

ÉNIGME

AU JARDIN DES PLANTES !

*Jean-Louis Fromont, membre de la SAGA,
animateur de la Commission du Quaternaire.*



Figure 1. Le dispositif au pied de la Grande serre du Jardin des Plantes.

Par un beau matin de la fin de cet hiver 2017 qui annonçait déjà le printemps, alors que je traversais l'Esplanade Milne Edwards*, le vaste espace situé le long de la Grande Galerie du Jardin des Plantes, j'aperçois une sorte de pierre dressée, tel un menhir, contre le mur de meulière situé au pied de la serre de l'Histoire des plantes, l'une des deux grandes serres du Jardin. Devant, un grand disque horizontal blanchâtre est dessiné au sol, comprenant une couronne plus foncée et incrusté de sortes de clous disposés en cercles concentriques, à l'exception de quelques importuns dérogeant à cette règle (figure 1).

Plusieurs images se télescopent : 2001, *l'Odyssée de l'espace*?... mais le monolithe du film de Stanley Kubrick était totalement noir et de bien plus grande dimension ; *une zone balisée pour l'atterrissage des hélicoptères*?... peu vraisemblable en cet endroit ; *une proposition de lieu d'atterrissage adressée à une*

hypothétique civilisation extra-terrestre ?... tels les précédents messages envoyés dans l'espace ?...

Stop au délire ! Réfléchissons. Le monolithe, lui, est forcément apparu récemment car je parcours souvent le Jardin et sa présence n'aurait pu m'échapper. Pas le moindre panneau en vue, aucune indication ou explication aux alentours. Les questions posées à quelques personnes du MNHN et de la SAGA restent sans réponse, soit ils n'ont rien vu, soit ils ignorent le dessin qui se cache derrière cette installation.

Reprenons donc calmement en commençant par une observation rapprochée aussi scientifique et rationnelle que possible de la roche (figure 2).

Le parallélépipède mesure environ 1,80 m de haut sur un mètre de large et 15 cm d'épaisseur ; il est posé sur un socle et solidaire du mur de meulière grâce à quatre pattes métalliques. On distingue des sortes de patatoïdes gris clair à ocre clair (figure 3), de dimen-



Figure 2. La roche énigmatique. Tombée du ciel ?

sions variables, ennoyés dans un fond noirâtre moucheté de points de même couleur que les patatoïdes ; cette roche apparaît donc comme une sorte de conglomérat.

Les recherches

Le géologue amateur que je suis consulte alors son *Dictionnaire de Géologie* (Foucault et al., 2014). « Un conglomérat est une roche sédimentaire détritique formée pour 50 % au moins de débris de roches de dimension supérieure à 2 mm liés par un ciment ». Ce terme regroupe :



Figure 3. La roche vue de plus près.

- « les brèches sédimentaires à éléments en majorité anguleux », ce qui n'est pas le cas ici car les éléments sont arrondis ;
- « les poudingues à éléments arrondis ou galets » ce qui semble être notre cas.

Et le dictionnaire renvoie à la planche 5, photo 2 (figure 4).

« Poudingue » me renvoie à la même planche et, pour les brèches, on distingue trois types différents (sédimentaire, tectonique, volcanique) dont les éléments sont anguleux. Impossible pour moi d'aller plus loin mais il me restait un joker : notre collègue Annie Cornée, toujours disponible et qui connaît bien le Muséum.

Elle me dit avoir également été intriguée par cette roche apparue mystérieusement dans le Jardin et dont la structure lui rappelle celle d'un échantillon de roche qu'elle me montre (figure 5). Cette roche provient de Rochechouart, coquette sous-préfecture de

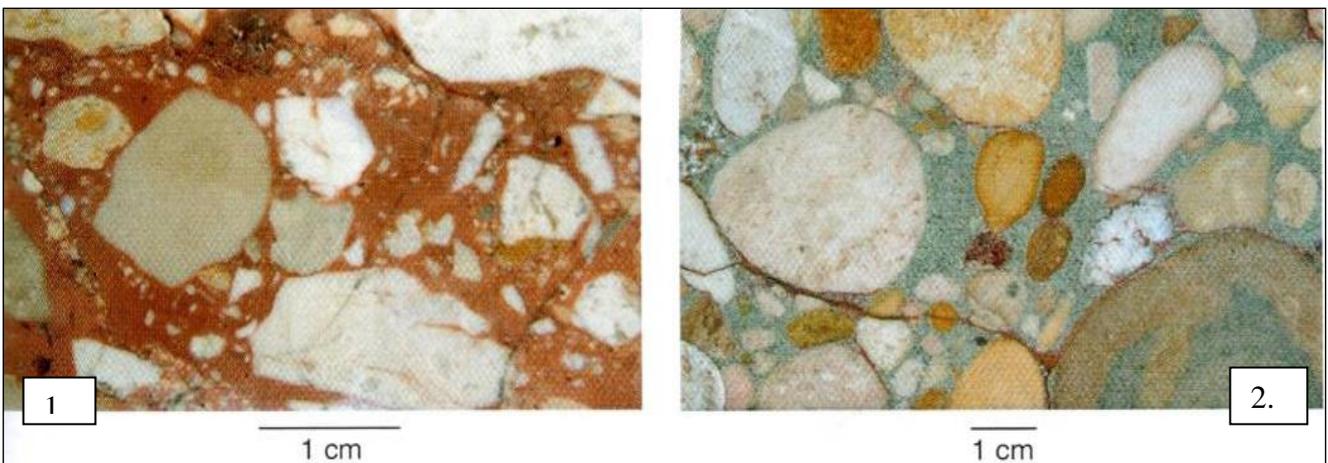


Figure 4. Planche 5, photo 2 de Foucault et al. (2014) qui fournit deux exemples : 1, une brèche. 2, un poudingue.

la Haute-Vienne (comme on dit dans les dépliants touristiques), située dans le Limousin. Cette ville, outre le fait que son église possède une flèche hélicoïdale, est surtout célèbre pour être le lieu où est tombé un très gros astéroïde il y a environ 214 millions d'années.



Figure 5. Un type de brèche de l'astroblème de Rochechouart (longueur : 14 cm).

Cette roche est aujourd'hui bien identifiée comme une brèche d'impact, également nommée impactite, et ressemble bien à celle observée. La taille des éléments, les couleurs sont différentes mais la structure semble la même ; notre roche mystère serait-elle une impactite ?

Nous effectuons une recherche de photos de brèches d'impact sur Internet et parmi les photos proposées, nous trouvons celle de la figure 6 qui ressemble vraiment très fortement à notre roche !

Et un lien Internet nous permet d'accéder au document : « Les brèches d'impact pseudotachylitiques (impact melt rock) de l'astroblème Vredefort, secteur



Figure 6. Les brèches d'impact pseudotachylitiques. (Photo P. Thomas).

À propos de Rochechouart

On pourrait penser que Rochechouart se nomme ainsi par analogie à « Roche-choir », puisque c'est le lieu où est tombée une roche, mais il n'en est rien. Le premier élément « Roche » représente la forme francisée du nord occitan *ròcha*, qui désigne à l'origine une montagne ou une simple butte rocheuse, et de « cavardus », nom d'un seigneur qui aurait fortifié la place vers l'an 1000.

de Parys, Afrique du Sud », de Pierre Thomas (ENS Lyon, laboratoire de géologie).

Le doute ne paraît plus possible, une recherche complémentaire sur le site du MNHN confirme notre hypothèse, la roche provient bien de l'astroblème (cratère d'impact créé par une météorite) de Vredefort, en Afrique du Sud, et fait partie d'un projet mené par Brigitte Zanda, MNHN, sur lequel nous reviendrons plus tard.

Localisation

Jusqu'aux années 1950, début de « l'ère spatiale », les cratères d'impact, sauf exceptions, étaient considérés comme des phénomènes volcaniques. Les progrès apportés par les études spatiales, le développement de l'imagerie géologique, satellitaire ou géophysique, ont permis aux géologues de rectifier peu à peu les anciennes confusions, tout en multipliant les nouvelles découvertes et en améliorant l'étude des cratères.

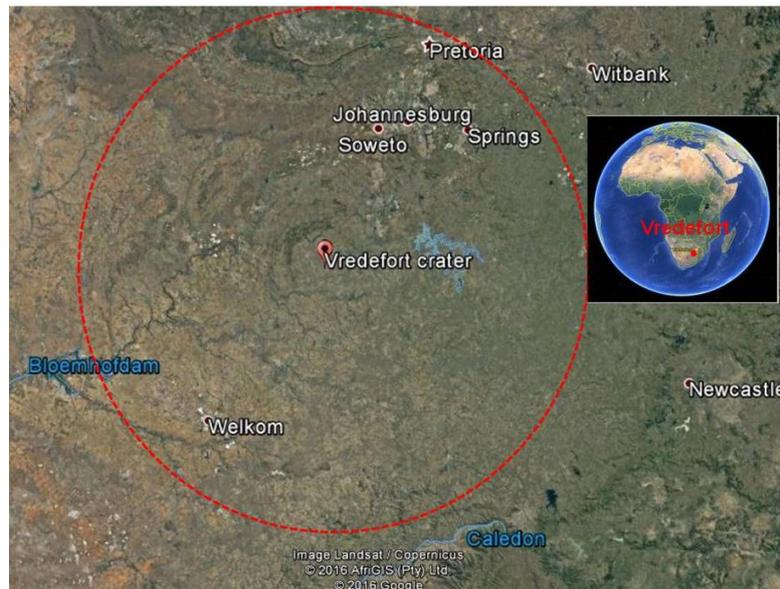


Figure 7. Localisation de Vredefort ; le cercle rouge a un diamètre approximatif de 300 km.

Située au sud de Johannesburg, capitale de la province de Gauteng, en Afrique du Sud, la structure circulaire qui se trouve autour du village de Vredefort

a longtemps intrigué les géologues. Il est maintenant admis qu'elle se trouve au centre de la structure d'impact d'une météorite. C'était le cratère de tous les records avec ses 300 km de diamètre et son âge estimé à 2,023 milliards d'années, le plus grand et le plus ancien. Depuis, la découverte d'un cratère à Maniitsoq, au Groenland, âgé de 3 milliards d'années, et dont le diamètre dépasse 500 km, semble vouloir lui dérober la première place.

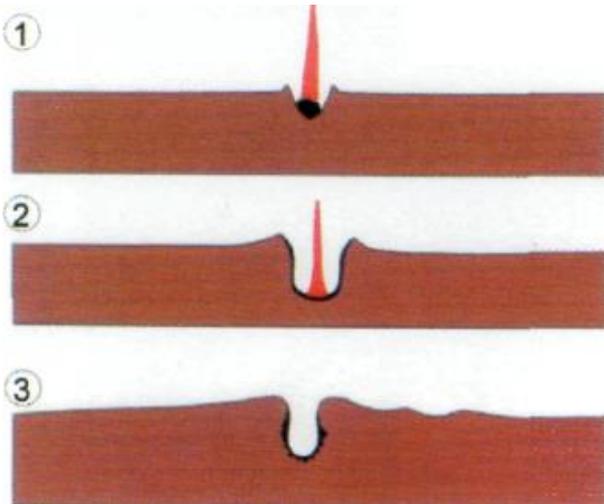
Scénario d'un impact

Lorsqu'un corps extraterrestre massif heurte la Terre, il est à peine ralenti par l'atmosphère et va engendrer un cratère d'impact, une immense cavité soufflée par l'énergie apportée par le bolide et liée à son incroyable vitesse (70 000 km/h !). Les roches qui tapissent le fond du cratère sont concassées et fondues localement, formant une pâte de couleur foncée entre les blocs de l'encaissant.

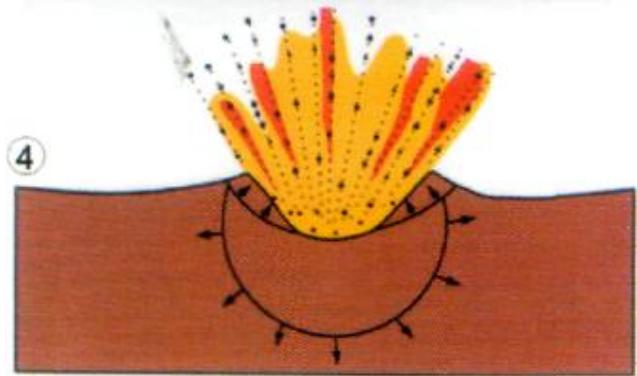
Mais voyons plus en détail les différentes étapes de la formation d'un cratère d'impact. Tout d'abord il faut distinguer deux principaux types de cratères en fonction de la dimension du projectile et de la nature du terrain :

- les cratères simples, en forme de bol, d'un diamètre de 2 à 4 km ;
- les cratères d'impact complexes, constitués d'un dôme central entouré d'un anneau, et d'un diamètre de plusieurs centaines de kilomètres.

Les cratères simples



1 - 2 - 3 - Lorsque le projectile entre en contact avec la surface de la terre, la **phase de contact et compression** commence. Le projectile pénètre dans la croûte terrestre en créant un orifice égal à celui de son propre diamètre puis il explose. L'énergie cinétique qu'il avait acquise se transforme en une onde de compression appelée aussi onde de choc.



4 - La pression exercée sur la roche par l'onde de choc à proximité du point d'explosion s'accroît instantanément pour atteindre une valeur de plusieurs centaines de Gigapascals (Gpa), soit plusieurs centaines de milliers d'atmosphères (un Gpa = 10 Kbar = 10 000 atmosphères).

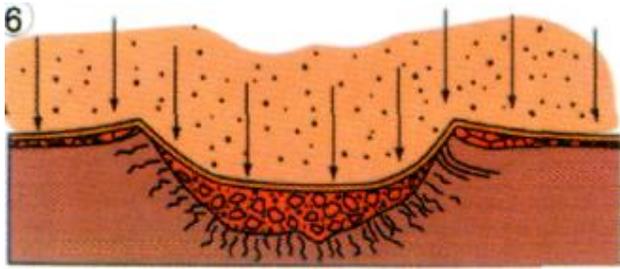
Dans le même temps, la température augmente à une vitesse vertigineuse pour atteindre plusieurs dizaines de milliers de degrés, soit une température de l'ordre de celle que l'on trouve à la surface du Soleil. Le projectile, en même temps qu'un volume à peu près équivalent du socle, sont vaporisés et éjectés créant ainsi un gigantesque panache qui s'élève à une altitude pouvant atteindre 100 km.

La taille du cratère augmente immédiatement et le matériel est projeté à l'extérieur puis retombe en partie dans le cratère mais aussi jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres alentour. Il est composé de roches de toutes dimensions et de roches fondues. C'est la **phase d'excavation**.



5 - L'éjection d'éléments de la roche cible se poursuit. Le socle du cratère est déformé, la roche se fissure, se fragmente et fond, au fur et à mesure que l'onde de compression se propage. Puis son énergie diminue et sa puissance décroît en même temps qu'elle s'éloigne du point d'impact.

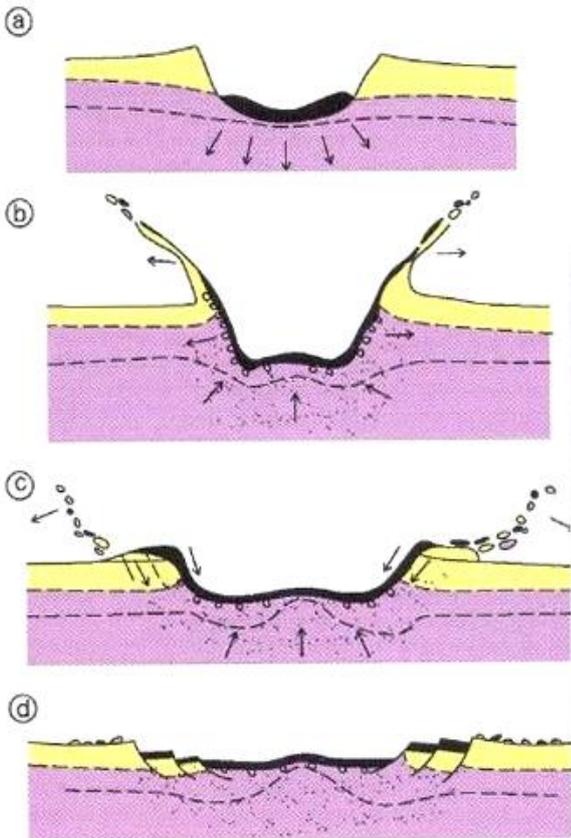
La déformation de la roche diminue jusqu'au moment où la solidité de la roche dépasse la force de l'onde de compression, on ne détecte plus alors de déformation du socle.



6 - Les éjectas de toute sorte retombent et se déposent au fond et autour du cratère. La roche encaissante se réajuste et fond localement. Le liquide s'infiltré le long des fissures puis se solidifie rapidement et engendre un verre, qui constitue la pâte située entre les blocs de la roche du socle.

Les cratères complexes

Lorsque le projectile est un astéroïde d'un à plusieurs kilomètres de diamètre, une telle masse n'est pas freinée par l'atmosphère et impacte le sol à vitesse cosmique, soit plusieurs dizaines de kilomètres par seconde. En conséquence, le corps céleste est volatilisé ou très dilué dans les roches terrestres vaporisées et fondues par l'impact, il ne reste aucune trace de l'astéroïde.



a - Dans le cas des cratères complexes, les phases de contact et de compression sont identiques à celles du cratère simple alors que la phase d'excavation

peut durer quelques minutes et croît en fonction de la dimension du projectile. La taille du cratère augmente et le socle est fissuré, concassé et fond localement, prend l'aspect d'une pâte noire qui s'écoule entre les blocs et dans les fissures, puis se solidifie sous forme d'un verre.

b - Le matériel qui compose le bord du cratère est éjecté, accroissant ainsi le diamètre du cratère. La roche qui compose le centre du cratère, qui a été fortement compressée, subit alors un rebond qui fait remonter la partie centrale de la structure. Le même phénomène de rebond peut être observé à la surface de l'eau lorsqu'une goutte tombe (voir vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=B8hhpA5rW9M>)

c - La partie centrale s'effondre et se stabilise pour former une zone surélevée sur le fond du cratère. Les parois du cratère devenues instables, une grande quantité des roches qui les composent retombent à l'intérieur de la structure d'impact, augmentant encore la taille de celle-ci.

d - À la fin de la phase de modification, la structure d'impact devait apparaître ainsi. Les lèvres du cratère en s'effondrant ont formé des terrasses et le fond présente un bombement, ou dôme, au centre de la structure d'impact. L'ensemble des différentes phases ne dure pas plus de quelques minutes.

Dans le cas de Vredefort, le diamètre du cratère initial est estimé à 90 km et on pense que l'astéroïde a pénétré la croûte terrestre jusqu'à une profondeur de 20 km, alors que l'épaisseur moyenne de la croûte est de l'ordre de 30 km. D'après les différentes estimations, le projectile devait avoir un diamètre d'environ 10 à 20 km. L'explosion a projeté des matières fondues et des blocs du socle jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres à la ronde. La roche encaissante, dont la composition est proche d'un granite, a fondu localement, le liquide s'est infiltré le long des fissures puis il s'est solidifié rapidement et a engendré un verre. C'est ce verre qui constitue la pâte noire, visible entre les blocs de couleur ocre-gris-rose, sur la roche exposée au Jardin des Plantes (figure 3).

L'astroblème aujourd'hui

Bien évidemment, plus de deux milliards d'années après qu'un objet céleste d'un diamètre de 10 à 20 km a percuté la Terre, l'érosion et la tectonique ont effacé la majorité des traces du cratère et des éjectas. La structure de Vredefort proprement dite est réduite au piton central, un dôme d'une cinquantaine de kilomètres de diamètre et à quelques ondulations à peine perceptibles sur le terrain.

Seule sa moitié nord affleure, mais la totalité de la structure est assez bien connue par géophysique et sondages.

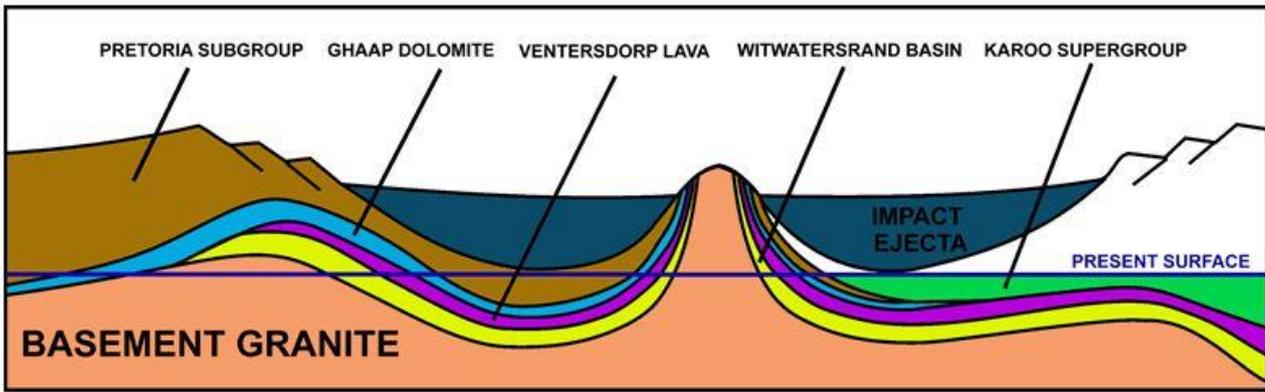


Figure 8. Coupe schématique de l'astroblème de Vredefort après l'impact.
(Source : Reimold W.U. & Gibson R.L. 2005. Meteorite impact ! The Vredefort structure).

Le cœur du dôme est composé de granitoïdes archéens, âgés d'environ 3,070 milliards d'années. Au nord, les reliefs en arc de cercle sont des sédiments du Supergroupe du Witswatersrand, très fracturés et verticalisés lors de l'impact.

Le schéma de la figure 8 est une représentation de la coupe de l'astroblème telle qu'il devait être après les différentes phases consécutives à l'impact et telle qu'elle apparaît maintenant. La ligne bleue horizontale (notée *present surface*) indique le niveau actuel du sol.

Le montage photographique de la figure 9 vient confirmer la coupe schématique précédente. La photo de gauche permet de distinguer nettement les reliefs résiduels des structures en anneau de l'astroblème qui sont particulièrement visibles dans sa partie nord/nord-ouest ; et la photo de droite précise le relief en indiquant l'altitude à l'aide de couleurs.

C'est seulement depuis une trentaine d'années que la structure de Vredefort est considérée comme une structure d'impact par la communauté scientifique. Mais, avant de retracer l'historique de cette reconnaissance, nous devons d'abord faire un détour pour enrichir notre connaissance et notre vocabulaire.

Le métamorphisme d'impact

Nous avons eu l'occasion d'étudier différents types de métamorphisme grâce à Dominique Rossier, animateur de la Commission de volcanisme. Le phénomène que nous étudions ici, l'impact d'une météorite de très grande taille à la surface de la Terre, est différent et caractérisé par :

1. de très hautes températures, plusieurs milliers de degrés proches de la température rencontrée à la surface du Soleil ;
2. de très importantes pressions, de 50 à plus de 100 giga pascals (GPa) soit un million de fois la pression atmosphérique et proches des pressions qui règnent au centre de la Terre ;
3. le tout dans un temps extrêmement bref, surtout pour la pression, le temps de compression n'étant que de quelques secondes.

La grande rapidité du phénomène ne permet pas d'arriver à des équilibres thermochimiques et en conséquence à la cristallisation de minéraux de métamorphisme comme c'est le cas au cours d'un métamor-

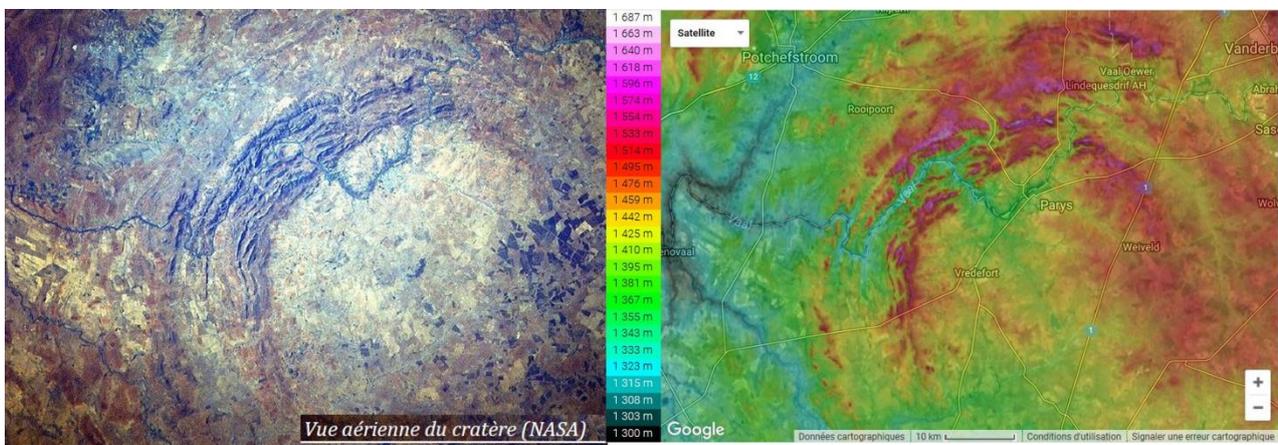


Figure 9. Deux vues aériennes de l'astroblème de Vredefort. À gauche, le relief (NASA) ; à droite, la vue interprétée, la couleur varie en fonction de l'altitude (Google Earth).

phisme de contact et, a fortiori, au cours d'événements tectoniques ou métamorphiques, dont le processus se déroule sur des dizaines de millions d'années, donc à une vitesse bien plus lente.

Le diagramme P/T (pression/température) de la figure 10 a été établi en prenant notamment en compte des observations et des mesures effectuées dans les chambres d'essais nucléaires souterrains et après des tirs au canon sur des falaises de granite, réalisés aux États-Unis par la marine américaine. Les données P et T sont représentées sur une échelle logarithmique.

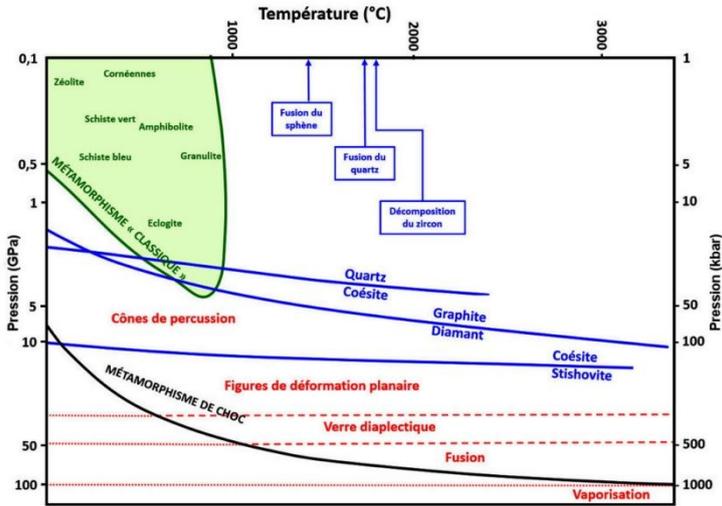


Figure 10. Diagramme P/T (Droits réservés © 1998 D'après B.M. French, modifié P. Thomas).

Comme vous pouvez le constater sur ce diagramme, les conditions rencontrées lors de l'impact sont très au-delà de celles décrites pour le métamorphisme classique.

Les principaux éléments permettant le diagnostic de ces hautes pressions et températures sont les suivants :

- le quartz métamorphisé en coésite ;
- le graphite en diamant ;
- la coésite en stishovite, deux formes de silice de très haute pression ;
- les cônes de percussion (en anglais *shatter cones*) ;
- les figures de déformations planaires (en anglais *PDFs, planar deformation features*) ;
- le verre diaplectique ;
- la fusion ;
- la vaporisation.

Coésite

La coésite, moins dense que la stishovite, mais nettement plus dense que le quartz, se forme aux dépens de celui-ci à 50 GPa, ou plus, en fonction de la température ; sa présence peut donc permettre de poser l'hypothèse d'un éventuel impact.

Stishovite

La stishovite est l'oxyde de silicium le plus dense connu. Elle se forme, à partir du quartz, uniquement à de très fortes pressions que l'on peut retrouver sur terre à des profondeurs dépassant souvent 500 km. Cependant, il semble que la stishovite formée en profondeur se retransforme en quartz avant d'atteindre de manière naturelle la surface. La présence de stishovite en surface est donc un excellent indice d'impact météoritique ou d'essai atomique souterrain.

Roches fondues

On trouve un pourcentage significatif de roche fondue dans les brèches. Mais on en trouve aussi dans le substratum, où cette roche fondue s'insinue dans les fractures préexistantes ou consécutives à l'impact. Ces veines faites de roche fondue sont de couleur très sombre, une roche qui ressemble à de la tachylite (verre basaltique), d'où leur nom de *pseudotachylite*.

Verres diaplectiques

Un verre diaplectique se forme par friction à haute pression, sans passer par la fusion. On peut le trouver en masse au niveau d'une faille, mais aussi dans des cristaux minéraux, au niveau des pseudo-clivages.

Cônes de percussion

La genèse des cônes de percussion nécessite une pression de 5 à 10 GPa (de 50 à 100 kbar), de sorte que ce sont les premiers symptômes spécifiques du métamorphisme de choc en ce qui concerne la pression. Leur formation est représentée dans le schéma de la figure 11.

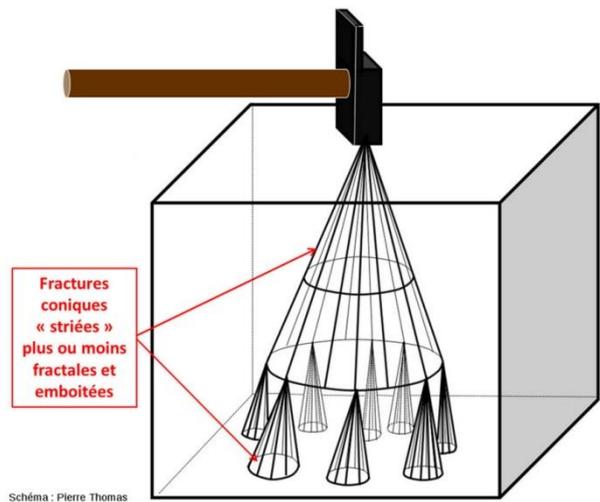


Figure 11. Formation des cônes de percussion (*shatter cones*). (© 2013. P. Thomas).

L'impact de météorite a été figuré ici par un coup de marteau. Un premier cône de percussion (*shatter cone* d'ordre 1) se développe juste sous la zone de choc. Sur la fissure conique du *shatter cone* d'ordre 1 se développent des *shatter cones* d'ordre 2, sur lesquels peuvent se développer des cônes d'ordre 3, puis 4... non représentés ici.

La présence de cônes de percussion est un indice très fort de la présence d'un impact de météorite quand l'érosion en a effacé la morphologie.

Éléments de déformation planaire

(en anglais *PDFs, planar deformation features*)

L'apparition d'éléments de déformation planaire dans des grains minéraux nécessite une pression de 10 à 35 GPa (de 100 à 350 kbar).

Il s'agit de plans de dislocation très fins et très rapprochés, développés notamment dans des cristaux de quartz.

Vaporisation de minéraux et de roches

La vaporisation de minéraux et de roches se produit quand $P > 100 \text{ GPa}$ et $T > 2\,500 \text{ °C}$ (figure 10). Par définition, elle laisse peu de traces.

Répartition du métamorphisme

Quelle est la répartition de ce métamorphisme au sein du cratère d'impact ? C'est la question à laquelle répond le diagramme de la figure 12 dans le cas d'un cratère d'un diamètre de 20 km. Pour mémoire, il faut multiplier les distances par 5 ou 10 dans le cas de Vredefort.

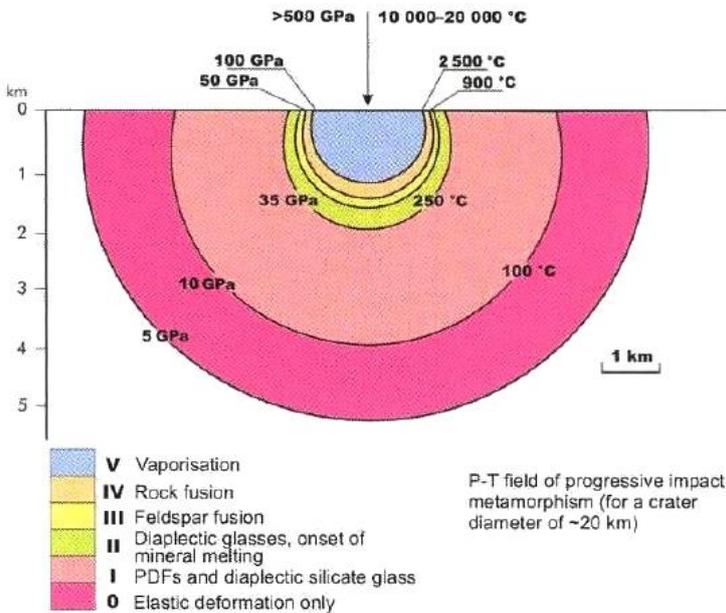


Figure 12. Transformations du substrat lors d'un impact créant un cratère de 20 km de diamètre (W.U. Reimold et R.L. Gibson).

- V Vaporisation** : le projectile, ainsi que toute cette zone de l'encaissant proche de l'impact, sont vaporisés.
- IV Rock fusion** : les roches environnantes fondent.
- III Feldspar fusion** : fusion de certains minéraux.
- II Diaplectic glasses, onset mineral melting** : transformation de minéraux en verre diaplectique.
- I PDFs and diaplectic silicate glass** : apparition d'éléments de déformation planaire.
- 0 Elastic deformation only** : fracturation et « bréchification ».

Bref historique des recherches

Le premier rapport rédigé à propos du Dôme de Vredefort est l'œuvre de G.W. Stow, en 1878 ; alors qu'il était mandaté pour rechercher des ressources d'énergie dans la région, il décrit des roches fortement altérées qu'il attribue à une origine volcanique. C'est seulement dans les années 1920 qu'une étude géologique réalisée par L.T. Nel et A.L. Hall délivre une description détaillée de la structure et conclut qu'elle est probablement liée à des explosions gazeuses ; puis, cinq ans plus tard, A.L. Hall remarque les structures en anneaux qui évoquent une caldera ou les cratères observés sur la Lune. En 1937, J.D. Boon et C.C. Albritton suggèrent qu'il peut s'agir de la conséquence de l'impact d'une météorite. R. Hargraves, en 1961, a observé les *shatter cones* qui évoquent un impact d'une très grande magnitude. Mais la communauté géologique sud-africaine reste très réfractaire à cette hypothèse. Pour finir, en 1965, N. Carter découvre des déformations dans des quartz qui peuvent trouver leur origine uniquement dans d'énormes pressions subies par les quartz et qui ne peuvent être rencontrées dans des processus métamorphiques ou tectoniques classiques. En 1990, Mcarthy met en évidence des ondulations tectoniques ayant le Dôme pour centre et rayonnant jusqu'à une distance de 150 km. La description de l'astroblème est alors complète. Cela permet de qualifier la région de « *ring basin* », soit la morphologie caractéristique des plus grands impacts. Ces dernières découvertes et quelques autres encore finissent par emporter l'adhésion de la communauté géologique mondiale... et locale.

Les indices d'impact à Vredefort

Maintenant que nous connaissons les principaux éléments caractéristiques de la présence d'un astroblème, allons voir sur place (si j'ose dire).

Le cratère

Comme le montrent les figures 7, 8 et 9, le Dôme de Vredefort se trouve au centre de structures concentriques. La limite externe véritable de la cavité est difficile à déterminer. En effet, à l'extérieur de la cavité directement creusée par l'impact, des phénomènes d'effondrement, des failles normales... affectent la bordure externe du cratère dont les éléments glissent vers son centre, créant des terrasses internes et agrandissant le diamètre apparent de la dépression finale. Il n'y a pas de consensus sur les dimensions véritables de la cavité initiale par rapport aux dimensions de la cavité terminale, elle-même très érodée et localisée très imparfaitement. On peut

proposer que le cratère initial à Vredefort avait un diamètre de 150 à 200 km, pour une cavité terminale d'un diamètre d'environ 300 km.

Les pseudotachylites

Les pseudotachylites, qui sont à l'origine de cet article, affleurent en de nombreux endroits comme l'indique le diagramme de la figure 13 qui recense les différentes occurrences des pseudotachylites, et indique les limites externes de localisation des cônes de percussion et des éléments de déformation planaire.

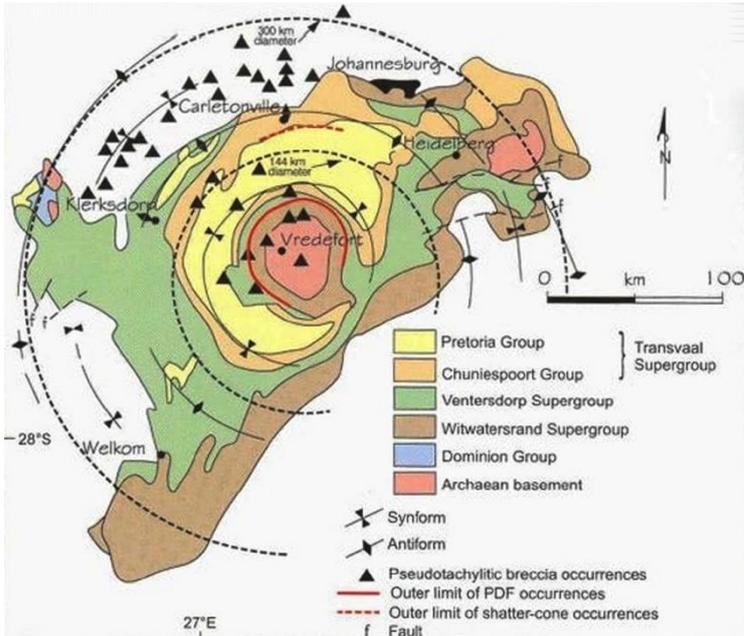


Figure 13. Extension géographique des indices d'impact autour de Vredefort (W.U. Reimold et R.L. Gibson, 2005).

Les affleurements de pseudotachylites sont représentés par les triangles noirs.

Le géologue Pierre Thomas a parcouru le terrain et rapporté de nombreuses photos des lieux où les pseudotachylites sont apparentes en affleurement, dans des brèches ou des carrières. Vous pourrez retrouver ses photos dans les documents cités à la fin de cet article, ils sont disponibles sur Internet. Ces carrières étaient exploitées pour obtenir des roches décoratives ; elles sont effectivement somptueuses comme le montre bien la figure 14.

Cette roche extraordinaire n'a pas de nom bien défini. La partie vitreuse est appelée pseudotachylite, ou verre d'impact, et par extension ce nom est attribué à l'ensemble. Le terme de brèche parfois utilisé n'est pas parfaitement approprié car une brèche a, par définition, une matrice clastique et non pas « magmatique ». Les anglo-saxons parlent d'*impact melt rock* (roche fondue d'impact) en évitant le terme d'*impact breccia* (brèche d'impact).



Figure 14. La carrière de Leeukop proche du Dôme de Vredefort, au nord de Parys (W.U. Reimold et R.L. Gibson, 2005).

Les cônes de percussion (shatter cones)

Une fois encore, Pierre Thomas en a découvert et photographié dans différents endroits et a publié un article à ce sujet : *Les shatter cones de l'astroblème de Vredefort, Afrique du Sud* (voir sources). J'ai retenu cette photo qui est particulièrement explicite (figure 15). La pointe de ces fissures de forme conique indique la direction du point d'impact.

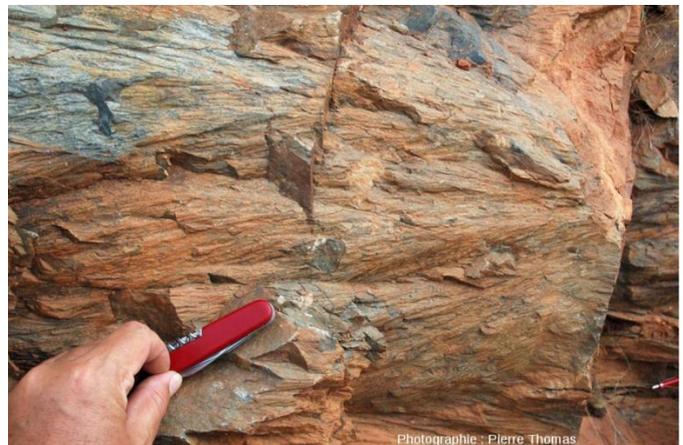


Figure 15. Exemple de cônes de percussion (shatter cones).

Coésite et stishovite

Un géologue suisse, Jacques Martini, qui a résidé en Afrique du Sud durant de nombreuses années, a été intrigué et intéressé par les controverses à propos de l'origine du dôme et des reliefs qui l'entourent (Martini, 2017). Il part du constat suivant, deux preuves manquaient à l'appel : d'une part des fragments du corps céleste et d'autre part deux minéraux qui sont la coésite et la stishovite. Ces deux minéraux sont des formes de silice de très haute pression déjà détectées

dans d'autres astrobloèmes et sont considérées comme des preuves majeures.

En 1977, il repère des affleurements de quartzite qui contiennent de fines traces de pseudotachylite produites lors du passage de l'onde de choc et le long desquelles le quartz a été vitrifié. Il prélève et analyse les échantillons et découvre des traces de coésite et de stishovite. Il rédige un article après sa découverte qui sera publié dans *Nature*, en 1978, et précise les lieux et la nature de ses prélèvements sur une carte géologique du Dôme de Vredefort (figure 16).

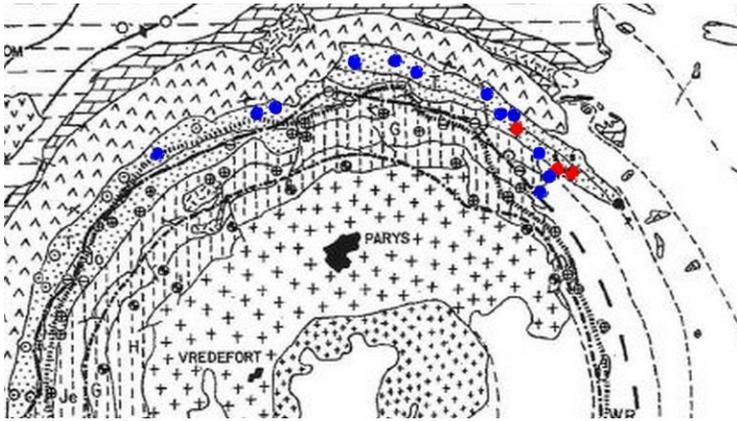


Figure 16. Extrait de la carte de Jacques Martini (2013), modifiée en couleurs. En bleu : développement de quartz fibreux et coésite. En rouge, idem mais avec stishovite en plus. Figures de déformations planaires (PDFs, planar deformation features).

En 1993, Hugues Leroux (université de Lille) fabriqua des lames minces extrêmement fines à partir de prélèvements effectués à Vredefort. L'analyse de ces lames mit en évidence des fractures dans les grains de quartz, récoltés dans la partie centrale du Dôme, et qui se développent uniquement à très haute pression.

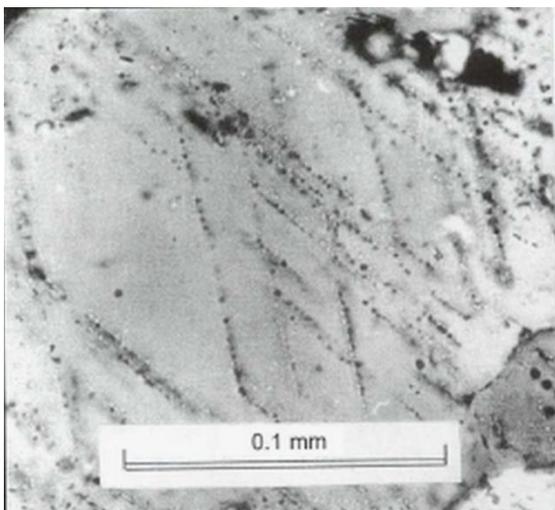


Figure 17. Exemple de microdéformation typique d'un choc dans un grain de quartz en lumière polarisée. (Leroux, 1994).

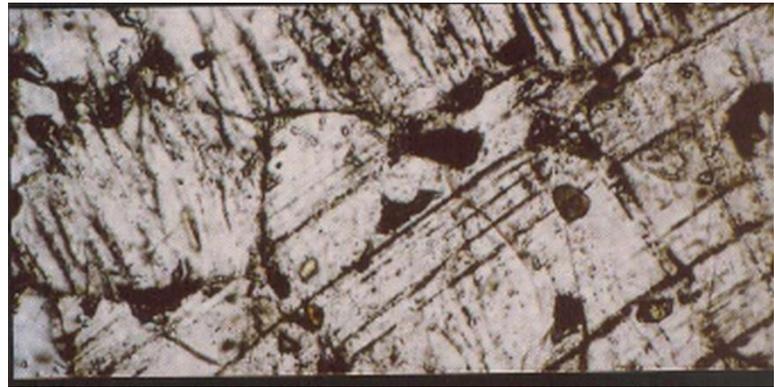


Figure 18. Autre exemple de microdéformation typique d'un choc dans un grain de quartz en lumière polarisée analysée ; taille de l'image : 1,1 mm. (Leroux, 1994).

Osmium

Une question restait sans réponse : pourquoi ne trouve-t-on pas de trace de la nature du projectile dans les roches situées à proximité du point d'impact en dépit des nombreuses analyses effectuées ?

Comme nous l'avons vu précédemment, le projectile, ainsi qu'une masse importante de l'encaissant, se sont volatilisés au moment de l'impact et 2,1 milliards d'années d'érosion ont modifié le site. De plus, il se trouve que la roche cible, un granitoïde archéen, est déjà riche en chrome, cobalt, nickel et iridium, principaux composants des météorites, masquant ainsi toute possibilité de détecter une infime variation liée à la présence de matériel d'origine extraterrestre.

À partir des années 1990, les techniques d'analyse isotopiques de l'osmium (Os) se sont développées. L'osmium est un métal platinoïde lourd, de couleur grise, dur et cassant, possédant de nombreux isotopes. La valeur du rapport $^{188}\text{Os}/^{187}\text{Os}$ est inférieure dans les roches extraterrestres (astéroïdes) à celle que l'on trouve dans les roches de la croûte terrestre. Fort de ce principe, Christian Koeberl (2002) a analysé un grand nombre de roches proches du point d'impact et montré que 0,2 % de leur masse étaient d'origine météoritique.

Voici, parmi beaucoup d'autres, quelques-unes des études et observations qui ont permis de démontrer l'origine extraterrestre de l'extraordinaire structure de Vredefort qui fait maintenant partie du patrimoine mondial.

Le patrimoine mondial de l'UNESCO

En 2005, le Dôme de Vredefort a été inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO pour son aspect paysager et son intérêt scientifique, géologique (critère VIII, voir annexe). Les travaux d'un grand nombre de scientifiques, au cours du XX^e siècle, et l'évolution des technologies modernes d'investigation ont permis de prouver définitivement l'origine du

site : un astroblogue résultant de la collision d'une météorite. Voici un extrait du document de la déclaration d'inscription au patrimoine mondial de l'UNESCO (voir synthèse en annexe).

Le « Jardin du Ciel »

Revenons maintenant au dispositif mis en place au Muséum dans le cadre du projet « Le Jardin du Ciel » mené par Brigitte Zanda et destiné à faciliter la compréhension de notre Univers et des éléments qui le composent. Ce Jardin unique en France est composé de trois éléments :

- un planétaire, représentation du système solaire à échelle humaine ;
- une caméra du projet FRIPON destinée à détecter les chutes de météorites ;
- l'échantillon de roche de Vredefort.

Ce projet pédagogique est lauréat du Collège des Licences de la Sorbonne. Le Jardin du Ciel a été réalisé grâce à la participation de nombreux partenaires : le Muséum national d'Histoire naturelle, les universités Pierre et Marie Curie et Paris Sorbonne, l'Observatoire de Paris, la Société des Amis du Muséum, le CNRS ; mais aussi le lycée Dorian et le lycée professionnel Hector Guimard qui sont intervenus dans la construction du planétaire.

Le Planétaire du Jardin des Plantes : bouger comme une planète !

Le planétaire est le grand disque décrit dans l'introduction de cet article et qui figure au premier plan de la figure 1. Les deux paragraphes suivants expliquent

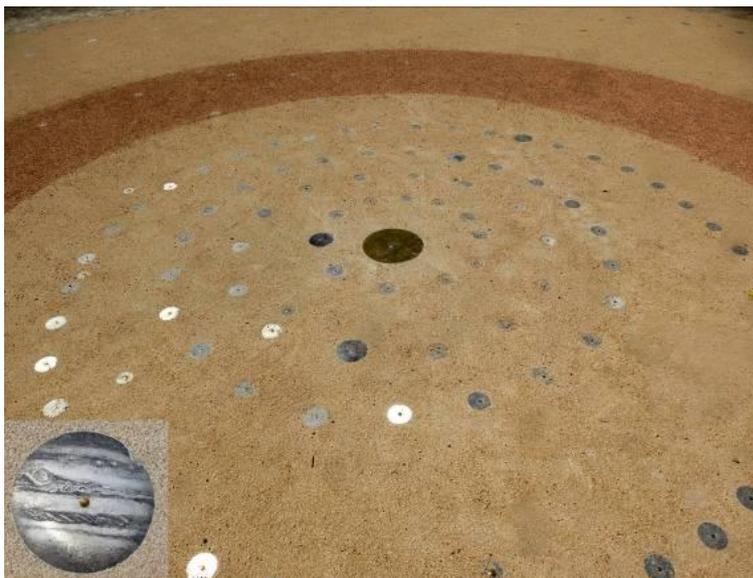


Figure 19 : Le planétaire du Jardin des Plantes. En bas à gauche, à titre d'exemple, le médaillon représentant Jupiter.

bien cette réalisation, ils sont extraits de la page « Un Jardin du Ciel dans le Jardin des Plantes » du site du MNHN (voir source).

« Premier en France et l'un des seuls au monde, le planétaire du Jardin des Plantes est une structure plane sur laquelle sont représentées les orbites de planètes, d'astéroïdes et de comètes du système solaire. Les positions sont matérialisées par des médaillons en inox et laiton, et insérées dans un "puzzle" de dalles de béton constituant un disque de 12 m de diamètre ».

« Cette installation permet au public de se déplacer en mimant un corps céleste puisque les espacements entre les médaillons respectent les vitesses relatives des astres. Il s'agit d'apprendre, tout en étant acteur de son apprentissage ! Sur chaque orbite, un des médaillons représente la planète qui décrit cet orbite ».

Le planétaire, outre qu'il offre une image concrète du système des planètes et comètes ainsi que de leur course, est aussi un support destiné à organiser des jeux avec les élèves pour leur faire découvrir leur position relative et la vitesse à laquelle les planètes décrivent leurs orbites. Des valises pédagogiques sont mises à disposition des enseignants intéressés et des jeux sont organisés dans le cadre de la Fête de la Science.

Le projet FRIPON



Figure 20. La caméra FRIPON sur le toit de la Grande Serre du Jardin des Plantes.

Une caméra fixée sur le toit de la Grande Serre du Jardin des Plantes (figure 20) scrute le ciel en permanence. Son objet : détecter et tracer la course des météores qui croisent entre 100 et 20 kilomètres

d'altitude. Elle fait partie d'un réseau de cent caméras, réparties sur le sol français, baptisé FRIPON (pour *Fireball Recovery and InterPlanetary Observation Network*).

Si un objet d'une taille suffisamment grande, une météorite, un fragment d'astéroïde ou d'un autre corps planétaire tombe sur la Terre, il sera enregistré par différentes caméras du réseau. Il sera alors possible de reconstituer sa trajectoire, connaître sa provenance et peut-être même être en mesure de déterminer le lieu de sa chute. En effet, alors qu'une cinquantaine de météorites ont été retrouvées au XIX^e siècle grâce aux observations des paysans de la France encore rurale, moins de la moitié l'ont été au XX^e siècle.

L'échantillon de roche de Vredefort

Cette roche magnifique (figure 2) n'est pas arrivée au Jardin des Plantes par miracle, mais grâce à la volonté et à la persévérance de Brigitte Zanda qui avait ce projet en tête depuis plusieurs années. De plus, lorsque nous l'avons sollicitée, elle nous a fait l'honneur de passer nous voir (figure 21) lors de la Fête de la Nature 2017, au mois de mai, et nous a fourni de nombreux documents et informations repris dans cet article.



Figure 21. Brigitte Zanda lors de la Fête de la Nature 2017 aux côtés de la brèche de Vredefort.

La roche exposée provient de la région du Dôme où se trouvent plusieurs carrières utilisées dans les

années 1960 pour produire des pierres ornementales. L'exploitation a maintenant cessé et la tranche acquise par le Muséum a été découpée sur un bloc restant du matériel extrait à l'époque. Elle fait partie d'un ensemble de quatre blocs achetés par la France, les trois autres se trouvant à Fleurance, dans le Gers, à Nantes et à la Réserve naturelle de Rochechouart.

Les panneaux explicatifs

Pendant la préparation de cet article, le projet de Jardin du Ciel a continué de progresser et ma surprise fut grande, au retour de vacances en juillet dernier, de découvrir les quatre panneaux explicatifs mis en place par le Muséum.

De gauche à droite on découvre ainsi : la brèche, la serre de l'Histoire des Plantes et les panneaux qui expliquent l'installation réalisée dans le cadre du projet Jardin du Ciel.

Je vous invite à aller voir ce Jardin du Ciel, à consulter les panneaux, le planétaire et, bien sûr, admirer la pseudotachylite.

Pour terminer, je vous propose un zoom sur le diagramme (figure 23, page suivante) qui résume à lui seul parfaitement la création de l'astroblème de Vredefort. Il m'a été fourni par Brigitte Zanda et figure sous une forme légèrement différente sur le panneau relatif à la brèche qui est intitulé : « *Vredefort : les marques d'une collision cosmique* ».

Enfin quelques chiffres qui donnent une idée du gigantisme de cet événement.

L'impact de Vredefort en quelques chiffres

Âge : 2 023 Ma.

Diamètre du cratère original : entre 250 et 300 km (un des trois plus grands au monde).

Profondeur du cratère : transitoirement, 50 km avant son effondrement, peut-être 15 km à la fin de l'épisode.

Volume excavé : environ 70 000 km³.

Distribution des éjectas : épaisseur encore supérieure à 1 m entre 350 et 500 km de l'impact.

Durée de l'impact : de 2 à 4 minutes pour le cratère transitoire, de 10 à 15 minutes au total.

Taille du projectile : entre 5 et 15 km.

Sismicité associée : magnitude 14 sur l'échelle de Richter (le plus grand séisme observé a atteint 9,2... et cette échelle est logarithmique !).

(D'après Remold & Gibson, 2005).

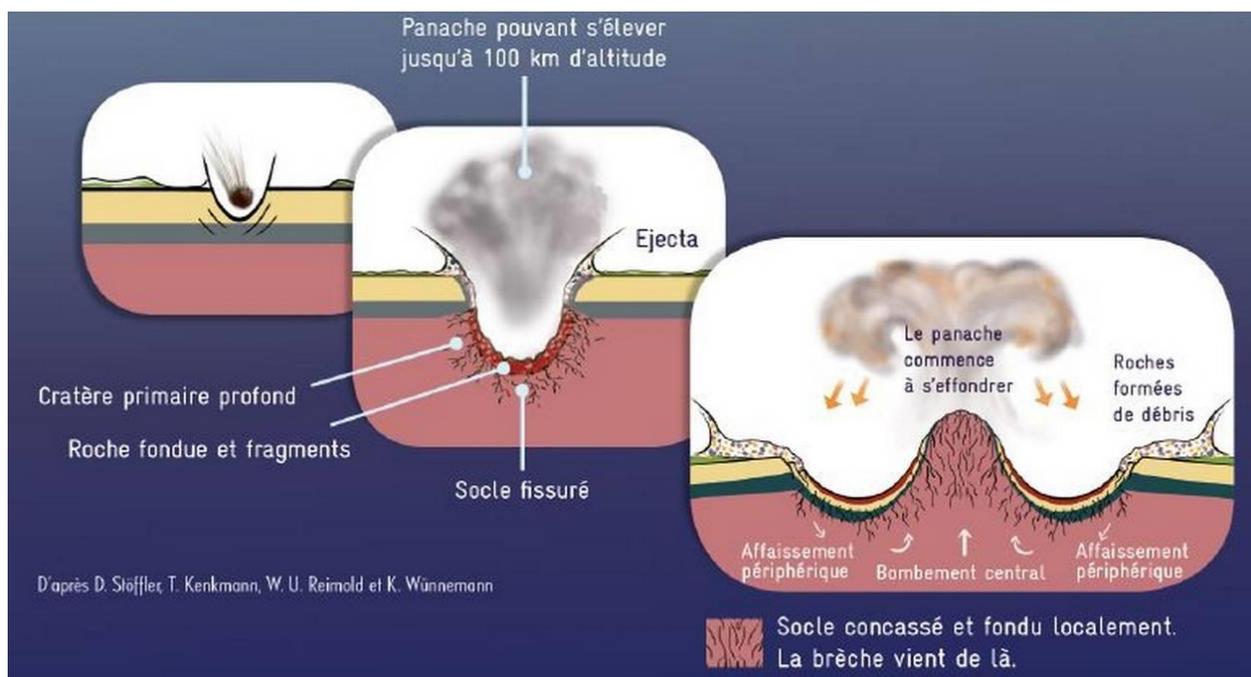


Figure 23. Le diagramme de synthèse avec l'indication de la provenance de la tranche de brèche.

* Henri Milne-Edwards (1800-1885) est un médecin et zoologiste français.

Cet illustre naturaliste, membre de l'Institut, fut professeur d'entomologie au Muséum, professeur titulaire à la Faculté des sciences de Paris et membre de l'Académie des sciences.

Remerciements

J'adresse tous mes remerciements à Annie Cornée sans qui cet article se serait probablement arrêté au premier chapitre « *L'énigme* », autrement dit n'aurait pas été publié, ainsi qu'à Brigitte Zanda pour sa participation et surtout pour son action qui a abouti au Jardin du Ciel.

Brigitte Zanda est enseignant-chercheur à l'Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie (IMPMC), Département Origines et Évolutions, Muséum national d'Histoire naturelle.

Sources

BOISSOU F. & GENESTE-SIMANDON J.-P. - Métamorphisme de choc : phases cristallines spécifiques des hautes pressions. Consultable sur : http://ww3.ac-poitiers.fr/svt/res_loc/meteorit/Fich_S/HP.html

FOUCAULT A., RAOULT J.F., CECCA F. et PLATEVOET B. (2014) – Dictionnaire de Géologie. Dunod, 8^e édition, 396 pages.

KOEBERL C. (2002) – A comparison of the osmium and chromium isotopic methods for the detection of meteoritic components in impactites : Examples from the Morokweng and Vredefort Impact Structures, South Africa.

LABROT C. (2004) – Les cratères d'impact sur : <https://www.nirgal.net/crater.html>

LEROUX H. (1994) – Étude par microscopie électronique en transmission du métamorphisme de choc dans le quartz et le diopside : applications aux impacts, à la limite C/T et aux météorites. Thèse.

MARTINI J. (2017) – La saga du Dôme de Vredefort, ou tout le mal que le nationalisme peut causer à la science : impressions d'un témoin. *Hypogées* n° 72, 2013, p.49-64. Consultable sur : http://aipug.org/wp-content/uploads/2017/04/La_saga_du_dome_du_Vredefort.pdf

MOYEN J.-F. (2007) – La structure d'impact de Vredefort. Consultable sur : <http://jfmoyen.free.fr/IMG/pdf/extrait-vredefort-lowres.pdf>

REIMOLD W.U. & GIBSON R. L. (2005) – Meteorite impact ! The Vredefort structure. Editions Council for Geoscience, Chisvan Rensburg Publications (Pty) Limited, 2^e édition, 319 pages.

THOMAS P. (2013) – Les impacts et les cratères de météorites. Vidéo conférence. Consultable sur : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/impact-crateres-meteorite.xml?doa:t=2#video>

THOMAS P. et DEQUINCEY O. (2013) – Les brèches d'impact de l'astrolème de Vredefort, Afrique du Sud. Consultable sur : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/image-de-la-semaine/Img436-2013-10-07.xml>

THOMAS P. et DEQUINCEY O. (2013) – Les brèches d'impact pseudotachylitiques (*impact melt rock*) de l'astrolème Vredefort, secteur de Parys, Afrique du Sud. Consultable sur : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/image-de-la-semaine/Img437-2013-10-14.xml>

THOMAS P. et DEQUINCEY O. (2013) – Les *shatter cones* de l'astrolème de Vredefort, Afrique du Sud. Consultable sur : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/image-de-la-semaine/Img435-2013-09-30.xml>

SALOMON J.N. et AULY T. (2010) – Impacteurs et astroblèmes : essai de classification et approche géographique. Géomorphologie, vol.16, 1, p. 3-20. Consultable sur : <https://geomorphologie.revues.org/7866>

ZANDA B. (2017) – La Brèche de Vredefort mise en place au Muséum.

Inscription sur la liste du Patrimoine Mondial de l'UNESCO. Contexte de la Décision,

[WHC11/35.COM/8E](http://whc.unesco.org/uploads/nominations/1162.pdf) Consultable sur : <http://whc.unesco.org/uploads/nominations/1162.pdf> (p. 542).

Une vidéo présentant un exemple d'impact :

<http://www.chiemgau-impact.com/wp-content/uploads/2012/05/CLICKING.mp4>

Ressources Internet complémentaires

Communiqué de presse du MNHN (2016) :

<https://www.mnhn.fr/fr/communiqués-presse-dossiers-presse/jardin-ciel-jardin-plantes>

Bande annonce du planétaire du Jardin des Plantes, vidéos : <http://www.jardindesplantes.net/fr/preparez-votre-visite/jardins/jardin-ciel-planetaire-jardin-plantes>

En bas de page, une vidéo de 1,20 minute.

Pages du Muséum consacrées au projet Planétaire :

<http://www.jardindesplantes.net/fr/preparez-votre-visite/jardins/jardin-ciel-planetaire-jardin-plantes>

Pour en savoir plus sur FRIPON : <https://www.fripon.org/> (Toutes les photos de l'article sont de J.-L. Fromont, sauf indication contraire dans la légende).

Annexe

Synthèse du document d'inscription du Dôme de Vredefort au Patrimoine mondial de l'UNESCO.

- *Bien* : Dôme de Vredefort.
- *État partie* : Afrique du Sud.
- *Id.* N° 1162.
- *Date d'inscription* : 2005.
- *Brève synthèse* : le dôme de Vredefort se trouve à 120 km au sud-ouest de Johannesburg. Le bien représente un phénomène géologique unique, formé il y a environ 2 023 millions d'années, et dont la structure d'impact météoritique est la plus ancienne et la plus grande connue sur Terre. Dans ce bien sont exposées des strates géologiques allant des zones centrales aux zones supérieures de l'écorce terrestre, qui ont évolué sur une période de plus de 3 200 Ma. Toutes les caractéristiques classiques d'un grand astroblème sont présentes dans le bien. Cette structure à couronnes multiples formée par la cicatrice de l'impact illustre l'effet du métamorphisme de choc des roches, la transformation des structures cristallines et les fractures coniques de l'immense force créée par l'impact.
- *Critère VIII* : le dôme de Vredefort est la structure d'impact de météorite la plus ancienne, la plus grande et la plus profondément érodée du monde. Il s'agit du phénomène de libération d'énergie le plus important du monde. Il contient des sites géologiques accessibles (affleurements) et de haute qualité qui apportent une gamme de preuves géologiques attestant une structure d'impact météoritique complexe. Les paysages rural et naturel du bien en série permettent de concevoir l'ampleur des struc-

tures en couronne qui résultent de l'impact.

La proposition en série est considérée comme un exemple représentatif de cette structure d'impact météoritique. Une analyse comparative complète avec d'autres structures d'impact météoritique complexes a démontré qu'il s'agit du seul exemple sur la Terre fournissant un profil géologique complet d'un astroblème en dessous du fond du cratère permettant ainsi des travaux de recherche sur la genèse et le développement d'un astroblème immédiatement après l'impact.

Une campagne de forages sur l'astroblème de Rochechouart

Depuis la mi-septembre 2017, une campagne de forages scientifiques carottés a débuté sur l'astroblème de Rochechouart. Les données récoltées devraient permettre de renforcer les connaissances sur les cratères d'impact, la formation des planètes, l'évolution de leurs surfaces et éventuellement sur les conditions d'émergence de la vie sur Terre.

La bonne marche scientifique du projet est pilotée par le Centre International de la Recherche sur les Impacts et sur Rochechouart (CIRIR), sous la direction de Philippe Lambert, astrogéologue. Le programme bénéficie des soutiens financiers de l'État, de l'Europe, du Conseil départemental de Charente et de Porte Océane du Limousin.

Par ailleurs, des actions pédagogiques seront mises sur pied, au bénéfice des populations locales, des scolaires et du grand public.

(Source : *Géochronique*. N° 43, septembre 2017).

L'astroblème dit de Rochechouart-Chassenon, situé entre les départements de la Haute-Vienne et de la Charente, est un ensemble de marques laissées par l'impact d'un astéroïde tombé il y a environ 207 millions d'années.

Cet astéroïde, de 1 500 m de diamètre, percuta la Terre au lieu-dit de la Judie, dans la commune de Pressignac, en Charente. Il a formé un cratère d'au moins 20 km de diamètre, et tout ravagé à plus de 100 km à la ronde ; des éjectas sont retombés jusqu'à 450 km de là. L'impact a modifié également les roches du sous-sol sur plus de 5 km de profondeur.

Une carrière a été ouverte au cœur de l'impact pour l'exploitation des brèches. L'exploitation s'est arrêtée en mettant au jour les traces du cratère, parfaitement visibles. Les brèches constituant les seules traces en surface, les forages vont permettre également de comprendre les transformations minéralogiques et chimiques des roches en profondeur.

Carte géologique à 1/50 000, feuille de Rochechouart, n° 687, éditée en 1996 par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).