

Un verre témoin d'impact

Le verre libyque est probablement le plus étonnant verre naturel que nous connaissions : il est formé de silice presque pure. C'est un verre massif, transparent et limpide, de couleur jaune ou vert pâle la plupart du temps. Quelques échantillons sont blancs et laiteux, ou parcourus par des traînées brunes ; un morceau découvert récemment est même bleuté. Plus de 10 000 tonnes de fragments, du grain de sable au bloc de 20 kilogrammes, seraient dispersés dans le désert libyque, une région de 3 500 kilomètres carrés, entre les cordons de dunes de la Grande Mer de sable, à l'Ouest de l'Égypte, près de la frontière libyenne. Comment ce verre s'est-il formé ? Des hypothèses variées ont été proposées depuis 60 ans, mais l'énigme vient seulement d'être résolue : le verre libyque résulte de la fusion d'un grès très pur lors d'un impact météoritique.

Dans les années 1930, les premiers curieux qui se sont intéressés au verre libyque ont attribué sa fabrication à des verriers antiques. Toutefois, toutes les mesures géochronologiques confirment qu'il s'est formé il y a environ 29 millions d'années, bien avant l'apparition de l'homme : l'origine naturelle de ce verre est incontestable.

Des analogies ont alors été recherchées avec d'autres roches terrestres. Ainsi, le refroidissement de laves produit parfois des verres, tels que les obsidiennes ou les macusanites (verres volcaniques transparents) d'Amérique du Sud. Mais aucune roche volcanique terrestre n'a une composition proche de celle du verre libyque. La chaleur dégagée par des feux de forêt peut aussi fondre, très

localement, des roches du sol, mais la silice ne fond qu'à plus de 1 700 °C : où trouver assez d'arbres à brûler pour produire les milliers de tonnes de ce verre ? On trouve enfin dans le désert des fulgurites, longues tiges creuses de verre qui résultent de la fusion du sable au passage de la foudre, mais ils n'ont ni l'aspect, ni la structure, ni la masse des plus gros morceaux de verre libyque.

Puisque aucun mécanisme terrestre ne semble expliquer la présence d'une telle quantité de morceaux de verre dans le désert, il faut envisager une origine extraterrestre. S'agirait-il de débris d'une météorite très inhabituelle ? Impossible : le verre libyque contient des bulles de gaz qui ont des caractéristiques de l'atmosphère, et il s'est donc bien formé sur Terre.

Au début des années 1980, une équipe allemande a annoncé que des traces d'hydrocarbures et, même, de fossiles végétaux avaient été trouvés dans le verre libyque : ce verre ne serait qu'un gel de silice précipité au fond d'un

grand lac. Cette hypothèse apparaît aujourd'hui, elle aussi, fantaisiste. D'abord, les traces organiques proviendraient d'une contamination des échantillons : elles n'ont jamais été retrouvées par d'autres laboratoires. En outre, au contraire du verre libyque, les gels de silice contiennent des quantités appréciables d'eau, et leur structure moléculaire est différente.

Le verre libyque contient des minéraux tels que la lechatelierite (de la silice fondue), la cristobalite (de même composition chimique que le quartz, mais de structure cristalline différente) et la baddeleyite (oxyde de zirconium) qui ne se forment qu'à haute température : le verre a donc été chauffé à plus de 1 700 °C. Une telle température peut être atteinte lors de l'impact d'une grosse météorite : le verre libyque est un verre d'impact, comme celui trouvé dans les cratères de Wabar, en Arabie Saoudite, ou d'Aouelloul, en Mauritanie.

Quelles autres preuves de cette origine avons-nous ? D'abord, le verre libyque présente de nombreuses analogies pétrographiques et géochimiques avec d'autres

verres d'impact bien identifiés : mêmes minéraux formés à hautes températures, mêmes formes et mêmes compositions des inclusions gazeuses, même pauvreté en eau comparée aux verres produits par d'autres processus. Ensuite, et surtout, le verre libyque porte la signature de la météorite responsable de l'impact : dans des échantillons contenant des traînées brunâtres, de l'iridium et d'autres éléments du groupe du platine ont été trouvés en quantités notables et en proportions quasi iden-

tiques à celles d'un type de météorites pierreuses. Les métaux du groupe du platine, en particulier l'iridium, sont presque absents des roches terrestres, mais présents, bien qu'en faibles quantités, dans la plupart des météorites.

Le mécanisme de l'impact explique aussi pourquoi le verre libyque est si riche en silice. Dans la région du Sahara où on le trouve, affleurent des roches sédimentaires presque exclusivement composées de grains de quartz et de composition très proche de celle du verre : les grès de Nubie. Ces roches, en fondant lors de l'impact, ont produit le verre il y a 29 millions d'années.

Le verre libyque n'a toutefois pas livré tous ses secrets : nous ne savons toujours pas où est le cratère d'impact. A-t-il été effacé par l'érosion ou est-il masqué par les sables du désert ?

Jean-Alix BARRAT, Université d'Angers, et Robert ROCCHIA, L.S.C.E., Gif-sur-Yvette



Le verre libyque, produit lors d'un impact météoritique, a été taillé par les hommes préhistoriques, qui l'ont aussi transporté parfois loin de l'endroit où ils l'avaient ramassé.

Cependant, 98 pour cent des météorites de la taille de celle qui est tombée à Wabar ne laissent aucun cratère, même temporaire. Elles se désagrègent dans l'atmosphère, qui semble constituer un écran efficace contre les impacts directs d'astéroïdes pierreux de moins de 100 mètres de diamètre : la Terre porte peu de cratères de diamètre inférieur à cinq kilomètres. Toutefois, les explosions en altitude sont parfois dévastatrices : dans la Toungouska, en Sibérie, en 1908, c'est probablement l'explosion d'une météorite pierreuse qui a abattu 2 200 kilomètres carrés de forêts et qui en a incendié la plus grande partie, bien qu'on n'en ait retrouvé presque aucune trace au sol. Un jour ou l'autre, une telle explosion détruira une ville.

Nous devons sans doute plus redouter ces impacts relativement faibles que ceux qui ont des répercussions sur tout le Globe : on connaît plusieurs sites d'impact beaucoup plus grands que Wabar, telle la structure annulaire de Manicouagan, au Québec, ou le site de Chicxulub, au Nord du Yucatán, au Mexique. Cependant, des impacts de cette importance ne se produisent en moyenne que tous les 100 millions d'années. L'astéroïde de dix kilomètres de diamètre qui a creusé Chicxulub et qui a peut-être fait disparaître les dinosaures est tombé il y a 65 millions d'années, et même si deux objets de taille comparable errent déjà sur des orbites coupant celle de la Terre, ils ne la percuteront pas dans un avenir proche.

Jeffrey WYNN et Eugene SHOEMAKER ont travaillé ensemble au Service géologique américain jusqu'à la mort du second, en 1997.

Harry St. John B. PHILBY, *An Account of Exploration in the Great South Desert of Arabia*, in *Geographical Journal*, vol. 81, n° 1, pp. 1-26, janvier 1933.

H.J. MELOSH, *Impact Cratering : A Geologic Process*, Oxford University Press, 1989.

J. Kelly BEATTY, «Secret» *Impacts Revealed*, in *Sky & Telescope*, vol. 87, n° 2, pp. 26-27, février 1994.

Hazards Due to Comets and Asteroids, sous la direction de Tom Gehrels, University of Arizona Press, 1995.

John S. LEWIS, *Rain of Iron and Ice : The Very Real Threat of Comet and Asteroid Bombardment*, Addison-Wesley Publishing, 1996.

Une mystérieuse météorite groenlandaise

WAYT GIBBS

Comment on chasse la météorite au Groenland.



1. UNE TONNE DE NEIGE, fondue dans une bâche de plastique noir, a été filtrée : elle contenait peut-être des poussières disséminées par l'explosion d'une météorite au-dessus du Groenland en décembre 1997.



Le téléphone par satellite apporta l'information vers 20 heures, alors que Lars Christensen et les six autres membres de l'expédition venaient de finir leur repas et patientaient sous la tente. Depuis sept jours, ils attendaient de reprendre leurs recherches des débris de la météorite de Kangilia : l'hélicoptère était bloqué par le brouillard et par les chutes de neige, et la fonte de la neige sur laquelle le camp était installé transformait les alentours en un marécage impraticable.

Le téléphone apportait enfin une bonne nouvelle : selon une station de télévision de Nuuk, la capitale du Groenland, un garde-chasse avait découvert la météorite. En naviguant dans le labyrinthe d'îles et de baies près de Qeqertarsuatsiaat, à environ 60 kilomètres à l'Ouest du camp, il avait vu quatre cratères, fraîchement creusés dans les piémonts côtiers et contenant des roches noires. Au bout d'une heure de communication, l'équipe réussit à joindre ce garde et à s'assurer qu'il les conduirait sur le site. Une autre bonne nouvelle arriva bientôt : les conditions météorologiques s'amélioraient. L'hélicoptère viendrait peu après l'aube pour les emmener inspecter les cratères.

Pendant deux semaines, ils avaient peiné sur des kilomètres de glace, ils avaient descendu et remonté des crevasses, ils avaient fondu la neige pour trouver des poussières, ils avaient cherché de toutes les manières possibles, mais toujours aux mauvais endroits. Seraient-ils enfin récompensés? Même pas : dès qu'il vit les cratères, L. Christensen sut qu'ils n'avaient pas été formés par des impacts de météorites. Des roches avaient simplement laissé des vides en tombant le long d'une pente érodée.

Cette expédition avait été préparée par Holger Pedersen et Torben Risbo, respectivement astronome et géophysicien à l'Université de Copenhague. Ils avaient choisi la zone de recherche : des

centaines de kilomètres carrés près de la source du Frederikshabs Isblink, un glacier géant au mouvement lent, et de 1 200 mètres d'épaisseur à l'endroit du camp.

Leur enquête de terrain et leurs calculs les avaient aussi convaincus que la météorite incandescente qui avait éclairé la côte Sud-Ouest du Groenland, le 9 décembre 1997, avait une origine extraordinaire : ce serait la première météorite connue provenant de l'extérieur du Système solaire. Ce résultat était étonnant : la masse de la météorite, avant qu'elle ne commence à se consumer dans l'atmosphère, avait été estimée à une centaine de tonnes. Il était inattendu que le premier objet interstellaire jamais détecté

soit aussi gros : statistiquement, on avait plus de chances d'en découvrir d'abord de petits. L'analyse d'un fragment, même minuscule, de la météorite permettrait de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse.

Retracer la chute

«Sunaana!», avait crié un enfant de trois ans à sa grand-mère : «Qu'est-ce que c'est?» C'est à cette question que H. Pedersen espérait répondre. Toutefois, il devait d'abord répondre à deux autres questions : dans quelle direction le bolide se déplaçait-il et à quelle vitesse? Il disposait pour cela d'un élément précieux : en enregistrant vidéo de trois secondes, qui

La météorite de Kangilia

La météorite de Kangilia est entrée dans l'atmosphère au-dessus de l'Atlantique Nord aux premières heures du 9 décembre 1997. Alors qu'elle filait vers l'Est, au-dessus de la côte Sud-Ouest du Groenland, à une vitesse de 56 kilomètres par seconde et à plus de 24 kilomètres d'altitude, elle a explosé en quatre fragments au moins, en raison de son échauffement par le frottement avec l'atmosphère (*en bas, vu d'un point au-dessus de la côte Est de l'Islande*). On y voyait comme en plein jour, selon le commandant d'un chalutier qui croisait au large de la côte accidentée près de Qeqertarsuaat (*en bas à droite*).

La triangulation des lignes de visée de témoins et de la trajectoire enregistrée par une caméra vidéo à Nuuk, capitale de l'île (*à droite, en jaune*) a révélé que si des fragments avaient survécu à leur entrée dans l'atmosphère, ils devaient avoir atterri près de la base du glacier Frederikshabs Isblink. À la fin de juillet, après la fonte de la majeure partie de la neige qui expose la calotte de glace sous-jacente, une expédition de sept hommes, séjournant un mois dans deux campements sur la glace, a ratissé plus de 3 000 kilomètres carrés (*à l'extrême droite*), à la recherche de débris de la météorite.



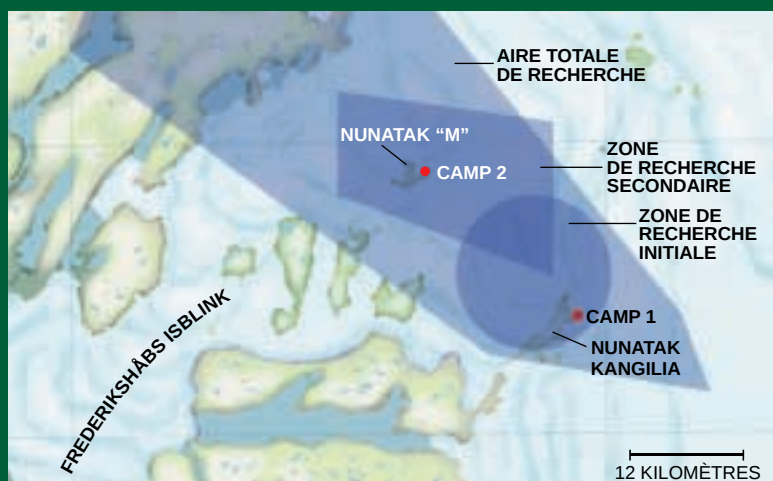
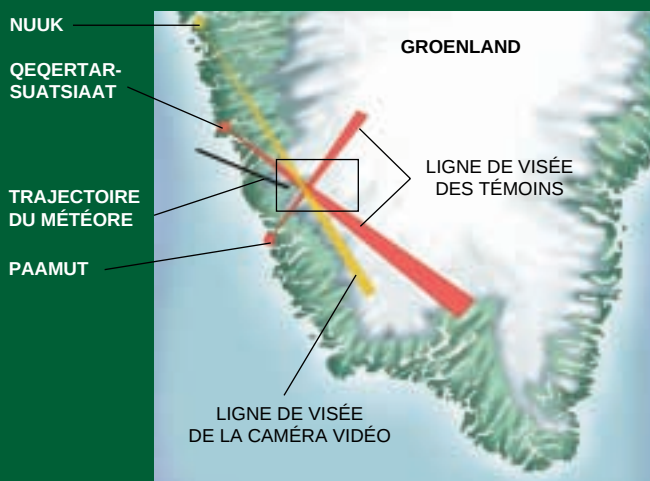
montrait la chute de la météorite et un éclair final juste sous l'horizon. Un habitant de Nuuk avait filmé l'événement par hasard, avec une caméra disposée pour la surveillance de son scooter des neiges. Si H. Pedersen pouvait reconstruire la trajectoire de la boule de feu quand elle avait traversé le champ de la caméra, alors il connaîtrait sa vitesse.

L'enregistrement montrait que la météorite se déplaçait dans un plan incliné de 53 degrés par rapport à la

2. CHERCHANT AU HASARD, l'équipe s'est écartée de la glace pour examiner des cratères observés sur la côte. Les alvéoles (taches blanches, en haut) n'étaient que des traces naturelles d'érosion.



Andy Ryan



Laure Grace



Andy Ryan

verticale, mais quelle était sa direction ? Pendant deux semaines sombres de janvier, H. Pedersen se déplaça de village en village avec un théodolite, instrument de mesure des angles. Interrogeant une trentaine de témoins, il couvrit son carnet de croquis et de témoignages : certains avaient vu de

grandes boules de feu de la taille de la Lune et aussi brillantes que le Soleil ; d'autres, des traînées incandescentes larges comme deux mains ouvertes. Surtout, il mesura l'angle sous lequel chaque observateur se souvenait avoir vu la boule de feu, à l'endroit d'où il l'avait aperçue.



Hans Henrik Olsen

3. DANS UNE CREVASSE, la glace lisse n'offre aucun point d'appui. Quand la neige couvre l'ouverture des fissures, les chutes sont imprévisibles et mortelles. Les membres de l'expédition marchent en file indienne et encordés.



Andy Ryan

4. L'ASTRONOME Holger Pedersen a fait du porte-à-porte pour recueillir des témoignages de Groenlandais qui avaient assisté à la chute de la météorite. En corrélant ces témoignages, un enregistrement vidéo réalisé à Nuuk et les données de satellites militaires américains, il est arrivé à la conclusion extraordinaire que l'objet était la première météorite interstellaire jamais observée.

Zdenek Ceplecha, spécialiste tchèque des météorites, avait appris l'existence de l'enregistrement vidéo. Il proposa alors son expérience et ses méthodes de travail à H. Pedersen. Le programme de calcul de trajectoires qu'il avait mis au point calcula la trajectoire la plus probable à partir des informations recueillies. Ce calcul fournissait toutefois une vitesse surprenante : environ 56 kilomètres par seconde, plus de deux fois la vitesse d'entrée dans la haute atmosphère de la plupart des météorites. C'était d'autant plus incroyable que la collision n'était pas frontale : l'objet avait quasiment embouti la Terre par-derrière à un peu plus de 200 000 kilomètres heure.

En calculant à rebours la trajectoire de l'objet dans l'espace extraterrestre, Z. Ceplecha découvrit en outre que l'orbite ne passait pas près de la ceinture des astéroïdes, d'où proviennent la majorité des météorites, mais qu'elle sortait complètement de l'écliptique (le plan où gravitent les planètes et la majorité des corps du Système solaire). Elle ne pouvait même pas avoir été déviée par l'attraction gravitationnelle de Mars. Si les observations et les calculs étaient corrects, ce dont Z. Ceplecha doutait, alors ce qui avait brûlé au-dessus du Groenland provenait d'au-delà du nuage cométaire de Oort, qui contient les objets les plus lointains du Système solaire.

Si la météorite était arrivée si vite, il n'en restait probablement plus que de la poussière : les pressions considérables qu'elle avait subies à son entrée dans l'atmosphère l'avaient entièrement disloquée. Des grains, ensevelis sous le mètre de neige tombée dans l'année, contenaient alors la preuve d'une origine extrasolaire. Si, au contraire, l'expédition trouvait un gros fragment et si la composition de ce fragment s'approchait de celle de météorites connues, l'hypothèse interstellaire serait infirmée.

La recherche sur le terrain

Un grand cercle entourant le «nunatak Kangilia» (un nunatak est une pointe rocheuse qui émerge de la calotte glaciaire) délimitait la zone principale de recherche. Après une semaine d'exploration, l'expédition n'avait rien trouvé. Maintenant qu'ils disposaient d'un hélicoptère, ses

membres avaient déplacé leur camp vers une seconde zone, si éloignée de tout que l'amoncellement de roches près du centre ne portait pas de nom officiel. H. Pedersen le nomma nunatak M, comme météore.

Le lendemain du jour où ils avaient inspecté les cratères si décevants, René Sorensen et Tore Jørgensen jetèrent leurs traîneaux dans l'hélicoptère et partirent pour un camp avancé. Les trois jours suivants, ils pelletteraient une tonne de neige dure sur une grande bâche de plastique noir, puis ils filtreraient l'eau de fonte pour récupérer toute particule solide qui aurait été piégée dans la neige depuis le début de son accumulation, au mois d'août précédent.

La première semaine, ils avaient essayé d'observer les particules au microscope, pour se faire une première opinion, mais la tempête permanente les contraignait à travailler sous la tente : dès leur ouverture, les échantillons furent contaminés par la suie des réchauds au kérosène, par les poils de leurs peaux de renne et par des cheveux. Par la suite, tous les échantillons furent donc scellés pour analyse ultérieure à Copenhague.

Vers neuf heures du matin, six hommes montèrent dans l'hélicoptère pour une reconnaissance aérienne vers le Sud-Est où, selon Z. Ceplecha, T. Risbo et H. Pedersen, les plus gros fragments avaient pu tomber. L'engin quadrilla quelques centaines de kilomètres carrés en deux heures : dix kilomètres en avant, un kilomètre à droite, dix kilomètres en arrière, un kilomètre à gauche, et ainsi de suite. À 30 mètres d'altitude, les hommes scrutaient une étendue de glace de 900 mètres, à gauche et à droite de l'hélicoptère. Même à une vitesse de 90 kilomètres heure, ils devaient apercevoir toute roche placée à la surface de la neige.

À l'atterrissage, L. Christensen émergea avec un sac plein de sable gluant et noir. Ce n'était que de la cryoconite, dépôt noir formé par l'accumulation, dans des tourbillons et dans des flaques, de poussières et d'algues entraînées par les ruisseaux d'eau de fonte qui coulent sous et à travers la neige. Toutefois, la cryoconite contenait peut-être de la poussière météoritique.

L'après-midi, l'équipe partit pour une nouvelle reconnaissance de 90 minutes. Elle revint les mains vides.



ONDES ET ONDELETTES

B. Burke Hubbard

PRIX D'ALEMBERT 1996

L'élaboration des ondelettes est une saga moderne.
Fourier a inventé la décomposition d'un signal en éléments simples ; pour les besoins de l'analyse du signal, physiciens et mathématiciens ont inventé une nouvelle décomposition en ondelettes. Celle-ci est utile dans de nombreuses applications et ses richesses ne sont pas toutes exploitées.

Barbara Burke Hubbard est écrivain scientifique : elle retrace avec simplicité et chaleur comment les scientifiques pensent et hésitent avant que n'écluse une idée, et comment ils coopèrent.
Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN



Andy Ryan

5. LA GLACE EST FRACTURÉE de crevasses qui atteignent 30 mètres de large et 100 mètres de profondeur. Malgré les dangers, l'équipe a parcouru près de 200 kilomètres à pied. La plus grande partie de la zone a été inspectée à partir d'un hélicoptère.

Lors de la troisième et dernière sortie de la journée, deux fois le pilote fit descendre l'appareil, mais chaque fois les espoirs de trouver une roche furent déçus : la couleur noire n'était due qu'à de la cryoconite.

Le 16 août, l'expédition finit comme elle avait commencé, contrariée par les caprices du climat groenlandais. Les membres de l'équipe avaient marché quelque 200 kilomètres sous la pluie, le vent et la neige sur une calotte de glace dangereuse.

Ils avaient volé sur plus de 1 000 kilomètres, fouillant en 25 jours une superficie de la taille du département du Rhône, à la recherche d'une pierre de la taille d'une balle de golf. Sans succès.

Pendant ce temps, Z. Ceplecha avait rencontré Richard Spalding, spécialiste en télédétection au Laboratoire Sandia, au Nouveau-Mexique, afin de comparer l'enregistrement vidéo de la météorite avec les données de deux satellites antimissiles

américains qui avaient aussi détecté l'explosion de la météorite. R. Spalding trouva, comme H. Pedersen, une corrélation entre deux éclairs sur la vidéo et deux pics très intenses sur les enregistrements des satellites.

De même, Edward Tagliaferri, consultant en télédétection, déduisit des données des satellites une vitesse de 46 à 52 kilomètres par seconde pour la météorite. Il proposa toutefois d'autres hypothèses. Deux gros blocs, distants de plusieurs kilomètres, avaient peut-être explosé à quelques millisecondes d'intervalle. Ou bien le passage de la météorite avait ionisé l'atmosphère et relié deux couches chargées, comme un fil : un plasma d'ions accélérés aurait alors circulé, dépassé l'objet et continué avec un bruit perçant jusqu'à ce que tous les ions libèrent d'un coup leur énergie en un éclair géant. La vidéo et les caméras des satellites auraient alors enregistré cette décharge de plasma qui fusait devant une météorite plus lente.

Aucune de ces explications n'était toutefois nécessaire. Un mois plus tard, H. Pedersen reçut une nouvelle copie numérique de la vidéo, beaucoup plus claire que la première. Il ajusta avec précision des images du film à des pics dans les enregistrements des satellites, puis il recalcule la trajectoire de la boule de feu : il obtint une vitesse de 29 kilomètres par seconde au lieu de 56, et une trajectoire originaire du Système solaire.

Une question subsiste toutefois. Si la météorite se déplaçait à une vitesse normale, elle aurait dû être visible très tôt après son entrée dans l'atmosphère : presque toutes les météorites commencent à briller entre 110 et 90 kilomètres d'altitude. Pourtant, cette boule de feu ne s'est apparemment pas échauffée avant d'atteindre 70 kilomètres.

Seuls des fragments de la météorite permettraient de répondre à cette question et de trancher quant à son origine. Les échantillons obtenus par la filtration de la neige fondue contiennent de petits grains minéraux rouges, bleus et bruns, qui semblent avoir été formés par une fragmentation explosive. Leur analyse dira s'ils proviennent ou non de l'espace interstellaire.

Wayt GIBBS est journaliste à *Scientific American*.
