croissance de ces corps, dont le diamètre est resté inférieur à 1 000 kilomètres. Les fragments qui ne se sont pas agglomérés sont devenus les astéroïdes.

Les plus grosses de ces planètes «ratées» ont accumulé suffisamment de chaleur interne pour se «différencier» : les métaux, plus denses que les roches, ont été attirés vers l'intérieur, formant peut-être un noyau, dans certains cas. Des roches ont fondu, et des éruptions volcaniques se sont produites sur certains corps. Aucun astéroïde n'est assez gros pour retenir une atmosphère, mais les minéraux



1. AVEC SON GROS CRATÈRE (*en bas*), l'astéroïde Éros mesure 33 kilomètres de longueur. Sur la face opposée, la dépression en forme de selle de cheval (*en haut, à gauche*) présente de nombreuses marques

inexpliquées. Grâce à des images comme celles-ci, les astéroïdes, qui étaient autrefois des points lumineux mystérieux, sont aujourd'hui des mondes que l'on explore.

hydratés de certaines météorites révèlent qu'ils ont porté de l'eau liquide.

Puis Jupiter perturba les trajectoires des planétésimaux, modifiant à la fois l'ellipticité et l'orientation du grand axe

de l'orbite ; les collisions entre planétésimaux sont devenues de plus en plus violentes, de sorte que ces corps ont cessé de grossir (ils perdaient des morceaux ou volaient en éclats). Souvent,

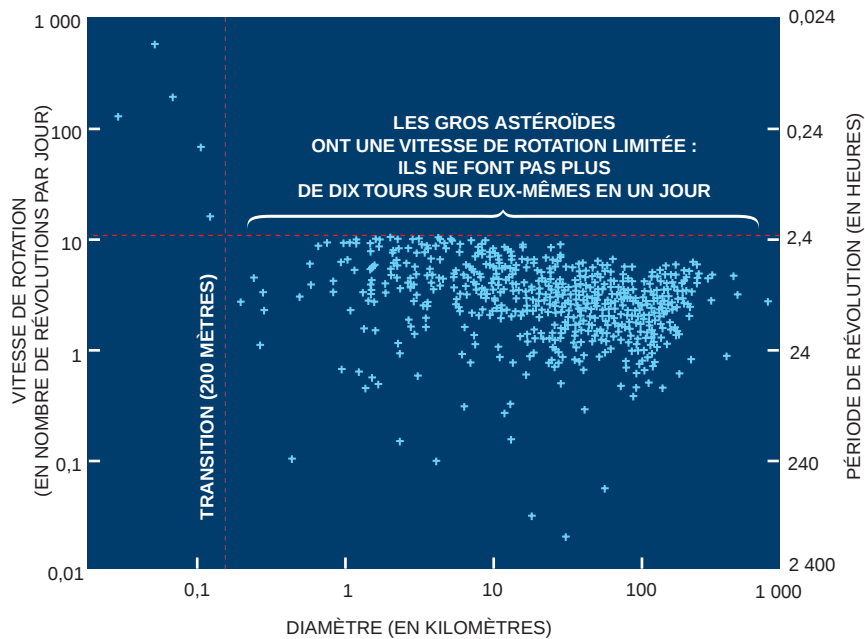
les débris ont continué à tourner autour du Soleil, formant des familles aux orbites voisines et aux spectres semblables. La plupart des astéroïdes et des météorites sont des morceaux rocheux ou métalliques de planétésimaux disloqués. D'autres – la plupart des comètes – sont des corps plus primitifs, qui ne se sont jamais différenciés, des reliques de la préhistoire des planètes.

Le ciel nous tombe sur la tête

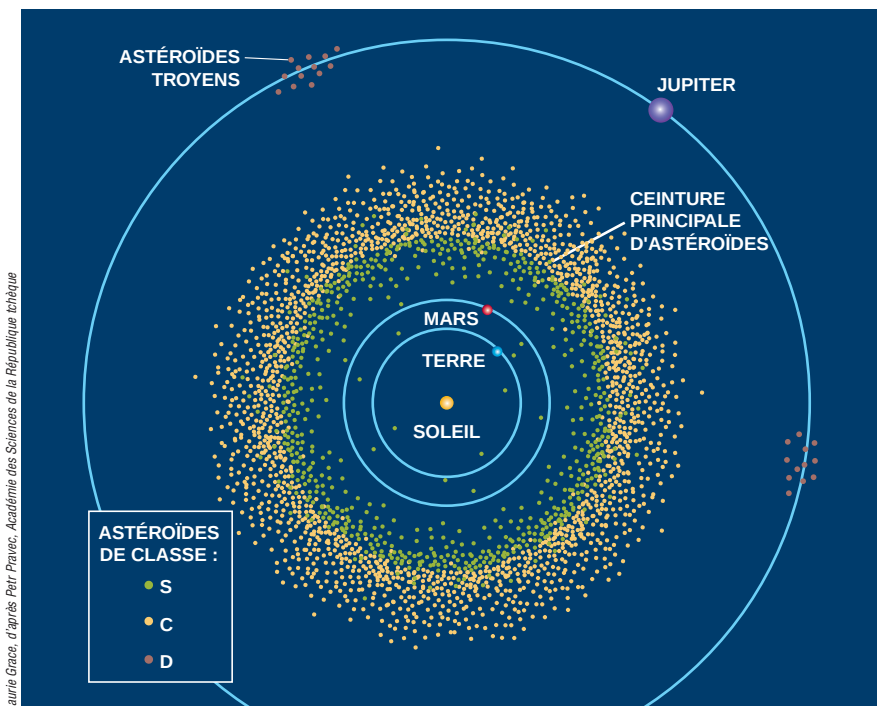
Il y a dix ans seulement, la spectroscopie des astéroïdes avait progressé, mais les astronomes n'avaient encore aucune image détaillée d'un astéroïde. Les premiers de ceux qui avaient été découverts, au début du XIX^e siècle, avaient reçu des noms mythologiques, conformément à la tradition astronomique, mais le panthéon est rapidement devenu insuffisant : quand on a commencé à repérer les astéroïdes en grand nombre, on a dû se rabattre sur les noms de leurs découvreurs, puis sur ceux de leurs femmes, bienfaiteurs, collègues... Oubliés pendant presque un siècle, ils passionnent aujourd'hui, car les sondes spatiales nous en ont rapporté des images : ils apparaissent non plus comme de faibles scintillements dans le ciel, mais comme des objets aux reliefs stupéfiants.

Cette renaissance est due en partie à Daniel Goldin, administrateur de la NASA, qui a voulu faire «plus vite, mieux, moins cher». Quelle aubaine pour les spécialistes des astéroïdes : ces corps sont plus accessibles que les planètes majeures du Système solaire. De surcroît, les planétologues et les paléontologues se sont beaucoup intéressés aux astéroïdes, car l'un d'entre eux semble avoir exterminé les dinosaures, il y a 65 millions d'années (voir *Un impact d'origine extraterrestre?*, par Walter Alvarez et Frank Asaro, *Pour la Science*, décembre 1990).

Un tel impact se reproduira certainement un jour, mais quand ? Tant que nous n'aurons pas recensé les gros astéroïdes qui frôlent la Terre, nous n'en saurons rien. Quand aux comètes potentiellement dangereuses, nous ne les recenserons jamais toutes non plus, car leur passage dans le Système solaire est extrêmement rare. La probabilité que la chute d'un corps céleste provoque une catastrophe naturelle qui perturbe l'ensemble du Globe, au cours d'une année donnée, reste extrêmement



2. LES ASTÉROÏDES semblent être de deux types. Ceux dont le diamètre est supérieur à 200 mètres, avec une rotation sur eux-mêmes en plus de deux heures, sont des tas de cailloux. Ils se disloqueraient s'ils tournaient plus vite. Les plus petits, qui tournent sur eux-mêmes en quelques minutes, sont des blocs rocheux. Les tas de cailloux étaient probablement des blocs rocheux qui se sont fragmentés lors de collisions et ont de nouveau agrégé une partie de leurs morceaux.



3. LA CEINTURE PRINCIPALE D'ASTÉROÏDES du Système solaire est à l'extérieur de l'orbite de Mars. Quelques astéroïdes solitaires traversent l'orbite de la Terre (qu'ils percutent parfois). D'autres, connus sous le nom d'astéroïdes troyens et répartis en deux groupes, sont en orbite synchrone avec Jupiter. Dans la ceinture principale, les astéroïdes sont essentiellement composés de roches et de fer (les astéroïdes de classe S). Plus loin, des astéroïdes rouges et sombres sont plus riches en carbone (les astéroïdes de classes C et D).

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.

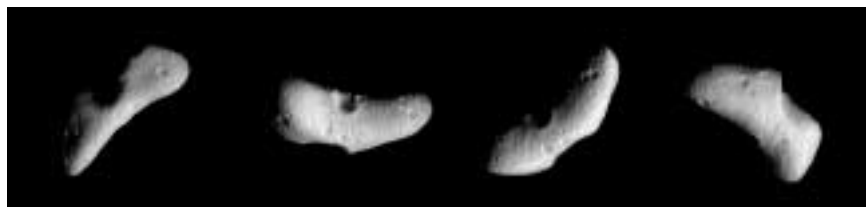
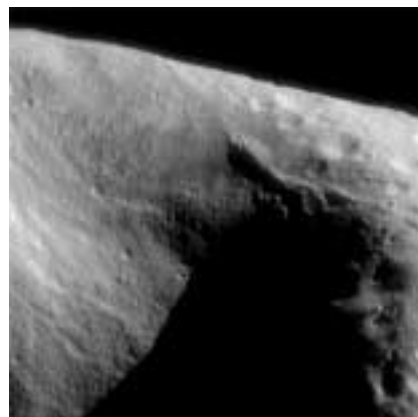
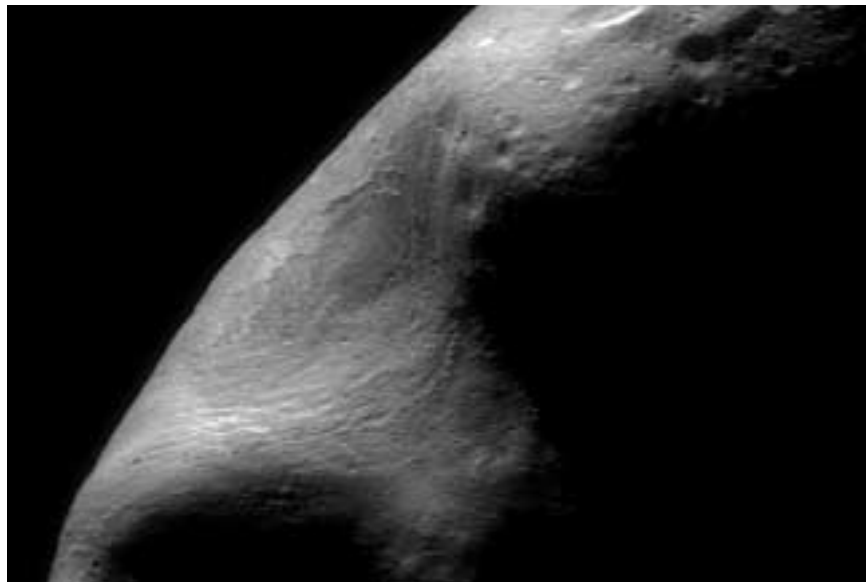
Il y a trois ans, quand la sonde NEAR a survolé l'astéroïde Mathilde, le planétologue Eugene Shoemaker a compris que les immenses cratères et la très faible densité observés s'expliquaient mutuellement : un tas de cailloux supporte beaucoup mieux les chocs qu'un objet d'un seul tenant ; il absorbe et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

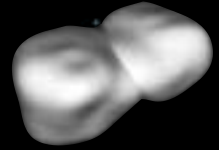
Dimensions : $1,8 \times 0,8$ kilomètre

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

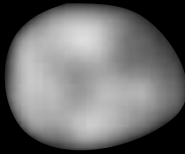
Classe spectrale : S

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 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).

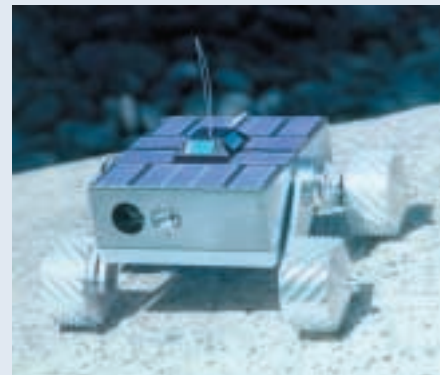
Ainsi les petits astéroïdes ont des formes spectaculaires, parce qu'ils ne retiennent pas les débris formés lors des collisions. Les gros astéroïdes sont des assemblages de morceaux plus petits, auxquels la gravité et les collisions aléatoires ont donné une forme arrondie ou, s'ils tournent sur eux-mêmes,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

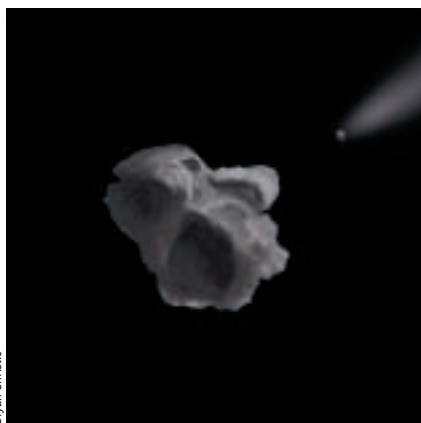
et d'autres formes de dissipation de l'énergie. Quand les chocs donnent aux boules assez d'énergie, elles se dispersent, mais, en général, elles finissent par se regrouper. Les simulations de D. Richardson s'appliquent à l'étude des collisions peu violentes qui ont abouti à l'accrétion des astéroïdes 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

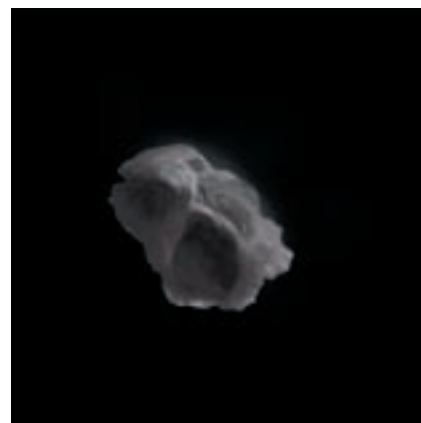


Bryan Christie

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 recouvrirent les traces de celle-ci.

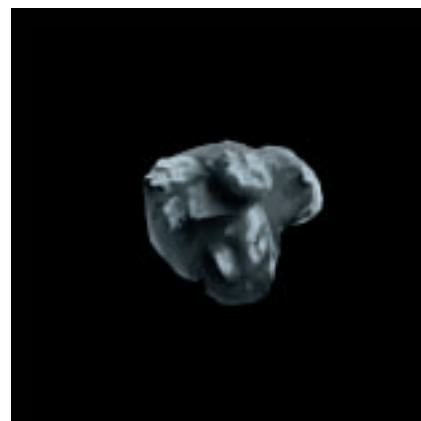


Bryan Christie

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.



que le projectile, se vaporisent en quelques millisecondes, engendrant une onde de choc puissante. Comme cette dernière ne se propage pas dans le vide, elle rebondit sur les surfaces de l'astéroïde, y compris sur la fracture entre ses deux parties. De ce fait, le morceau de l'astéroïde qui n'a pas été heurté directement n'est pas perturbé par l'onde de choc, tandis que le morceau heurté se divise en plusieurs dizaines de gros fragments, qui mettent des heures à se disperser ; les plus gros finissent par se rassembler.

En changeant la configuration initiale ou les paramètres de l'astéroïde, qui sont d'ailleurs mal connus, on obtient des résultats complètement différents. Notamment, si on définit les astéroïdes comme des tas de cailloux, ils explosent difficilement.

Rendez-vous avec Éros

En comparant les images d'astéroïdes à des simulations fondées sur différentes hypothèses initiales, on cherche à comprendre les caractéristiques les plus étranges de ces corps. Avec Peter Thomas, de l'Université Cornell, nous avons ainsi analysé la collision qui forma le plus gros cratère de l'astéroïde Mathilde : nous obtenons un diamètre, une forme et un dépôt de débris analogues à ceux qui ont été observés.

Quand on suppose que Mathilde fut initialement d'un seul tenant, on doit conclure que l'astéroïde se serait cassé en plusieurs dizaines de morceaux, contrairement aux observations. Avec l'hypothèse du tas de cailloux, la simulation concorde avec les observations. Kevin Housen, du Laboratoire Boeing de physique des collisions, pense aussi que Mathilde est un tas de cailloux, mais il considère que les cratères sont des fosses de tassement, comme des creux dans un sac de grain, plutôt que le résultat de collisions.

Ces études préparent les missions futures. Selon que les astéroïdes sont des agglomérats ou des monolithes, on n'utilisera pas les mêmes méthodes pour prélever des échantillons ; à plus longue échéance, on devra également tenir compte de la constitution des astéroïdes pour y construire des télescopes, en extraire des minéraux ou les dévier s'ils menacent la Terre. L'irrégularité du champ gravitationnel complique déjà les missions d'exploration des astéroïdes et des comètes : autour de ces corps, les

sondes ont souvent des orbites chaotiques, de sorte qu'elles risquent de s'écraser à la surface des objets qu'elles visitent ; pour les mêmes raisons, le pointage des caméras et des autres instruments dans la bonne direction est difficile. Pour éviter ces inconvénients, la sonde NEAR observe Éros en restant à plus de 100 kilomètres de lui, de sorte que l'objet, en forme de pomme de terre irrégulière, exerce une attraction analogue à celle d'une sphère. En mesurant les écarts de NEAR par rapport à une orbite elliptique, on déterminera la répartition des masses à l'intérieur d'Éros.

NEAR tourne autour de cet astéroïde à la vitesse d'un cycliste peu pressé. La sonde envoie vers la Terre une quantité considérable d'informations qui devraient d'abord montrer la différence entre les astéroïdes et les météorites. Des caméras cartographient Éros avec une résolution de quelques mètres, des spectromètres analysent sa composition, et un magnétomètre détectera un éventuel champ magnétique propre, ainsi que ses interactions avec le champ solaire. Les missions suivantes étudieront les astéroïdes et les comètes encore plus en détail, à l'aide de modules qui se poseront, feront des forages et renverront des échantillons. Ainsi comprendra-t-on mieux la physique des petits corps planétaires, où la cohésion joue parfois un rôle aussi important que la gravité. Assez gros pour retenir leur substance, mais trop petits pour lui donner une forme ronde, ni rochers ni planètes, les astéroïdes tiennent à la fois du ciel et de la Terre.

Erik ASPHAUG est astrophysicien à l'Université de Californie.

Hazards Due to Comets and Asteroids, sous la direction de Tom Gehrels, University of Arizona Press, 1994.

John LEWIS, *Mining the Sky*, Addison-Wesley, 1996.

Erik ASPHAUG, Steven J. OSTRO, R.S. HUDSON, D.J. SCHEERES et Willy BENZ, *Disruption of Kilometre-Sized Asteroids by Energetic Collisions*, in *Nature*, vol. 393, pp. 437-440, 4 juin 1998.

Harry MCSWEEN, *Meteorites and Their Parent Planets*, deuxième édition, Cambridge University Press, 1999.

Eileen RYAN et William BOTTKE, *Asteroid Fragmentation and Evolution of Asteroids*, in *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, vol. 28, pp. 367-389, Annual Reviews, 2000.



CE QUE DISENT LES PIERRES

Maurice Mattauer

Ce livre vous convie à une promenade illustrée dans l'univers des pierres. À partir de l'image, Maurice Mattauer, professeur de géologie à l'Université de Montpellier, reconstitue l'histoire des roches et les grands événements dont elles sont les témoins, et invite à un «retour aux pierres», gage d'une nouvelle compréhension de la nature.

Code P001 • 100 F
144 pages

Voir bon de commande
page 90

