
Jean-Noël Salomon et Teddy Auly

Impacteurs et astroblèmes : essai de classification et approche géographique

Avertissement

Le contenu de ce site relève de la législation française sur la propriété intellectuelle et est la propriété exclusive de l'éditeur.

Les œuvres figurant sur ce site peuvent être consultées et reproduites sur un support papier ou numérique sous réserve qu'elles soient strictement réservées à un usage soit personnel, soit scientifique ou pédagogique excluant toute exploitation commerciale. La reproduction devra obligatoirement mentionner l'éditeur, le nom de la revue, l'auteur et la référence du document.

Toute autre reproduction est interdite sauf accord préalable de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France.

revues.org

Revues.org est un portail de revues en sciences humaines et sociales développé par le Cléo, Centre pour l'édition électronique ouverte (CNRS, EHESS, UP, UAPV).

Référence électronique

Jean-Noël Salomon et Teddy Auly, « Impacteurs et astroblèmes : essai de classification et approche géographique », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], 1/2010 | 2010, mis en ligne le 01 avril 2012, consulté le 11 octobre 2012. URL : <http://geomorphologie.revues.org/7866> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.7866

Éditeur : Groupe français de géomorphologie

<http://geomorphologie.revues.org>

<http://www.revues.org>

Document accessible en ligne sur : <http://geomorphologie.revues.org/7866>

Ce document est le fac-similé de l'édition papier.

© Groupe français de géomorphologie

Impacteurs et astroblèmes : essai de classification et approche géographique

Impactors and astroblems: attempt of classification and geographical approach

Jean-Noël Salomon*, Teddy Auly*

Résumé

Lorsqu'une météorite percute la surface d'une planète, elle laisse des traces profondes plus ou moins durables : ce sont les cratères météoriques et astroblèmes. Depuis quelques années, grâce aux progrès de la télédétection, des techniques instrumentales et des analyses, l'intérêt porté à ces phénomènes et aux morphologies qui en découlent est croissant. Une masse d'informations existe donc, mais elle est particulièrement dispersée et porte peu sur les types de morphologies et leurs évolutions ultérieures. Nous avons pu ainsi dresser une liste de 230 astroblèmes, la plus complète semble-t-il à ce jour, et proposer des classements typologiques en fonction de l'ancienneté, de la taille, de l'angle d'impact et de la forme de l'astroblème ainsi que de la chute (corps unique, dual, multiple). Le but de cet article est de proposer une mise au point sur les différents aspects qu'ils induisent et d'évoquer succinctement l'aspect catastrophique de ces collisions spatiales.

Mots-clés : météorites, astroblèmes, métamorphisme de choc, géomorphologie, catastrophisme.

Abstract

When a meteorite crashes to the ground of a planet, it leaves more or less long lasting deep traces: these are meteoric craters and astroblems. Thanks to the improvement of remote sensing, instrumental techniques and analysis, the interest given to these phenomena and their resulting morphologies has increased in recent years. A mass of information therefore exists, but it is particularly scattered and provides little insight to the types of morphologies and their subsequent evolutions. We have been able to prepare a list of 230 astroblems, (which seems to be the most complete list available today,) and suggest a typological classification according to age, size, angle of impact and shape of the astroblem, and fall (single body, double, multiple). The aim of this article is to clarify the different aspects that astroblems induce, and to recall briefly the catastrophic aspects of these spatial collisions.

Key words: meteorites, astroblems, shock metamorphism, geomorphology, catastrophism.

Abridged English version

The earth's surface is constantly bombed by meteorites (fig. 1) which some are sometimes of great sizes. In which case violent impacts occur, which give scars in the shape of crater: they are astroblems. The goal of this paper is to show synthetically how these impacts form because they depend on a long row of factors: size, speed, angle of attack, single, double or multiple impact, etc. Then, an attempt of classification is put forward from different benchmarks.

A census report of the different astroblems is suggested, but we have to be sure that it is a case off astroblems because it exists in the nature many forms of convergence, especially the circular structure. Nowadays, this discrimination is reliable because it relies on ground works and the collecting of samples allowing well-tried analysis leading to the

identification of the material nature (origin and transformation in situ for the very high temperatures released at the moment of the impact; gravimetric anomalies, specific materials; iridium, etc.). To support that, the fall conditions are explained: in broad, in these two cases, we can distinguish three stages (fig. 2): the contact, followed by a compression stage during which the air mass is sandwiched between the fireball and the earth and compressed and heated up; the excavating stage which is produced as the fireball is vaporized (in accordance with the blast wave) leading to a rapid decompression of the material; lastly the site transformation stage with a certain regressing to stability but with repercussions on the crater environments (rebounding of the compressed area below the centre of the new crater, formation of a ring border and central rising, lastly the material sliding of the border and central dome).

* Laboratoire de Géographie Physique Appliquée (LGPA), Institut de géographie, Université Michel de Montaigne-Bordeaux 3, Campus universitaire, 33 607 PESSAC. Courriel : jnsalomon@yahoo.com ; auly_teddy@yahoo.fr

Ejectas (impactites, suevites, etc.) can be propelled very far (fig. 3).

The systematic study of any astroblem (list over 230 impacts) lead to distinguish 'families' and to propose types of classifications based respectively on age, size, shape and impact angle (fig. 8) leading to simple, multiple, circular or ellipsoid, with central pike or not, etc., and the fall type (with outburst or not of the impactor, fig. 9). A synthesis is proposed through the figure (fig. 5) or tables. The study continues taking into account the consequences of the impact on the planet, that leads to consider their role not only about the mass extinctions during the geologic ages (i.e., the K/T limit and the role of Chicxulub) but also about the terrestrial tectonic movements. Indeed, it is surprising to observe that each great mass extinction coincides with the fall of a very big impactor. So the astroblems can be considered as geological markers of the Earth's story not only by the consequences on the life that they infer but also by the traces that they leave. Then the authors were interested in the later becoming of these astroblems, evolving as all reliefs according to the classical modalities of erosion. Thus, we can note that they are particularly numerous in the ancient bases and desert areas. This observation is easily explained by the fact that those environments keep traces for a very long time (crystalline rocks are less sensible to erosion in cold countries and desert conditions are not much propitious to erosion). To the contrary, tropical environments or better oceans 'recycle' the astroblems quickly, hence the few actual identifications. Finally, we note that if astroblems seem to be more abundant in rich countries it is because researches are more numerous.

Lastly, the Man/Astroblems relationship is considered under different angles: use of materials, agriculture (fig. 11), tourism, enhancement of circular structures (hydrology; fig. 6), etc. The future is not forgotten with the fear of a coming impact putting in jeopardy the planet and with the imagined means to ward off this danger. In the end, this paper brings a perspective, not to say new, at least synthetic, on morphologies under considered and studied by geomorphologists in general and geographers in particular. Documentary references provided from research on the Internet, Google Earth sites and from the books mentioned in the bibliography.

Introduction

La surface de la Terre est constamment bombardée par des météorites (Combes, 2007) : environ 100 t/jour (fig. 1) ! Mais, statistiquement, il ne tombe d'astéroïde de quelques dizaines de mètres de diamètre que chaque siècle. Ces derniers et ceux de taille

Fig. 1 – Nombre de géocroiseurs détectés depuis 1980 (d'après Chamberlin, 2006). 1 : Ensemble des géocroiseurs détectés ; 2 : Géocroiseur > à 1 km.

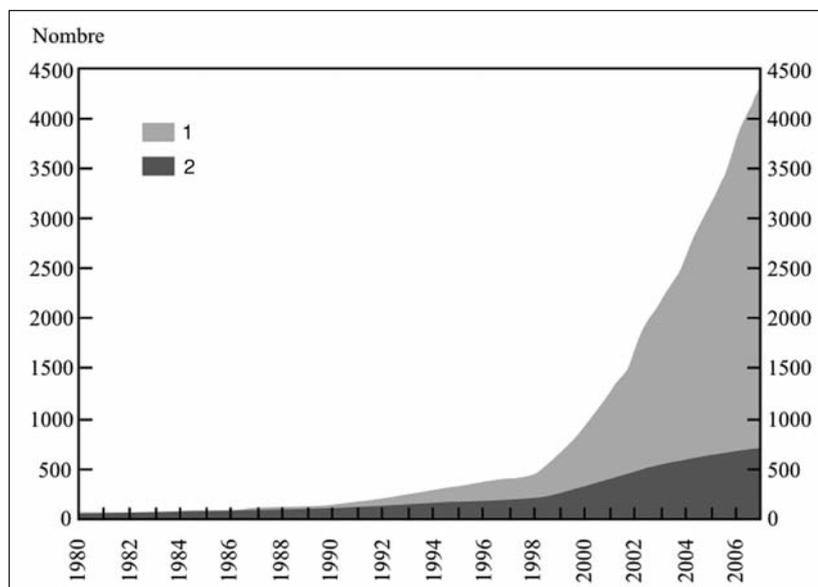
Fig. 1 – Number of NEOs (Near Earth Objects) detected since 1980 (after Chamberlin, 2006). 1: Total of NEOs detected; 2: NEO > 1 km

supérieure, laissent en leur point d'impact une cicatrice : ce sont des astroblèmes (du grec *astro*, étoile et *blema*, blessure). La définition d'un « astroblème » a été précisée pour la première fois par R.S. Dietz (1961) : c'est la cicatrice laissée par l'impact d'un astéroïde, l'impact étant facilement identifiable par la présence de cônes de percussion. La genèse des cratères météoritiques et des astroblèmes est rappelée brièvement car elle explique en partie leur évolution ultérieure. Longtemps ignorées, ces cicatrices de l'écorce terrestre font de nos jours l'objet de recherches de plus en plus fréquentes, mais très dispersées (Salomon et Auly, 2007 ; Auly et Pellegrin, 2007). Après avoir explicité les différents aspects des impacts météoritiques, cet article propose une caractérisation typologique des différents astroblèmes, aborde leur intérêt pour l'Homme et évoque enfin les parades éventuelles liées à leur dangerosité.

Impacts et astroblèmes

Les géocroiseurs sont des astéroïdes croisant aux abords de la Terre. On en a reconnu près de 4 500 (Chamberlin, 2006), mais du point de vue statistique, la probabilité d'un impact reste rassurante : une météorite d'environ 50 m ne tombe sur Terre que tous les 100 à 2 000 ans ; de 100 m, tous les 5 000 à 10 000 ans ; de 200 à 300 m, tous les 30 000 ans ; de 500 m, tous les 200 000 ans ; de 1,3 km, tous les 800 000 ans et de 10 km (type Chicxulub) tous les 150×10^6 ans (NASA, 2007). Notre planète, âgée de $4,6 \times 10^9$ ans, a donc « digéré » de très nombreux impacts dont il ne reste que peu de traces, du moins en surface. De nombreuses études, notamment sur le Ries (Osinski, 2004) et Steinheim (Müller *et al.*, 1969 ; Reiff, 1979 ; Ernston, 1984 a et b ; Skala et Rohovec, 1998) ont permis de comprendre ce qui se passe au moment d'un choc d'impact (fig. 2). Schématiquement, dans ces deux cas, on peut distinguer trois stades et six phases (déjà mentionnés par H.-J. Melosh, 1989) :

- Le premier est le contact, suivi d'un stade de compression (10^{-9} à 10^{-2} s) : la masse d'air prise en sandwich entre



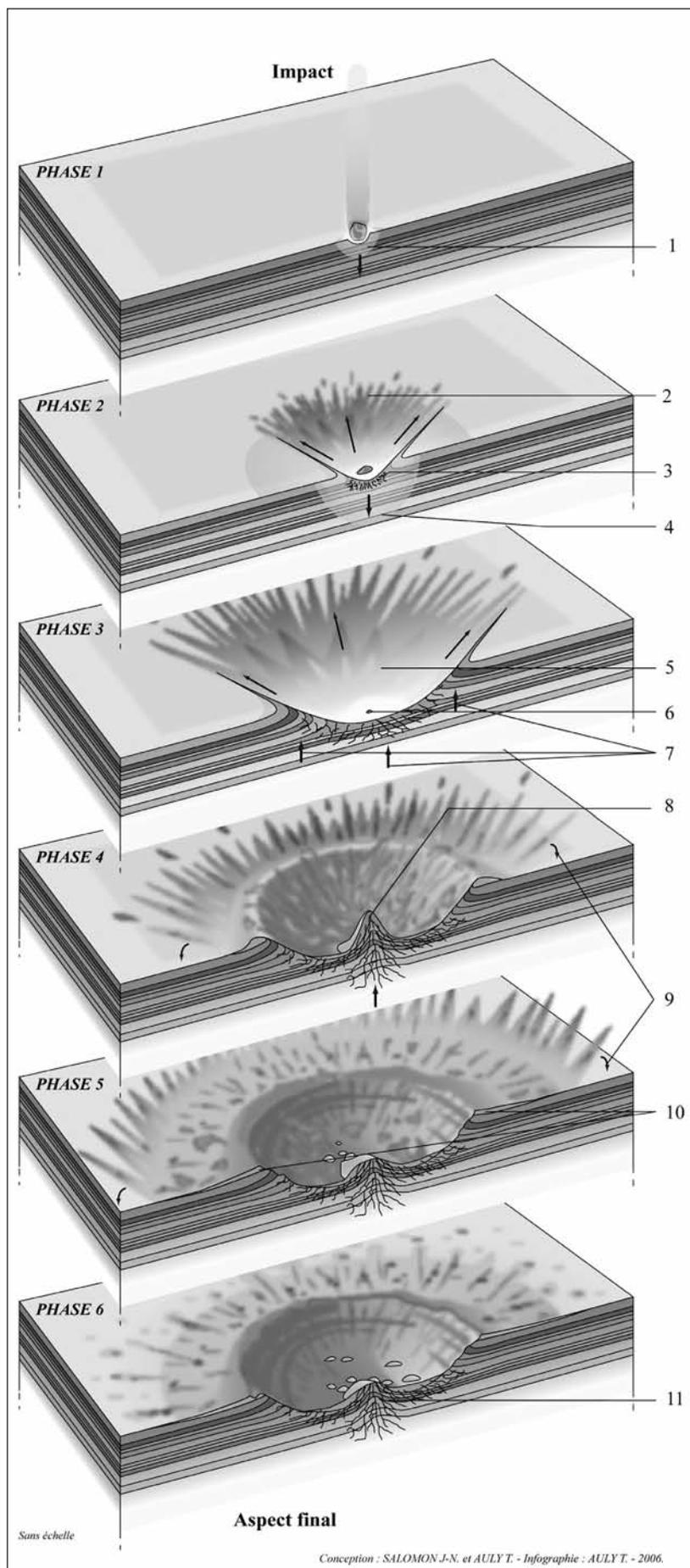


Fig. 2 – Scénario d'un impact météoritique, avec les six phases principales théoriques de la formation d'un cratère météoritique terrestre. 1 : début de l'onde de choc et élévation considérable des températures (plusieurs millions de degrés) ; 2 : éjection de matériel ; 3 : fracturation et liquéfaction de la lithologie ; 4 : intensité maximale de l'onde de choc ; 5 : diamètre maximal ; 6 : vaporisation du bolide ; 7 : réactions isostasiques ; 8 : le piton central est lié à la remontée de matériaux liquéfiés (hautes températures) à la manière d'une goutte d'eau, puis solidifiés par refroidissement ; 9 : chute de matériel ; 10 : impactites en couches inversées ; 11 : consolidation par refroidissement et substratum choqué.

Fig. 2 – Scenario of a meteoritic impact, with the six theoretical stages of the formation of an earth meteoric crater. 1: beginning of the shock wave and significant rise of the temperatures (many millions of degrees); 2: material ejection; 3: fracturing and liquefaction of the lithology; 4: maximal intensity of the shock wave; 5: maximal diameter; fireball vaporization; 7: isostatic responses; 8: the central pike is linked to the uplift of liquefied materials (high temperatures) like a raindrop, then solidified by cooling; 9: material fall; 10: impactites in inverted beds; 11: strengthening by cooling and shocked substratum.

le bolide et la terre est compressée et chauffée. À mesure que la météorite s'approche de la surface, la pression et la chaleur deviennent telles que les matériaux de surface, sous le bolide, fondent littéralement. Une décompression de cette masse d'air peut se faire latéralement en formant une sorte de cône, transportant de petites masses de roches surchauffées à très grande vitesse. Avec ce transport se produit un refroidissement produisant des débris impactiques dont plusieurs échantillons (tectites, moldavites) ont été retrouvés jusqu'à 400 km du cratère du Ries, en Bohême et Moravie. Quelques microsecondes plus tard, au point d'impact, l'énergie cinétique a été transformée en deux ondes de choc se propageant de façon concentrique. L'une est partie vers le haut dans le projectile et la seconde vers le bas jusqu'à 1 km dans l'encaissant terrestre, chauffant et compressant le matériel (jusqu'à 25 % de son volume originel).

- Le suivant est le stade de creusement (10^{-3} à 2 s) : à mesure que le bolide est vaporisé (ce qui suit la première onde de choc) se produit une décompression rapide du matériel. Sous l'effet d'une grande énergie cinétique, cela provoque la formation d'un cône d'éjecta surmontant les environs. Les sédiments sommitaux sont logiquement les premiers à émerger. Le matériel (sédimentaire dans le cas du Ries) est mélangé avec des fragments du socle granitique donnant des brèches d'impact. Le socle cristallin est à son tour affecté et une partie est

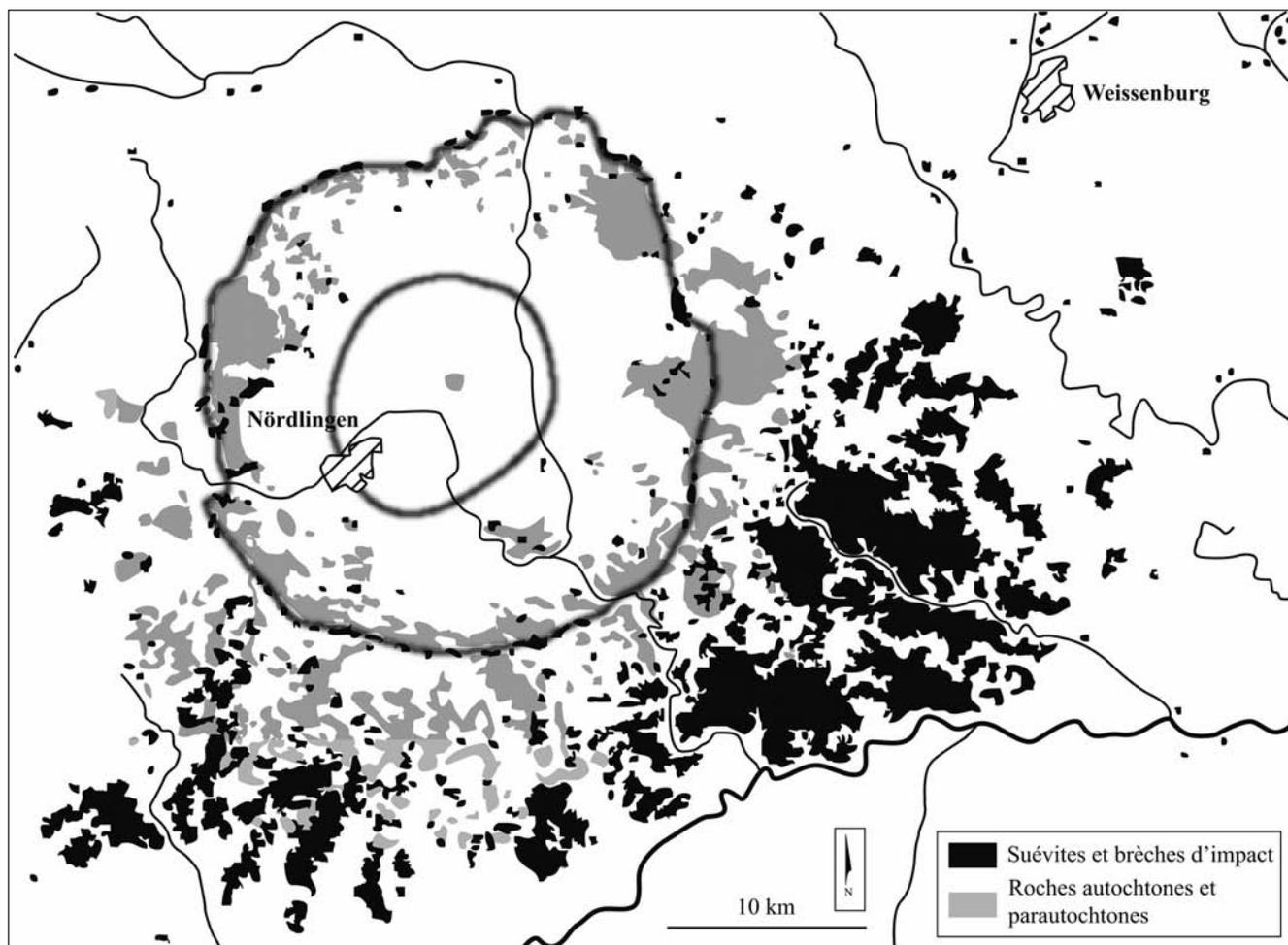


Fig. 3 – Une structure d'impact : le Ries en Allemagne (14,8 Ma ; 48°51'1"N, 10°29'15"E). Carte géologique générale du cratère du Ries surimposée sur un modèle numérique de terrain (simplifiée d'après Bayerisches Geologisches Landesamt. E. Geiß). 1 : suévites et brèches d'impact ; 2 : roches autochtones et parautochtones. On observera que les tectites sont essentiellement situées au sud et au sud-est, donnant des indications quant à l'angle de chute de la météorite.

Fig. 3 – An impact structure: the Ries in Germany (14.8 Ma; 48°51'1"N, 10°29'15"E). Geologic map of the Ries crater superimposed on a numerical land model (simplified after Bayerisches Geologisches Landesamt. E. Geiß). 1: suevites and impact breccias; 2: autochthonous and para-autochthonous rocks. Note that the tectites are essentially located southward and south-eastward, giving indications about the fall angle of the meteorite.

remontée donnant des brèches et des suévites (fig. 3). Ces mélanges et remontées (avec processus d'inversion) sont caractéristiques des cratères d'impact. Un vaste panache d'éjecta (2-3 km³ de matériel) se forme, puis un nuage de vapeur chaude (environ 5 km³) autour du soubassement cristallin excavé. C'est ce mélange qui engendre la formation de suévite incluant des fragments cristallins, d'éléments de la couverture et des poussières.

- Enfin vient le stade des transformations du site (après 2 s). Après la formation du cratère d'impact, il se produit un certain retour à l'équilibre mais avec des répercussions sur les environs du cratère. L'aire comprimée sous le centre du nouveau cratère rebondit de façon plus ou moins élastique comme si elle était soulagée d'une très forte pression et forme une bordure en anneau et une élévation centrale cristalline. Le matériel des bordures glisse en couverture formant des replats. Il en est de même à partir du dôme central. La vapeur incandescente provoque d'énormes tempêtes provoquant de véritables déluges de précipitations de telle sorte

que le cratère est rapidement rempli. La texture de la suévite porte les traces de tout cela (dendrites) indiquant un refroidissement rapide à partir d'une température de 2 000°C. Ces pluies diluviennes engendrent des glissements de terrain dans le cratère, des phénomènes d'érosion sur les remparts et le dôme (peu consolidé), puis, pour le Ries, la formation d'un lac qui laissera des traces sous forme de sédiments lacustres. Les érosions ultérieures effacent pratiquement toute trace topographique du cratère.

Bien entendu, ce scénario varie en fonction de l'importance de l'impacteur (diamètre et masse), de sa vitesse, de sa densité et surtout du lieu de chute (lithologie), mais aussi de sa composition et de son angle d'approche. En effet, lorsque ces astéroïdes tombent dans la mer, ils provoquent des chocs thermiques. Leur température peut atteindre 50 000°C et de gigantesques tsunamis avec des vagues supérieures à 20-30 m et parfois nettement plus : pour Chicxulub ou Eltanin certaines auraient atteint 100 m ! Un impact laisse de nombreuses traces liées à la collision et au métamorphisme de

choc : cratère circulaire ou ellipsoïdal, impactites ou roches fondues et transformées physiquement par les ondes de choc, cônes de percussion, anomalies gravimétriques, *etc.*, qui permettent par la suite d'identifier la réalité d'un astroblème comme à Rochechouart (Lambert, 1977).

Le problème de l'identification

La composition du bolide responsable de l'astroblème est un critère essentiel de l'identification. Cependant, cette composition et le type d'impacteur sont rarement connus et le plus souvent supposés. Or, la nature initiale d'un bolide caractérise en partie la façon dont il va percuter un corps planétaire mais aussi le cratère d'impact qui en résultera. Un certain nombre de formations ont été associées à une météorite dont la composition a été plus ou moins identifiée. On peut les regrouper dans trois grandes familles. La première est celle des lithoïdes ou météorites rocheuses (pierreuses), avec les chondrites et les achondrites, représente plus de 92 % des chutes observées. Les chondrites (composées de petites sphérules, les chondres) sont les météorites les plus primitives et les plus fréquentes. Elles proviennent de petits astéroïdes. Ce sont de vraies pierres que l'on trouve en abondance à Gibéon, Clearwater, Popigai, *etc.* Enfin, les achondrites (El-Gygytgyn, à Nicholson Lake) ressemblent à un basalte et proviennent d'un gros astéroïde. Ces catégories sont elles-mêmes divisées en plusieurs sous-groupes avec d'une part les sidérites ou météorites ferreuses (5,7 % de chutes) ; elles sont très abondantes à Meteor Crater, Boxhole, Bosumtwi, Wabar, *etc.*, et d'autre part les sidérolites ou météorites mixtes (1,5 % des chutes) se composant d'éléments variés de fer, de nickel d'oxyde de magnésium, *etc.*, et de roches. Cependant, l'identification d'un astroblème ne peut se suffire à constater la présence de ces éléments venus de l'espace. Il convient de compléter cela avec la télédétection. De nos jours, les images satellitaires complètent les photographies aériennes et les spécialistes savent très bien détecter les linéaments circulaires qui permettent de soupçonner la présence d'un astroblème. Par exemple, nous avons identifié sur l'île de Melville (fig. 4A) au Canada, une structure parfaitement circulaire qui incitait à penser qu'il pourrait s'agir d'un nouvel astroblème. Il en est de même avec deux

autres au large de Turku (Finlande) qui pourraient être un double impact (fig. 4B). Mais les sources de confusion sont très nombreuses (volcanisme, crypto-volcanisme, intrusion, diapirisme, hydrothermalisme, *etc.*) et l'on ne saurait s'arrêter à ce seul critère. De fait la structure de l'île de Melville s'est révélée être un diapir de gypse et celles de Turku attendent confirmation. Cependant, l'information peut aussi se croiser avec d'autres critères (Pilkington et Grieve, 1992). Tour à tour on peut examiner les structures annulaires, enceintes concentriques, pic central, *etc.*, qui sont les premiers critères morphostructuraux d'identification (fig. 5). Mais il ne faut pas les confondre avec les structures volcaniques ou subvolcaniques si bien que, là encore, d'autres critères sont nécessaires. Puis on considère les anomalies gravimétriques. Celles-ci correspondent au contraste engendré par le rem-

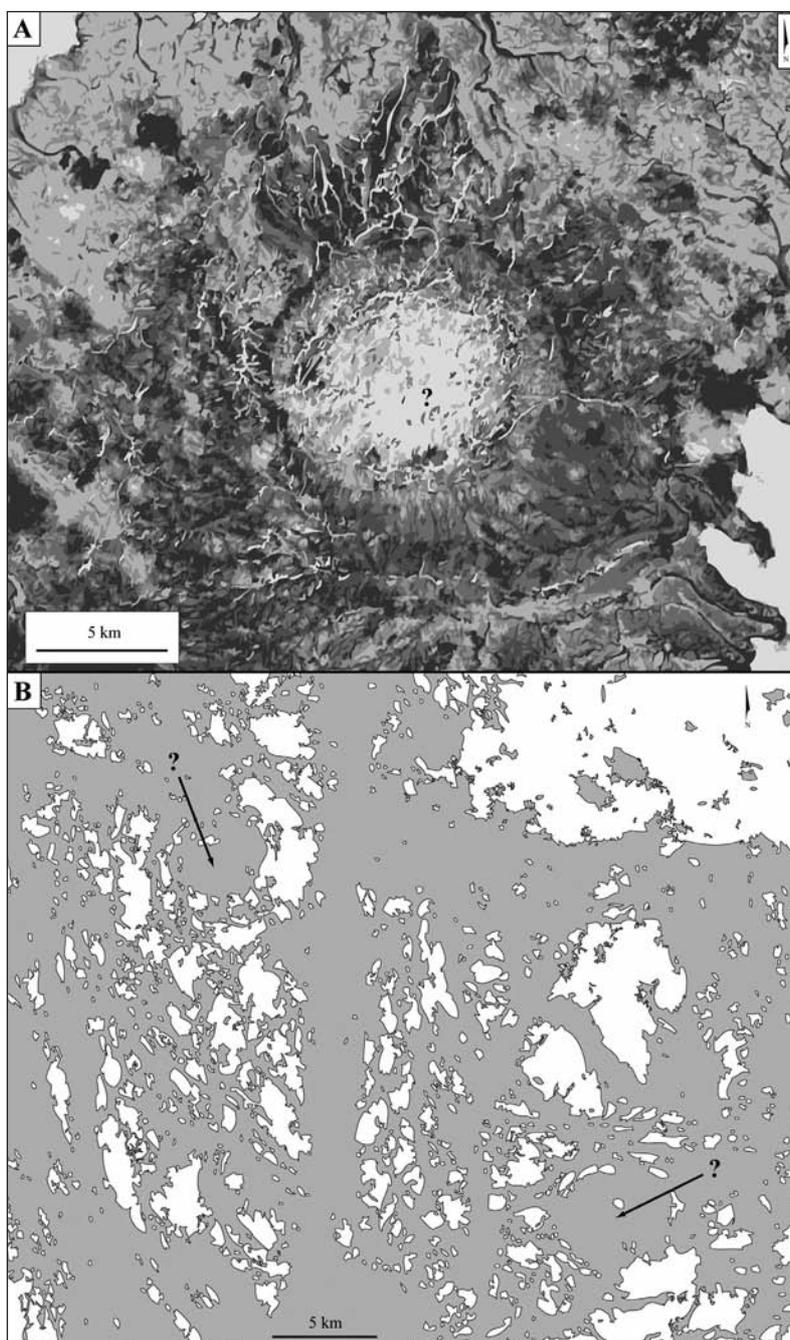


Fig. 4 – Structures présumées découvertes par télédétection. A : Ile Melville, Canada (76°16'N, 109°3'W). B : SW Finlande (60°22'N, 21°13'E).

Fig. 4 – Presumed structures discovered by remote sensing. A: Melville island, Canada (76°16'N, 109°3'W). B: SW Finlande (60°22'N, 21°13'E).

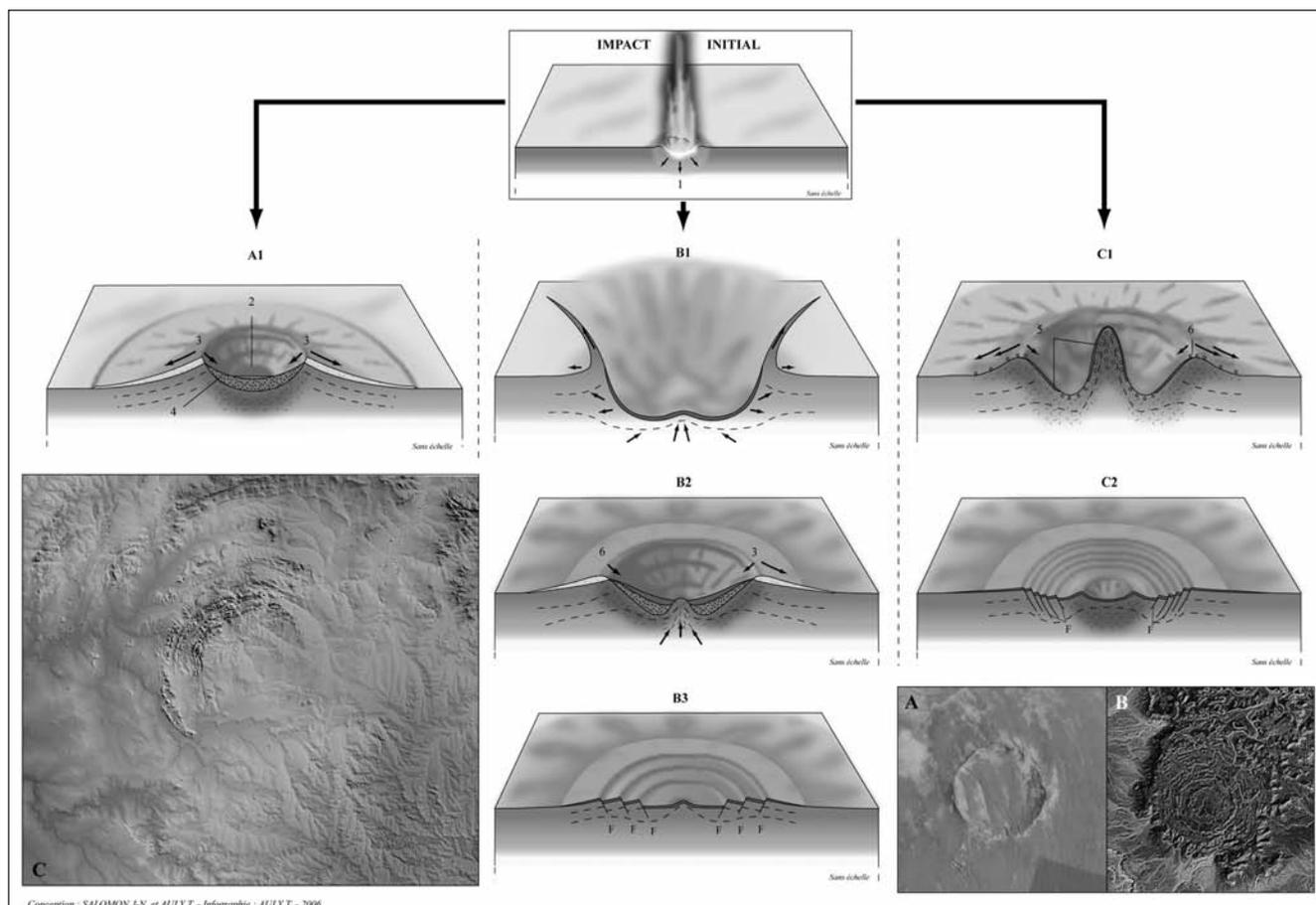


Fig. 5 – **Formation de trois des types principaux d'astroblèmes circulaires terrestres** (images tirées des MNT *in* glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml et de Google Earth). A : Astroblème de Roter Kamm, 2,5 km de diamètre (Namibie). B : Astroblème de Tin Bider, 6 km de diamètre (Algérie). C : Astroblème de Vredefort, 300 km de diamètre (Afrique du Sud). A1 : Cratère simple d'impact modéré. B1 : Excavation du substratum et début du soulèvement. B2 : Montée du dôme central et effondrement du rempart interne le long de failles listriques. B3 : Cratère complexe d'impact moyen avec piton central. C1 : Elévation centrale, à la fois haute et non consolidée. C2 : Cratère complexe de fort impact à structure annulaire, suite à l'effondrement du piton central. 1 : propagation de l'onde de choc ; 2 : dépôts lacustres éventuels ; 3 : érosion ; 4 : colmatage ; 5 : glissements ; 6 : éboulements.

Fig. 5 – **Formation of three main types of earth circular astroblems** (pictures from glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml and Google Earth). A: Roter Kamm astroblem, 2,5 km diameter (Namibia). B: Tin Bider astroblem, 6 km diameter (Algeria). C: Vredefort astroblem, 300 km diameter (South-Africa). A1: Reduce impact simple crater. B1: Substratum excavation and beginning uplift. B2: Central pike ascent and collapse of the internal rampart along listric faults. B3: Medium impact complex crater with central pike. C1: Central uplift, both high and unconsolidated. C2: Strong impact crater with annular structure, following the central pike collapse. 1: shock wave spread; 2: possible lacustrine deposits; 3: erosion; 4: clogging; 5: slipping; 6: landslides.

plissage du cratère par les matériaux de retombée et les brèches d'une part, et par celui de l'encaissant environnant resté intact (Chicxulub ; fig. 6).

Lorsque l'impact se produit et à mesure que les pressions/températures augmentent, se produisent la succession et les transformations suivantes (French, 1998) : fracturation du substrat, bréchification, formation des cônes de percussion, transformation du quartz en coésite, puis celle du graphite en diamant, de la coésite en stishovite, quartz clivés, perte de biréfringence des feldspaths, isotropisation, fusion, puis vaporisation de la roche. Sur le terrain, puis en laboratoire, on identifie les échantillons récoltés ce qui permet éventuellement d'identifier ces éléments comme par exemple les brèches d'impact. Le choc engendre des températures et des pressions énormément élevées qui transforment les minéraux de la roche choquée, des températures et des pressions

qui sont bien au-delà de celles atteintes dans le métamorphisme régional. En effet, les brèches d'impact sont souvent contaminées par des éléments rares sur Terre qui proviennent de l'impacteur comme l'iridium, le nickel, le platine ou d'autres éléments sidérophiles. Une impactite est une pierre terrestre modifiée par l'impact d'une météorite. Les impactites ont pour origine la fusion de la croûte superficielle sous l'énorme quantité dégagée au moment de l'impact ; elles se forment donc à des températures considérables. Les tectites (du grec *tectos*, fondu) sont des petites pierres vitreuses qui diffèrent chimiquement des laves terrestres. Elles correspondent à des fragments de roches terrestres, arrachés du sol lors des impacts météoritiques, fondus sous l'effet du choc, puis brutalement refroidis. Leur forme est régulière sous forme de disques, de poires, de larmes, d'esquilles, *etc.* Leur formation nécessite un impact important. Mais ce sont les énormes pres-

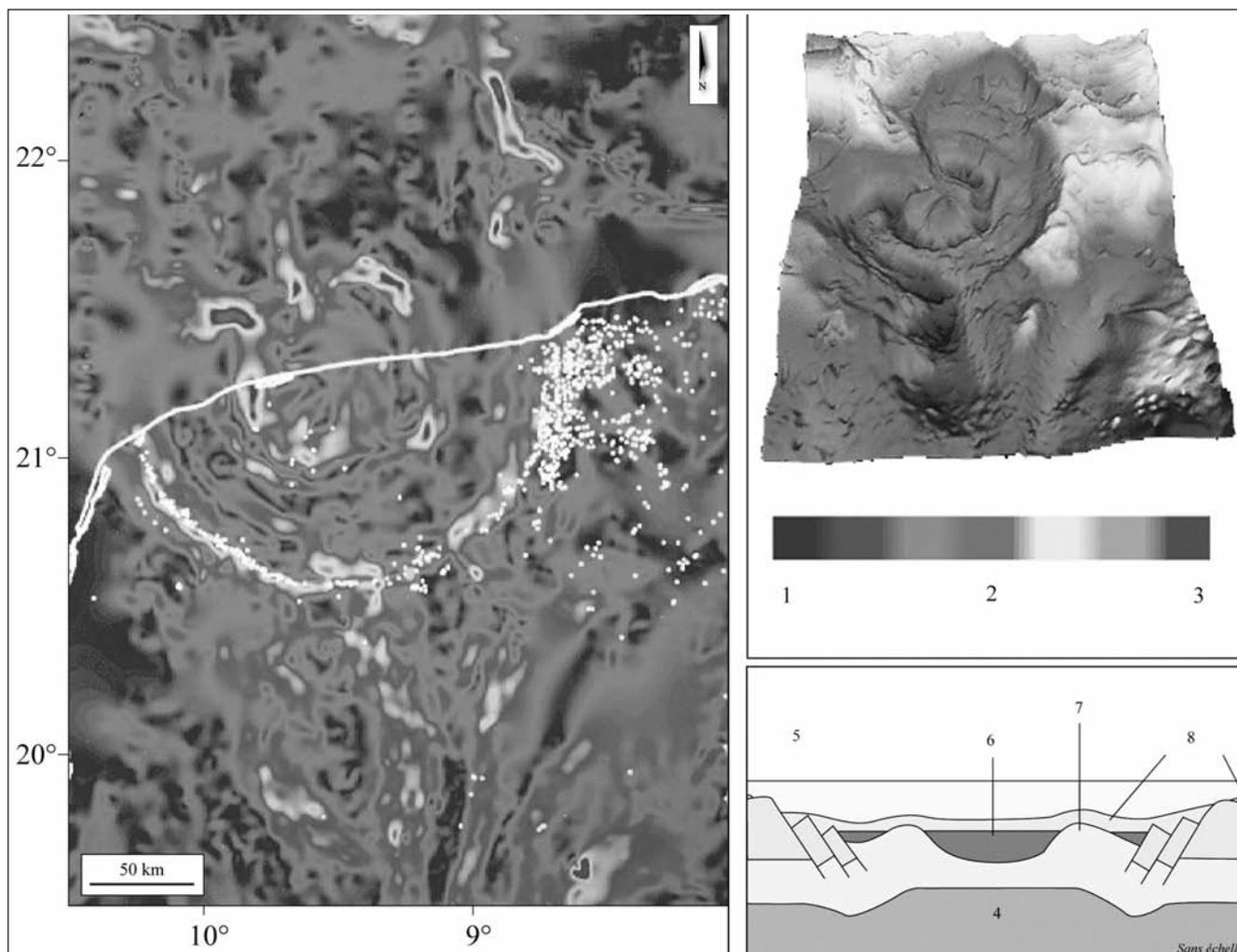


Fig. 6 – Images et coupe simplifiée du cratère de Chicxulub, repéré au Yucatan par des anomalies gravitationnelles. Noter, en blanc, les cenotes liés aux fissurations développées dans les calcaires. Beaucoup suivent le bord circulaire du cratère (d'après Hildebrand *et al.*, 1995). 1 : faible gravité ; 2 : gravité moyenne ; 3 : forte gravité ; 4 : élévation centrale ; 5 : rebord du cratère d'impact ; 6 : couche de roche fondue par l'impact ; 7 : crête de l'anneau interne ; 8 : brèche d'impact.

Fig. 6 – Pictures and simplified geological section of the Chicxulub crater, detected in Yucatan by gravitational anomalies. Note, in white, the cenotes connected with the fissuring developed in the limestones. Many of them follow the circular rim of the crater (after Hildebrand *et al.*, 1995). 1: small gravity; 2: medium gravity; 3: strong gravity; 4: central uplift; 5: impact crater rim; 6: rock bed smelt by the impact; 7: internal ring crest; 8: impact breccias.

sions libérées lors du choc (estimations 1 000 à 5 000 GPa et $T > 3\,000^\circ\text{C}$, pour Rochechouart) qui engendrent la signature indéniable d'un impact météoritique: cristaux de quartz choqués et disloqués, formes de quartz caractéristiques des très hautes pressions (coésite et stishovite) que seul un impact peut engendrer. On distingue notamment les cônes de percussion ou de pression (*shatter cones*) : il s'agit de déformations (qui peuvent aller de quelques cm à plusieurs mètres), en forme de cône, couvertes de stries rayonnantes dont l'apex est dirigé vers la source de pression. La présence de matériaux spécifiques aux impacts météoritiques est également révélatrice : minéraux « choqués » ou « isotropisés » (verres diaplectiques), minéraux de très haute pression, verres de fusion, quartz choqués, grains magnétiques, nanodiamants, suie, fullerènes (molécules cages) renfermant de l'hélium 3, rare sur Terre. La présence d'iridium est également un indice important car, s'il est présent dans la nature,

il ne l'est qu'en faible quantité. En cas de concentration importante, il témoigne, selon de nombreux scientifiques comme le prix Nobel de Physique Luis Walter Alvarez, d'une origine extraterrestre (Alvarez et Asaro, 1990 ; Rocchia et Robin, 2002). Il a permis notamment de préciser la limite K-T (Crétacé-Tertiaire). D'autres éléments (nickel, chrome, cobalt...), d'origine extra-terrestre, peuvent jouer le même rôle d'identification. Enfin, les spinelles nickélicifères sont des minéraux dont la formation nécessite la fusion d'un matériel fortement nickélicifère à une température supérieure à $1\,300^\circ\text{C}$ et ce dans une atmosphère riche en oxygène. Leur composition dépend de la pression d'oxygène, donc de l'altitude à laquelle s'est effectuée l'oxydation. Les spinelles sont des minéraux particuliers et leur présence signe, sans aucun doute, la trace d'un impact. Au final, il est aujourd'hui facile de lever les doutes sur l'identification d'un astroblème. Si ces derniers subsistent, ce n'est que parce que les

moyens n'ont pas été mis à disposition des scientifiques. Il est vrai que les coûts peuvent être très importants (forages).

Typologies

Le nombre de cratères et d'astroblèmes actuellement connus est suffisamment important (plus de 230 dont une trentaine est fortement probable ; Salomon et Auly, 2007) pour que l'on puisse proposer des types de classifications. L'un des premiers à avoir tenté cela fut T. Monod (1972). La plus exhaustive, en vigueur au Canada (université de Brunswick), se contentait de distinguer les cratères simples des cratères complexes (Dence, 1973). Mais plusieurs autres critères peuvent être pris en compte (Melosh, 1989, 1998), énoncés ci-dessous.

L'ancienneté

Du fait que la Terre est soumise depuis longtemps à l'érosion, la plupart de ses astroblèmes ont disparu de longue date. Tout d'abord, en toute logique, la grande majorité des bolides a dû tomber dans les océans. Or, du fait du renouvellement constant du plancher océanique, aucune cicatrice n'a pu perdurer au-delà de 200 Ma. Et ceci d'autant plus que la sédimentation des fonds des océans a oblitéré facilement toute trace. Les plus anciens (tab. 1) sont donc à rechercher sur les continents et notamment dans les parties de ceux-ci susceptibles de conserver longtemps leurs traces. Il s'agit surtout des régions de socle et en particulier celles ne connaissant qu'une érosion modérée (régions arides par exemple). *De facto* les plus anciens astroblèmes connus sur Terre ont autour de 2 milliards d'années (Vredefort : $2\,023 \pm 4$ Ma, en Afrique du Sud ; Sudbury : $1\,850 \pm 3$ Ma, au Canada). Le plus ancien répertorié (Mashchak et Naumov, 1996) est ac-

tuellement celui de Suavjärvi en Carélie avec 2 400 Ma (limite Archéen/protérozoïque) ; son diamètre est de 16 km mais topographiquement il n'en reste presque rien: pour laisser des empreintes durables, il faut toujours de grosses structures. Inversement, les météorites les plus récentes (tab. 1) ont été aperçues par les Hommes. Sirente (1650) en Italie ; Simuna (01/06/1937), en Estonie ; Sikhote Alin (12/02/1947) et Toungounska (30/06/1908) en Sibérie ou encore Sterlitamak (17/05/1990) en Russie, sont de ceux-là. Le dernier en date (15/09/2007) est tombé au Pérou, creusant un cratère de 30 m de large sur 6 de profondeur. Wabar (4 500 ans) en Arabie Séoudite est un exemple de l'effacement rapide des cicatrices laissées par un impact. En 1932, le cratère d'impact principal (il y eut plusieurs météorites) était encore profond de 12,5 m (pour un diamètre de 116 m) et abritait un lac de sel blanc. Colmaté par les sables, il n'était plus que de 8 m de profondeur en 1965 et seulement de 2 m en 1994 ! En général, les restes météoritiques ne sont préservés que sur des cratères jeunes de taille modeste car pour les grosses structures impactites, l'énergie libérée lors de l'impact est tellement importante que la météorite est en général totalement sublimée.

La taille

Il est facile de distinguer les petits cratères des grands. Les premiers ont un diamètre inférieur à 15 km et une profondeur équivalente à 1/10 du diamètre ; ils ont souvent une forme en « bol » car le creux est dû au choc, l'énergie cinétique du météorite se concentrant sur la zone d'impact. Les seconds (tab. 2) ont un diamètre supérieur à 15 km mais la profondeur ne dépasse pas 2 000 m (Masaitis et Sharpton, 1994). Généralement, ils sont à fond plat avec un piton central et des bordures ayant glissé dans le cratère. Cette mor-

Nom	Situation	Âge (Ma)
A		
Suavjärvi	Russie	2 400
Vredefort	Afrique du Sud	$2\,023 \pm 4$
Sudbury	Canada	$1\,853 \pm 3$
Shoemaker	Australie	$1\,630 \pm 5$
Suvasvesi (N et S)	Finlande	< 1 000
B		
Campo del Cielo	Argentine	<0,004
Ilut Metsä	Estonie	>0,002
Sobolev	Russie	<0,001
Haviland	Etats-Unis	<0,001
Sikhote-Alin	Russie	12/02/1947

Tab. 1 – Classement des astroblèmes par ancienneté (A : Les plus anciens. B : Parmi les plus récents ; d'après la liste de l'université de Brunswick).

Tab. 1 – Classification of the astroblems by ages (A: Oldests. B: Recents; after Brunswick University).

Astroblème	Situation	Diamètre (en km)
Shiva	Inde	600 x 400
Wilkes Land	Antarctique	500
Vredefort	Afrique du Sud	200-300
Sudbury	Canada	140-150
Chicxulub	Mexique	180-200
Alamo	Etats-Unis	190
Bedout	Australie	180
Popigai	Russie	100
Manicouagan	Canada	100
Aclaman	Australie	90-100

Tab. 2 – Les plus grands diamètres de structures d'impact (connus en 2008).

Tab. 2 – The biggest impact structures diameters (known in 2008).

phologie particulière est due aux phénomènes de rebond : une partie de l'énergie est utilisée par ce rebond et redresse les couches centrales. Lorsqu'un petit objet parvient au sol et que sa vitesse d'impact est assez faible (de 1 à 2 km/s), la destruction au sol n'est que mécanique. Cela se traduit par une fragmentation et la dispersion dans les environs immédiats de débris rocheux. Ceux-ci, lorsqu'on les retrouve, font la joie des collectionneurs et des Musées (Londres). Beaucoup d'objets ayant explosé au contact des couches denses de l'atmosphère se retrouvent éparpillés au moment de l'impact : cela se traduit par des champs météoritiques

(impacts multiples) laissant peu de traces car les cratères sont petits et les météorites s'enfoncent dans le sol à faible profondeur (quelques mètres) devenant peu décelables du fait de leur petite taille. Toutefois plusieurs champs ont été reconnus, tous récents (holocènes à actuels), dont la principale caractéristique est de dessiner une ellipse dans laquelle les fragments sont inscrits (fig. 7). S'il s'agit de gros bolides (de 100 m de diamètre à plusieurs kilomètres), la vitesse d'impact est forte si bien que la destruction au sol est explosive : la météorite tout comme son encaissant sont vaporisés et il existe relativement peu de débris. Les ondes de

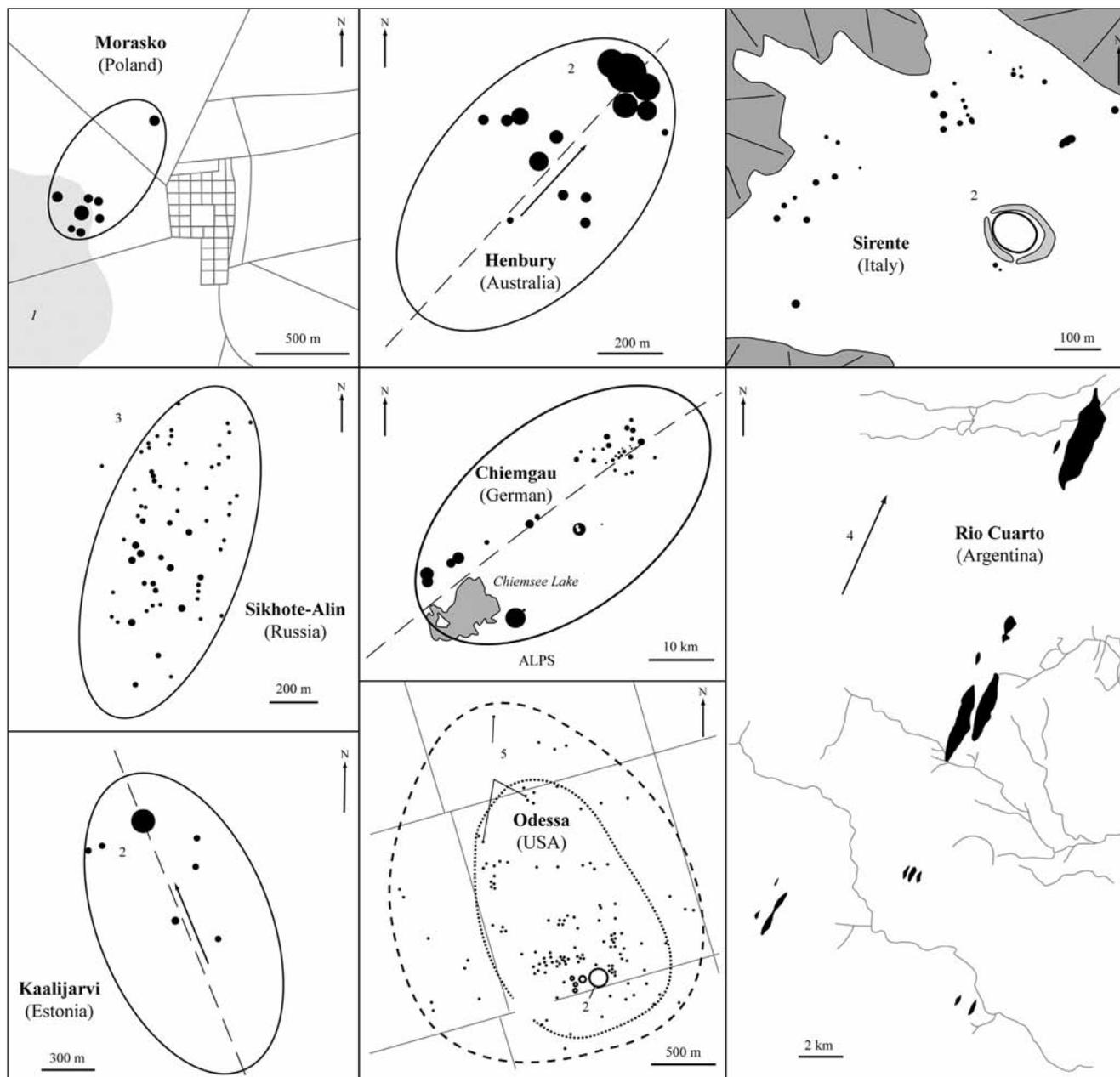


Fig. 7 – **Champs d'astrolèmes multiples** (adapté de Krinov, 1963 et Hodge, 1994, in www.astrosurf.com ; University of Texas of the Permian Basin ; Ormö *et al.*, 2006). 1 : forêt ; 2 : cratère principal ; 3 : représentation des plus grands cratères ; 4 : trajectoire de chute ; 5 : emplacements des fragments de météorites.

Fig. 7 – **Fields of numerous astrolèmes** (adapted from Krinov, 1963 and Hodge, 1994, in www.astrosurf.com ; University of Texas of the Permian Basin ; Ormö *et al.*, 2006). 1: forest; 2: main crater; 3: biggest craters representation; 4: fall trajectory; 5: meteorites fragments locations.

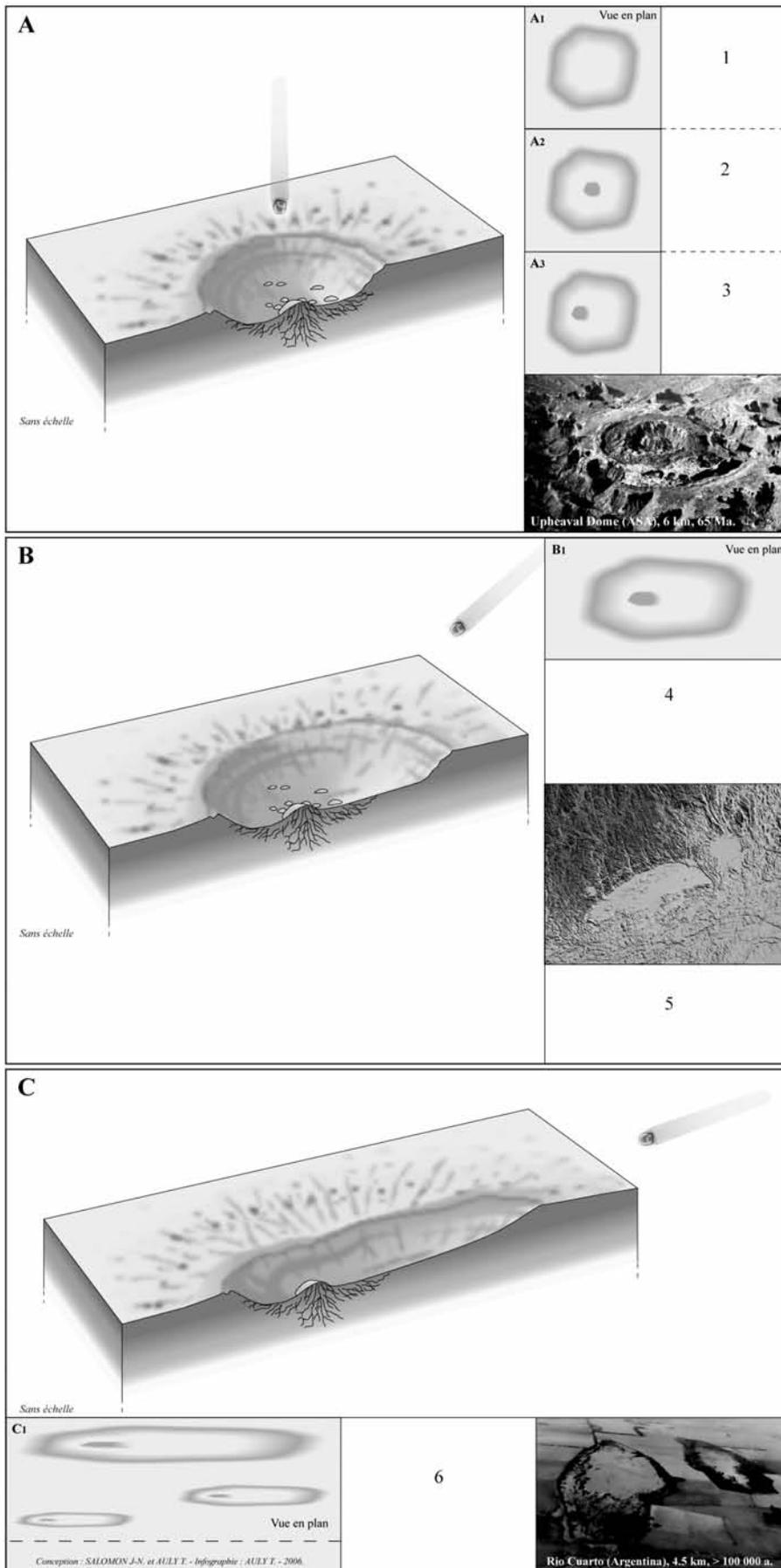


Fig. 8 – Types de morphologies des astroblèmes en fonction de leur angle d'impact. A : Impact vertical et structure circulaire. Cette structure correspond à la majorité des astroblèmes. Ils forment souvent des lacs (Bosumtwi, Ghana ; Clearwater, Canada ; Lonar, Inde, etc.). Parmi ces morphologies circulaires, on retrouve le Ries (Allemagne), Wolfe Creek (Australie), Sikhote-Alin (Russie), Upheaval Dome (E.U.), etc. B : Impact oblique et structure ovalisée, on note la position dissymétrique du picon central. Trois des plus grands impacts de bolides dont on retrouve encore les traces sur la surface terrestre rentrent dans la catégorie des morphologies de cratère ovalisé : Sudbury (Canada), Alamo (E.U.), 190 km, 367 Ma. C : Impact rasant et structure ellipsoïdale. Le picon est déjeté. 1 : cratère sans picon central ; 2 : cratère avec picon central où le vecteur d'impact est vertical ou sub-vertical ; 3 : cratère avec picon d'impact où le vecteur d'impact est légèrement incliné ; 4 : cratère avec ou sans picon où le vecteur d'impact est fortement incliné ; 5 : MNT de l'astroblème de Sudbury au Canada. Son diamètre est d'environ 250 km et son âge dépasse 1 850 Ma ; 6 : cratère avec ou sans picon où le vecteur d'impact est rasant, quasiment horizontal.

Fig. 8 – Morphologies types of astroblems according their angle impact. A: Vertical impact and circular structure. This structure corresponds to the majority of astroblems. They often form lakes (Bosumtwi, Ghana; Clearwater, Canada; Lonar, India, etc.). Among these circular morphologies, we find the Ries (Germany), Wolfe Creek (Australia), Sikhote-Alin (Russia), Upheaval Dome (E.U.), etc. B: Oblique impact and elliptic structure. Note the asymmetric position of central peak. Three of the biggest impacts of fireballs which one can still find traces on earth surface enter the frame of ovalized craters morphologies: Sudbury (Canada), Alamo (E.U.), 190 km, 367 Ma. C: Low-angled impact and ellipsoidal structure. The peak is lop-sided. 1: crater without central pike; 2: crater with central pike where the impact vector is vertical or sub-vertical; 3: crater with impact pike where the impact vector is slightly pitched; 4: crater with, or not, pike where the impact vector is strongly pitched; 5: MNT of the Sudbury astrobleme in Canada. His diameter is about 250 km and his age go far 1850 Ma; 6: crater with, or not, pike, where the impact vector is grazing, nearly horizontal.

choc puissantes, les pressions fantastiques (>10 mégabars) et les énormes températures (parfois >5 000°C) favorisent la fusion. Le matériel alentour qui est comprimé est dispersé au loin tandis que l'encaissant se fracture intensément sur une vaste zone (fig. 5). Les cicatrices diffèrent également : celles des gros impacts perdurent en principe plus longtemps. Pour donner une idée, on estime que la météorite de Chicxulub devait avoir environ 10 km de diamètre (Baines *et al.*, 1995 ; Bralower *et al.*, 1998) et que l'énergie cinétique dégagée fut de l'ordre de 100×10^9 mégatonnes (soit 50 milliards de fois la bombe d'Hiroshima !). Aujourd'hui, il ne reste plus sur Terre d'astrolèmes ayant plus de 2×10^9 ans, mais il subsiste certaines formations très anciennes (environ une trentaine) nommées « astrons » (Baie d'Hudson ?), qui ont été découvertes par l'observation spatiale.

Les formes et l'angle d'impact

Sur le terrain, les formes circulaires, subcirculaires, oblongues, en forme de bol, ou de van, avec des dessins plus ou moins paraboliques dominant. L'angle d'impact est évidemment un facteur important comme l'indiquent les traces oblongues et elliptiques de Rio Cuarto (Argentine ; fig. 8). La lithologie encaissante et la rhéologie locales semblent jouer un rôle dans la mesure où, pour des impacteurs identiques, les cratères formés dans des sédiments sont de 2 à 4 fois plus grands que ceux qui affectent les roches cristallines. Les météorites qui arrivent sur Terre, à cause de leur grande vitesse, s'enfoncent dans le sol et produisent un cratère dont l'importance dépend de la masse, de la densité et de la vitesse de l'impacteur. Rappelons que c'est la décompression qui produit le cratère, et non le choc initial. Celle-ci fait qu'une grande partie des matériaux est éjectée au loin. C'est pour cela que le cratère est bien plus grand que l'objet qui l'a produit. Une règle simple (approximative) donne le diamètre du cratère en fonction de celui du météorite : le diamètre du cratère est environ 20 fois le diamètre du météorite (Melosh, 1989). La taille du cratère est bien sûr d'autant plus grande que l'objet qui le creuse est plus gros, plus massif (mais cela varie avec l'énergie, et le rapport varie avec le diamètre de la structure). Schématiquement, trois grands types de cratères peuvent être distingués (fig. 5). Les premiers sont les cratères simples. Les météorites de diamètre compris entre 10 m et 200 m produisent un cratère simple, sans structure centrale. Les cratères sont alors relativement petits avec des ratios profondeur/diamètre de l'ordre de 1 à 5 ou de 1 à 7. Ils sont en forme de coupole inversée, très évasée, avec des bords surélevés. Compte tenu de la taille modeste de ces cratères, il existe peu ou pas de traces de métamorphisme d'impact. En revanche, brèches et débris abondent, colmatant en partie la dépression centrale comme à Amguid, en Algérie (26°5'N, 4°23'E). Ensuite viennent les cratères complexes, plus grands (>2-3 km). Les plus gros impacteurs engendrent un cratère plus compliqué pour lequel les remparts sont généralement assez pentus si bien qu'ils ont tendance à s'effondrer (terrasses périphériques d'effondrement) par la suite et à colmater le centre du cratère. L'énergie est telle que la météorite est complètement

vaporisée. Il n'en reste aucune trace car, si ce n'est des métaux (Ir, Fe...) mélangés à la brèche pour ces impacts violents, les extraordinaires pressions et températures générées liquéfient littéralement les roches. Dans un premier temps, elles sont propulsées en profondeur puis remontent aussitôt sous forme de rebond (comme pour la chute d'une goutte d'eau dans un verre rempli d'eau pour former une structure en « chapeau mexicain » avec un dôme central, des terrasses et des dépôts. L'exemple de Steinheim (48°40'N, 10°4'E) est démonstratif. Enfin, il y a les cratères à anneaux multiples et de taille importante (>100 km). Dans certains cas, le dôme central peut être si haut et étroit qu'à son tour il peut s'effondrer en donnant une structure annulaire de type « *peak ring* ». Dans ce cas, il peut y avoir une succession de crêtes et de sillons alternant, soulignés par des talwegs ou des lignes de partage des eaux. Dans les grands astrolèmes, le soulèvement central rebrousse sa couronne ou même la chevauche partiellement et peut même produire des plis dissymétriques au-delà de la couronne. Les exemples de Vredefort (Afrique du Sud ; 27°S, 27°30'E) et de Silverpit (Grande-Bretagne ; Mer du Nord) illustrent ce cas. Pour sa part, R. Grieve (1995) distingue les cratères simples (<2-3 km de diamètre), les cratères complexes à pic central, les cratères à pic central et structure annulaire unique (>10 km de diamètre) et les bassins d'impact à anneaux multiples (>100-150 km de diamètre). Après l'impact, les éboulements et glissements adoucissent et, par épandages successifs, colmatent progressivement l'intérieur du cratère (couvertures d'éjecta). Lorsque la roche percutée est cristallisée, il peut en résulter des fragmentations complexes, des structures annulaires et de grandes différences de comportement des roches face à l'érosion différentielle. Sur la Lune, les cratères sont très bien conservés mais, sur Terre, l'érosion fait son œuvre. Toutefois, les structures annulaires peuvent perdurer longtemps et sont mises en valeur par les réseaux hydrographiques et surtout par des lacs (Manicouagan) car leur topographie s'y prédispose.

La chute

La majorité des météorites se fragmente à une altitude de 12 à 8 km de hauteur, à l'entrée de l'atmosphère. La vitesse moyenne de la Terre est de 30 km/s et celle d'entrée d'un corps de 42 km/s. Donc si ce corps rattrape la Terre, sa vitesse d'entrée sera de l'ordre de 12 km/s ; mais si ce corps arrive de face, la vitesse sera d'environ de 72 km/s. Pour une vitesse moyenne de 30 km/s, la vitesse au sol sera encore de 10 à 20 km/s (freinage par frottements). Pour qu'ils arrivent au sol, les projectiles doivent avoir une masse d'au moins 10 kg et une trajectoire favorable car le frottement leur fait perdre environ 80 % de leur masse (Carion, 1997). À ce moment là, la chute peut être soit unique (il existe de très nombreux exemples ; Salomon et Auly, 2007), soit duale : citons les astrolèmes de Kara (65 km de diamètre) et d'Ust-Kara (25 km) sur l'estuaire de la rivière de même nom en Russie, et datés tous deux de 73 Ma. Kara, peu visible sur les images satellitaires, présente une triple structure annulaire, mais est bien détecté par gravimétrie et a laissé de nombreuses im-

pacites. Ust-Kara, de même nature, est essentiellement en mer (golfe de Baydarata). Près de la Baie d'Hudson (Québec), Clearwater East (32 km) et Clearwater West (22 km) sont les traces de deux projectiles jumeaux (âge identique de 290 ± 20 Ma). Ils sont occupés par deux lacs. Dans Clearwater West, un chapelet d'îlots dessine un cercle en pointillé correspondant aux vestiges d'une structure annulaire et du dôme central soulevé. Arkenu I et II en Libye (140 Ma) sont bien conservés. Wabar (Arabie Séoudite), qui présente deux cratères de respectivement 64 et 110 m de diamètre, est devenu une attraction touristique. Parfois la chute peut être triple [Stopfenheim Kuppel, Steinheim et Ries (15 Ma) ; Aouounga (Tchad)], ou même multiple. Dès que les impacts sont très nombreux, on parle de champs météoritiques. En effet, les impacts groupés ne sont pas nécessairement alignés (Auly et Pellegrin, 2007). Environ une douzaine de champs d'astroblièmes sont aujourd'hui connus. Citons ceux de Kaalijärvi (Estonie ; 7 impacts), Morasko (Pologne ; 8), Henbury (T.N., Australie ; 15), Campo del Cielo (Argentine ; 20) et Sikhote-Alin (Sibérie ; 122), auxquels il faut probablement ajouter Sirente (18) en Italie. Le plus grand champ serait celui observé dans le sud-ouest du désert égyptien (Gilf Kebir) où les impacts s'étendent sur 5 000 km² (Paillou *et al.*, 2004). Un champ météoritique encore plus vaste aurait été découvert en 1836 à Gibeon (Namibie ; 25°33'S, 18°E). Son grand axe serait de 390 km pour 120 km de petit axe. L'ensemble couvre 30 000 km² mais aucun cratère n'a encore été découvert. À Chiemgau (Bavière), 81 cratères ont été identifiés, répartis sur une sorte d'ellipse (fig. 7) de 58 km de grand axe. Le champ d'impacts couvrirait environ 1 200 km² (Hoffmann *et al.*, 2005). Quelques cratères ont été cartographiés sur les cartes topographiques anciennes et certains sont bien préservés. Les plus grands ont un diamètre de l'ordre de 370 m et souvent ils sont remplis d'eau. C'est le cas du Tüttensee (500 m de diamètre) qui garde des traces de remparts (8 m de haut).

L'éclatement (ou pas) de l'impacteur

En plus des paramètres précités, la morphologie d'un astroblième dépend également de la manière par laquelle le corps extra-terrestre pénètre l'atmosphère terrestre : soit il reste compact, soit il se brise en morceaux. À partir de l'étude des différents impacts connus, nous avons établi une relation entre la fracturation provoquée par l'impacteur et la forme de l'astroblième (fig. 9). Prenons le premier cas : météorites ou comètes restant compacts. Il regroupe les astroblièmes uniques (un seul cratère). Ici, l'impacteur dense et cohérent ne se fracture pas en traversant l'atmosphère. Selon sa taille, sa composition, sa densité et son angle d'impact, les cicatrices seront plus ou moins marquées. Cela correspond à la majorité des structures relevées sur Terre. Dans le cas où l'impacteur garde une certaine cohésion, seuls quelques fragments se séparent du corps principal pour poinçonner la surface terrestre. Le cratère d'impact principal sera associé à des astroblièmes plus modestes à l'instar de Lonar, en Inde (19°59'N, 76°31'E). Si l'impacteur se fractionne à l'entrée dans l'atmosphère en deux gros blocs proches l'un de l'autre, l'impact sera double. De

nombreux exemples ont été répertoriés : Arkenu 1 et 2, en Libye (22°4'N, 23°45'E) ; Clearwater ouest et est, au Canada (56°5'N, 74°7'W) ; Chesapeake Bay et Toms Canyon, aux Etats-Unis (37°15'N, 76°5'W ; 39°8'N, 72°51'W), *etc.* Les champs d'astroblièmes résultent, quant à eux, de l'importante fragmentation) du projectile pénétrant l'atmosphère. La dissociation en divers éléments venant percuter la surface terrestre entraîne au sol une ellipse de dispersion, plus ou moins étirée en fonction de l'angle d'attaque. Par ailleurs, Toungouska (Sibérie) constitue le seul exemple récent (1908) et avéré de l'explosion d'un impacteur (comète ?) en haute atmosphère (vers 8 km d'altitude). Le souffle consécutif a détruit un territoire de 20 000 km². Un exemple de relation entre un astroblième et la fracturation d'un impacteur a été étudié en direct en 1994 lorsque la comète Shoemaker-Levy 9 s'est écrasée sur Jupiter (Orton *et al.*, 1995). La comète est entrée dans la limite de Roche de la planète, ce qui a provoqué la fracturation de cette dernière en neuf fragments lesquels se sont écrasés en surface en alignement. Ce type d'impact s'est produit sur Terre à plusieurs reprises (Auly et Pellegrin, 2007).

L'évolution ultérieure et l'utilisation anthropique

Après l'impact et la formation d'une morphologie caractéristique, les astroblièmes subissent les effets de l'érosion notamment différentielle.

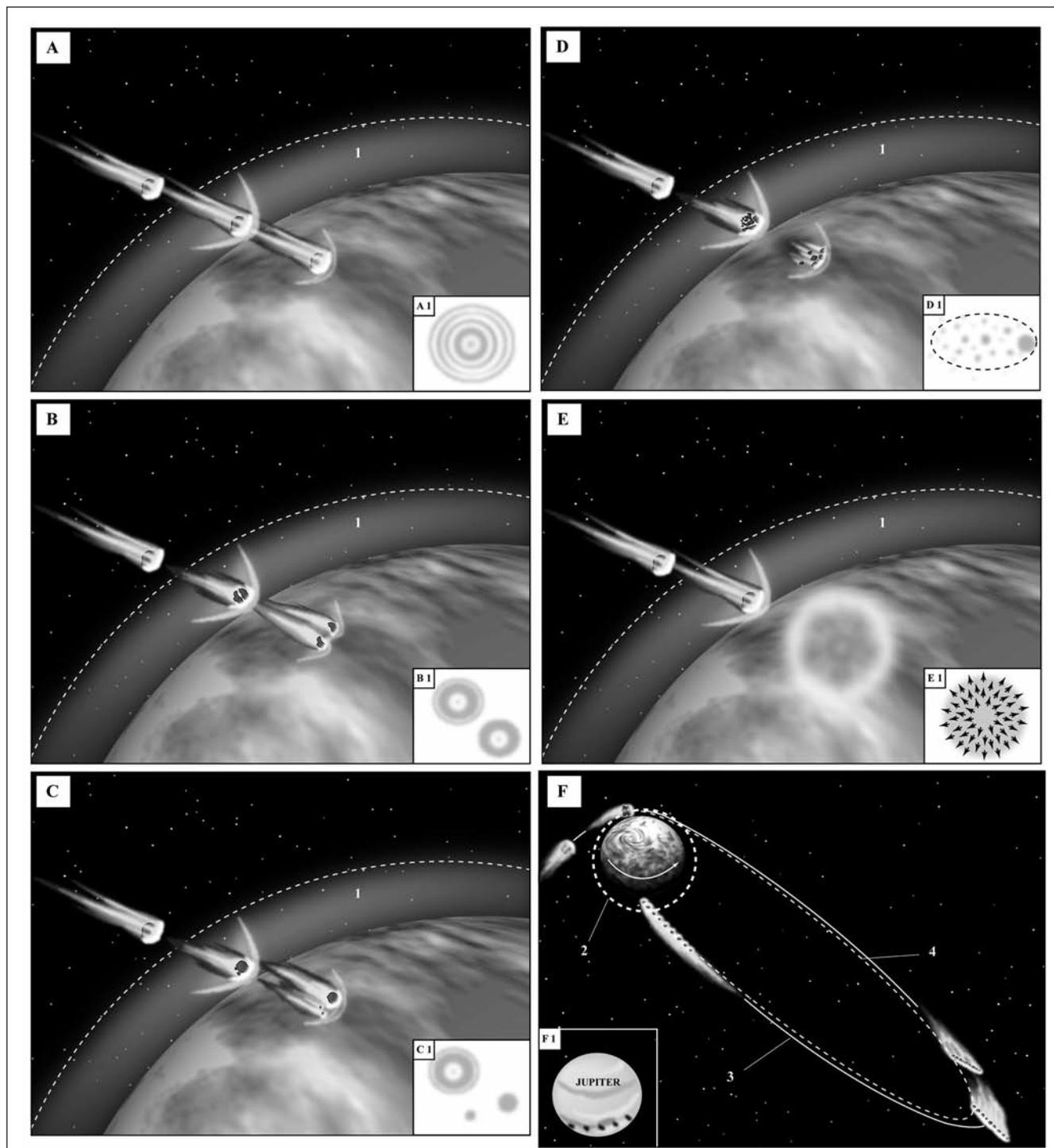
Fig. 9 – Relation entre la fracturation d'un bolide et la morphologie des astroblièmes (F : d'après Chodas et Doherty, *in* *astrosurf.com*). A : Vredefort (Afrique du Sud). Impacteur indifférencié non fracturé (A1 : astroblième unique). B : Arkenu 1 et 2 (Libye). Impacteur indifférencié se fracturant en deux blocs à l'entrée dans l'atmosphère (B1 : impact double). C : Lonar (Inde). Impacteur indifférencié où quelques fragments se détachent (C1 : astroblième principal parfois associé à quelques petits impacts). D : Gilf Kebir (Libye). Impacteur indifférencié se fracturant en une multitude d'éléments (D1 : champs d'astroblièmes). E : Toungouska (Russie). Impacteur indifférencié se vaporisant et explosant dans l'atmosphère (E1 : effet de souffle, seule la couverture superficielle est affectée). F : Shoemaker-Levy 9 (Jupiter). Le bolide se fractionne en passant la limite de Roche et suit une nouvelle trajectoire menant les fragments vers la planète (F1 : alignement d'astroblièmes). 1 : atmosphère ; 2 : limite de la roche ; 3 : trajectoire du bolide ; 4 : trajectoire du premier fragment à impacter la planète.

Fig. 9 – Relation between the fracturation of a meteor and the morphologies of the astroblems (F: after Chodas and Doherty, *in* *astrosurf.com*). A: Vredefort (South Africa). Undifferentiated impactor unbroken (A1: single astroblem). B: Arkenu 1 and 2 (Lybia). Undifferentiated impactor breaking into two blocks in entering into the atmospher (B1: double impact). C: Lonar (India). Undifferentiated impactor with some breaking loose fragments (C1: main astroblem sometimes associated with some small impacts). D: Gilf Kebir (Lybia). Undifferentiated llimpactor breaking in a multitude of elements (D1: astroblems fields). E: Toungouska (Russia). Undifferentiated impactor spraying and blowing up in the atmospher (E1: blast effect, only the superficial cover is affected). F: Shoemaker-Levy 9 (Jupiter). The fireball breaks down going through the rock limit se fractionne and follows a new trajectory leading the fragments to the planet (F1: astroblems alignment). 1: atmospher; 2: rock limit; 3: fireball trajectory; 4: trajectory of the first fragment impacting the planet.

Le devenir des astroblèmes

Dans de nombreux cas, les cratères apparents demeurent bien visibles. L'idée logique est alors que ces astroblèmes sont récents, mais cette idée peut être faussée car d'une part le cratère formé immédiatement après l'impact pouvait être plus grand et d'autre part certains milieux climatiques sont plus favorables que d'autres à l'érosion. Dans le cas de Manicouagan, le cratère de départ mesurait environ 100 km de diamètre (Degeai et Peulvast, 2006) et il n'en mesure plus aujourd'hui que 70 km car l'érosion ultérieure (glaciation) a

effacé la plupart des traces. Si l'intérieur reste visible, c'est qu'il se compose de roches très résistantes. Ce cas est très fréquent pour tous les astroblèmes de cratère complexe car, au niveau du piton central, les modifications pétrographiques sont telles au moment de l'impact (fusion puis refroidissement rapide) qu'elles aboutissent à former des roches métamorphiques et ignées qui sont, comme à Steinheim, bien mises en valeur ultérieurement. Juste après l'impact, les pluies torrentielles viennent remplir le tout jeune cratère. Celui-ci constitue d'ailleurs un bon réceptacle fermé, propice à la formation de lacs susceptibles de durer très long-



temps. Ce fut le cas du Ries où l'on a retrouvé d'importants dépôts lacustres contenant de nombreux fossiles (Osinki, 2004 ; Arp, 2006). Ces dépôts contribuent fortement à oblitérer les morphologies d'origine. Par ailleurs, de nombreux glissements centripètes se font le long de failles listriques, facilités par la faible cohésion des matériaux. Bien sûr, l'érosion (ruissellement, mouvements gravitaires, solifluxion, éolienne, etc.) joue comme sur n'importe quel relief pentu. Enfin, dans le cas des astroblèmes les plus anciens, le travail conjoint de l'érosion et de la sédimentation a effacé toute trace superficielle, voire souterraine, des anciennes collisions mais pas toujours : à Chicxulub, la structure ensevelie est soulignée en surface par des alignements circulaires de cenotes (Heraud-Piña, 1996). D'une façon générale, la durée de vie est plus élevée dans les régions géologiques stables et, *a contrario*, elle l'est moins là où la dynamique géologique (tectonique, érosion, etc.) est mouvementée (tab. 3). La plupart des collisions s'étant produites dans les océans, il n'est pas étonnant que très peu de vestiges soient encore décelables. Par ailleurs, on remarque que la plupart des impacts reconnus se situent en Amérique du Nord, en Europe, en Russie et en Australie. En fait, cela s'explique avant tout par les nombreuses recherches industrielles et/ou scientifiques qui y sont faites. Ils sont également nombreux dans les zones arides et sub-arides car ils s'y conservent bien. Inversement, dans les pays de la zone intertropicale humide, les astroblèmes sont peu représentés en raison de leur oblitération rapide par les épaisses couvertures pédologiques, d'altération, végétales, ainsi que par une érosion chimique plus intense. En définitive, il faut se faire à l'idée que notre planète a été beaucoup plus bombardée qu'on ne l'imagine (notamment lors du Grand Bombardement Météorique qu'a subi la Terre durant les 600 premiers Ma de son existence) et qu'elle le sera encore. Or, il est arrivé dans le passé que certains impacts multiples se soient produits en alignements plus ou moins rectilignes et ce, à une époque où la configuration des continents n'était pas celle d'aujourd'hui. Par la suite, la dérive de ces derniers a séparé les astroblèmes, lesquels constituent des marqueurs d'un état passé. Grâce à un essai de cartographie chronologique et l'utilisation de ces marqueurs, un intéressant scénario « revisitant » la dérive des continents a pu être proposé (Auly et Pellegrin, 2007).

Diamètre de l'astroblème	Espérance de vie
Moins de 1 km	< 1 Ma
De 1 à 10 km	Plus d'1 Ma à plusieurs dizaines de Ma
> 10 km	Plusieurs centaines de Ma
100 km et +	1 à 2 milliards d'années

Tab. 3 – **Espérance de vie moyenne d'un astroblème terrestre.**

Tab. 3 – *Mean life expectancy of an Earth astroblem.*

L'utilisation anthropique directe

Dès leur origine les astroblèmes ont été mis à profit par l'Homme selon des modes extrêmement variés. Un certain nombre de cratères ont été très vite remplis d'eau, à la suite d'orages. Ce fut le cas du Ries, dont le lac de cratère a perduré longtemps (présence d'Ostracodes) avant de se colmater définitivement. Mais à plus petite échelle, un bon nombre de ces cratères, souvent confondus avec des dépressions volcaniques (maars, caldeiras) ou karstiques (Mardellen en Allemagne), ont été aménagés par l'Homme en lieux d'abreuvoir pour le bétail (cas de Sirene en Italie). Ce sont surtout les matériaux originaux qu'ils recèlent qui ont attiré l'intérêt sinon la convoitise. Les verres libyques, formés par l'impact d'une météorite dans les sables du désert libyen, ont été utilisés dès l'Antiquité comme bijoux. Un bon exemple est le scarabée ornant le pectoral de Toutankhamon. Dans le cratère de Popigai (Sibérie), formé par l'impact d'un météorite, du graphite s'est transformé en agrégats de diamants, certains larges d'un centimètre! Ils sont bien sûr exploités. Si la plupart des autres matériaux sont moins précieux, ils sont très recherchés : des collectionneurs développent des bourses d'échange et il existe un commerce fructueux des matériaux issus des météorites. L'extraction de matériaux d'origine ou dérivés constitue une activité ancienne qui s'est pratiquée dans de nombreux astroblèmes. Citons entre autres les minerais (essentiellement des Ferrosillicides (Fe_xSi_y) et des Silicides d'Aluminium (Al_xSi_y), à l'origine de nombreuses bourses d'échange pour collectionneurs et de musées, la chaux vive, les verres de cristallerie, les pierres de construction (le château et l'église de Rochechouart sont entièrement construits en brèche d'impact). Certains ont pensé faire fortune tel le géologue D.B. Baringer (1905) qui avait acheté au début du XX^e siècle, des droits d'exploitation minière persuadé que Meteor Crater abritait une énorme quantité de fer. Au Canada, l'édification du barrage Daniel-Johnson sur la rivière Manicouagan a provoqué l'apparition d'un lac annulaire remarquable. D'une superficie de 2 000 km² et d'une profondeur moyenne de 73 m, le réservoir est l'un des plus importants au monde tant par son volume que par sa profondeur. Le lac alimente les centrales hydroélectriques (6 au total). L'île René Levasseur au centre, parfois appelée « l'œil du Québec » et correspondant la partie centrale du cratère, n'est apparue qu'avec le remplissage. Le lac Manicouagan représente un exemple unique d'aménagement hydraulique d'un cratère météorique par l'Homme (fig. 10). Certains cratères abritant encore des dépôts lacustres ont été mis à profit pour développer des champs agricoles dont les formes rayonnantes (Söderfjärden) ou la marqueterie (Ries, Steinheim) soulignent l'astroblème (fig. 11). Mais c'est certainement le tourisme qui offre les meilleures perspectives utilitaires. Meteor Crater en Arizona attire chaque année des centaines de milliers de visiteurs et a engendré toute une industrie touristique (hôtels, boutiques, visites guidées, survols en ballon, etc.) génératrice d'emplois. Il en est de même pour de nombreux cratères comme Steinheim et le Ries (Allemagne) ou encore Rochechouart en France (musées). Des randonnées sont organisées pour des amateurs souhaitant vi-

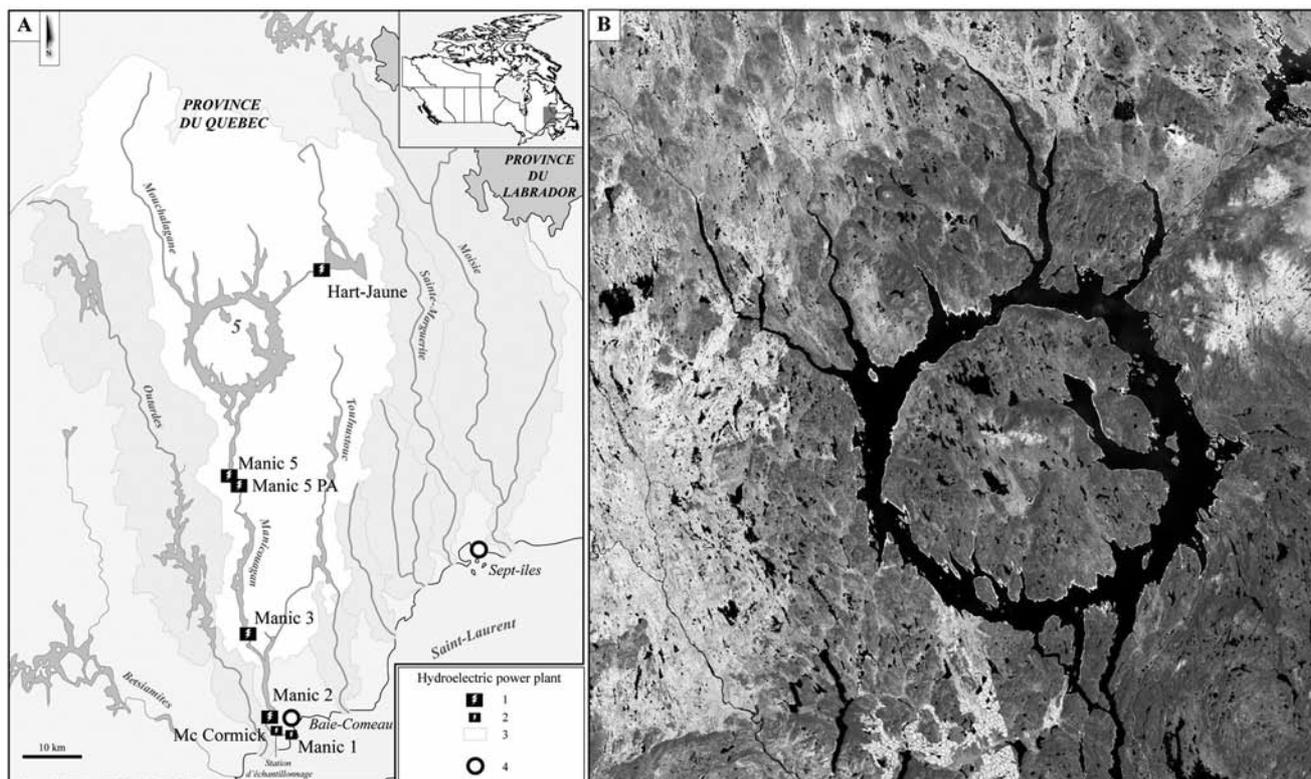


Fig.10 – L'aménagement hydroélectrique du réservoir de l'astrolème de Manicouagan (A). Réservoir Manicouagan (214 Ma ; B). Le diamètre mesure 100 km (photographie : gracieuseté de la NASA). 1 : 1000 MW ou plus ; 2 : moins de 1000 MW ; 3 : limite de bassin-versant ; 4 : villes principales ; 5 : réservoir Manicouagan.

Fig.10 – The hydroelectrical management of the storage basin of the Manicouagan astrobleme (214 Ma; A). The storage basin of Manicouagan (B). The diameter measures 100 km (photography: courtesy of NASA). 1: 1000 MW or more; 2: under 1000 MW; 3: catchment area limit 4: main towns; 5: Manicouagan reservoir.

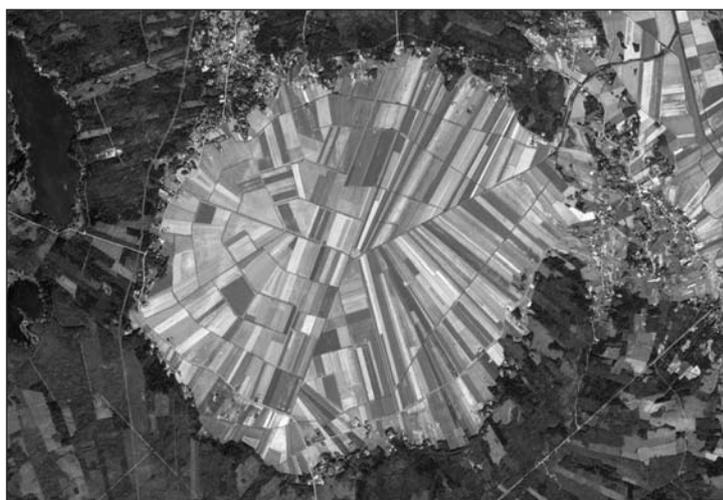


Fig. 11 – L'astrolème de Söderfjärden en Finlande (6,6 km de diamètre ; 63°N, 21°35'E).

Fig. 11 – The astrobleme of Söderfjärden in Finland (6.6 km in diameter; 63°N, 21°35'E).

siter certains astrolèmes sahariens ou australiens. Enfin, de nombreux livres d'art (photographies) font mention de ces astrolèmes.

Les risques de collision et les éventuelles parades

Aujourd'hui sont recensés quelque 2 000 objets s'approchant peu ou prou de la Terre parmi lesquels plus de 700 corps célestes d'un diamètre supérieur au kilomètre et proches de la Terre ont été repérés (mais la Nasa estime qu'il en existe plus de 1 100). Heureusement, 99,9 % d'entre eux sont classés dans la zone blanche de l'échelle de Turin et n'ont aucune chance de toucher la Terre. Cependant, le grand nombre d'impacts connus laisse augurer que d'autres collisions auront lieu (Gehrels, 1994).

Au-dessus de 50 m de diamètre, les objets traversent l'atmosphère sans s'y consumer. A partir de 140 m (il y en aurait au moins 100 000) ils ont la capacité de ravager toute une région or seuls 4 000 ont été identifiés. Depuis quelques années, les détections d'astéroïdes potentiellement dangereux pour la Terre se sont multipliées (fig. 1). Aujourd'hui, 859 « géocroiseurs » candidats à une collision ont été répertoriés par la NASA. Mais il en existe encore plusieurs centaines à découvrir : l'Infrared Space Observatory (ISO) de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) a démontré qu'il y en aurait environ 2 millions dépassant le kilomètre de diamètre dans

les « ceintures d'astéroïdes » du système solaire. Comme certains doivent croiser l'orbite de la Terre, il existe un risque potentiel pour cette dernière, mais seuls deux sont répertoriés en zone verte (2002 LY45 et 1997 XR2) et aucun dans les zones supérieures de l'échelle de Turin (tab. 4). Le premier (1,5 km de diamètre) devrait frôler la Terre en 2030 et le second (230 m de diamètre) en 2101. Aujourd'hui (2007), le risque le plus élevé semble appartenir à 99942 Apophis (250 m). Celui-ci devrait frôler la Terre le 13 avril 2029 et le risque est estimé à 1/45 000 pour que ce corps céleste de 20 Mt percute la Terre en avril 2036. Pourtant, selon J. Giorgini *et al.* (2002) du Jet Propulsion Laboratory, l'astéroïde (29075) 1950 DA (1 km de diamètre) est pressenti comme devant percuter notre planète le 16 mars 2880. À condition que les calculs soient justes, cela laisse donc le temps de chercher une prévention. Cependant la NASA publie une liste des astéroïdes, régulièrement remise à jour, de laquelle 1950 DA est... absent ! La probabilité d'une collision de type Chicxulub est tellement faible (1 sur 100 Ma) que les autorités ne prennent pas en considération le danger, malgré le caractère apocalyptique des risques encourus. Cependant, face aux menaces que représentent ces astéroïdes, l'Homme est tenté de développer des stratégies de prévention.

Les astéroïdes les plus dangereux ne sont pas forcément les plus gros car leur taille les rend brillants et par conséquent facilement repérables à l'aide des télescopes terrestres. Les plus dangereux sont paradoxalement les plus petits car on ne peut les détecter que peu de temps avant un éventuel impact. La première solution est l'explosion nucléaire qui consisterait à faire exploser une charge à la surface ou à l'intérieur d'une météorite menaçante. Mais cette option fait la *quasi* unanimité contre elle, l'argument décisif étant qu'une déflagration engendrerait de très nombreux morceaux, lesquels seraient tout aussi dangereux que l'astéroïde intact, voire beaucoup plus. Une fragmentation de l'objet ne diminuerait pas l'énergie totale de celui-ci et l'atmosphère serait tout autant réchauffée. Et sur une grande partie de la Terre, les conséquences climatiques pourraient être pires. De plus, les fragments provoqueraient de plus petites explosions, mais celles-ci seraient multipliées et rien ne dit qu'il y aurait moins de dégâts. Une variante récente proposée par la NASA est celle de l'onde de choc atomique. Certains scientifiques (NASA, 2007) considèrent que l'onde de choc d'une explosion nucléaire déclenchée à distance d'un corps de grande taille serait de 10 à 100 fois plus efficace que toute autre méthode non nucléaire pour dévier une trajectoire dangereuse. En fait, beaucoup d'experts sont très réticents vis-à-vis de ce type de parade qui pose par ailleurs la question du respect des traités internationaux sur les engins nucléaires. Une autre solution est celle de l'impact cinétique. Dans cette technique, sur laquelle travaille l'Agence Spatiale Européenne (ESA), un projectile non explosif percute la surface d'un astre de petite taille pour espérer créer une légère déviation de son orbite qui finirait, sur une période de plusieurs années, par écarter sa course de la Terre. Ce projet, défendu par la Fondation B612 (fondation américaine ayant pour but de trouver un moyen de dévier un as-

Degrés	Effets
0 ou « zone blanche »	Aucune chance de toucher la Terre
1 ou « zone verte »	Probabilité infime de collision
2	Probabilité très infime de collision
3 ou « zone jaune »	Probabilité infime de collision
4	Probabilité très faible d'impac
5	Probabilité d'impact
6 ou « zone orange »	Probabilité moyenne d'impact
7	Probabilité forte d'impact
8	Collision certaine et dégâts locaux équivalents à un séisme
9 ou « zone rouge »	Dégâts régionaux (au sens planétaire)
10	Impact avec extinction massive des espèces

Tab. 4 – Echelle de Turin.

Tab. 4 – The Torino scale.

téroïde géocroiseur avant 2015), semble assez avancé. La mission Don Quichotte (Mission d'investigation et de caractérisation géophysique de l'ESA sur les astéroïdes géocroiseurs, et expérience technologique de déviation d'un de ces objets) est la première étape du développement d'un système de protection de la Terre contre les impacts de NEO (Near Earth Objects). La mission a pour but de tester le concept et les procédés technologiques sur un astéroïde inoffensif, dans l'attente d'une autre mission « en direct » à l'avenir. Une autre encore est la poussée lente. Toutes sortes de techniques (plus ou moins réalistes et coûteuses) ont été proposées, qui vont du remorqueur cosmique au tir laser, en passant par des miroirs ou de la peinture noire répandue sur l'objet pour modifier la pression de radiation exercée par les rayons solaires. Enfin vient le tracteur gravitationnel. Ce procédé consiste à placer un vaisseau massif près de l'astéroïde pour le dévier par l'effet d'attraction gravitationnelle. Cependant, cette technique ne pourrait éventuellement être efficace que sur une très longue période.

Conclusion

Le surcroît d'intérêt manifesté au cours de la dernière décennie pour les 230 impacts et astroblèmes est, scientifiquement, pleinement justifié. Ces impacts sont soupçonnés d'être à l'origine de grands bouleversements paléo-environnementaux et climatiques ayant conduit à plusieurs extinctions de masse dans le passé. Leur rôle quant à l'ordon-

nancement de nombreuses structures géologiques est de plus en plus soupçonné. La curiosité de nos contemporains, et particulièrement des plus jeunes, pour l'espace ne se dément pas tandis qu'une activité économique non négligeable s'est développée autour. Enfin, il serait nécessaire de consacrer des ressources importantes aux programmes d'observation des astéroïdes susceptibles de croiser un jour l'orbite terrestre comme le programme international baptisé *Spaceguard Survey*. Plus tôt l'humanité connaîtra la trajectoire de ces objets géocroiseurs, plus elle aura de temps pour intervenir.

Remerciements

Aux deux relecteurs pour leurs remarques pertinentes et constructives. A Craig Watson et Sarah Powell pour la correction et l'édition du texte en anglais.

Références

- Alvarez W., Asaro F. (1990)** – An Extraterrestrial Impact. *Scientific American* 264, 42.
- Arp G. (2006)** – Sediments of the Ries Crater Lake (Miocene, Southern Germany). In *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, band 45, Hannover.
- Auly T., Pellegrin J.-C. (2007)** – Astéroïdes terrestres et dérive des continents : essai de cartographie chronologique. *Bulletin des Travaux du LGPA* (université Bordeaux 3), 25, 51-67.
- Baines K.H., Pope K.O., Ocampo A.C., Ivanov B.A. (1995)** – Climatic change at the K/T boundary: Atmospheric effects of the Chicxulub impact. *Geological Society of America*, Annual meeting, A-349.
- Barringer D.M. (1905)** – Coon Mountain and its crater. *Proceedings*, Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 57, 861-886.
- Bralower T.J., Paull C.K., Leckie R.M. (1998)** – The Cretaceous-Tertiary boundary cocktail: Chicxulub impact triggers margin collapse and extensive sediment gravity flows. *Geology* 26, 331-334.
- Carion A. (1997)** – *Les météorites et leurs impacts*. Masson, Collection Hors collection, Paris, 232 p.
- Chamberlin A.B. (2006)** – Near-earth asteroid discovery statistics, <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/archive.html>.
- Combes M.-A. (2007)** – *La Terre bombardée*. Editions France-Empire, Paris, 440 p.
- Degeai J.-P., Peulvast J.-P. (2006)** – Calcul de l'érosion à long terme en région de socle autour de grands astéroïdes du Québec et de France. *Géographie physique et Quaternaire* 60, 2, 131-148.
- Dence M.R. (1973)** – Dimensional analysis of impact structures. *Meteoritics* 8, 343-344.
- Dietz R.S. (1961)** – Astéroïdes. *Scientific American* 205, 50-58.
- Ernst K. (1984a)** – Un modèle pesanteur-dérivé pour le cratère d'impact de Steinheim. *Geologischen Rundschau* 73, 483-498 (en allemand).
- Ernst K. (1984b)** – Der Magnetfeld-Messungen im Gebiet de neuer de v.K. Ergebnisse Impakt-Struktur Steinheimer Becken, *Jber. Geol. Oberrhein. Jujubes* 66, 153-160.
- French B.M. (1998)** – *Traces of Catastrophe : a handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures*. LPI contr. n° 954, Lunar and Planetary Inst. Houston, 120 p.
- Gehrels T. (Ed.) (1994)** – *Hazards due to Comets and Asteroids*. University of Arizona Press, Tucson, 1300 p.
- Giorgini J., Ostro S.J., Benner L.A.M., Chodas P.W., Chesley S.R., Hudson R.S., Nolan M.C., Klemola A.R., Standish E.M., Jurgens R.F., Rose R., Chamberlin A.B., Yeomans D.K., Margot J.L. (2002)** – Physical Limits of Collision Prediction. *Science* 296, 132-136.
- Grieve R. (1995)** – Les cratères de météorites. *Dossier Pour la science*, juin 1995.
- Hérault-Pina M. (1996)** – *Le karst du Yucatan. Pays des Mayas*. Presses Universitaires de Bordeaux, Collection Scieteren, Bordeaux, 284 p.
- Hildebrand A.R., Pilkington M., Connors M., Ortiz-Aleman C., Chavez R.E. (1995)** – Size and structure of the Chicxulub crater revealed by horizontal gravity gradients and cenotes. *Nature* 376, 415-417.
- Hodge P. (1994)** – *Meteor craters and impact structures*. Cambridge University Press, Cambridge, 124 p.
- Hoffmann V., Rösler W., Patzelt A., Raeymaecker B., Van Espen P. (2005)** – Characterization of a small crater-like structure in southeast Bavaria, Germany. *Meteoritics and Planetary Science* 40, A129.
- Krinov E.-L. (1963)** – *In The solar system*. University Chicago Press, Chicago, volume 4, 183-187, 189-207, 208-234.
- Lambert P. (1977)** – *La structure d'impact de météorite géante de Rochechouart*. Thèse de doctorat de 3^e cycle, université Paris-Sud, centre d'Orsay.
- Mashchak M.S., Naumov M.V. (1996)** – The Suavjarvi Structure: An early proterozoic Impact site on the fennoscandian shield. *Lunar and Planetary Science XXVII*, 825-826.
- Masaitis V.L., Sharpton V.L. (1994)** – Large meteorite impacts and planetary evolution. *The Geological Society of America*, Special Paper 293, 153-162.
- Melosh H.J. (1989)** – *Impact Cratering. A geologic Process*. Oxford Monogr. Geol. Geophys. 11, Oxford, 245 p.
- Melosh H.J., Ivanov B.A. (1998)** – Impact crater collapse. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 27, 385-415.
- Monod T. (1972)** – *Astéroïdes et cratères météoritiques*. La Pléiade, T1, Géologie, Gallimard, 287-330.
- Müller S., Ansoerge J., Emter D., Greiner G. (1969)** – Mesures géomagnétiques dans la région du bassin de Steinheim, *Ober-rheinische Geologische Abhandlungen*, 18, 33-46 (en allemand).
- NASA (2007)** – *Near-Earth Object survey and deflection analysis of alternatives*. Report to Congress. National aeronautics and Space Administration, March 2007, 27 p.
- Orton G.S., A'Hearn M., Baines K. (1995)** – Collision of comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter observed by the NASA infrared telescope facility. *Science* 267, 1277-1282.
- Osinski G.R. (2004)** – Impact melt rocks from the Ries impact structure, Germany: An origin as impact melt flows? *Earth and Planetary Science Letters* 226, 3-4, 529-543.
- Paillou P., El Barkooky A., Barakat A., Malezieux J.-M., Reynaud B., Dejax J., Heggy E. (2004)** – *Discovery of the largest*

impact crater field on the Earth in the Gif Kebir region, Egypt. Comptes Rendus Geosciences 336, 1491-1500.

Pilkington M., Grieve R.A.F. (1992) – The Geophysical Signature of Terrestrial Impact Craters. *Reviews of Geophysics* 30, 161-181.

Reiff W. (Ed.) (1979) – Guide du cratère d'impact du bassin de Steinheim. *Geologische Landesamt Baden-Wurtemberg* (en allemand).

Rocchia R., Robin E. (2002) – Catastrophes cosmiques et . *Pour La Science*, 300, 24-27.

Salomon J.-N., Auly T. (2007) – Impacts de météorites et astrolèmes : considérations géomorphologiques et géographiques générales. *Bulletin des Travaux du LGPA* (université Bordeaux 3), 25, 13-50 + CD Rom.

Skala R., Rohovec J. (1998) – Spectroscopies à résonance magnétique nucléaire des calcaires choqués de la météorite du cratère de Steinheim. *Science Planétaire*, 33, 4, A146-A147, supplément.

Sites Internet utilisés comme référentiel de structures terrestres d'impact

www.unb.ca/passc/ImpactDatabase

www.somerikko.net

Article reçu le 31 janvier 2008, accepté le 15 septembre 2009.