

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 suévites, 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

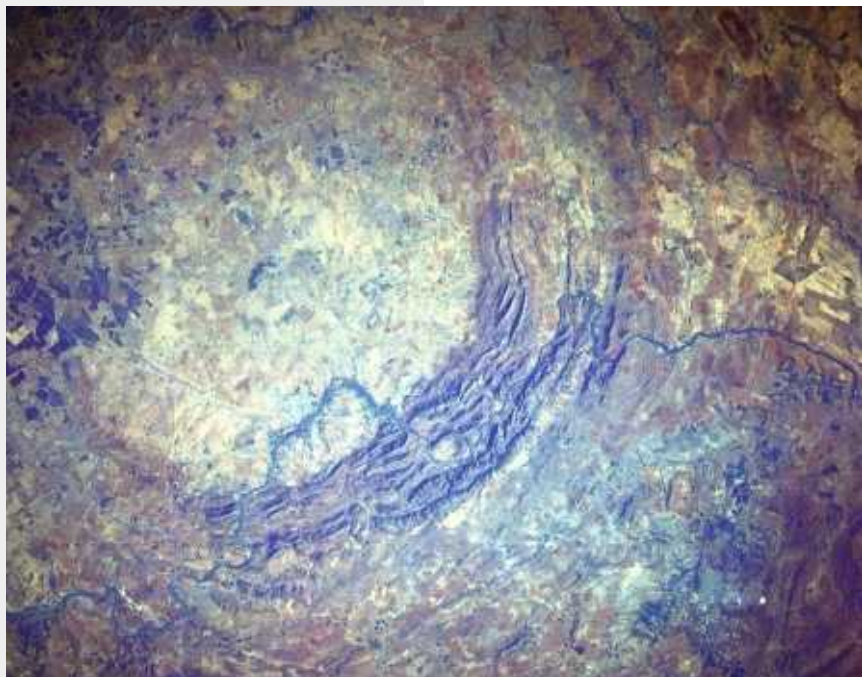
LE VREDEFORT : ASTROBLÈME GÉANT

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.



M/S4