

Le nouveau site de Pour la Science est en ligne !

www.pourlascience.fr

Avec son nouveau site Internet, *Pour la Science* vous offre plus de contenu, plus de services, plus d'interactivité.

➤ Vous êtes abonné à *Pour la Science* ?

Retrouvez l'intégralité de votre magazine en ligne et téléchargez les articles de votre choix. Réagissez aux articles et posez vos questions à des experts. Découvrez chaque jour des contenus inédits.

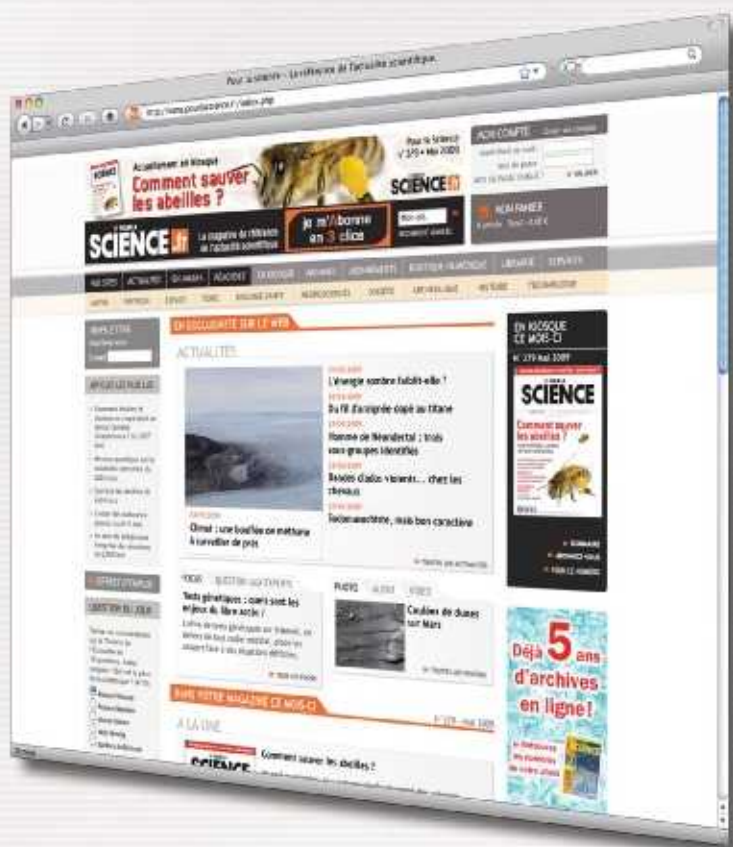
➤ Vous n'êtes pas encore abonné à *Pour la Science* ?

Découvrez chaque jour des actualités scientifiques, des articles originaux, des photos, des vidéos...
Achetez les articles de votre choix.

➤ Abonnez-vous en ligne en trois clics !

L'abonnement « papier » vous donne accès au magazine imprimé et à tous les contenus web.
L'abonnement « web » vous donne accès à votre magazine au format numérique.

➤ Et bientôt l'accès en intégralité aux archives !



À bientôt sur

POUR LA
SCIENCE.fr

Les cratères de météorites

Pierre Vincent

Les cratères d'impacts météoritiques sont produits par des explosions, qui laissent des signatures géologiques et minéralogiques caractéristiques.

En 1995, de retour à N'Djamena, la capitale tchadienne, après une mission au Tibesti, je découvre par hasard une image satellitaire de l'Ennedi. Sur ce plateau gréseux situé au Nord-Est du Tchad, on distingue une structure circulaire d'une quinzaine de kilomètres de diamètre dotée d'un important relief central. Un astroblème ? En d'autres termes, un cratère d'impact météoritique ? L'étude en France de photos aériennes réalisées par l'Institut géographique national et l'armée de l'air confirme l'intérêt d'une mission sur le terrain afin de tester cette hypothèse. Grâce à Alain Beauvilain, un géographe bon connaisseur du Tchad, où il réside alors, elle a lieu l'année suivante. La structure n'est qu'à 35 kilomètres au Nord-Est de la palmeraie de Fada, mais la présence d'une zone minée nous empêche d'y parvenir avant cinq jours. Nous constatons sur place que les roches du relief central

– des brèches – plaident en faveur d'un impact, mais n'en constituent pas une preuve suffisante. Outre d'éventuels restes de météorite – mais ils sont toujours absents dans les grands cratères –, la seule preuve irréfutable de la réalité d'un impact est la présence d'un métamorphisme de choc, c'est-à-dire d'une transformation des minéraux ou des roches due aux pressions et aux températures extrêmes d'un impact.

Pressions extrêmes

Or, de retour à Clermont-Ferrand, nous découvrons que nombre des échantillons rapportés du Tchad contiennent des quartz choqués. On désigne ainsi des cristaux de quartz, qui, sous l'influence de la pression énorme ayant brièvement régné pendant un choc, ont acquis le long de certains plans cristallins de très fines lamelles amorphes (non cristallines).

Depuis, le cratère de Gweni-Fada a été homologué par la base internationale de données des impacts maintenue par le Centre de sciences spatiale et planétaire de l'Université du Nouveau-Brunswick au Canada. Il suffit de taper les mots-clés *Gweni Fada crater* dans le logiciel *Google Earth* pour le contempler.

Du reste, l'importance des images satellitaires dans la découverte de possibles cratères à la surface de la Terre ne cesse de se confirmer. En 2005, Arthur Hickman du Service géologique australien a découvert à l'aide de *Google Earth* une structure ronde à l'Est de l'Australie. Sur le site internet, elle est déjà présentée comme un « probable cratère météoritique nouvellement découvert », et il suffit d'y taper *Hickman crater* pour l'observer. Elle est actuellement en voie d'homologation, après la découverte sur place d'impactites, c'est-à-dire de roches transformées par un impact météoritique...



© Sanjiv/Alto/Corbis

Ces deux cas sont typiques de la prudence, mais aussi de la vitesse avec laquelle progresse l'impactologie, c'est-à-dire l'étude des impacts météoritiques. Dans cette science jeune et faisant appel à de nombreux domaines des sciences de la Terre et de l'Univers, on repère de plus en plus souvent une structure candidate grâce à l'imagerie satellitaire – et à la chance ! –, puis on confirme son éventuelle nature météoritique par une scrupuleuse étude géologique du terrain et par des examens de laboratoire, afin de trouver des preuves minéralogiques irréfutables d'un métamorphisme de choc. Après avoir évoqué la naissance de l'impactologie, nous expliquerons ici le processus physique de la formation d'un cratère d'impact météoritique, et quelles structures et roches reconnaître pour identifier à coup sûr la réalité d'un impact.

L'étude des cratères débute en 1609, quand Galilée, pointant sa lunette sur la

Lune, remarque l'omniprésence de structures circulaires. Par des méthodes ingénieuses, il montre qu'il s'agit de dépressions pourvues ou non de reliefs centraux, dont il parvient même à estimer la hauteur. L'illustre physicien ne propose aucune explication sur l'origine de ces structures, mais il pose un problème, qui reste ensuite un sujet récurrent chez ses successeurs : les cratères sont-ils des vestiges d'impacts ou de volcans ?

L'hypothèse des volcans

Toutefois, au cours des siècles qui suivent les découvertes de Galilée, les géologues tendent à voir un volcan dans tout cratère. On les comprend : les hommes ont souvent vu se former des cratères volcaniques, mais jamais de cratères d'impact...

C'est cette persistance dans l'interprétation des cratères lunaires qui explique

L'ESSENTIEL

✓ Parce que les cratères d'impact étaient pris pour des volcans, l'étude des impacts, l'impactologie, n'a vraiment commencé qu'au XX^e siècle.

✓ L'impact d'une météorite se fait en trois étapes – compression, excavation, modification –, qui expliquent la forme du cratère.

✓ Les caractéristiques des roches d'impact – les impactites – dépendent de la masse et de la vitesse de l'impacteur et de la nature des terrains où il explose.

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 1100 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

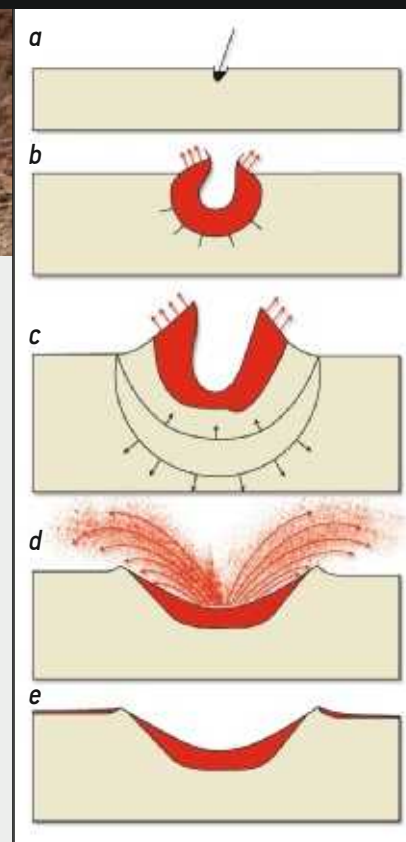


Le *Barringer Meteor Crater* est l'un des rares cratères simples bien conservés de la Terre. Il s'est formé, il y a quelque 50 000 ans, lors de l'arrivée d'une météorite ferreuse sur le plateau sédimentaire du Colorado. D'environ 150 000 tonnes, la masse résiduelle de ce corps se déplaçait d'une dizaine 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 1100 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.

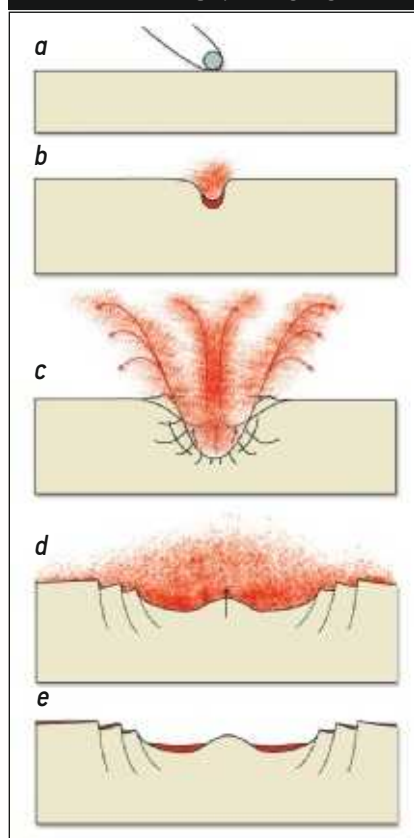
Partout où ces ondes passent, la pression, la température et la densité augmentent extrêmement vite. La pression, par exemple, atteint quasi instantanément des millions d'atmosphères (soit des centaines de gigapascals), ce qui dépasse de très loin ce que peuvent supporter les matériaux de la cible. Leur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

AOROUNGA : LA SYMÉTRIE PARFAITE



La structure d'Aorounga (*ci-dessus*) est située dans la plaine désertique du Borkou, à 130 kilomètres au Nord de l'oasis de Faya. Elle est entièrement contenue dans les grès paléozoïques (plus de 290 millions d'années) – qui à cet endroit ont environ 2 000 mètres d'épaisseur –, aucun élément du Précambrien sous-jacent n'ayant été trouvé dans ses produits d'impact. La présence sur place de verre laissait espérer une datation par la méthode des traces de fission, mais les essais n'ont pas abouti, car les échantillons que nous avons prélevés sur place étaient altérés.

Dans sa structure, Aorounga est un cratère complexe, d'un diamètre moyen de 16 kilomètres, contenant un soulèvement central annulaire de grès anciens, soulevés, basculés et partiellement érodés, qui entoure une dépression cen-

trale en inversion de relief (*ci-contre*). L'élargissement du cratère initial s'est fait par glissements gravitaires vers le centre de la couronne périphérique, le long de surfaces de glissement incurvées, expliquant les formes de guirlande de la limite externe. La dépression externe, remarquablement régulière, est limitée par une falaise circulaire continue (*ci-dessous*). Sur le plateau central, des impactites (roches produites par l'impact) forment une couche qui a dû être continue initialement : il s'agit de suéville à grain fin, avec de petits débris lithiques et du verre. À son contact, les grès sous-jacents sont rougis, ce qui atteste de la haute température qui a suivi l'impact.

Aorounga est un site idéal pour l'étude détaillée des déformations subies lors d'un impact par des formations sédimentaires stratifiées initialement horizontales – un cas peu fréquent, bien que son étude en soit au stade de la reconnaissance.



des quartz choqués décrits au début. Ainsi, dans toute la partie de la roche-cible où la tension de l'onde de raréfaction (la tension subie par le matériau du fait de l'onde) est supérieure à la résistance des matériaux, les roches sont volatilisées ou fondues ; dans les zones plus profondes où ce n'est plus le cas, elles sont fragmentées, puis fracturées (*figures c de l'encadré page 42*).

Dans un grand impact, le contact, la compression, la décompression et le passage de l'onde de choc ne durent que quelques dixièmes de seconde. Au cours de ce processus ultrabref, les roches qui constituent la cible sont accélérées, et s'éloignent à grande vitesse du point d'impact. Dans la partie superficielle, elles sont éjectées vers le haut et sur les côtés, ce qui produit les éjectas que l'on retrouve autour du cratère. Au-dessous, elles s'enfoncent.

Champignon d'impact

Le cratère transitoire (ou initial) est excavé par tous ces processus. Il a la forme d'un bol, dont les bords, constitués de strates rebroussées, sont recouverts d'éjecta. La profondeur totale du cratère est due pour environ un tiers à l'excavation des éjectas, et pour deux tiers à l'enfoncement du plancher. On estime qu'environ six secondes sont nécessaires pour former un cratère

LES IMPACTITES : DES ROCHES PRODUITES PAR IMPACT

Le terme impactite désigne toutes les roches transformées par un impact météoritique ou formées dans ou autour de son cratère. Ainsi, il inclut les roches fondues par l'impact (verres) et toutes les roches choquées ou réduites en débris, ainsi que toutes leurs combinaisons.

Les impactites les plus reconnaissables à l'œil nu sont les cônes de percussion, des structures rocheuses marquées de nombreux demi-cônes résultant de la compression de la roche à une pression de dizaine de milliers d'atmosphères (*a*, des

cônes de percussion trouvés dans le cratère d'Aorounga au Tchad).

Les impactites les plus communes sont les brèches d'impact, des conglomérats de débris, de roches fondues et de roches choquées liés par un ciment naturel. Il en existe de nombreuses sortes, dont les suévites, des brèches à inclusions vitreuses qui ont été définies dans le cratère du Ries en Bavière.

Les suévites tirées de la carrière d'Otting dans le Ries contiennent des verres d'impact (inclusions sombres) et de nombreux fragments de sédiments retenus dans une matrice grise à grains fins (*b*).

À gauche, trois sortes de brèches issues du cratère de Rochechouart en France. En haut, un mélange de fragments de gneiss, de granite, de quartz, et de leptinite lié par une



matrice composée de poussières qui se sont solidifiées dans le temps (*d*). Une matrice vitreuse

abondante (les volutes rouges) emprisonne de nombreux fragments de roche de tailles diverses, ce qui suggère que cette brèche s'est formée dans le cratère à proximité, là où du matériau fondu et des débris se sont mêlés. Deux autres brèches



issues du cratère de Rochechouart sont toutes les deux constituées d'une fine matrice enfermant des fragments variés de roches colorées (*et c*). Les brèches d'impact les plus esthétiques font l'objet d'un commerce !



F. Michaud



P. Bockstaller



L. Carion

transitoire de un kilomètre, tandis qu'environ 90 secondes le sont pour former un cratère transitoire de 200 kilomètres.

Un champignon de matériau vaporisé se forme très vite au-dessus de la cavité, comparable aux champignons atomiques produits par les explosions nucléaires atmosphériques. Ce panache pourra même dépasser la haute atmosphère et s'étendre dans l'espace au-dessus de toute la surface de la Terre. Cela s'est par exemple produit lors de la formation du cratère géant de Chicxulub, il y a 65 millions d'années. La poussière de son panache a produit en retombant la strate riche en iridium, à l'origine de l'interprétation météoritique de la disparition des dinosaures.

Une part du matériau fondu est éjectée sur les côtés et forme les brèches (conglomérats rocheux) contenant des éléments vitreux que l'on nomme suévités, mais reste surtout à l'intérieur du cratère transitoire qu'elle recouvre. On estime l'énergie d'un impact suffisante pour faire fondre ou volatiliser un volume de cible allant jusqu'à 1 000 fois celui du projectile. Dans le cas du cratère de Sudbury au Canada, ce volume fut par exemple de plus de 1 000 kilomètres cubes : un réservoir magmatique comparable à celui d'un grand volcan, mais à ciel ouvert, exista alors pour un temps. Toutefois, la plus grande partie du matériel éjecté a été déposée à quelques rayons de cratère seulement, par voie balistique ou par éjection latérale.

Finalement, la phase de modification s'enclenche. La violence de l'impact est maintenant consommée, mais le cratère transitoire est instable. La gravité va immédiatement le modifier : en moins d'une minute pour les petits cratères transitoires et en quelques minutes pour les grandes structures. L'importance des modifications effectuées par la gravité varie beaucoup, en fonction de la taille du cratère. Dans le cas des petits cratères – ceux de moins de quatre kilomètres de diamètre –, la bordure s'écroule en partie, ce qui augmente quelque peu le diamètre initial. Ce phénomène est associé au glissement de divers blocs et autres débris dans la cavité. Ce remplissage réduit de moitié la profondeur du trou ; il en résulte un cratère en forme de bol que l'on nomme cratère simple parce qu'il ressemble assez au cratère transitoire initial.

Au-dessus d'une certaine taille de l'impacteur, les processus de transformation de la cavité transitoire sont bien plus compliqués, de sorte que l'on parle de cra-

tère complexe. Les processus déjà décrits dans le cas des petits impacts sont aussi à l'œuvre, mais avec une plus grande ampleur. Le cratère s'élargit par effondrement des parois, avec formation de terrasses concentriques descendant vers la région centrale qui est au contraire soulevée pour former un piton central. Toutefois, dans les cratères de plus de 20 ou 25 kilomètres de diamètre, le piton central est remplacé par une couronne de reliefs (*peak ring*) entourant une dépression sommitale. Les géométries résultantes ne sont pas sans rappeler les formes de rebond prises par un liquide juste après qu'une goutte y est tombée. En fait, tout se passe comme si l'énergie dissipée dans le milieu le rendait provisoirement fluide,

✓ SUR LE WEB

<http://www.lpl.arizona.edu/impacteffects/>

Earth impact database
<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>

GWENI-FADA : UN IMPACT OBLIQUE

Le cratère d'impact de Gweni-Fada est situé dans l'Ennedi, au Nord-Est du Tchad, dans une zone sédimentaire gréseuse remontant au Primaire. Son âge est inconnu, mais il doit être nettement plus jeune que les formations perturbées.

Nous avons récemment reconnu ce cratère complexe de 22 kilomètres de diamètre ; il présente plusieurs caractéristiques inhabituelles, dont une forte dissymétrie de son complexe central (*ci-dessous*). Malgré son érosion, sa structure centrale a préservé sa forme originelle. Le rempart externe est continu, seulement interrompu au Sud-Sud-Ouest par un important effondrement des terrasses, venues buter en se plissant et se chevauchant contre le soulèvement central. Celui-ci, anormalement large, est déplacé vers le Sud par rapport au centre géométrique, ce qui donne une forme de croissant à la dépression, partiellement comblée de dépôts lacustres, qui l'entourent. Le piton central est ainsi à plus de 500 mètres du centre géométrique. On remarque aussi que le complexe central est ouvert vers le Nord, suivant une forme dite « en pince de homard ».

Ces caractères particuliers sont connus sur Terre dans l'astrobombe de Manson dans l'État de l'Iowa, où il a été montré qu'ils résultent d'un angle d'impact de la météorite inférieur à 30° par rapport au sol. Cette interprétation résulte d'études expérimentales, et de comparaisons avec les structures présentes sur d'autres planètes où la répartition des éjectas est observable. L'exemple du cratère King, situé sur la face cachée de la Lune, est celui qui évoque le mieux Gweni-Fada.

Les impactites du complexe central sont érodées, mais celles de la dépression doivent

subsister sous les alluvions lacustres. L'effondrement du flanc Sud s'est produit après le rehaussement du complexe central, mais probablement vers la fin du stade de modification du cratère initial : le plissement des grès résulterait de la dégradation temporaire de la résistance des matériaux liée à l'impact.

On sait que pour un même diamètre de cratère, la largeur du complexe central est plus grande pour un impact oblique, et que, dans tous les cas, celle-ci augmente avec l'érosion. Cependant, cela ne suffit pas à expliquer la taille anormalement importante du cratère de Gweni-Fada. En 1989, Jay Melosh, de l'Université d'Arizona, a déjà signalé que des cratères martiens avaient des pics centraux énormes, et il attribuait ce fait à la présence d'eau (liquide ou gelée) sous la surface. Cette interprétation peut s'appliquer : des nappes aquifères sont présentes dans les grès paléozoïques de l'Ennedi en contact avec le substratum antécambrien imperméable.



de sorte que, quand il se fige, peut-être après plusieurs oscillations, il conserve une forme de rebond.

Le passage entre les conditions de formation d'un cratère simple à celles d'un cratère complexe se fait quand un seuil de résistance des matériaux a été atteint. Il a été calculé que ce seuil est facilement atteint étant donné l'énergie dissipée par unité de temps par un grand impact. Une fois ce seuil de résistance dépassé, les roches ne présentent qu'une très faible cohésion tandis que leur coefficient de frottement est devenu presque nul. La notion de fluidisation acoustique (une réduction des frottements entre débris rocheux due aux vibrations acoustiques) introduite par J. Melosh est celle qui rend le mieux compte de cette dégradation transitoire de la résis-

tance des matériaux. Ce domaine reste toutefois très débattu par les théoriciens.

Comment identifier un cratère d'impact ? Comme l'illustrent les exemples rapportés, le rôle des images satellitaires est devenu essentiel pour repérer les structures circulaires candidates. Pour autant, elles ne dispensent jamais d'une étude au sol.

Identification : au sol !

Pour y faire quelles constatations ? Tout d'abord, pour y étudier les caractéristiques de la structure, telles la géométrie du cratère, la présence de terrasses concentriques, d'un relief ou d'un pic central, etc. Mais certains astroblèmes, celui de Rochechouart en France, par exemple, n'auraient jamais été reconnus du ciel ! Sur place,

on ne trouve que très rarement des débris météoritiques, car, dans la plupart des cas, le matériau de l'impacteur est volatilisé, fondu et éjecté au loin.

En revanche, des brèches d'impact sont produites dans tous les cas. En géologie, le terme de brèches désigne des roches composées d'au moins 50 pour cent d'éléments grossiers fixés par un ciment naturel. Les brèches d'impact se forment à partir des éjectas, c'est-à-dire de débris de roches fondues, choquées, ou simplement broyées, et d'un remplissage provenant des éjectas fins. Il existe de nombreuses variétés de brèches d'impact, dont les plus remarquables sont sans doute les suévites, parce qu'elles contiennent des éléments vitreux, donc du matériel fondu. Les suévites ont été définies au Ries, où elles forment une couche de 400 mètres d'épaisseur dans le fond du cratère, puis reconnues dans de nombreux astroblèmes à travers le monde : elles sont typiques des dépôts qui remplissent les cratères.

Toutefois, outre les brèches d'impact, il existe des brèches sédimentaires, tectoniques, volcaniques... C'est pourquoi la présence de brèches n'est pas suffisante en soi pour caractériser un impact : il faut pour cela qu'elles présentent au niveau microscopique les preuves d'un métamorphisme de choc. Dans son livre faisant référence, le géologue Bevan French, de la *Smithsonian Institution* de Washington, aux États-Unis, décrit en détail les roches perturbées

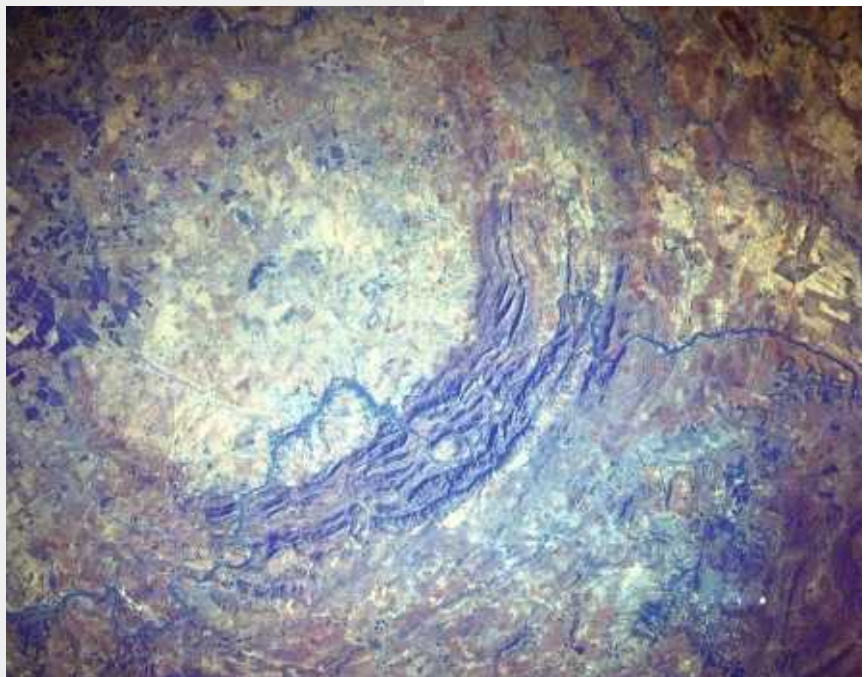
LE VREDEFORT : ASTROBLÈME GÉANT

Le Vredefort est le plus grand cratère d'impact connu sur Terre. De 250 à 300 kilomètres, son cratère est plus large que les 250 kilomètres du cratère de Sudbury au Canada et que les 170 kilomètres du cratère de Chicxulub au Mexique (qui aurait causé la fin des dinosaures). L'astéroïde qui l'a créé aurait mesuré plus de dix kilomètres de diamètre.

L'astroblème de Vredefort (*ci-dessous, une vue satellitaire*) est aussi extrêmement ancien, puisqu'il a été formé en pleine ère précambrienne, il y a environ deux milliards d'années. Il est donc très érodé, toutes ses impactites ayant disparu depuis longtemps. Toutefois, les structures subsistantes indiquent qu'il s'agit de l'un des rares cratères à anneaux multiples de la Terre. Ce type de cratères est produit par les plus grands impacts. Les anneaux concentriques peuvent atteindre des centaines de kilomètres de diamètre. L'une des théories pour les expliquer est que l'impact crée dans la croûte terrestre d'immenses vagues qui se figent sous la forme d'anneaux. Elles sont rares sur Terre car, très anciennes, elles ont été érodées ou ont disparu. En revanche, elles sont conservées et faciles à observer sur les autres planètes telluriques et la Lune. Le bassin oriental sur la Lune, avec ses cinq anneaux, en est l'archétype.

L'une des conséquences géologiques majeures est que les plis ainsi créés (formant ce que les géologues nomment des synclinaux et des anticlinaux) sont autant de pièges à minéraux. C'est ce qui explique que la moitié de l'or produit sur Terre, mais aussi beaucoup d'uranium aient été extraits autour du Vredefort. Au-delà du cratère du Vredefort et de sa couronne, les formations du Witvaters-

rand, les plissements circulaires qui font onduler les formations du Witvatersrand, ont longtemps été protégées de l'érosion par une couche d'impactites. L'or qui s'y est accumulé avait été libéré par la destruction de filons au cours des temps géologiques. Il est actuellement conservé dans les synclinaux, particulièrement celui de la *Golden Belt*. Comme il est antérieur à l'impact, bien qu'une partie ait été remaniée par l'activité hydrothermale consécutive à celui-ci, c'est bien à la formation du cratère qu'il doit de ne pas avoir été érodé.



MSA

Connu sous l'appellation « le Clot », ce petit cratère est situé dans l'Hérault, à 1,5 kilomètre au Sud du village de Cabrerolles. Il mesure 220 mètres de diamètre pour une profondeur de 50 mètres. Sa forme est circulaire, avec des parois abruptes et un fond plat planté de vigne (à droite). Il est creusé dans des grès et des schistes carbonifères, ce qui semble exclure la possibilité d'une origine karstique (le creusement de roches carbonatées solubles, surtout du calcaire). C'est pourquoi, en 1950, les géologues Bernard Gèze et André Cailleux avaient suggéré qu'il pouvait s'agir d'un cratère d'impact météoritique, l'argument principal étant qu'on imagine mal un

autre mécanisme capable de produire dans ce contexte un tel cratère. Cela a suffi à son inscription sur l'inventaire international des cratères d'impact, mais il en a été exclu en 1977, les critères d'inscription étant devenus plus rigoureux... Les quelques recherches effectuées depuis n'ont pas permis de trouver des arguments en faveur de l'hypothèse de l'impact. Les impactites signalées un temps (des cônes de percussion) se sont révélées ne pas en être, et aucun quartz choqué n'a été trouvé à ce jour.

Dans un cratère d'impact simple, même de petite taille, les rebords sont normalement plus ou moins rebroussés, ce qui n'est pas le cas ici. On peut suggérer qu'une ori-



P. Vincent

gine karstique profonde est possible : les couches de calcaire dévonien, qui affleurent un kilomètre au Nord du Clot, se poursuivent probablement quelques centaines de mètres au-dessous. L'effondrement d'une cavité formée par érosion karstique (les calcaires se dissol-

vent dans l'eau) pourrait donc être à l'origine du Clot. Plus au Nord, dans les calcaires, deux autres dépressions fermées de plus petite taille confirment cette possibilité. Le Clot de Cabrerolles n'en reste pas moins remarquable pour sa beauté – et pour son vin !

dans leur structure intime, donnant ainsi une définition au sens large des impactites.

Quelles sont les impactites possibles ? Les seules vraiment évidentes à l'œil nu sont les cônes de percussion, nommés *shatter cones* en anglais (voir l'encadré page 44). Ces cônes se forment habituellement dans des roches isotropes, à grain fin, qui ne sont pas présentes sur tous les terrains.

Impactites

Les autres impactites ne sont identifiables qu'au microscope. Elles contiennent des minéraux qui ne se forment qu'à très haute pression et haute température. Ainsi, la coésite et la stishovite sont des minéraux de silice qui proviennent de la transformation du quartz. Ce sont aussi les minéraux choqués, des minéraux initialement non isotropes, mais qui le sont devenus (on parle de minéraux isotropisés) ou encore des verres de fusion.

Le carbone ayant subi une pression extrême – le diamant – est assez fréquent dans les impactites, où il prend la forme de minuscules cristaux mesurant une fraction de millimètre. Ces cristaux résultent de la transformation de roches-cibles contenant du graphite. Parmi les minéraux choqués, les quartz sont particulièrement utiles à l'identification d'un cratère, car ils sont très stables, même s'ils peuvent finir par disparaître eux aussi par recuit thermique ou recristallisation. Enfin, les pseudotachylites ont été

décrites pour la première fois dans l'astrolème du Vredefort, en Afrique du Sud. Ces roches vitrifiées par frottement ne sont pas spécifiques des impacts, mais elles en fournissent un indice important quand elles sont associées à une tectonique particulière.

Tandis que les impactites sont formées pendant la propagation des ondes de choc, d'autres roches peuvent l'être pendant la modification du cratère transitoire. Ainsi, comme à Rochechouart, il est apparu que les glissements de blocs à l'origine des terrasses peuvent produire un verre : la pseudotachylite.

L'incessant bombardement des astres du Système solaire par des objets cosmiques n'a pas laissé sur la surface de la Terre les mêmes cicatrices que sur les autres planètes telluriques ou la Lune. Pour autant, même si la plupart des cratères terrestres ont disparu, on sait aujourd'hui le rôle géologique majeur joué par les cratères d'impact sur Terre. Soulignons que les cataclysmes d'origine cosmique ont joué un rôle essentiel dans l'évolution de la vie : tout indique qu'elle peut être interrompue par un événement qui la relance dans une nouvelle direction. Le bombardement cosmique de la Terre n'a certes plus l'ampleur qu'il avait au début du Système solaire, mais l'impact de la comète Shoemaker-Lévy-9 sur Jupiter, en 1994, nous rappelle que la formation des cratères d'impact n'est pas seulement de l'histoire ancienne... ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. M. Vincent et A. Beauvilain, *Découverte d'un nouveau cratère d'impact météoritique en Afrique : l'astrolème de Gweni-Fada (Ennedi, Sahara du Tchad)*, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 323, pp. 987-997, 1996.

C. Koeberl et al., *Aorounga and Gweni Fada impact structures, Chad : Remote sensing, petrography, and geochemistry of target rocks*, *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 40, n° 9/10, pp. 1455-1471, 2005.

H. J. Melosh, *Impact Cratering. A Geologic Process*, Oxford University Press, 1996.

B. M. French, *Traces of Catastrophe : A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*, Contribution 954, 120 p., Lunar and Planetary Institute, Houston, 1998.

Forage dans le plus grand cratère américain

1. CETTE VUE DE LA BAIE DE CHESAPEAKE
obtenue par satellite ne révèle en rien
la présence sous-jacente du plus grand
cratère météoritique des États-Unis,
découvert fortuitement en 1990 !

Christian Koeberl

**Il y a 35 millions d'années,
une météorite de plusieurs
kilomètres de diamètre
a explosé dans la mer
continentale de Virginie.
L'astroblème marin ainsi créé
est l'un des mieux conservés
du monde.**

L'origine des tectites d'Amérique du Nord est enfin révélée ! Les tectites sont des fragments de roches fondues expulsés très loin du cratère d'impact creusé par une météorite. On connaissait jusqu'à présent quatre grands champs de tectites au monde, dont celui du Ries en Allemagne, qui s'étend sur plus de 400 kilomètres, et un champ nord-américain. Toutefois, dans les années 1990, apparaissent des indices de l'existence d'un grand cratère d'impact sous la baie de Chesapeake dans l'État de Virginie. L'explosion qui le produisit serait la source des tectites nord-américaines. C'est pourquoi, dans le cadre du Programme international de forage scientifique continental (*International Continental Scientific Drilling Program*), une campagne d'étude systématique par forage a

été décidée. Je l'ai dirigée avec mes collègues Gregory Gohn, du Service américain de prospection géologique, Kenneth Miller, de l'Université Rutgers à Piscataway, et Wolf Reimold, du Musée Humboldt pour les sciences naturelles à Berlin. Nous rendons compte ici de ses résultats.

Ouverte sur l'Atlantique, la baie de Chesapeake est le plus grand estuaire des États-Unis. Elle couvre 166 534 kilomètres carrés, et plus de 150 rivières s'y jettent. Le premier indice de l'existence du cratère est apparu en 1983, quand un carottage pratiqué à Atlantic City a livré une couche de perles de verre (des tectites) et de quartz choqués (des microfragments à la structure cristalline profondément altérée par le choc), soit autant de produits typiques d'un impact.

La découverte aurait pu être liée à un petit impact, donc seulement d'importance locale. Cependant, au cours des années 1990, le Service américain de prospection géologique a réalisé des forages et des mesures géophysiques, m'associant à cette étude. Progressivement, les indices d'un grand impact se sont multipliés, de sorte que, dès 1996, nous étions certains que la grande structure ronde perceptible sous le fond sous-marin ne pouvait être d'origine volcanique. Parmi ces indices, des quartz choqués étaient les plus certains, car ils sont toujours dus à un impact.

Comme dans le cas de l'impact du Chicxulub, réputé être à l'origine de l'extinction des dinosaures, il y a 65 millions d'années, c'est ensuite la prospection pétrolière qui a révélé toute l'importance du cratère de Chesapeake. Plus grande structure d'impact connue aux États-Unis, le cratère de la baie de Chesapeake mesure 85 kilomètres de diamètre. D'après sa taille et les datations, il résulterait de la collision avec la Terre d'une météorite de deux à cinq kilomètres de diamètre à la fin de l'Éocène (56 à 34 millions d'années). Aujourd'hui, plus rien n'en est visible, car il se trouve entre 300 à 500 mètres sous le fond de la baie.

Toutefois, il est particulièrement bien conservé, car il s'agit d'un exemple typique d'«impact humide», en d'autres termes de cratère produit par la chute d'une météorite dans la mer peu profonde d'un plateau continental. Ce type d'impact produit des cratères ayant la forme intérieure d'un sombrero retourné (voir la figure ci-contre). Très rare parmi les cratères reconnus, cette forme est celle des cratères produits par des impacts sous-marins. C'est le cas du cratère sous-marin de Mjölner situé entre la Norvège et le Spitzberg, ou encore de celui de Lockne, qui se trouve à terre en Suède, mais dont on pense qu'il fut formé à l'Ordovicien (448 à 444 millions d'années) par un impact en mer.

Ces constatations, qui rendent le cratère de Chesapeake particulièrement intéressant, ont favorisé le lancement en 2004 d'une campagne scientifique par le Programme continental de forage scientifique (*International Scientific Drilling Program*) et par le Service américain de prospection géologique. Avec G. Gohn, K. Miller et W. Reimold, j'en ai dirigé la partie scientifique. Le forage s'est avéré difficile, car les alternances de couches d'argiles gon-

flées d'eau et de strates de roches diverses nous ont obligés à plusieurs interruptions. Ainsi, le seul forage, réalisé en automne 2006 et au printemps 2007, a coûté deux millions d'euros, et a dû être interrompu. Malgré ces difficultés, nous avons finalement obtenu une carotte de 1,8 kilomètre de long, que nous avons étudiée ensuite pendant près de deux ans.

La forme du cratère de Chesapeake résulte des élasticités différentes des trois couches qui constituent la baie : la couche d'eau, celle de sédiments marins et celle des roches cristallines sous-jacentes. Ces dernières sont les plus dures, de sorte que l'entonnoir qu'y a creusé la météorite – la pointe du sombrero – est relativement petit. L'impact a aussi produit un large entonnoir dans le sédiment. Il a chassé l'eau de mer d'une immense zone, laquelle en fuyant, puis refluant, a charrié d'innombrables débris. Cette région bouleversée constitue le bord du chapeau.

D'environ 30 à 40 kilomètres de diamètre, l'entonnoir creusé dans le sédiment est plein de brèches, c'est-à-dire de débris de roches d'origines diverses, qui ont été mélangées au moment de l'impact.

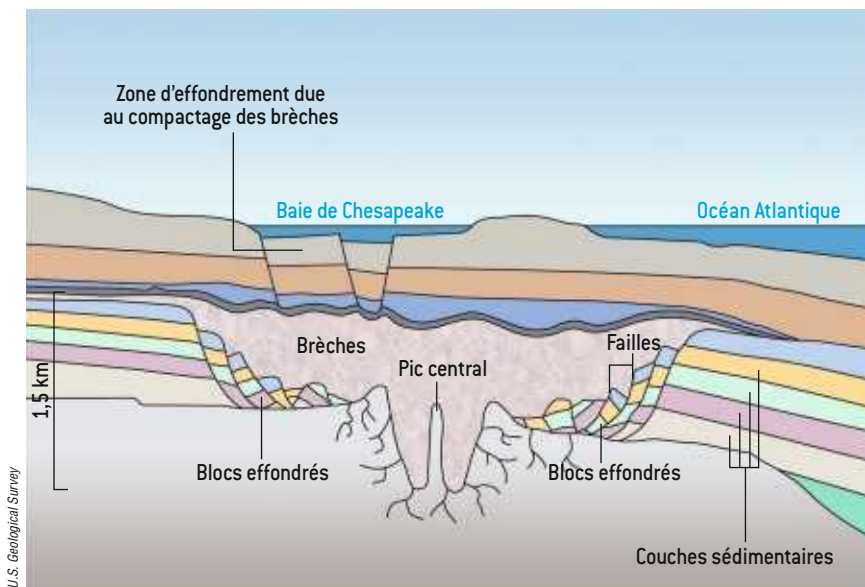
L'AUTEUR



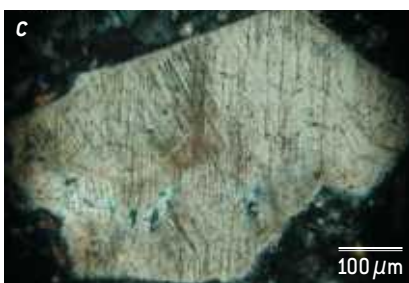
Christophe KOEBERL est professeur au Département de recherche sur la lithosphère de l'Université de Vienne, en Autriche.



2. L'ASTROBLÈME DE LA BAIE DE CHESAPEAKE est une structure de 30 à 40 kilomètres de diamètre enfouie sous 300 à 500 mètres de sédiments. C'est le cratère d'impact le mieux conservé en milieu marin.



3. LE PROFIL DU CRATÈRE DE LA BAIE DE CHESAPEAKE révèle l'ampleur du bouleversement géologique opéré par la chute de la météorite : le choc a créé une énorme dépression remplie de débris, ce qui a modifié le cours des rivières locales (donnant à la baie sa forme si particulière) et bouleversé la situation et le fonctionnement des aquifères, qui, pour la plupart, ne livrent plus qu'une eau saumâtre peu consommable.



4. LES BRÈCHES OBSERVÉES AU MICROSCOPE révèlent l'effet de l'impact. Un grain de quartz choqué (c) est strié de multiples fissures laissées par les cisailages dus à de violentes ondes de choc. Des coupes (a et b) de deux brèches d'impact révèlent des fragments de diverses roches ainsi que du matériau fondu figé.

Ces brèches sont caractéristiques de la présence d'un cratère météoritique ; c'est notamment le cas des suévites, mélanges de fragments rocheux divers, mais aussi des quartz choqués produits par les impacts.

Dans les carottes, nous avons aussi découvert certaines brèches renfermant de l'eau de mer restée intacte depuis 35 millions d'années... Or pour couvrir les besoins des deux millions d'habitants vivant dans les villes entourant le cratère, de nombreux forages ont été réalisés à la recherche d'eau douce : ils n'ont produit que de l'eau saumâtre. Cette constatation étonnante s'explique par le piégeage d'eau de mer et donc de sel dans le sol. Notre découverte va donc permettre de localiser la zone de l'impact où l'eau souterraine est non salée – et par conséquent, les zones non polluées par l'impact, où les nappes phréatiques seront exemptes de sel.

Des traces de tsunami

Une autre surprise fut la découverte au cours de l'un de nos forages d'un immense bloc de granite enfoui sous les autres déchets. De plusieurs centaines de mètres d'épaisseur et long de plus d'un kilomètre, il provient nécessairement d'une autre zone, car les bancs de granite les plus proches se trouvent à six kilo-

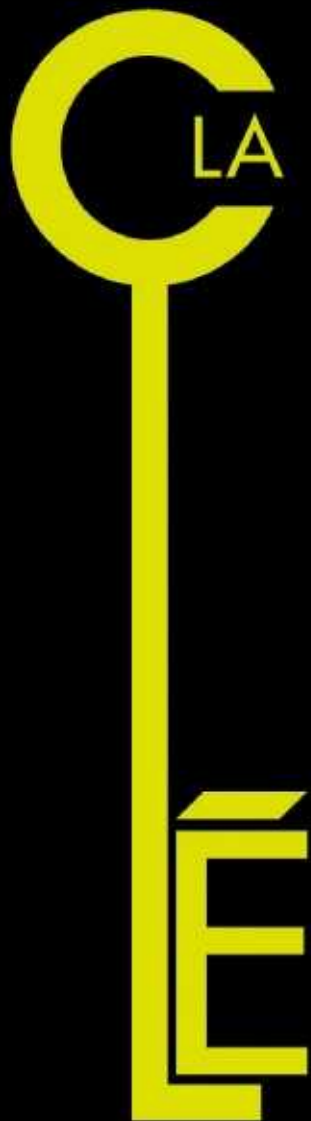
mètres. En outre, il a probablement franchi la distance séparant son origine de son lieu de dépôt en quelques minutes, voire quelques secondes et avant le reflux de la mer, car il se trouve coincé entre une couche de roches concassées, provenant du socle local, et le matériel chaotique charrié par la mer lors de son reflux. Sans doute aura-t-il glissé à grande vitesse sur les pentes du cratère central, ce que confirme le fait que les brèches sous-jacentes ont été broyées à l'état de gravier, voire de sable.

Les débris rocheux qui surmontent le bloc de granite ont eux-mêmes été amoncelés dans le cratère par le reflux de la mer. Dans les carottes, nous avons découvert les traces du passage d'un tsunami : une strate bien définie partout dans le cratère, mais constituée d'un mélange particulièrement chaotique de débris divers, dont certains étaient situés dans des couches géologiques qui, avant l'événement, étaient séparées par des centaines de mètres d'épaisseur de sol !

Nommée tsunamite, pareille couche se reconnaît notamment à sa granulométrie de plus en plus fine du bas vers le haut, caractéristique d'une sédimentation dans des eaux particulièrement agitées.

Notre étude nous a aussi livré d'intéressantes informations sur la structure géologique de la région, notamment sur les variations du niveau de la mer. Les géologues savent en effet dire si des sédiments ont été déposés sur terre ou sous l'eau, ce qui renseigne sur la position de la ligne des eaux à diverses époques. En outre, les fossiles marins piégés dans les sédiments correspondent souvent à des organismes dont on sait à quelle profondeur ils vivent, ce dont on déduit à quelle profondeur ils se trouvaient quand ils ont été fossilisés. Tous ces éléments nous ont renseignés sur la tectonique locale, c'est-à-dire sur les mouvements et les déformations de la croûte terrestre locale dans la région. Nous avons également été surpris de découvrir que même à 1,8 kilomètre de profondeur, dans la partie chaude du cratère, certaines formes de vie ont réussi à se maintenir.

L'exploitation des données prélevées dans la baie de Chesapeake va encore durer plusieurs années, mais, grâce aux résultats déjà acquis, nous connaissons désormais bien mieux l'impact... géologique d'un impact... météoritique sur un plateau continental marin. ■



Pour la Science



Les Dossiers

76 €

seulement, au lieu de 102,50 €

Soit
les Dossiers
offerts !

DES SCIENCES



Retrouvez en plus l'intégralité de votre magazine en ligne et téléchargez les articles de votre choix compris dans votre abonnement sur www.pourlascience.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements • Pour la Science
8, rue Férou • 75278 Paris cedex 06

☐ **Oui**, je m'abonne à **Pour la Science** (12 numéros) + les **Dossiers** (4 numéros) pour **1 an**

76 € au lieu de 102,50* € Participation aux frais de port : Europe (hors France) 12 € par an, autres pays 25 € par an.

☐ **Oui**, je m'abonne à **Pour la Science** seul (12 numéros) pour **1 an**

56 € au lieu de 74,70* € Participation aux frais de port : Europe (hors France) 12 € par an, autres pays 25 € par an.

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations de *Pour la Science*.

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations des partenaires commerciaux de *Pour la Science*.

Mes coordonnées (à remplir) :

Nom, prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Pays : _____

E-mail** : _____

Téléphone** : _____

Date de naissance** : _____

Je règle par :

☐ Chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte _____

Date d'expiration _____ Code de sécurité*** _____

Signature obligatoire _____