

Collisions de comètes et d'astéroïdes : La Terre est-elle menacée ?





Entre le 6 et le 22 juillet 1994, la comète Shoemaker-Levy 9 s'écrasait sur Jupiter. Ainsi, pour la première fois, nous avons pu observer une comète heurter une planète.

Au-delà de toute l'activité scientifique liée à cet événement, il est intéressant de se poser la question suivante : cela pourrait-il arriver à la Terre et, si oui, comment pourrions nous y faire face ?

Philippe Jamet

Les investigations menées depuis le début des années 50 (passage de l'inanimé au vivant, exobiologie, formation des étoiles et des planètes, « crises de la vie », impactisme) nous amènent à nous poser tellement de questions inattendues qu'elles nous forcent à écarter définitivement toute approche parcellaire de problèmes globaux.

Les fantastiques découvertes effectuées sur les nuages interstellaires par la radioastronomie et l'astronomie infrarouge, les questions que pose l'étonnante « chimie du froid extrême » mise en évidence par des scientifiques russes et néerlandais, les bouleversements en matière de planétologie induits par les programmes Voyager et Viking, tendent à prouver que les apparentes discontinuités et hétérogénéités qui différencient les planètes du système solaire ne constituent qu'un « habillage circonstanciel ». Il existerait — fait encore insoupçonné il y a peu — un *lien organique* entre les mondes planétaires sous tous leurs aspects les plus complexes (comme la vie et l'émergence de l'intelligence) et le cosmos lui-même, fait d'interactions et même de cycles plus ou moins apparents. La compréhension récente de la nature profonde des comètes, des astéroïdes et de leurs processus complexes a considérablement accéléré la résolution de nombreux problèmes.

Tous les problèmes globaux dont nous venons de parler sont liés par des chaînes inextricables entrant en *résonance* les unes avec les autres et, plus le temps passe, plus les scientifiques découvrent avec étonnement que leur résolution implique d'élargir le débat jusqu'au niveau *galactique*. Il semble bien, en effet, que des phénomènes extérieurs au système solaire puissent jouer, de temps à autre, un rôle de « déterminant majeur » dans les processus complexes qui s'y déroulent. Toutefois, un acteur récent est apparu dans la longue histoire de l'évolution vers la complexité au sein de notre système planétaire. Un acteur majeur qui remet en cause le règne « dictatorial » des

« déterminants extérieurs ». Cet acteur majeur s'appelle l'homme. Avec son intelligence, sa capacité de compréhension du réel et sa créativité, il peut modifier une fois pour toutes les règles du jeu, en faisant appel aux technologies les plus modernes. De tous les participants au jeu singulier du Cosmos, c'est le seul capable d'échapper au déterminisme qui règle les actions aveugles et mécaniques des autres acteurs, le seul capable de modifier le cours des choses.

Système solaire et collisions

Le reflet de cette trame cosmique reliant le stellaire et le planétaire au galactique apparaît dans le processus qui conduit à la création de systèmes planétaires, dont notre système solaire reste, jusqu'à présent, le seul exemple achevé que nous puissions contempler in situ. Toutes les découvertes les plus récentes n'ont fait que renforcer l'idée de cette imbrication. Notre système planétaire serait le produit d'éléments de processus *endogènes*, liés au phénomène de contraction gravitationnelle d'un gros nuage de poussières et de molécules qui aurait également subi l'influence d'éléments *exogènes*, en apparence « indépendants ». Ces derniers ont induit, au niveau du système solaire en formation, des processus collisionnels et de pénétration qui sont probablement les conséquences de phénomènes cataclysmiques. On peut imaginer, par exemple, l'explosion de supernovæ, entraînant des ondes de choc dont l'effet et la dispersion se seraient étendus sur des dizaines de millions d'années.

Ceci paraît effarant si l'on raisonne, du point de vue de l'échelle du temps humaine, mais tout à fait normal et « ordinaire » à l'échelle cosmique, où les effets d'un cataclysme sont, à cause des longues distances, en quelque sorte « conservés » avant d'entrer en action. On peut dire que chaque étoile de notre galaxie contient, dans une certaine mesure, la signature de processus plus ou moins lointains qui se sont produits des millions d'années, voire des centai-

nes de millions d'années avant sa formation ! De plus, une fois formée, la protoétoile peut encore subir l'influence d'événements ultérieurs du même type, comme, par exemple, rencontrer d'autres nuages denses de molécules et de poussières, au cours de son périple par rapport au centre galactique. Un tel événement pourrait expliquer certaines périodes glaciaires de notre histoire terrestre, contribuant à faire baisser, au prix d'une occultation minime, la quantité d'énergie solaire transmise au niveau de l'orbite terrestre.

Pour ce qui concerne notre système solaire, et donc le problème des collisions qui, comme nous le verrons, lui sont inhérents de par sa nature, nombre de théories plus ou moins cohérentes ont été proposées. Cependant, la question de son origine ne saurait être dissociée de son étonnante structure au sein de laquelle se meuvent des objets tellement divers qu'il est impossible d'y retrouver deux objets aux caractères pratiquement identiques. En effet, comment expliquer qu'à l'intérieur d'un même système solaire et planétaire, visiblement issu de la même structure originelle de base, puissent exister des corps aussi *dissemblables* que :

- une étoile centrale éjectant à chaque seconde des quantités phénoménales de rayonnements et d'énergie ;
- des planètes telluriques solides (Mercure, Vénus, la Terre, Mars) ;
- des planètes géantes gazeuses (comme Jupiter et Saturne), entourées elles-mêmes de mini-systèmes planétaires et ayant entre elles autant d'hétérogénéités que de similitudes ;
- des astéroïdes solides de grande taille dont les orbites sont relativement proches du Soleil ;
- des comètes composées à la fois d'éléments volatils et d'éléments solides mais dont les trajectoires, encore plus exotiques que certains cas extrêmes d'astéroïdes, ont pour particularité de posséder une aphélie (partie de leur orbite la plus éloignée du Soleil), située parfois à plusieurs

centaines, voire plusieurs milliers et dizaines de milliers d'unités astronomiques de notre étoile centrale.

Et le problème s'est encore récemment compliqué entre 1977 et 1992 : tout d'abord avec la découverte de l'objet Kowal (dénommé depuis Chiron), situé entre Saturne et Uranus, ensuite avec la mise en évidence d'objets « transneptuniens » par l'équipe de l'Américain Jewitt. Curieusement, ces étranges objets semblent revêtir à la fois les caractéristiques des comètes et des astéroïdes. Des travaux récents¹ de l'astrophysicien Cruikshank tendent à montrer qu'il en existerait des milliers au niveau de la fameuse Ceinture de Kuiper, dénommée ainsi en l'honneur du pionnier américain-hollandais qui fut le premier à en soupçonner l'existence. Selon Cruikshank, une taille de 150 à 200 kilomètres pour ces objets ne serait pas rare. Pour sa part, le spécialiste français Michel Maurette estime que ces objets devraient faire l'objet d'une surveillance particulière.

Jusqu'à présent ces objets « intermédiaires » difficiles à classer (auxquels pourrait peut-être appartenir la comète Shoemaker-Levy qui s'est écrasée en morceaux sur Jupiter en juillet dernier) n'avaient pas été détectés faute de programme de recherche spécifique. Depuis le début des années 90, ils font l'objet de tentatives de détection systématique de la part d'observatoires américains. Toujours selon Cruikshank et Maurette, certains de ces objets pourraient, à la suite de phénomènes gravitationnels, être éjectés vers les parties internes du système solaire sur des orbites de collision planétaire !

Ce n'est pas surprenant puisque l'impactisme a été la règle au tout début de la formation du système solaire. L'évolution d'une situation de processus d'accrétion du tout jeune système planétaire vers l'ordre apparent et bien huilé actuel n'empêche pas toutefois certains objets d'y déroger de temps à autre. Le processus ayant mené à la formation du système solaire donne l'explication de cet apparent illogisme. Les premières explications quant à ce processus (du type « nébuleuse primiti-



La collision toute récente avec Jupiter de la comète Shoemaker-Levy, comète qui avait été préalablement dissociée par les forces gravitationnelles de la planète géante, prouve que l'impactisme qui était la règle au début de la formation du système solaire est toujours actuel en tant qu'effet résiduel du processus d'accrétion des planètes. Selon Eric Gérard, radioastronome à l'Observatoire de Meudon, le phénomène d'explosion constaté dans l'atmosphère de Jupiter, lors de ces impacts, prouve que la comète en question possédait un noyau dur de poussières et de roches.

ve »), quoique logiques, sont restées longtemps théoriques. Ce n'est qu'au milieu du XX^{ème} siècle, et grâce à l'observation en direct des mécanismes de formation des protoétoiles et des T Tauri au sein de nuages de poussières denses, que l'on a pu acquérir une réelle compréhension de ce processus. Parallèlement, à l'aide de la spectroscopie et la radioastronomie centimétrique et millimétrique, on mit en évidence « analogies et ressemblances » entre ces nuages et les comètes.

Actuellement, l'hypothèse la plus probable concernant la naissance du système solaire est la suivante. Au départ, nous avons, situé près du plan médian galactique, un parmi ces nombreux nuages de poussières et de molécules interstellaires. Celui-ci est partiellement dissocié par les ondes de choc provoquées par des explosions de supernovæ relativement « proches », apportant avec elles des tourbillons de poussières et de gaz éjectés. Ensuite, ce nuage commence, au cours d'une longue évolution pouvant s'étendre sur plusieurs centaines de millions d'années, à se recomposer mais *enrichi* par l'apport des éléments venus de ces supernovæ. Selon Paul Pellas, un chercheur mondialement connu du Muséum et grand spécialiste des météorites, cinq ou six événements de ce type ont probablement coexisté à la naissance du système solaire et on en retrouve des traces indiscutables au niveau des

isotopes de certains éléments trouvés dans des météorites comme le néon 20 et le néon 22. Ce phénomène se reproduit d'ailleurs en d'autres points de la Galaxie, il s'est déjà produit de nombreuses fois par le passé, il se reproduira encore, il est *permanent* !

C'est à partir de cet enrichissement important en éléments extérieurs que nous allons pouvoir comprendre le processus d'évolution de notre nuage désormais devenu *plus dense et plus massif*. Même si en comparaison d'une atmosphère planétaire celui-ci est relativement peu dense, il ne faut pas oublier que l'effet de *taille* compense l'effet de *densité*. Plus notre nuage est grand, plus il est dense, plus ses forces de gravitation vont être élevées ! Passé un certain seuil critique, il va tendre à s'effondrer sur lui-même.

Dans un premier temps notre nuage va ressembler à une grosse boule de gaz et de poussières tournant sur elle-même. Dans un deuxième temps, la boule « primitive » tournant de plus en plus vite évoluera peu à peu vers une structure en forme de disque relativement épais, s'affinant au fur et à mesure des phases successives de son évolution. Au centre du disque où une structure en forme de boule ramassée persiste, la densité de matière augmente de telle façon qu'une brutale pression apparaît sur les composantes de gaz et de poussières, lesquelles vont s'échauffer les unes les

autres jusqu'à ce qu'apparaisse un « noyau chaud », puis une protoétoile et enfin une étoile qui va devenir notre Soleil ! C'est à ce moment-là que la contraction de notre nébuleuse protostellaire va se ralentir et que notre étoile devient un véritable « maelström » dont la température au centre peut atteindre 15 millions de degrés, dès qu'ont été amorcées les réactions de nucléosynthèse. Déjà bien avant ce stade, les molécules complexes et les éléments les plus volatils ont totalement disparu du centre de la nébuleuse, sauf une fraction importante de l'hydrogène et quelques éléments résiduels ayant, grâce à la protection de quelques éléments lourds, échappé à la destruction.

Par contre, à partir d'une certaine distance de la nouvelle étoile et plus encore sur les parties externes de la nébuleuse primitive, il *subsiste* des poussières et des molécules en partie dissociées. Cette situation explique l'incroyable hétérogénéité des corps qui composent notre système solaire. Pour des raisons évidentes de mécanique et de dynamique, et plus encore à cause des écarts considérables de température selon que l'on se trouve dans une partie du disque proche ou éloignée de notre étoile centrale, apparaissent progressivement des « hétérogénéités locales ». Elles ont les unes par rapport aux autres des dissemblances de départ avec cependant toutes un point com-

mun : les grains de poussières et de silicates ont tendance à sédimenter et à s'agglutiner en anneaux dans le plan équatorial.

Au niveau de ces anneaux se produisent des phénomènes d'accrétion des grains de poussières, des particules de fer et de silicates et des molécules résiduelles plus ou moins complexes qui vont d'abord évoluer en petits « planétésimaux » de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, dont les forces gravitationnelles, si faibles soient-elles, finissent par jouer les unes sur les autres à cause de « l'effet de temps ». Peu à peu nos planétésimaux finissent par s'agglomérer en structures plus importantes ayant de 1 à 1000 kilomètres de diamètre, lesquelles finissent, par processus d'accrétion successifs, par évoluer vers le stade de « protoplanètes » et aboutir aux planètes que nous connaissons actuellement. Selon les spécialistes, ce processus d'accrétion menant à la formation des planètes se serait déroulé sur environ 500 millions d'années. Toutefois, conséquence du mécanisme que nous venons de décrire, l'hétérogénéité constatée aujourd'hui est déjà la règle dans le système nouveau-né :

- au niveau des anneaux les plus proches du Soleil, la chaleur de celui-ci a déjà fait de considérables dégâts et détruit presque totalement les éléments volatils du nuage originel. Seuls subsistent les éléments « durs » et réfractaires (avec, au sein de ceux-ci, quelques éléments légers protégés), et ce que nous connaissons actuellement sous le nom de Ceinture des astéroïdes. Celle-ci, située entre Mars et Jupiter, représente probablement la marque d'un anneau protoplanétaire qui n'a pu se former et évoluer jusqu'à ses dernières étapes, à cause de l'influence gravitationnelle de la planète géante toute proche et de bombardements de gros corps primitifs en orbite instable. Les planètes internes, formées à partir de ces éléments réfractaires et durs, composées d'un noyau de fer et de silicates, sont dites solides et telluriques. C'est le cas de Mercure, Vénus, la Terre et Mars qui ont au départ perdu plus de 95% de leurs éléments volatils.

- au niveau des parties du disque situées au-delà de la barrière des astéroïdes, et malgré les « pointes d'humeur » du Soleil nouveau-né, la densité de puissance transmise par l'énergie solaire ne suffit plus à détruire les éléments volatils et les molécules complexes du nuage interstellaire originel. De ce fait, le phénomène d'accrétion et la formation de planétésimaux se déroulent de façon différente. Ici les « grains » et les poussières de graphite et de silicates s'agglutinent non seulement entre eux mais aussi avec des glaces de méthane et d'ammoniac, de l'azote gelé, des glaces d'eau (H_2O) et la fraction résiduelle des molécules interstellaires originales. Du fait de processus complexes faisant intervenir à la fois une certaine forme d'énergie thermique interne à cause de leur taille en devenir et des températures très basses du milieu interplanétaire environnant, les planétésimaux des parties externes du disque évoluent peu à peu vers le stade de « géantes gazeuses ». Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune ont, à cause de leur masse de départ et des distances différentes où elles se sont formées autant de points communs que de différences. Les lois de la mécanique céleste prennent peu à peu le dessus sur le désordre originel, mais l'explication de l'incroyable dissemblance des divers composants de notre système planétaire n'est pas encore totalement réglé pour autant.

Il existe encore, sur chacune des orbites des planètes nouvellement formées (entre celles-ci et de chaque côté des plans orbitaux ou coupant ceux-ci déjà de façon excentrique), des centaines de milliards de petits corps résiduels qui n'ont pu participer au processus d'accrétion. A cette époque, le système solaire peut faire penser à une succession de « grosses grappes de raisin entourées de véritables nuages de guêpes ». Des centaines de millions de petits planétésimaux solides débarrassés de leurs éléments volatils (mais moins que les planètes telluriques), orbitent à la fois autour des planètes telluriques et autour du Soleil, jusqu'au niveau de la ceinture située entre Mars et Jupiter. Leur orbite est loin d'avoir atteint une stabilité définitive : ce sont les astéroïdes que nous connaissons ac-

tuellement, ceinture entre Mars et Jupiter, objets Apollo, Amor et Aten, « Mars-crossers ». Il faut également ajouter quelques « agglomérats » aujourd'hui disparus et dont l'un d'eux, d'une taille comparable à Mars est probablement à l'origine de la formation de la Lune, à la suite d'un monstrueux impact avec la Terre nouvellement formée !

Pour les planétésimaux situés au-delà, n'ayant pu participer au processus d'accrétion des géantes gazeuses, la situation est encore plus complexe. Sur une palette de structures possibles assez variée, s'agglutinent poussières, débris rocheux, hydrogène originel, glaces d'eau, de méthane et d'ammoniac, organisations exotiques comparables aux « chhydrates hydratés » terrestres et molécules de divers niveaux de complexité. Ce sont les cométésimaux, en fait nos futures comètes, qui ne doivent pas être classées en un modèle unique. Le fameux « modèle de Whipple » (dit de la « boule de neige sale »), n'expliquerait donc pas tout : certaines comètes (comme quelques objets du type « Earth Grazers » aux trajectoires inhabituellement exotiques) possèdent un *noyau solide*, ou bien ne sont ni plus ni moins que des « tas de boue congelés », comme le pensent les spécialistes français Michel Maurette et Michel Combes. Ces hypothèses ont d'ailleurs été confirmées par des travaux d'une équipe américaine de l'US Naval Observatory. Ils ont constaté qu'un nombre minime de comètes, s'écrasant sur les couches externes du Soleil, arrive au niveau de celles-ci pratiquement sans dislocations et que leur spectre, au moment de cette phase, présente toutes les caractéristiques d'un *noyau dur* important en révélant la dissociation ultime d'éléments comme le fer, le magnésium, le silicium, l'aluminium.

Nos comètes se forment selon un processus d'accrétion qui se situe sur une palette plus large que celui des astéroïdes. On les trouve à la fois sur les parties les plus externes du système solaire (Nuage de Oort), à des distances de 50.000 à 100.000 UA², et sur des orbites relativement proches de celles des planètes géantes gazeuses. Ces dernières constituent les pro-

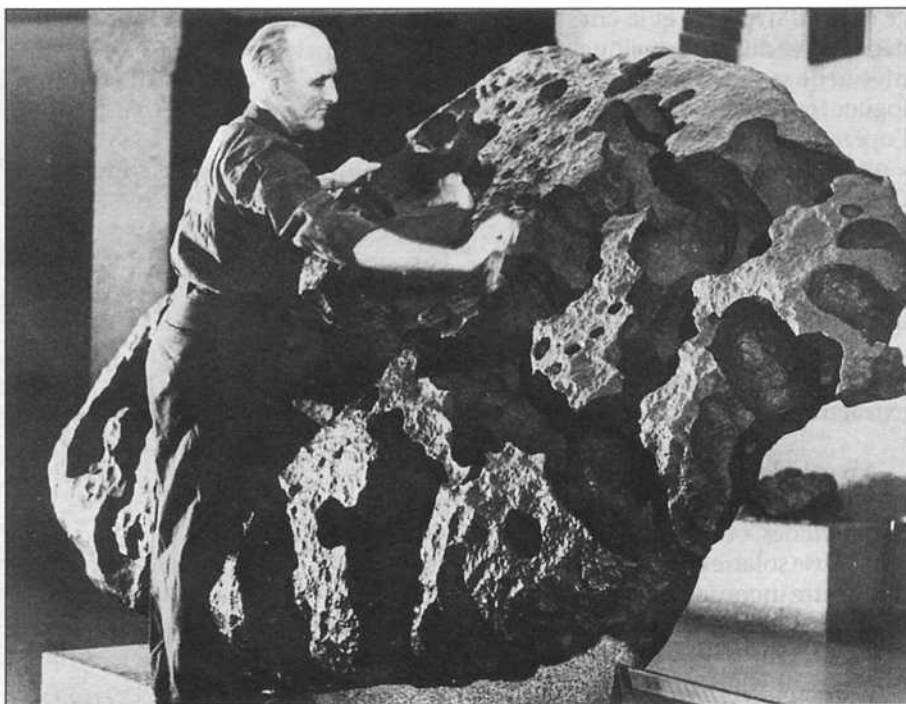
bables objets « intermédiaires » de la Ceinture de Kuiper, dont treize exemplaires de grosse taille ont été détectés jusqu'à ce jour. Résultat du désordre orbital qui règne dans le système solaire à cette époque, et aussi de l'influence gravitationnelle considérable des grosses planètes extérieures (Jupiter joue notamment le rôle d'un véritable accélérateur de masse), bon nombre de ces comètes sont rejetées dans toutes les directions. Elles rejoindront le Nuage de Oort, après un voyage de centaines ou de milliers d'années, ainsi que des orbites du nouveau système planétaire. Ceci explique une partie des collisions massives passées et des impacts avec les planètes telluriques.

Nous pouvons donc considérer, à juste titre, les astéroïdes et les comètes comme des « résidus fossiles » du système solaire. L'interaction des comètes et des astéroïdes avec les mondes telluriques a été importante, mais reste une donnée à prendre en compte si l'on raisonne sur des coupes temporelles élargies.

Les preuves d'impacts

L'idée, parfaitement exacte, selon laquelle la Terre pourrait être touchée par des « chutes de pierre » et par des impacts « d'objets venus du ciel » est fort ancienne. Elle était, dans l'Antiquité, naïvement assimilée à des « effondrements de la voûte céleste ». Des descriptions de ces événements apparaissent aussi bien dans des papyrus égyptiens que dans la littérature hébraïque ou encore l'Apocalypse de Saint-Jean : « *Il tomba dans la mer comme une grande montagne embrasée, le tiers de la mer devint du sang, il mourut le tiers des êtres vivants qui étaient dans la mer* ». Plus encore en arrière dans l'Histoire, la description de faits identiques apparaît dans la *Théogonie* d'Hésiode, dans les écrits du philosophe grec Anaxagore et chez Pline l'Ancien lorsqu'il parle de « *comètes et de prodiges ayant effrayé les peuples égyptiens* ».

Curieusement cette réalité qui semblait acquise aux yeux des savants de



La Willamette. Cette météorite, d'une masse de ferro-nickel de 14 tonnes, a été trouvée près de Portland (Orégon) en 1902.

l'Antiquité tomba dans les oubliettes jusqu'au XVIII^{ème} siècle (rappelons-nous l'hostilité de Lavoisier à l'idée que des « *pierres pussent tomber du ciel* »). Et pourtant, des chutes importantes de météorites avaient été signalées aux XI^{ème}, XIII^{ème} et XVI^{ème} siècles sur le territoire de l'Empire russe (comme la météorite de Tashkantan tombée en 1584), et des cratères importants attribués par les Indiens du Canada à des « *masses de pierres et de fer tombées du ciel* » avaient été signalés par ceux-ci aux colonisateurs incrédules, français et anglais. Vers le milieu du XVIII^{ème} siècle, un certain nombre de chutes de météorites ont eu pour témoins oculaires directs des centaines de personnes (comme l'astronome tchèque Stepling dans le cas de la chute spectaculaire de 1754 en Bohême). Les « certitudes » de la science officielle commencèrent à être ébranlées. C'est à un ecclésiastique, le Père Bachelot, que revint l'honneur d'être le premier scientifique de l'époque moderne à attribuer aux météorites une origine extraterrestre. Ce n'est toutefois qu'au début du XIX^{ème} siècle que fut reconnue officiellement la réalité de l'impactisme. En France, en 1803, sur la commune de L'Aigle dans l'Orne, près de 40 kilos de météorites

s'abattent en plein jour en s'éparpillant sur une zone de 40 km² et, parmi elles, on trouve des « objets » de 4 à 9 kilos visiblement issus d'une fragmentation d'un objet échauffé par les couches atmosphériques. Des chutes encore plus importantes seront signalées à Stannern (Tchécoslovaquie), à Knyahinya en Ukraine (avec un fragment de plus de 290 kilos !), en Roumanie près de Cluj, vers les années 1860. Dès cette époque la réalité de l'origine cosmique de ces impacts ne fait plus de doute aux yeux de la communauté scientifique. L'essentiel du mérite en revint au Germano-Russe Ernst Chladni qui fut le premier à utiliser des méthodes d'analyse moderne appliquées à des objets soupçonnés de venir de l'espace. Grâce à la chaire qu'il occupait à l'Université de Saint-Petersbourg, il lui fut possible d'opérer sur un gros bloc de près de 700 kilos trouvé en Sibérie, près de Krasnoïarsk. Il découvrit que celui-ci contenait, en quantités réparties de façon uniforme sur toute sa structure, une variante de l'olivine dénommée « chrysolithe », qui ne se forme ordinairement qu'au cours d'éruptions volcaniques. Très étonnant, cette « pierre » avait été trouvée dans une région totalement incompatible géologiquement avec

ce type de structure et la chrysolithe découverte différait quelque peu, au niveau de sa géométrie, de ses homologues terrestres. Chladni renouvela l'opération avec un autre probable « objet de l'espace » découvert à Otumpa en Argentine (d'une masse supérieure à 13 tonnes !). Il découvrit également de la chrysolithe mais, cette fois-ci, associée à d'importantes quantités de fer dont l'analyse chimique permit d'établir, sans aucun doute, qu'il avait été synthétisé en milieu extraterrestre.

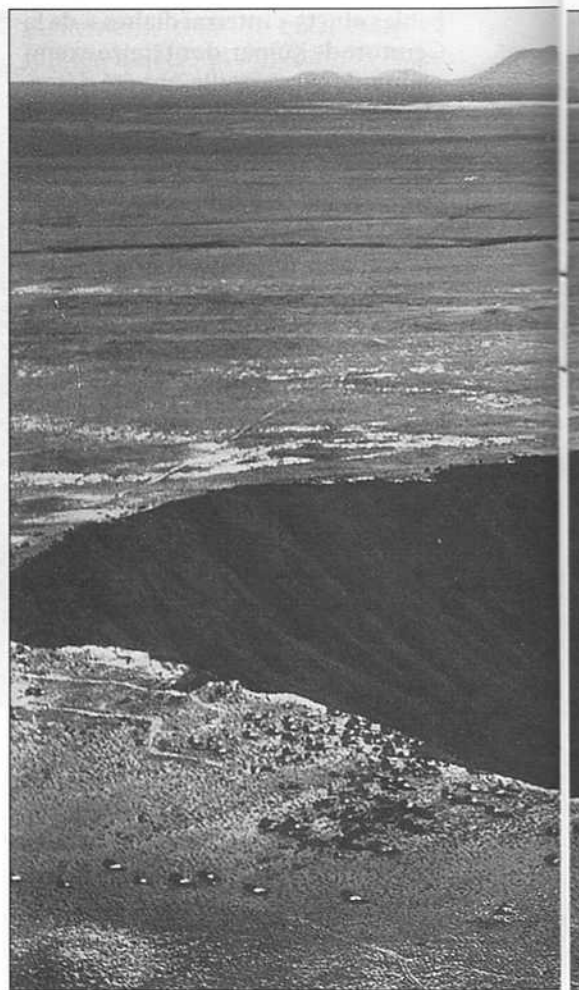
A partir de ce moment, il apparaissait bien que ces objets étaient effectivement des « résidus fossiles » de la nébuleuse solaire et planétaire primitive. Cette incontournable réalité fut confirmée ultérieurement lors d'analyses effectuées sur des météorites tombées au cours du XX^{ème} siècle : grosse météorite de Sikhota-Aline tombée en 1947 où furent récupérées plus de 20 tonnes de fer et de nickel (avec des fragments allant de 500 kilos à 1,7 tonnes !); météorite de Morton dans le Kansas (1948); météorite de Beliss (1961-Texas); « Objet » d'Ider découvert la même année en Alabama; chutes de blocs de pierre constatés en Mandchourie en 1976 et en Afrique du Sud en 1979.

Ces collisions sur Terre étant prouvées, et étant donné ce que nous savons déjà du monde collisionnel qui a donné naissance au système solaire, il n'est pas étonnant que l'étude de ces pierres de l'espace ait amené à confirmer les hypothèses émises sur le fameux processus d'accrétion. Certaines de ces météorites seraient même issues de collisions et de fracturations, subies au cours ou après le processus d'accrétion !

Les méthodes inspirées aux Etats-Unis par l'astrophysicien et physicien Edward Anders pour « mesurer l'âge des météorites » nous ont conforté dans cette idée. Les rayons cosmiques engendrent à l'intérieur des météorites des substances radioactives et stables. La proportion de ces substances dans les objets en question constitue en quelque sorte la « signature » de l'époque où le corps de la météorite a été directement exposé. Lorsqu'un élément relevé

donne à cette météorite, par exemple, une ancienneté de 10 à 12 millions d'années, il est bien évident qu'elle est issue d'un corps plus grand, plus âgé et plus gros. Fait très intéressant à noter, certaines météorites très rares ont en quelque sorte « emmagasiné » et « gelé » à l'intérieur de leur structure des quantités anormales de substances issues de la désintégration radioactive d'éléments qui n'existaient qu'au début du système solaire. Ainsi, la découverte de quantités inhabituelles de xénon 129 dans quelques exceptionnelles météorites prouve qu'elles sont parmi les plus primitives de notre système solaire. En effet, le xénon 129 est considéré comme issu de la désintégration radioactive de l'iode 129 (dont la « demi-vie » est de 17 milliards d'années) aujourd'hui disparu et qui n'existe que dans les nébuleuses protostellaires. Ceci, et d'autres données recueillies par d'autres méthodes, autorisent notre spécialiste national Michel Maurette à affirmer que « certaines météorites contiennent même une faible proportion inférieure à 0,1% de grains présolaires minuscules ayant survécu à l'évolution de la nébuleuse solaire primitive ». Le fait que ces météorites dites « à xénon 129 » soient très rares constitue une preuve supplémentaire que « les collisions ont été la règle ». Ce fait a été constaté in situ par les Orbiter des sondes Viking, qui ont photographié de nombreux cratères d'impact sur les satellites martiens Phobos et Deimos ainsi que sur la planète Mars elle-même. De même, avec la sonde Galileo qui nous montre ses extraordinaires vues de l'astéroïde Gaspra : celui-ci, criblé de cratères d'impacts, semble avoir été formé non pas uniquement à partir de « grains », mais également par collision de deux gros objets ayant évolué ultérieurement vers une structure unique par accrétion.

Nous retrouvons dans ce cas-là, et dans d'autres, la trace d'une intense période de bombardement et de collisions. Selon Roger Ferlet et Alfred Vidal-Madjar (chercheurs à l'IAP de Paris), cette période, qui a contribué au processus d'accrétion et à « l'élimination » d'un grand nombre d'objets, aurait duré entre 700 et 800 millions d'années. Cette élimination



massive par collision explique pourquoi, actuellement, la masse totale des astéroïdes ne doit guère représenter qu'un pourcentage minime de la masse lunaire. Actuellement, selon la plupart des spécialistes, ce sont aux alentours de 20.000 tonnes par an de micrométéorites et de météorites, issues de la dissociation de corps cométaires ou d'astéroïdes, qui tombent sur la Terre. Cependant, il n'en fut pas toujours ainsi. A l'époque où les premières formes de vie rudimentaires apparaissaient sur la Terre, il fallait probablement multiplier le nombre de ces collisions d'un facteur 1000. Les astrophysiciens et les géologues ont la preuve que notre planète a été bombardée dans le passé par de très gros objets.

Le plus incroyable dans cette affaire vient du fait que nous en avons la preuve pratiquement sous nos yeux. Nous étions en fait comme l'*Etourdi* de Molière qui cherche les gants qu'il a dans sa main. C'est grâce à l'avènement de la photographie aérienne



Le fameux « Meteor Crater » de l'Arizona, cratère de 1400 mètres de diamètre et de 200 mètres de profondeur. L'hypothèse, émise en 1905 par l'Américain Barringer, selon laquelle il était dû à un impact d'astéroïde, ne fut prise au sérieux que dans les années 30. Sa nature de cratère météoritique fut définitivement reconnue au début des années 50.

que nous avons eu l'opportunité de détecter nombre d'impacts parfois difficilement décelables depuis le sol. C'est également grâce au rapprochement, depuis les années 50, des géologues et des astronomes. Néanmoins, les uns comme les autres n'imaginaient pas un seul instant que ces objets, cause d'impacts cosmiques, puissent dépasser de beaucoup quelques tonnes, même en tenant compte du phénomène de dissociation induit par l'entrée de ces objets dans l'atmosphère terrestre. Pourtant, les astronomes disposaient depuis longtemps déjà de plaques photographiques et, en 1932, les astronomes Delporte et Reinmuth mettaient en évidence la présence des objets Apollo et Amor, donnant, par la suite, leur nom à toute une catégorie d'objets de type « astéroïde », coupant régulièrement l'orbite terrestre à des distances par rapport au Soleil allant de 1 à 1,04 unités astronomiques (UA). En 1932, sensation chez les astronomes : l'objet Apollo coupait l'orbite terrestre à un peu plus de 11,3 millions de kilo-

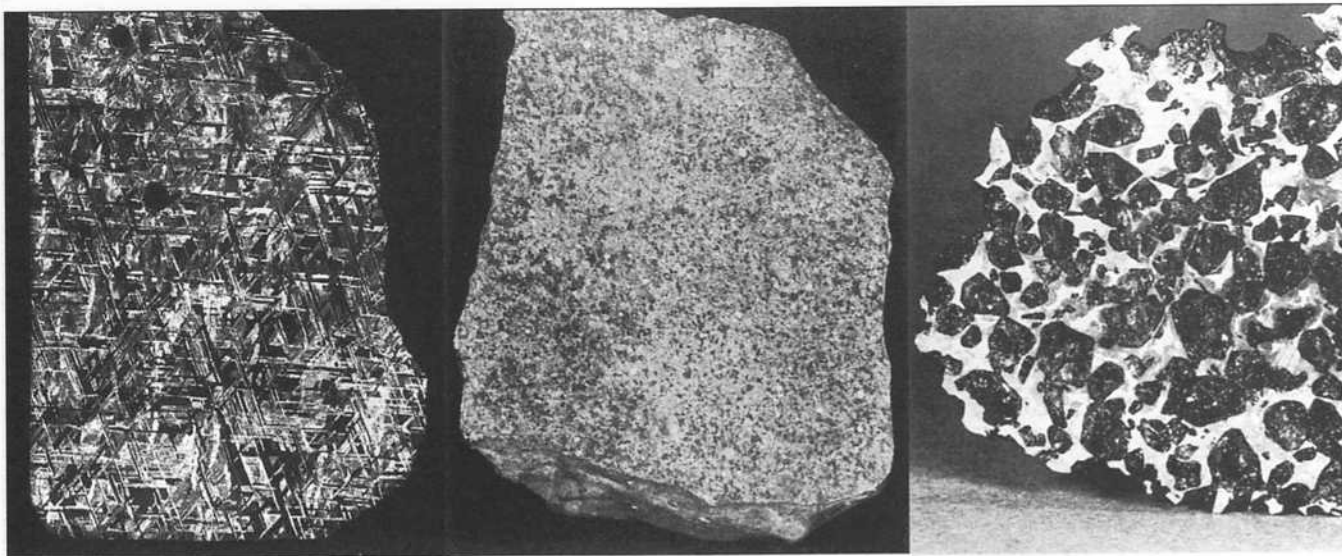
mètres. Le « record » n'allait pas tenir longtemps. En 1936, l'objet Adonis coupait l'orbite de notre planète à 2,2 millions de kilomètres, soit moins de six fois la distance moyenne Terre-Lune !

Les spécialistes devaient être définitivement convaincus de la possibilité d'impacts de tels objets 21 mois plus tard lorsque Hermes, un objet dont la taille est estimée à 7 ou 800 mètres, fut détecté en train de couper l'orbite que décrit la Terre par rapport au Soleil à 700.000 kilomètres de notre planète. Des calculs très sérieux estimèrent même ses « possibilités d'approche » à une distance se situant entre 300.000 et 350.000 kilomètres....

Dès lors, l'hypothèse émise en 1905 par l'Américain Barringer, selon laquelle le fameux « Meteor Crater » de l'Arizona était dû à un impact d'astéroïde fut enfin prise au sérieux. Même si sa nature de cratère météoritique ne fut enfin reconnue qu'au début

des années 50, les découvertes de Delporte et Reinmuth accélérèrent les recherches sur d'éventuels cratères d'impact à la surface de la Terre. Ce fut le grand mérite des géologues Albritton et Boon d'estimer, dès 1937, qu'un certain nombre de grands cratères canadiens (Holleford, les cratères jumeaux de Clearwater Lake, Brent et Manicouagan) étaient en fait des « astroblièmes » (cratères météoritiques fossiles), formés par l'impact avec les roches terrestres d'objets d'une taille de plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Ainsi, le cratère de Manicouagan (70 kilomètres de diamètre) est considéré comme le résultat d'un impact avec un objet cosmique de 3,5 kilomètres de diamètre, qui se serait produit il y a environ 200 millions d'années !

Toutefois, ce n'est qu'à partir des années 50 que les perfectionnements des méthodes d'analyse géologique et chimique permirent de prouver définitivement ces hypothèses. On mit en évidence ce que les spécialis-



A gauche, coupe dans une sidérolithe. On peut distinguer la structure de l'alliage de ferro-nickel. Au centre, météorite pierreuse, à structure granuleuse. A droite, une lithosidérolithe, composée d'un alliage de ferro-nickel truffé d'olivine.

tes appellent le « métamorphisme par impactisme ». Cette phase brutale laisse des traces caractéristiques sur les roches situées dans et autour du cratère, du fait qu'elles sont soumises à des températures et des pressions gigantesques². Bien souvent les géologues trouvent sur ces zones des variations « exotiques » de quartz, comme la coesite et des pallasites. Ils ont aussi remarqué, sur ces quartz, des traces longitudinales laissées par les ondes de choc. Les pallasites contiennent de très gros cristaux d'olivine très « marqués », qui semblent dus à la collision de petits blocs détachés de l'astéroïde principal dans l'atmosphère. Cette hypothèse tient au fait que ces pallasites ne sont pas rares dans des météorites de type « mixte » (météorites de type ferro-pierreuses) et que celles découvertes ne présentent pas les mêmes caractéristiques d'ondes de choc que celles trouvées près des grands cratères qui ont pourtant la même composition chimique. On relève également des phénomènes typiques de fusion (les roches s'étant trouvées à l'état de lave pendant quelques secondes), et de vitrification des roches terrestres ayant subi l'impact. Il n'est d'ailleurs pas rare que des quartz terrestres, contenus dans les roches ayant subi l'impact, aient évolué vers des formes exceptionnellement denses, impossibles à produire lors de phénomènes géologiques ou éruptifs terrestres. Ces formes exotiques, dénom-

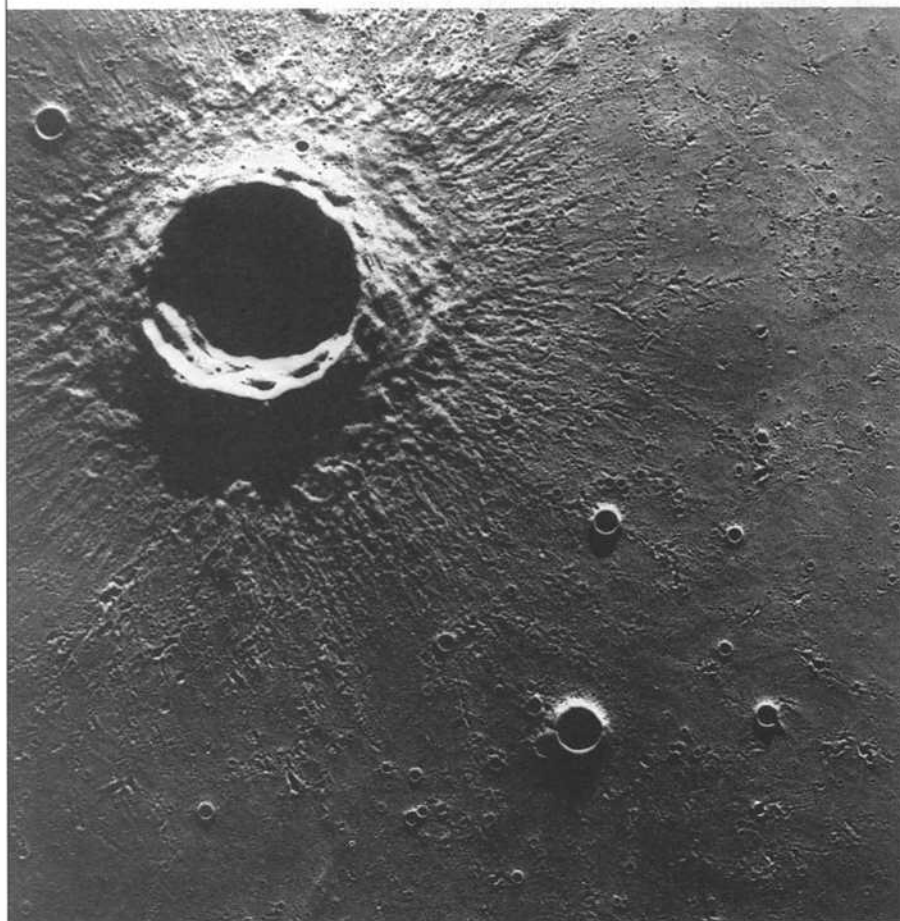
mées souvent « stishovites » constituent une marque certaine de l'existence d'un impact cosmique.

L'étude des processus ayant conduit à la formation du système solaire est en elle-même la preuve que la Terre n'a pas eu le monopole de ce « bombardement cosmique ». En fait, c'est l'exploration lunaire qui a ouvert les yeux aux scientifiques car, comme le souligne Michel Maurette : « *Le programme Apollo nous a permis de conclure que 99% des cratères lunaires sont des cratères d'impact et d'avoir une idée enfin cohérente de la nature des mers lunaires* ». Aujourd'hui, grâce au débarquement sur la Lune de l'astronome géologue Harrison Schmitt et aux études qui ont été effectuées sur les roches ramenées, il ne fait plus guère de doute que la mer lunaire « Mare Imbrium » est le résultat d'un impact avec un objet géant de 100 kilomètres de diamètre arrivant à la surface de notre satellite à une vitesse de 20 kilomètres/seconde.

Les « tables d'énergie cinétique d'impacts », dues à l'astrophysicien Michel Combes et à son collègue américain William K. Hartmann, nous autorisent à penser que l'énergie dégagée par cet impact équivalait probablement à mille milliards de fois celle de la bombe d'Hiroshima ! Et il existe 87 cratères géants de plus de 100 kilomètres répartis sur toute la surface lunaire ! Du fait que l'absence

d'atmosphère lunaire permet aux gros astéroïdes et aux noyaux cométaires d'arriver à la surface de notre satellite sans dissociation, il n'est pas douteux que ces impacts ont été provoqués par des objets dont la taille allait de 10 kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres. Des impacts de ce type se sont également produits sur Mercure, Vénus, Mars et les satellites géants des grandes planètes gazeuses extérieures... Ainsi un cratère d'un diamètre supérieur à 400 kilomètres a été photographié par la sonde Voyager 2 sur le satellite de Saturne, Téthys, tandis qu'un autre de 130 kilomètres était découvert par Voyager 1 sur Mimas, un autre corps orbitant autour de la planète aux anneaux. Un autre satellite de la même planète, Encelade, semble quant à lui avoir subi un bombardement intense à une époque récente. Les cratères d'impact sont aussi nombreux sur les satellites galiléens Callisto, Ganymède et Europa. Sur ce dernier, le processus de cratérisation a créé des fractures et des crevasses monstrueuses sur sa surface de glace. Selon Cruikshank, il semble difficile de faire la part, pour ces impacts, entre les comètes et les astéroïdes d'un côté, et de l'autre, les corps résiduels de l'époque du processus d'accrétion de ces satellites. De ce fait, la Lune reste le témoin le plus probant de l'impactisme qui s'est abattu sur la Terre dans le passé. En effet, sur notre planète, les processus géologiques, les phénomènes d'oro-

C'est le programme Apollo qui a ouvert les yeux des astrophysiciens sur la réalité de l'impactisme : l'examen de nombreuses roches lunaires tend en effet à montrer qu'elles ont subi le phénomène de « métamorphisme par impact. » Selon Michel Maurette, chercheur à Orsay, 99% des cratères lunaires sont dus à des impacts d'astéroïdes et de noyaux cométaires.



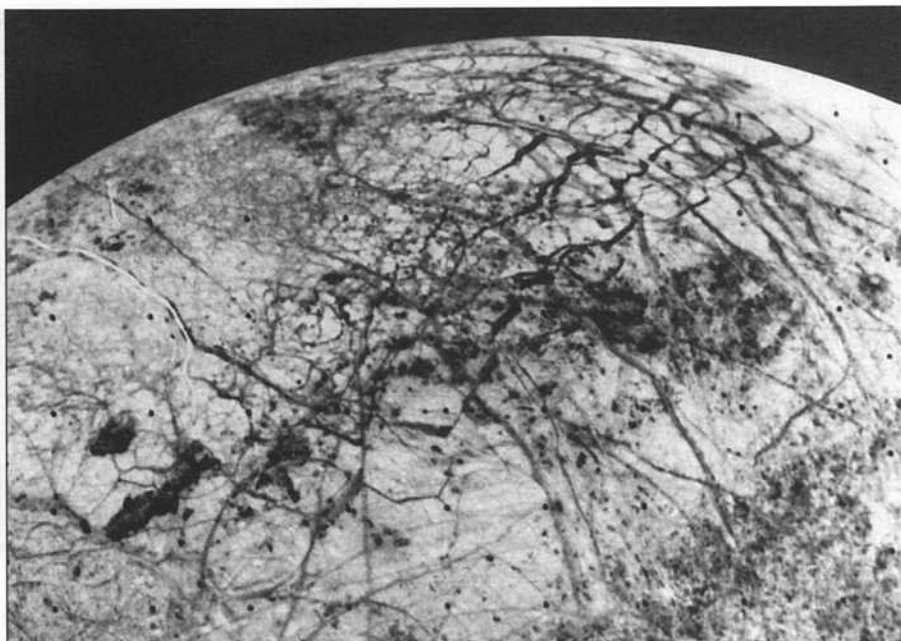
genèse (formation des montagnes induite par la tectonique des plaques), les tremblements de terre, l'érosion hydraulique et éolienne, voire le volcanisme, ont effacé tous les gros impacts remontant dans le passé à moins de deux milliards d'années après la formation de notre planète.

Une matrice explicative cosmique ?

Le problème posé par les impacts d'astéroïdes s'explique aujourd'hui assez bien. Il est évident que certains de ces corps résiduels, se déplaçant sur des trajectoires exotiques (cas des objets Apollo, Aten, Amor), dans les zones où orbitent les planètes telluriques, n'ont pas d'orbite stable éternelle. En effet, leur faible masse (toute relative puisqu'elle peut se situer sur une échelle allant de centaines de milliers à des centaines de millions de tonnes, voire même plus pour quelques rares objets), par rapport aux planètes, les condamne, à des degrés divers, à subir la force de gravitation de celles-ci. En quelque sorte, plus un astéroïde de cette catégorie effectue d'orbites, plus le nombre de fois où celles-ci sont perturbées augmente, plus les conséquences résiduelles de ces perturbations produisent d'effets durables, plus il a de chances de parvenir un jour à une trajectoire d'intersection et de collision avec un objet planétaire. Ainsi, selon Michel Combes, il semble acquis que certains des objets Apollo et Aten, dénommés pour la circonstance EGA (acronyme de « Earth Grazers ») risquent à terme d'être « éliminés » lors d'une collision avec la Terre ou la Lune, si l'on tient compte d'un laps de temps s'étalant sur plusieurs centaines de milliers d'années. Cette proportion serait d'un EGA sur trois si l'on tient compte de leurs orbites actuelles et de leurs probables perturbations gravitationnelles. Mars, qui subit le même phénomène, n'est pas tellement mieux placée. Toujours selon le même spécialiste, seulement 20% de ces objets ont une chance raisonnable de pouvoir continuer à parcourir éternellement les espaces interplanétaires, étant donné que les perturbations gravitationnelles res-

tent insuffisantes pour les faire parvenir un jour sur une trajectoire de collision. Une surveillance intensive des espaces où orbitent les planètes telluriques devraient donc pouvoir nous permettre de détecter à temps les objets potentiellement dangereux. Mais il faut savoir que, d'après les relevés obtenus sur des plaques photographiques et des caméras CCD, le nombre de ces objets dont les orbites coupent une sphère imaginaire allant de Mercure à Mars se situerait au bas mot entre 60.000 et 70.000 ! De plus, ne sont retenus dans ce nombre que les corps dont la taille dépasse les 100 mètres et, parmi ceux-ci, 800 dépassent largement la taille du kilomètre, jusqu'à 8,5 et 9 kilomètres. Si les statistiques publiées sont exactes, cela signifie qu'un peu plus de 20.000 objets ont de fortes chances d'entrer en collision avec la Terre d'ici à 500 ou 600 millions d'années.

A l'échelle de temps humaine, ce processus d'impact reste un événement exceptionnel : la fréquence entre deux impacts de gros objets se situe sur une échelle comptabilisable en dizaines de millions d'années. Toutefois, il n'en est pas de même à l'échelle astronomique où cette fréquence n'est plus exceptionnelle. De plus, et des informations classées « Secret Défense » viennent de le souligner récemment, chaque année plusieurs astéroïdes d'une taille allant de 10 à 20 mètres et plusieurs dizaines d'objets de plusieurs mètres explosent, après s'être fragmentés dans les hautes couches atmosphériques terrestres. Cette fréquence est due au fait que ces petits objets sont les plus nombreux mais la découverte sur Terre, et en grand nombre, de cratères d'impacts gigantesques prouve aussi que de très gros objets et des noyaux cométaires ont déjà percuté notre planète. On peut citer, notamment, le fameux cratère de Chicxulub, en grande partie immergé sous la mer aux confins du Mexique dans la région du Yucatan, atteignant la taille monstrueuse de 200 kilomètres. Certains biologistes et paléontologues partisans des thèses « catastrophistes » lui attribuent la probable responsabilité de la « crise d'extinction des espèces » de la fin de l'ère secondaire, du fait que l'âge de cet impact



Les photographies obtenues lors du programme américain Voyager ont révélé que les satellites de Jupiter et de Saturne avaient eux aussi subi des phases d'impactisme. Sur Europa, satellite de Jupiter, les impacts ont créé des failles et des crevasses gigantesques au niveau de la carapace de glace qui recouvre probablement un océan.

y correspond parfaitement. Ceci n'est pas étonnant si l'on sait qu'un objet de 10 kilomètres percutant une planète tellurique dégage, d'après Michel Combes et Hartmann, une énergie se situant aux alentours de $8,2 \times 10^{23}$ Joules !

Si ces impacts d'astéroïdes ne mettent en jeu tout compte fait que des phénomènes endogènes au système solaire, il semble bien toutefois que l'impactisme soit aussi le fait de chaînes de résonances cosmiques, impliquant des phénomènes extérieurs.



Les sondes soviétiques et américaines Mariner et Viking-Orbiter ont révélé sur Mars d'étonnants cratères d'impacts. Outre les comètes, Mars est particulièrement menacée par une catégorie spécifique d'objets Amor dénommée « Mars-Crossers ».



Jan Oort, « père » de la fameuse ceinture cométaire qui porte son nom.

L'astrophysique moderne nous a appris qu'il était impossible de traiter le phénomène de la formation d'une étoile et de son cortège de planètes, et plus encore leur devenir, comme des phénomènes isolés.

De ce point de vue, cette trame cosmique concerne plus particulièrement les comètes et plus spécifiquement celles du Nuage de Oort, dont le nombre serait de plusieurs centaines de milliards. Elles entoureraient notre système planétaire à la manière d'une espèce de monstrueux « cocon » à une distance d'environ 50.000 UA. L'existence de cette incroyable structure semble prouvée par le fait qu'un grand nombre de comètes pénétrant dans les parties internes du système solaire, semblent « venir de partout », comme le souligne Eric Gérard, chercheur au Département Radioastronomie de l'Observatoire de Meudon. Quant aux « fausses comètes » et « faux astéroïdes » de la Ceinture de Kuiper, on sait qu'ils orbitent pratiquement sur le même plan moyen de l'écliptique que la plupart des planètes. Il ne faut cependant pas oublier que, sur les treize objets déjà détectés, certains sont composés de monstrueux noyaux d'une taille se situant entre 150 et 200 kilomètres, et que des phénomènes gravitationnels dus aux grosses planètes gazeuses pourraient « désorbiter » un de ces objets, l'éjectant vers le système solaire. Si l'on sait qu'en moyenne un gros objet cosmique crée un cratère d'impact dix fois plus grand que lui, il n'est pas besoin d'être grand clerc pour imaginer les conséquences désastreuses qu'un tel événement

aurait sur notre planète en tenant compte du fait que l'accroissement des dégâts est hyperexponentiel par rapport à l'accroissement de la taille de l'objet. En effet, l'énergie cinétique au moment de la collision, est multipliée d'un facteur de mille si la taille d'un objet cosmique est multipliée par dix. L'événement qui a créé sur la Lune « Mare Imbrium » prouve qu'une titanesque collision reste possible à l'avenir dans le système Terre-Lune.

Il faudra, dans le futur, placer la Ceinture de Kuiper sous la surveillance d'un système d'alerte avancée (par exemple, en installant des sondes équipées de détecteurs sophistiqués sur une orbite permanente neptunienne). Cette surveillance est beaucoup plus difficile à effectuer pour ce qui concerne le Nuage de Oort et, comme le pense Michel Maurette, « l'arrivée d'une comète venue de cette zone est en elle-même beaucoup plus dangereuse que celle d'un astéroïde ». Pourquoi ? C'est cette notion de « chaîne de résonance cosmique » qui nous donne la clé pour une interprétation rationnelle et lucide du danger. Les comètes, qui ont apporté à la Terre un grand nombre de molécules organiques et 90 % de son eau selon l'astrophysicien belge Delsemme et le Français Raulin, constituent aussi, et plus encore que les gros astéroïdes Apollo, Amor ou Aten, une source d'impacts potentiels.

Ce sont les progrès de l'astronomie cométaire qui nous ont amené peu à peu à élargir notre champ de vision, mais l'émergence de ce con-

cept de chaîne de résonance cosmique n'est en fait qu'une conséquence des découvertes de l'astrophysicien Jan Oort, « père » de la fameuse ceinture cométaire qui porte son nom. Dès le début des années 40, il prenait de vitesse tous ses collègues en mettant en évidence le fait surprenant selon lequel les étoiles n'effectuent pas toutes leur orbite à la même vitesse par rapport au noyau central galactique. De l'étude des mouvements de ces étoiles et de leur répartition, il concluait que celles-ci se déplacent, en fait, au cours de cycles très longs, selon des orbites « sinusoïdales » par rapport au plan galactique. Les scientifiques mirent un certain temps à tirer de ces données les conclusions qui s'imposaient. Après la guerre, ce furent les progrès de la radioastronomie et l'étude des nuages de poussières et de molécules interstellaires qui permirent d'effectuer une nouvelle avancée. Ceux-ci semblent, en effet, exister dans tous les points de la Galaxie mais avec une particularité étonnante : les plus importants étaient majoritairement concentrés vers ce plan médian. On découvrit également deux autres phénomènes lourds de signification. D'une part, plus les étoiles sont éloignées du centre galactique, plus l'orbite qu'elles décrivent est sinusoïdale par rapport au plan médian qu'elles semblent amenées à devoir traverser tour à tour dans un sens et dans l'autre, selon des cycles réguliers. D'autre part, les nuages majoritairement situés dans ce plan médian, décrivant eux aussi une orbite par rapport au noyau central galactique, se déplacent beaucoup moins vite que les étoiles et de façon plus « rectiligne », comme s'ils étaient « freinés » par quelque chose qui n'est peut-être pas sans rapport avec la « matière noire ». Ces étoiles, et donc notre Soleil, ses planètes et son enveloppe cométaire composée de centaines de milliards d'objets, sont en conséquences amenées, au cours de leurs pérégrinations, à rencontrer inévitablement ces nuages...

Ces nuages, on le sait, sont en général peu denses avec toutefois de notables exceptions, comme c'est parfois le cas au sein de la Nébuleuse d'Orion. Néanmoins, leur taille est tellement monumentale par rapport

à un système planétaire les pénétrant que leur faible effet de densité est plus que largement compensé par un gigantesque effet de taille. Une énorme pression gravitationnelle serait induite sur les systèmes planétaires, pouvant dévier, vers les régions planétaires, des comètes jusque-là inactives mais peu à peu désorbitées par cette pression se déroulant sur des centaines voire des milliers d'années. Certains astrophysiciens pensent notamment que certaines « pluies cométaires » passées s'expliqueraient par ce phénomène et que la pénétration de comètes venues de la Ceinture de Kuiper ne saurait concerner qu'un nombre minoritaire de ces objets. La preuve en est que la majorité des comètes « semblent venir de toutes les directions ». Leurs orbites (qui sont par rapport au Soleil soit des ellipses, soit des paraboles soit des trajectoires légèrement hyperboliques) se caractérisent par rapport aux orbites planétaires par toute une gamme de valeurs allant de 0 à 90 degrés (on parle ici d'orbites « directes »), et plus encore de 90 à 180 degrés (on parle alors d'orbites « rétrogrades »). Ceci signifie bien que ces comètes se sont constituées majoritairement dans des régions froides, fort éloignées du Soleil, thèse déjà émise dans les années 30 par Ernst Öpik. Elles pénètrent de temps à autre dans les régions internes du système solaire, sur des orbites dites de « capture », parce que *quelque chose* d'extérieur exerce à intervalles plus ou moins réguliers une formidable pression gravitationnelle sur l'anneau de Oort !

La Lune, où les « durées de vie » des gros cratères et impacts sont en moyenne cent fois supérieures à la Terre, garde la trace à la fois d'impacts d'astéroïdes et de véritables pluies cométaires. Il va de soi qu'à la suite d'un événement galactique tout à fait habituel et ordinaire, notre Terre a dû aussi être bombardée massivement par des objets de ce type, avec des collisions encore plus violentes que les impacts d'astéroïdes. Ceci peut paraître étonnant vu que ces astéroïdes sont en principe « plus durs » que les noyaux cométaires, mais il ne faut pas oublier que la nature d'un objet et sa densité plus ou moins grande (selon que celui-ci est plus ou moins

carboné ou « silicate » ou dans un cas extrême franchement « métallique ») ne sont pas les seuls facteurs à prendre en compte pour évaluer leur potentiel destructif. Il existe un autre critère bien plus important à considérer : c'est la vitesse du corps en question avant l'impact. Ces astéroïdes ont en quelque sorte une orbite variable « résiduelle » qui a été plus ou moins modelée sur des milliers d'années par les forces gravitationnelles planétaires et naviguent, à quelques exceptions près, dans le même sens que les corps planétaires. Donc, les vitesses possibles de collision de ces corps avec une planète se situent dans une fourchette maximum allant de 10 à 18 kilomètres par seconde, ce qui est encore important.

Il n'en est pas de même pour les comètes, sauf pour les objets « intermédiaires » de la Ceinture de Kuiper. En effet, leurs orbites peuvent prendre tous les angles possibles avec le plan orbital terrestre et elles n'ont pas majoritairement subi le processus de ralentissement de leur vitesse par les forces gravitationnelles des planètes. Sauf pour celles qui sont passées par la « dictature » de Jupiter, elles n'ont généralement que peu de points communs avec les orbites des planètes telluriques. De ce fait, la fourchette de vitesse de collision possibles d'une comète arrivant sur une orbite de capture rétrograde peut atteindre les chiffres fantastiques de 30 à 40 kilomètres par seconde et, toujours selon Michel Combes, « *Une comète de masse comparable à un astéroïde, même avec une forte proportion d'éléments volatils, produirait entre quatre et neuf fois plus de destructions que ce dernier* ».

Lors de l'impact d'un gros astéroïde ferreux, on ne retrouve pratiquement jamais aucun résidu conséquent intact (l'énergie de celui-ci vaporisant même les éléments les plus durs que l'on ne retrouve que dans le cas d'impacts de météorites de relativement faible masse), l'idée même d'un impact terrestre avec une comète de quelques kilomètres de diamètre ne peut que nous laisser songeurs. Or, il semble bien que de tels événements catastrophiques se soient réellement produits sur Terre. Curieusement, ce

sont les paléontologues et les géologues, plus que les astrophysiciens, qui nous ont mis sur la voie.

Nos connaissances sur l'impactisme doivent beaucoup aux progrès en matière de datation des roches par radioactivité (utilisation du potassium 40 et du rubidium 87 dont la désintégration radioactive se mesurant en milliards d'années permet de remonter loin dans le temps). Utilisant ces méthodes modernes de datation des roches, les Américains Rampino et Stothers ont effectué pendant plusieurs années des analyses sur une trentaine de gros cratères d'impacts cosmiques reconnus. Ils ont conclu que ces impacts ne sont pas isolés mais répartis selon des strates de temps séparées entre elles par des intervalles quasi-réguliers ! Seul point faible de leur argumentation, à cause des conséquences d'un gros impact du point de vue de son énergie cinétique et de son potentiel autodestructif, il n'est pas toujours évident de déterminer si son origine est astéroïdale ou cométaire. Plus étonnant encore, utilisant les travaux de Rampino et Stothers, leurs compatriotes Raup et Sepkoski se sont plongés dans une étude statistique des espèces disparues, à partir d'une nomenclature des fossiles répertoriés au niveau mondial pour chaque époque. Ils ont constaté que l'analogie avec les impacts est telle qu'elle concorde pratiquement à 90% ! Selon Raup et Sepkoski, dont les travaux remontent au début des années 80, les extinctions des espèces (qui semblent avoir été souvent brutales) semblent suivre des « crêtes » et des cycles réguliers (estimés par eux à environ 26 millions d'années). Le début de ces cycles semble suivre tellement étroitement la chronologie temporelle des cratères d'impacts, à quelques exceptions près, que tout ceci ne saurait être le fait du hasard. Cette idée de « chaîne de résonance cosmique » suscite encore aujourd'hui d'âpres débats parmi les théoriciens. Il faut reconnaître que cette controverse se situe surtout au niveau de la nature des causes de ces impacts. D'autres hypothèses ont été émises ou peuvent être envisagées : perturbation régulière du Nuage de Oort par une minuscule étoile invisible de type

« naine brune », orbitant autour de notre système solaire sur une trajectoire à aphélie et périhélie extrêmes ; ondes de choc dues à la rotation galactique envoyées régulièrement selon des fréquences « ascendantes » et « descendantes » ; perturbations gravitationnelles internes au Nuage de Oort, selon un système de « pulsations » régulières révélant son instabilité et hérité de l'époque de sa formation. Toutefois, il faut rester prudent et ne pas tomber aveuglement dans le travers consistant à voir dans le catastrophisme le moteur essentiel et le régulateur unique de l'évolution.

L'intelligence humaine, facteur décisif

L'astrophysicienne Anny-Chantal Levasseur-Regourd, grande spécialiste des comètes et Professeur à l'Université Paris 6, estime « *qu'un système de surveillance intensive par des télescopes répartis sur les deux hémisphères serait suffisant pour se prémunir à la fois contre les impacts de comètes et d'astéroïdes* ». Nous ne partageons pas son optimisme, tout au moins concernant les comètes, même si comme elle le souligne avec raison « *seul un objet de plus de 1 kilomètre pourrait être à l'origine d'un impact, dont les conséquences puissent être suffisamment grandes pour entraîner des effets se situant bien au-delà du simple niveau local* ». En fait, ce raisonnement ne reste valable que si on a affaire à un objet unique et de petite taille. Or les études effectuées sur les astéroïdes par Rampino et Stothers semblent accréditer l'idée de pluies cométaires massives lorsque se produisent des perturbations du Nuage de Oort. L'examen de ce qui s'est passé il y a un certain nombre de millions d'années au niveau des satellites de Jupiter n'est guère encourageant non plus... Et ne parlons pas des découvertes effectuées tout récemment par Cruikshank !

« Faire face aux impacts » signifie non seulement un système de surveillance complet du système solaire, mais la mise au point de toute une palette de *stratégies potentielles*. L'ap-



La Comète de Halley. Selon la plupart des spécialistes, la majorité des comètes pénétrant les parties internes du système solaire, « sur des orbites de capture », proviennent du Nuage de Oort, une gigantesque structure en forme de cocon entourant notre système planétaire.

proche doit être différente s'il s'agit d'astéroïdes ou de comètes et des variantes devront être envisagées selon la taille, la masse et la composition de l'objet, l'inclinaison de son orbite, sa vitesse probable d'impact, le laps de temps estimé avant la collision.

Pour les astéroïdes, le risque réel d'impact d'un gros objet offre au moins l'avantage de pouvoir être détecté à l'avance. Nous aurions un délai de quelques années pour élaborer une stratégie de destruction ou de « déviation ». Présenté en 1991 aux responsables de la NASA et des deux Chambres Législatives, le rapport

Ahrens-Harris retenait pour ce faire tout un éventail d'options, dont le moins que l'on puisse dire est qu'elles soulignent déjà à ce niveau les *limites* de nos moyens technologiques, à la fois en matière de potentiel destructif et de transport. En effet, si nous disposons de moyens nucléaires pour faire exploser dans l'espace des objets allant un tout petit peu au-delà de 1 kilomètre, il ne faut pas oublier que, d'une façon générale, ces astéroïdes se déplacent sur des orbites excentrées (allant jusqu'à 24 degrés) par rapport au plan orbital moyen des planètes. En conséquence, nos techniques spatiales actuelles, basées sur des fusées et vaisseaux à propulsion cryotechnique, qui se révèlent déjà « un peu justes » lorsqu'il faut envisager une mission nécessitant de s'élever de quelques degrés au dessus de l'écliptique, risquent de se montrer partiellement déficients... Ainsi, pour le moment, nos sondes scientifiques, ayant au cours de leur mission l'objectif de survoler et de photographier des astéroïdes (cas de Galileo), ne disposent pas encore de moyens de propulsion et de manœuvre leur permettant de passer à moins de 10 kilomètres/seconde de ces objets, et nos faiblesses technologiques nous rendent incapables d'avoir avec ceux-ci un accès direct autre que des pénétrateurs. En clair, cela signifie que pour un objet Apollo/Aten ne dépassant pas trop le kilomètre, il sera effectivement possible de le détruire à une distance inférieure à un million de kilomètres. La partie est *loin* d'être gagnée pour des objets plus gros. Ainsi, il serait pratiquement impossible de détruire un astéroïde ferreux de type « M » d'une taille de 1,5 kilomètre. La seule solution serait de faire exploser, à une distance bien déterminée par rapport à celui-ci, une bombe thermonucléaire de très forte puissance pour dévier sa trajectoire et lui faire quitter l'orbite de collision. Ce scénario, en apparence « nouveau », et que l'on nous ressort depuis quelques années à la manière d'un plat réchauffé, fut imaginé dès les années 50, par des hommes comme Krafft Ehrlicke et Edward Teller.

Quant aux objets plus gros (en imaginant une possible collision avec

un objet comme Eros qui mesure plus de 35 kilomètres et dont la masse est évaluée aux alentours de 20.000 milliards de tonnes !), inutile de préciser que le laps de temps dont nous disposerions n'aurait de sens que si nous disposions déjà de bases spatiales avancées et de vaisseaux à propulsion nucléaire de seconde génération. Sans cela, nous ne pourrions franchir « l'intervalle énergétique » qui nous sépare de ces astéroïdes de façon à pouvoir les attaquer *sur place*, au minimum un an avant qu'ils ne se trouvent sur la trajectoire d'intersection avec la Terre. La masse de tels « Léviathans » est telle que nous ne pourrions prendre le risque de tenter une opération au dernier moment. Il n'est pas sûr, en effet, du fait de la combinaison de la vitesse et de la masse d'un tel objet, que tous nos arsenaux nucléaires soient suffisants si on l'attaque à un million de kilomètres de la Terre avant sa pénétration dans le système Terre-Lune. Le risque serait très grand que nous ne réussissions qu'à dissocier partiellement le monstre en question et qu'un certain nombre de résidus de cette dissociation (par exemple atteignant 3 à 4 kilomètres), réussisse malgré tout à entrer en collision avec la Terre ! Selon Michel Maurette, « *le remède pourrait être encore pire que le mal* »... La seule solution réaliste consisterait à envoyer, longtemps à l'avance, une expédition composée à la fois de robots et d'astronautes à la rencontre de l'astéroïde. Pour ce faire, une expédition composée de vaisseaux à propulsion nucléaire serait nécessaire pour disposer d'un système propulsif suffisamment rapide et puissant, afin de gagner du temps et maximiser la masse d'emport. Une telle mission pourrait correspondre à une masse totale de 900 à 1000 tonnes assemblée dans l'espace et expédiée vers une orbite basse terrestre, par le biais d'une dizaine de vols d'un engin dérivé de la navette spatiale actuelle et dénommé Shuttle-C.

L'idée, plus intéressante que les autres stratégies envisagées, consiste à déposer directement *sur l'astéroïde* les charges thermonucléaires en ayant préalablement choisi les sites les plus favorables qui peuvent être des fractures, des pôles d'accrétion (dans le

cas d'astéroïdes doubles), des hétérogénéités locales plus fragiles. Une telle mission pourrait impliquer quinze à vingt astronautes, dont cinq à six intervenants directs en sortie extravéhiculaire opérant sur l'astéroïde lui-même. Une fois le dépôt des charges effectuées, la mise à feu des systèmes pyrotechniques serait déclenché à distance. On voit qu'une telle stratégie se situe déjà à la limite de la « frontière technologique », mais dans le prolongement de ce que nous savons faire ou que nous saurions faire si le programme américain Rover n'avait pas été abandonné stupidement. Car le même type de technologies qui nous permettrait le voyage vers Mars, pourrait nous permettre de faire face à un probable impact d'astéroïdes. On pourrait même envisager des stratégies préventives pour dévier progressivement leurs orbites vers des orbites planétaires de « parking », afin d'exploiter leurs prodigieuses ressources minérales. Mais pour cela, il faut une autre politique spatiale que celles suivies actuellement.

Le problème des comètes reste le plus difficile à maîtriser. Nous savons déjà combien leur vitesse potentielle de collision est élevée et leur délai de détection beaucoup plus court. Pour ce qui concerne la Terre, un tel événement s'est déjà produit et peut se produire aussi bien dans un million d'années que dans cinquante ans. Une chose est sûre : il se reproduira ! Pour y faire face, il sera indispensable d'effectuer préalablement un certain nombre de bonds technologiques. En effet, si le niveau actuel de nos technologies nous permettrait d'attaquer « au dernier moment » un petit noyau cométaire d'un kilomètre, même arrivant sur une trajectoire à 90 degrés, il n'en serait pas de même pour une pluie cométaire ou un gros noyau dépassant les 100 kilomètres.

Les comètes ont apporté à la Terre la majorité de ses éléments liquides et ceux qui ont accéléré le processus menant à la vie, tout en participant de temps à autre aux « crises d'extinction » temporaires de celle-ci. Elles contribuent aussi au plus grand défi scientifique et technologique de notre histoire. Il est douteux toute-

fois qu'une société basée sur la recherche exclusive du profit à court terme puisse nous permettre de relever un tel pari. Son système de valeurs ne permet pas de prendre à temps les décisions nécessaires et les choix technologiques et scientifiques. Comme si le Créateur, après nous avoir évité la catastrophe et nous avoir donné les bases nécessaires d'éducation, nous disait : « Maintenant à vous de jouer. Si vous ne réussissez pas, cela sera vraiment votre faute ».

Notes

1. Ces travaux ont été effectués en juillet 1994 aux Etats-Unis par l'astrophysicien Cruikshank, l'un des principaux investigateurs du programme Voyager.
2. Jusqu'à plusieurs milliers de degrés et de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de gigapascals, sur une phase de temps qui ne dépasse pas deux ou trois secondes.
3. Voir *Fusion* N°51 (mai-juin 1994), l'article de Philippe Jamet, intitulé « A la recherche de la matière noire. »

Bibliographie

1. Michel Maurette, *Chasseurs d'étoiles*, Hachette, Collection Questions de Science, 1993. Le Classique du genre à mettre entre toutes les mains et à faire lire, de gré ou de force, aux « décideurs »...
2. Michel Combes, *La Terre bombardée*, Editions France Empire, 1982. Un livre extraordinaire écrit par un des spécialistes les plus compétents et les mieux informés, qui mériterait d'être réédité !
3. Philippe Jamet, Dossier « Les Comètes », *Medispace* (Revue de la Société française d'études et recherches en médecine spatiale), Vol. 3, N° 1 et 2, janvier-avril 1991.
4. Anny-Chantal Levasseur-Regourd et Philippe de la Cotardière, *Halley, Le Roman des comètes*, Denoël, 1985. Incontestablement le meilleur des bons ouvrages de vulgarisation écrits peu avant la mission internationale Halley.
5. Donald Goldsmith, *Némésis : l'étoile du destin*, Robert Laffont, 1985. Ouvrage qui intègre assez bien la notion de chaîne de résonance cosmique et présente de façon très intelligible plusieurs théories audacieuses mais intéressantes.