



Ces pierres qui tombent du ciel

Ph. Lambert, J. Goni, Z. Johan *

Il y a 180 ans seulement, CHALDINI reconnaissait la vraie nature des météorites. Mais il fallut attendre la chute de plusieurs milliers de météorites, le 26 avril 1803, à l'Aigle dans l'Orne, et le rapport à l'académie des Sciences de J.-B. BIOT, pour convaincre le monde savant qu'il pouvait « tomber des pierres du ciel ».

Une météorite est un fragment de matière solide en provenance des espaces intersidéraux. Tous les corps célestes sont soumis au bombardement de météorites. Il n'y a pas de limitation dans la taille des météorites (les grosses météorites sont appelées astéroïdes).

De même pour la découverte des météorites, il s'opérait jusqu'à il y a une vingtaine d'années, un blocage psychologique dans l'esprit des savants en ce qui concerne l'existence sur la Terre de cratères formés par des objets de grande taille d'origine extra-terrestre. Cependant, depuis la fin du siècle dernier (GILBERT, 1893-1896), la plupart des cratères lunaires sont interprétés comme dus à des impacts de météorites géantes. Mais il faut attendre 1953 pour que le Meteor-crater en Arizona, au milieu d'un désert de sable et de formations calcaires, avec ses 300 mètres de profondeur, ses 1,2 kilomètre de diamètre, et les restes de météorite, soit interprété comme une structure d'impact de météorite géante et non un phénomène volcanique « bizarre ».

Pourquoi cette prise de conscience tardive de ce phénomène sur Terre ? Il y a au moins trois grandes raisons pour expliquer cet état de fait. L'atmosphère propre à notre planète est considérée comme un écran. Certes, elle joue effectivement ce rôle en ce qui concerne les petites météorites : il ne peut exister, comme sur la Lune, d'impacts de météorites microscopiques.

La plupart des météorites que nous connaissons sur Terre ont une taille moyenne (gravier) et arrivent avec une vitesse de l'ordre de celle de la chute libre. Or, elles étaient entrées dans l'atmosphère avec une vitesse de l'ordre du km/s ou plus. Elles ont subi un freinage considérable.

Par contre les météorites géantes (masse > 10 000 t) ne sont pas sensibles à ce freinage : leur vitesse d'impact est du même ordre que leur vitesse d'entrée dans l'atmosphère, soit le km/s.

L'éventualité de la chute d'une météorite géante est très restreinte à l'échelle de la vie de l'homme. Les calculs statistiques de SHOEMAKER (1962), basés sur la répartition des petits corps célestes et la densité de chutes sur le continent américain, suggèrent pour les deux derniers milliards d'années une fréquence d'au moins un impact ⁽¹⁾ à la surface de notre planète tous les 10 000 ans, soit un peu plus d'un impact tous les 100 000 ans sur les terres émergées.

Si la Lune, astre géologiquement mort, a pu conserver à sa surface les traces des collisions de météorites depuis le début de son histoire, il n'en va pas de même sur Terre où la croûte est en perpétuel renouveau. Ces mêmes cicatrices disparaissent rapidement par le jeu de l'érosion, de la sédimentation, des plissements, etc.

* Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

Phénomène d'impact

Après la pénétration dans l'atmosphère d'une météorite animée d'une vitesse cosmique (on considère en général une vitesse d'au moins 15 à 20 km/s ⁽²⁾ pour les impacts montrant une quantité significative de matériel fondu et vaporisé), schématiquement, des temps successifs peuvent s'envisager :

- transfert d'énergie,
- compression.

Il correspond au passage de l'onde de choc dans la matière. Dans la météorite, cette onde se propage vers le haut et est responsable de la perte de la quasi-totalité de la matière météoritique. Dans le sol, elle se propage vers le bas suivant la normale à une surface d'onde demi-sphérique. L'énergie transportée par l'onde de choc est énorme : la pression au front de l'onde peut atteindre plusieurs fois celle qui règne au centre de notre planète. Pendant cette phase, la matière est mise en mouvement et éjectée avec des vitesses énormes (éjection hydrodynamique).

Sous la contrainte dynamique de l'onde de choc s'observent des modifications permanentes physiques minéralogiques, chimiques, morphologiques qui apparaissent dans des domaines de pression-température bien tranchés des domaines du métamorphisme endogénique. Ces effets se produisent à l'échelle du cristal et à l'échelle de la roche.

Les transformations par les ondes de choc (produites par l'impact, seul processus naturel capable de les générer) illustrent un nouveau domaine du comportement de la matière, celui de la compression dynamique, où les solides vont jusqu'à se déformer comme des gaz et où les champs de stabilité sont tout à fait tranchés de ceux du domaine statique.

Impact énergétique

Il n'est pas possible d'accéder directement aux paramètres physiques d'une météorite qui s'est écrasée sur Terre à un moment des temps géologiques (vitesse, masse...). Le calcul théorique de l'énergie libérée à l'impact est basé sur les caractéristiques du cratère. La formule la plus généralement utilisée est l'équation de BALDWIN (1963).

Les valeurs obtenues sont très approximatives car l'équation ne tient pas compte de la profondeur initiale du cratère, or le rapport diamètre sur profondeur est fonction de la densité de la « météorite ». Cependant, elle permet de fixer un ordre de grandeur.

Comparaison avec les éruptions volcaniques

Pour comparer avec le phénomène bref qu'est l'impact d'une météorite, voici les valeurs correspondant à l'énergie dépensée en une seule éruption (de l'ordre de la journée, en temps) :

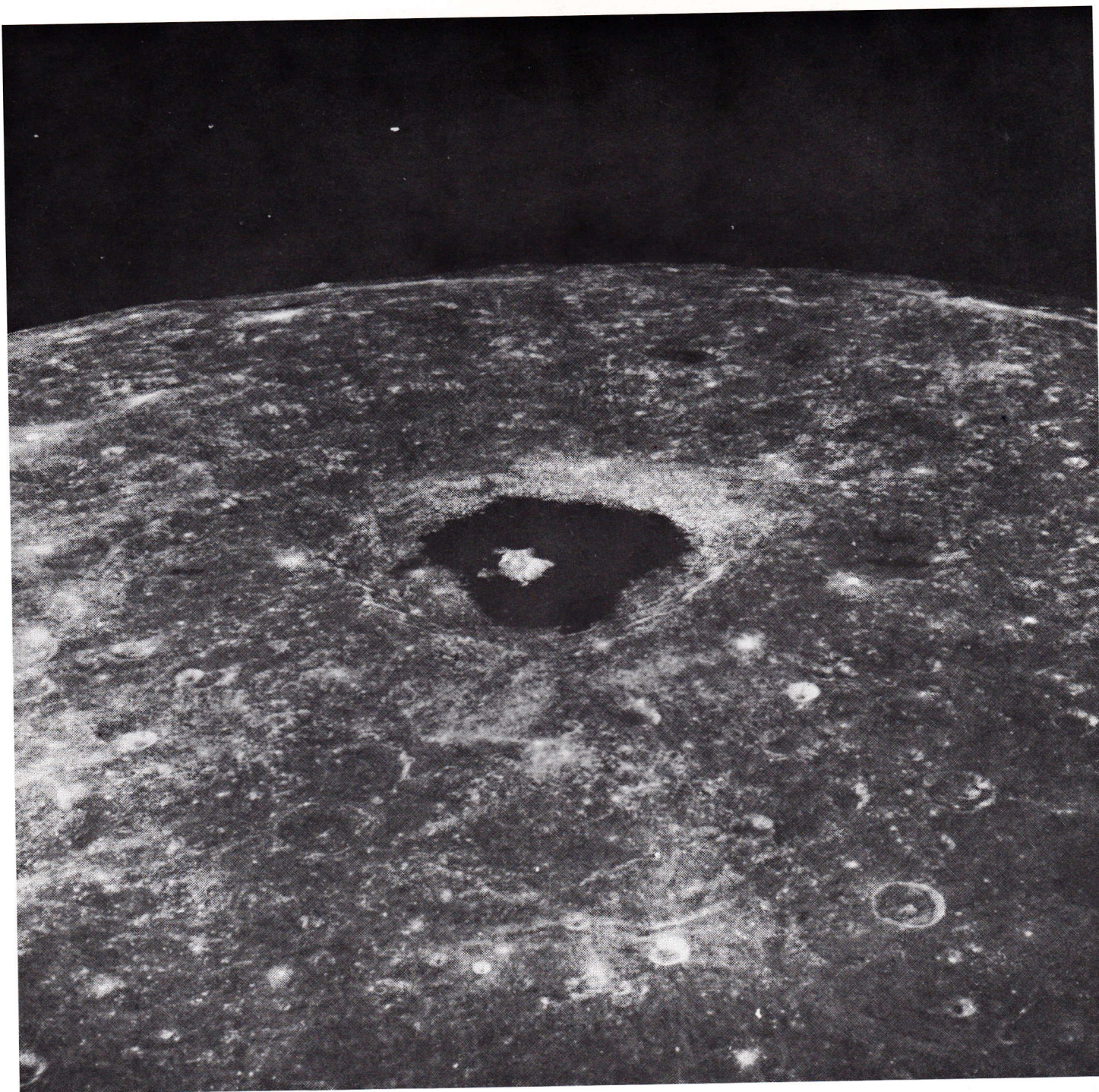
Montagne Pelée (1902) = $1,2 \times 10^{24}$ ergs (R. BROUSSE, communication personnelle, 1974).

Krakatoa (1883) = $8,6 \times 10^{23}$ ergs (A. RITTMAN, 1963).

Bezimianny (1955) = 4×10^{23} ergs (A. RITTMAN, 1963).

(1) impact d'une taille comparable ou supérieure à celle du Meteor-crater.

(2) soit 100 à 135 fois la vitesse de propagation du son dans l'air (Mach 100 à 135).



En moyenne, l'énergie dépensée à la surface de la Terre par la somme de tous les phénomènes énergétiques (volcans, tremblements de terre, etc.) est de 1×10^{28} ergs par an (TAYLOR, 1967). Ceci met en valeur l'importance de l'énergie développée au cours d'un phénomène d'impact, d'autant plus que le transfert est quasi-instantané. Pour Sudbury (Canada) par exemple, en une minute un point de l'écorce terrestre a reçu une énergie comparable à celle produite par tous les phénomènes énergétiques de la surface du globe pendant 100 ans.

Pour comparaison avec la puissance des explosifs, signalons que l'énergie de Sudbury (2×10^{29} ergs) équivaut environ à celle de 50 millions de mégatonnes (TNT), soit plus de 2 milliards de fois la puissance de la bombe d'Hiroshima.

Pourquoi étudier les astroblèmes ?

Leur intérêt scientifique est très grand,

mais l'industrie, et en particulier le secteur minier, s'intéressent aussi, depuis peu, à ces recherches.

L'étude des impacts de météorites géantes est un domaine nouveau, inconnu il y a seulement quelques années, en passe de constituer ou constituant déjà dans certains pays (U.S.A.) une science à part entière. Les principales caractéristiques de ce nouveau domaine sont le lien qu'il suppose entre de nombreuses disciplines (géologie, pétrographie, physique des matériaux, physique balistique, géophysique, thermodynamique, astronomie...) et d'autre part le champ d'application du phénomène et l'importance de ses conséquences.

Ce phénomène est considéré comme universel. Les météorites elles-mêmes subissent les impacts de météorites plus petites. Pour ces petits corps comme pour les astres les plus gros, ce bombardement a pour résultat une érosion de surface. A part des exceptions comme la

Cratère Tsiolkovski photographié par Apollo 8 (250 km de diamètre). Considéré comme le prototype lunaire des structures d'impact de météorite géante induisant le volcanisme, le Sudbury (Canada) est l'équivalent terrestre de cette structure.

Terre, pour la majorité des corps célestes ce phénomène constitue le seul processus géologique actif.

Quant aux conséquences principales, il se produit un flux de matière à l'échelle du système. Sans vouloir expliquer l'origine de matière intersidérale, ni celle des représentants de notre système (soleil et ses satellites), on est sûr que les collisions de météorites d'astéroïdes, au début de l'histoire de notre système, ont eu pour résultat de grossir la masse de chaque représentant.

Ceci n'est qu'une simple conséquence de la gravitation : le système tend à se vider de ses petits éléments qui sont

attirés par les gros et vont les grossir. De plus, la taille des collisions et leur rythme tendent à décroître.

Exemple : les études lunaires récentes montrent que la Lune et la Terre, qui est soumise au même régime, ont subi entre 4,6 milliards d'années (date de leur naissance) et 4 milliards d'années, les bombardements de météorites les plus violents et les plus énormes de leur histoire. Les cratères de certains impacts sur la Lune sont supposés y avoir atteint 2 000 km de diamètre.

La décroissance du rythme et de la taille des collisions invoqués ici n'est pas constante. Dans la période récente, ce flux qui, en gros, décroît, n'est pas constant non plus. Conséquence de la décroissance de ce flux, l'éventualité d'une collision à venir entre une météorite énorme (susceptible de produire un impact de 100 km de diamètre) et de la Lune peut être considérée comme nulle. Ceci est vrai pour la Terre qui est astreinte au même régime.

Citons aussi des conséquences géologiques du bombardement météoritique sur une surface planétaire : le bombardement d'une planète par les météorites produit l'érosion de sa surface.

Il s'agit d'une couverture de fragments non consolidés de roches lunaires, de verre, de brèches d'impact, de matière météoritique en faible quantité et éventuellement de cendres. Ces débris et leur mélange résultent des impacts de météorites.

Sur les « mers » lunaires, l'épaisseur de cette couverture est faible (de l'ordre de quelques mètres à quelques dizaines de mètres). Sur les « terres » lunaires, le « bedrock » (substratum dur) peut être enfoui sous une couche de débris atteignant un kilomètre.

Conséquences terrestres du bombardement météoritique

Pour la Terre, les cicatrices des grands impacts de météorites ont été effacées ; certains imaginent les conséquences hypothétiques qu'ils ont pu avoir : changement de l'axe de rotation de la Terre et changement de la vitesse angulaire.

Ces modifications entraînant directement des changements brusques de climat ainsi que des variations dans la durée du jour, on peut imaginer les conséquences les plus terribles de tels bouleversements sur les règnes animal et végétal. Cependant, il faut se garder de se laisser emporter par ce néocatastrophisme. Ces conséquences sont purement hypothétiques, et il n'y a pas de support de terrain actuellement pour affirmer que de telles modifications sur l'orbite de la Terre se sont produites. D'autre part, seul un impact colossal peut modifier les caractéristiques orbitales terrestres. Connaissant la répartition actuelle des corps célestes, et en particulier celle des astéroïdes, et compte tenu de la décroissance de la taille des collisions, on peut supposer que seules les périodes les plus lointaines de l'histoire de la Terre ont pu enregistrer de tels phénomènes. Dans ce cas, l'origine de la vie terrestre étant postérieure à ces périodes, il n'y aurait pas eu de conséquences biologiques directes.

Parmi les conséquences sûres qu'ont pu

avoir les impacts de météorites géantes, citons les raz de marées : 80 % des impacts se produisent en mer ; les séismes : une onde de choc amortie devient une onde élastique ; le volcanisme : une onde élastique ; le volcanisme.

Intérêt économique

Sudbury (Ontario - Canada) est un des plus grands gisements du monde : il produit les 3/4 du nickel mondial, la moitié du platine mondial (camouflé, dans la pyrrhotite, la pentlandite et la pyrite nickelifère), du cuivre et du fer. Ce gisement est connu depuis 1883. Il a produit depuis le début de son exploitation pour une valeur de plus de 9 milliards de dollars.

Son origine : l'hypothèse la plus généralement admise est celle d'un impact géant, susceptible de provoquer la montée magmatique dans une province métallogénique riche. Dans ce cas, le rapport entre l'impact et la minéralisation n'est qu'un simple rapport de coïncidence.

Il y a une autre hypothèse, moins suivie cependant, celle de R.S. Dietz, qui tend à prouver le lien de parenté entre les minéralisations et la météorite. Il apporte des arguments (études isotopiques, zonéographie des minéralisations, etc.) qui se heurtent, d'une part, au fait qu'il n'existe pas de météorites connues qui aient la composition requise pour expliquer les minéralisations de Sudbury, et, d'autre part, au fait que le volume de ces dernières est de l'ordre de celui supposé pour la météorite responsable. Or, la majeure partie de la matière de la météorite, est perdue au moment de l'impact.

La montée magmatique

Plusieurs mécanismes applicables aussi bien à la Terre qu'à la Lune ont été proposés pour expliquer l'intrusion de magma profond par suite d'un impact de météorite géante.

- La météorite perce la croûte : le magma sous pression s'injecte directement vers la surface par le fond du cratère.
- La météorite ne traverse pas la croûte, mais sous le cratère et à cause de l'excavation, se produit une fusion partielle de la matière des suites du relâchement de la pression (diminution de la pression lithostatique). Ce phénomène suppose un gradient géothermique élevé au moment de l'impact. Le même phénomène peut se produire dans une région où le gradient géothermique est normal par suite de l'augmentation locale de ce dernier sous le cratère, résultat de la présence de matériaux fondus dans ce cratère.

- La météorite ne traverse pas la croûte, mais la fracturation de cette dernière, induite par le choc, permet la montée magmatique.

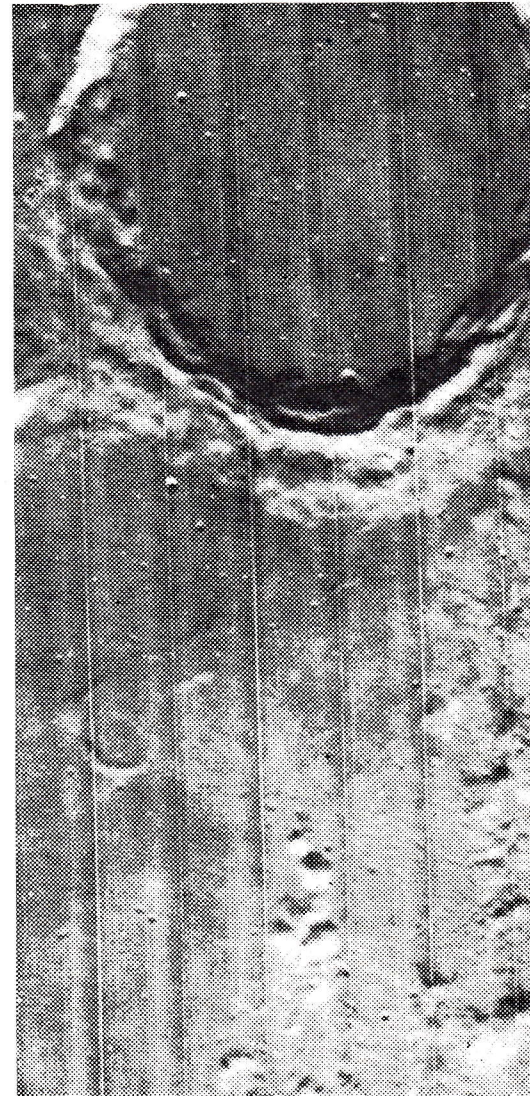
Sudbury est une structure d'impact de météorite géante. La minéralisation de Sudbury est une conséquence de l'impact. Elle est liée à une activité magmatique interne provoquée par un facteur externe. Cette particularité distingue Sudbury des autres impacts de météorite géante connus sur Terre (Meteorcrater, Ries), mais le cas est connu classiquement pour la Lune.

L'idée d'une activité magmatique induite par impact de météorite géante a

été proposée depuis une quinzaine d'années pour expliquer les mers lunaires (BALDWIN, 1949 ; MC CAULEY, 1967 ; MACKIN, 1969). Elle a été aussi suggérée comme un mécanisme important dans les premiers temps de l'histoire de la Terre (DONN et al, 1965 ; RONCA, 1966 ; SALISBURY et RONCA, 1966).

Après les missions lunaires habitées, il semble maintenant certain que la majeure partie des structures volcaniques lunaires soient le résultat d'une activité magmatique induite par impact géant.

Le Sudbury est l'équivalent terrestre de ce qui est maintenant reconnu comme très fréquent sur la Lune. C'est un argument très important pour faire valoir



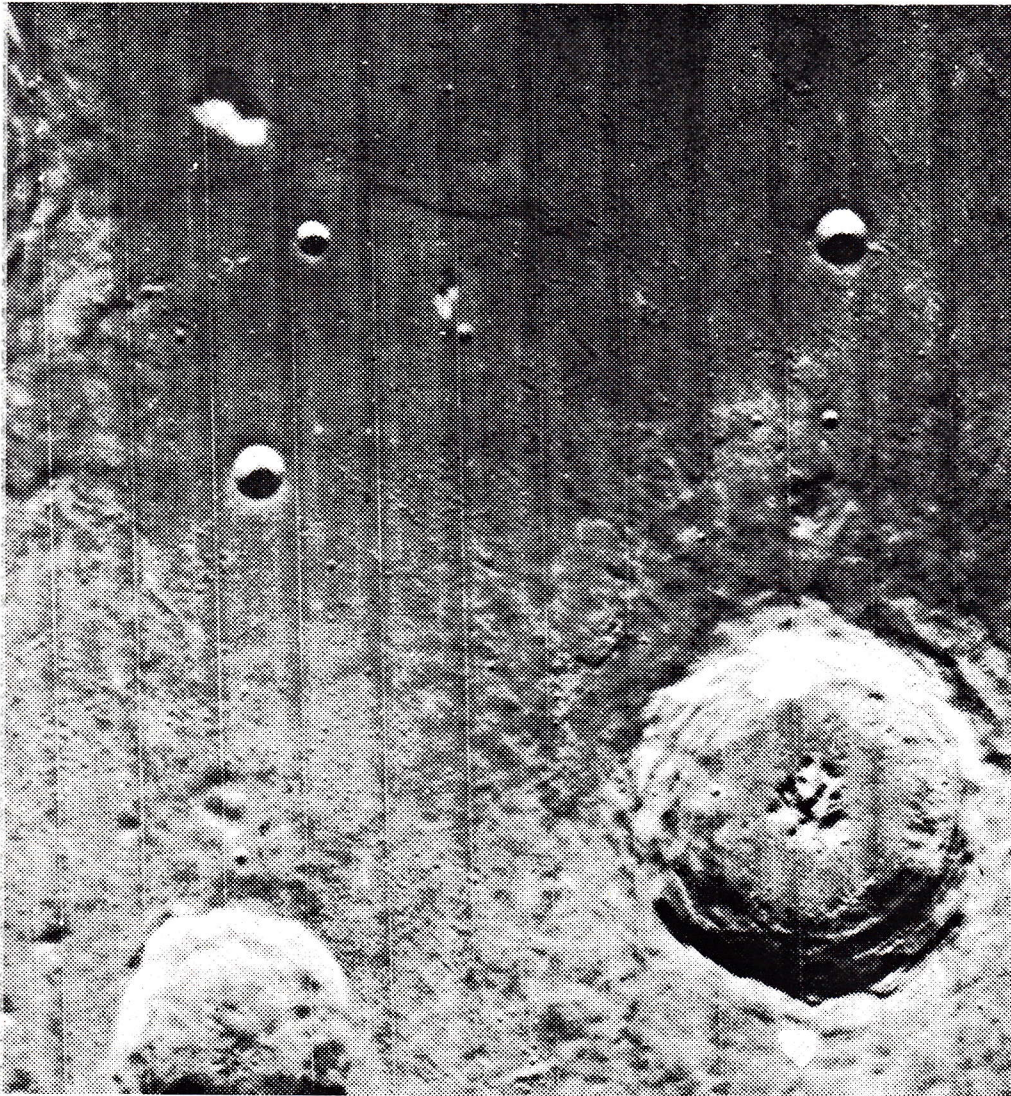
le fait qu'il existe d'autres structures de ce type sur Terre. Il faut s'attendre à ce que, dans les années à venir, d'autres structures volcaniques classiques soient remises en cause, en particulier celles qui se rapprochent le plus du Sudbury (Busweld, complexe de Wichita, complexe gabbroïque de Duluth... et même le Skeargeard).

Cependant, les reconnaissances de structures volcaniques terrestres induites par impact vont se heurter à deux grosses difficultés : d'une part la convergence de structure avec un phénomène volcanique normal, convergence d'autant plus accentuée que la structure est ancienne ou mal préservée. D'autre part, des années d'études pour la plupart, et des

	Diamètre (km)	Age (m.a.)	Energie (ergs)
Meteor crater (U.S.A.-Arizona)	1,200	0,04	5×10^{23}
Halleford (Canada-Ontario)	2	550 ± 50	$6,49 \times 10^{23}$
Brent (Canada-Ontario)	4	450 ± 40	$2,06 \times 10^{14}$
Lac Couture (Canada-Québec)	10	paléozoïque mésosoïque	$2,60 \times 10^{27}$
Rochechouart (France-Limousin)	20	165 ± 5	$1,2 \times 10^{28}$
Ries (Allemagne-Bavière)	24	$14,8 \pm 7$	
Vredefort (Afrique du Sud)	100	1970 ± 100	2×10^{30}
Sudbury (Canada-Ontario)	100	1700 ± 200	2×10^{30}

années d'interprétation volcanique. A fortiori dans ce domaine, la connaissance des effets de choc est à envisager car, dans la plupart des cas, le métamorphisme de choc sera le seul indice.

les phénomènes sont les mêmes : en particulier les conditions thermodynamiques régissant l'apparition de chaque phase sont identiques. La connaissance des effets des ondes de choc dans la matière



Le cratère lunaire Archimède (80 km de diamètre) en haut à gauche est considéré comme un impact de météorite géante. Cet impact a eu pour conséquence le volcanisme. A droite, Aristillus (56 km de diamètre) et en bas Autolycus (33,5 km de diamètre) sont des cratères d'impact sans volcanisme associé, comparable au Meteor-crater sur Terre.

Des astroblèmes aux explosions nucléaires

Les explosions nucléaires produisent toutes les transformations du métamorphisme de choc, connues et décrites à propos des impacts de météorites géantes. Ceci est lié au fait que l'explosion nucléaire dans un sol produit une onde de choc comparable à celles créées par les impacts géants.

Les différences entre les deux phénomènes tiennent uniquement à la masse des produits affectés par chaque transformation, et à la géométrie de l'explosion (explosion de surface « cratérisante » ; ou explosion souterraine contenue). Insistons sur le fait que, qualitativement,

d'après les études de cratères d'impacts de météorites géantes, ou de sites d'explosions nucléaires, conduit à envisager des applications pacifiques de l'énergie atomique.

Dans un proche avenir, il semble que l'explosif nucléaire deviendra un outil majeur pour certaines industries de base :

- génie civil, pour la réalisation de très grands ouvrages,
- génie minier, pour permettre l'exploitation de très grands gisements à faible teneur, pour les industries des hydrocarbures liquides ou gazeux, qu'il s'agisse de réservoirs à faible transmissivité, ou de création de grandes capacités de stockage.