

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.

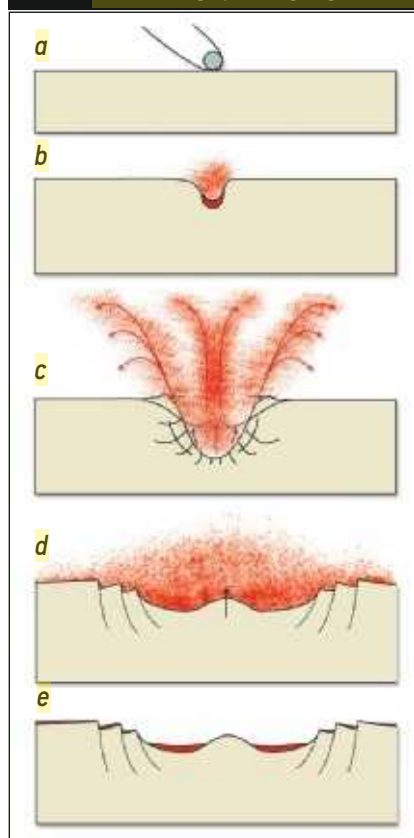
Partout où ces ondes passent, la pression, la température et la densité augmentent extrêmement vite. La pression, par exemple, atteint quasi instantanément des millions d'atmosphères (soit des centaines de gigapascals), ce qui dépasse de très loin ce que peuvent supporter les matériaux de la cible. Leur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



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 suévite 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.

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-

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