

pour une large part l'étonnant retard qu'a pris l'impactologie. Très tôt, pourtant, des géologues remarquent que contrairement aux cratères de la Lune, les cratères volcaniques terrestres ne se rencontrent que dans certaines régions. Dès lors, pourquoi sont-ils omniprésents sur la Lune? Et pourquoi sont-ils toujours circulaires, rétorquent les partisans de la thèse volcanique? Les impacteurs arrivant *a priori* de l'espace sous tous les angles possibles, ils ne peuvent que laisser des traces elliptiques, comparables à celles des boulets de canon. Longtemps, cet argument passa pour imparable. Depuis, on a appris que pourvu qu'elle ait une masse suffisante (de l'ordre de 100 tonnes), une météorite hypervélocité ne heurte pas le sol comme un boulet, mais y explose comme un obus! C'est pourquoi son arrivée produit un cratère circulaire. Ensuite vinrent les missions *Apollo*, et s'imposa la certitude que les cratères lunaires sont principalement dus à des impacts.

La même polémique s'est longtemps poursuivie à propos des astroblobes terrestres. Le cas historique du *Barringer Meteor Crater* en Arizona l'illustre bien. Ce cratère, qui porte le nom du pionnier de l'impactologie D. Barringer, est une structure cir-

culaire de 1 100 mètres de diamètre et de 145 mètres de profondeur, dont les flancs dominent le désert environnant de 45 mètres. Ses couches sont rebroussées vers l'extérieur, voire déversées. À l'extérieur du cratère et jusqu'à environ sept kilomètres, le sol est jonché de milliers de fragments d'une météorite de fer.

Dès 1903, et malgré l'avis contraire des scientifiques, Barringer est convaincu que cette dépression résulte de l'impact d'une météorite métallique de dix millions de tonnes. Un trésor minier, donc. Pendant 20 ans, il fait des forages pour atteindre le corps métallique géant qu'il pensait trouver sous les dépôts du fond. C'est un échec, bien qu'il ait atteint 450 mètres de profondeur, ce qui conforte ceux qui doutent de son interprétation.

Seul contre tous

Toutefois, en 1929, l'astronome F. R. Moulton lui donne raison : il démontre par le calcul que l'impact d'une météorite peut produire une explosion capable de créer un tel cratère. Un détail toutefois désespère Barringer : l'énergie mise en jeu est telle que, selon l'astronome, la matière qui

constitue la météorite a certainement été volatilisée au moment de l'impact. En outre, d'après ses calculs, un corps de 500 000 tonnes se déplaçant à 10 kilomètres par seconde seulement aurait suffi à produire le cratère. Puisque son énergie cinétique croît comme le carré de sa vitesse, s'il avait une vitesse double, une masse quatre fois inférieure aurait suffi... Pour Barringer, c'est une catastrophe. En recherchant la précieuse masse de métal de la météorite, il s'est ruiné et a ruiné ses associés. Quelques jours après avoir pris connaissance des résultats de Moulton, il est emporté par une attaque cardiaque... Sur le plan scientifique, pour autant, c'est un succès. Dans les années qui suivent la mort de Barringer, la plupart des scientifiques admettent qu'il avait raison. Son erreur est d'avoir surestimé le freinage de l'atmosphère, ce qui l'a conduit à surestimer la masse de l'impacteur...

Après la mort de Barringer, les études suscitées par la controverse du *Meteor Crater* se sont poursuivies, mais comme elles étaient dispersées, elles n'ont guère atteint les géologues. Ce n'est qu'en 1989 que Jay Melosh publia un ouvrage, qui, pour la première fois, faisait une synthèse de

METEOR CRATER : PROTOTYPE DU CRATÈRE SIMPLE

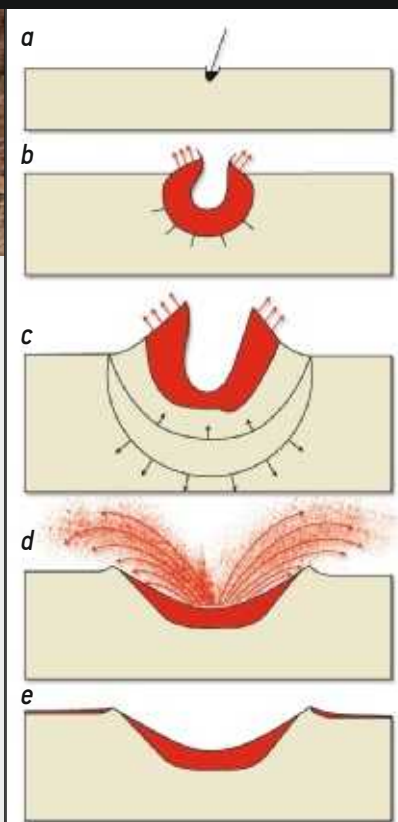


Le *Barringer Meteor Crater* est l'un des rares cratères simples bien conservés de la Terre. Il s'est formé, il y a quelque 50 000 ans, lors de l'arrivée d'une météorite ferreuse sur le plateau sédimentaire du Colorado. D'environ 150 000 tonnes, la masse résiduelle de ce corps se déplaçait d'une dizaine de kilomètres par seconde suivant un axe incliné de 80 degrés par rapport au sol lorsqu'elle a heurté un empilement de grès, de calcaire, de dolomite et de sédiments argileux (a). Les ondes de choc produites par la compression de ce corps (b) se sont propagées dans les strates rocheuses (c), qu'elles ont d'abord réduites en un magma ultrachaud, puis rejetées sur les côtés (d) tandis qu'une partie de la masse comprimée par le choc était éjectée



sur les côtés (e). La collision aurait dégagé une énergie équivalente à 150 fois celle de la bombe d'Hiroshima, éjectant 175 millions de tonnes jusqu'à 260 kilomètres, mais pour l'essentiel à quelques kilomètres. En a résulté un cratère en forme de bol de 1 100 mètres de diamètre et de plus de 145 mètres de profondeur à partir de bordures dominant le désert d'environ 45 mètres.

Les cratères simples bien conservés sont rarissimes sur la Terre, car l'érosion les fait disparaître vite à l'échelle géologique, mais on les dénombre par milliers sur la Lune et d'autres astres. Premier astroblob identifié comme tel, le *Meteor Crater* est le cratère simple terrestre ayant suscité le plus de travaux scientifiques.



la physique du déroulement d'un impact. Il y distinguait trois phases.

La première est la phase de contact et de compression. C'est la plus brève : entre le moment où l'impacteur touche la cible et celui où il est stoppé, ne s'écoulent que quelques fractions de seconde, pendant lesquelles l'essentiel de l'énergie cinétique est transmise à la cible. L'impacteur s'y enfonce, en repoussant et comprimant ses matériaux. Leur résistance ralentit l'impacteur, qui est rapidement stoppé, tandis que les matériaux de la cible sont brusquement accélérés. Ce phénomène produit des ondes caractérisées par des vitesses, des énergies et des puissances dissipées bien plus grandes que celles des ondes mécaniques habituelles : ce que l'on nomme des ondes de choc.

Une partie de ces ondes de choc se propage dans l'impacteur, puis se réfléchit en une onde dite de raréfaction (ou de tension) qui entraîne sa volatilisation ou sa fusion, et le jaillissement d'un panache hypersonique chargé de matériaux choqués. Cette brève phase ne concerne qu'un volume comparable à celui du projectile (*stade b de l'encadré page 42*). Il semble que ce soit à cette étape précoce de l'impact

que se forment et sont expulsées hors du cratère les tectites, ces fragments de roches fondues caractéristiques de certains grands impacts. Celui du Ries en Allemagne est par exemple à l'origine des moldavites, des tectites que l'on retrouve en Bohême, à près de 500 kilomètres du cratère.

Puis commence la phase d'excavation, pendant laquelle se forme un premier cratère : le cratère transitoire. La zone où l'impacteur a été stoppé et volatilisé est entourée d'une enveloppe hémisphérique d'ondes de choc qui divergent à grande vitesse. Elles se propagent dans la cible jusqu'à plus de dix kilomètres par seconde, puis leurs effets s'atténuent, jusqu'à devenir comparables à ceux d'ondes sismiques. Dans le cas des grosses météorites, il arrive que les ondes de choc parviennent aux antipodes.

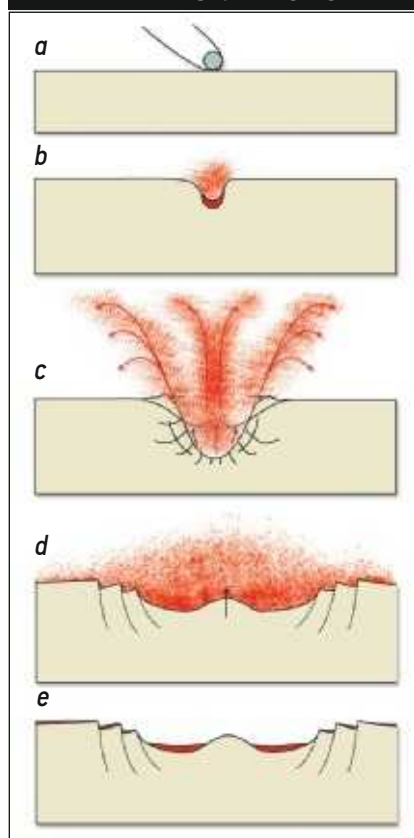
Partout où ces ondes passent, la pression, la température et la densité augmentent extrêmement vite. La pression, par exemple, atteint quasi instantanément des millions d'atmosphères (soit des centaines de gigapascals), ce qui dépasse de très loin ce que peuvent supporter les matériaux de la cible. Leur structure la plus intime, leur structure minéralogique, en est transformée, ce qui est le cas par exemple

L'AUTEUR



Pierre VINCENT, volcanologue, professeur honoraire de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, est un ancien membre du Laboratoire CNRS Magma et volcans de cette université.

LE RIES : PROTOTYPE DU CRATÈRE COMPLEXE



Le Ries est le grand cratère d'impact le mieux conservé de la Terre. Il s'est formé il y a environ 15 millions d'années lors de l'arrivée d'une météorite sur le Jura souabe en Allemagne. Aujourd'hui, il ne se distingue pas clairement à cause de sa dimension et de l'érosion, mais apparaît vu du ciel comme une chaîne de collines couvertes de forêts (*ci-contre en haut*). En certains endroits, sa bordure révèle la pente et les roches choquées typiques des bords de cratères d'impact (*ci-contre en bas*).

La météorite aurait eu un diamètre d'environ 1,5 kilomètre et serait arrivée avec une vitesse de 15 à 20 kilomètres par seconde (a), ce qui a engendré une explosion de plusieurs centaines de milliers de fois la bombe d'Hiroshima (b) projetant plus de 150 kilomètres cubes de roches sédimentaires et même de roches cristallines arrachées au socle sous-jacent jusqu'à 70 kilomètres (c), voire 450 kilomètres pour certains éjectas (tectites).

Sa formation a suivi au début la même séquence que dans le cas d'un cratère simple, aboutissant à la formation d'un cratère initial en bol, puis s'est produit un rebond dont a résulté un soulèvement central (annulaire au Ries, différent ailleurs), tandis que l'extension sous le cra-



tère et autour d'un réseau de failles consécutif au choc produisait en surface une série de terrasses concentriques (e).

Du fait de sa relative jeunesse – moins de 15 millions d'années – une partie des produits projetés hors du cratère est conservée, et bien exposée grâce à des carrières. Le cratère recoupant à la fois des formations sédimentaires variées et leur socle granitique, l'impact du Ries a produit une très grande variété d'impactites, c'est-à-dire de roches transformées par l'impact. C'est sans doute aussi celui qui a suscité le plus de travaux, ce qui en fait le modèle de référence pour les cratères complexes.