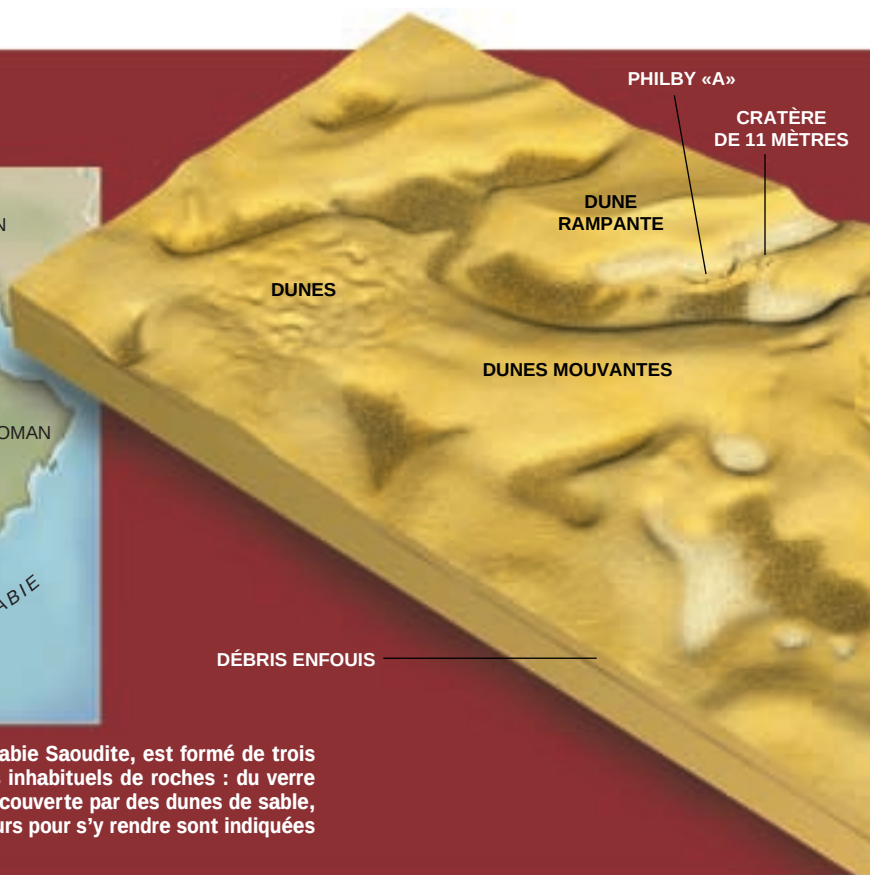




1. LE SITE DE WABAR, dans le désert Rub'al-Khali, en Arabie Saoudite, est formé de trois cratères et recouvert d'une mince couche de deux types inhabituels de roches : du verre noir et de l'«impactite». La majeure partie du site a été recouverte par des dunes de sable, en constant déplacement. Les routes suivies par les auteurs pour s'y rendre sont indiquées sur la carte.



des morceaux de la météorite. Trois expéditions sur place nous ont permis de décrire les étapes de la collision.

De nombreuses météorites ont heurté la Terre depuis sa formation, et le Système solaire ressemble toujours à un stand de tir : des objets tels que celui qui est tombé à Wabar menacent

les installations humaines. L'étude de Wabar et de sites semblables permet d'évaluer la fréquence des collisions : à défaut d'éviter le bombardement, nous pouvons au moins en connaître la fréquence.

À son arrivée à Wabar, Philby cherche des objets archéologiques et des

ruines. Il est vite déçu : il ne voit que des scories noires, des blocs de grès blanc et deux dépressions circulaires partiellement ensevelies, qui ressemblaient à des cratères volcaniques. Ces perles noires qui jonchent le sol ont-elles été portées par les femmes de la cité détruite ? Ce morceau de fer de 30 centimètres de long a-t-il été forgé par une civilisation ancienne ? Philby en vient à penser que ce fragment de métal oxydé n'est pas d'origine terrestre. Il a raison : cette roche contient 90 pour cent de fer, 3,5 à 5 pour cent de nickel et quatre à six parties par million d'iridium, élément plus rare sur la Terre, mais que l'on trouve fréquemment à de telles concentrations dans les météorites.

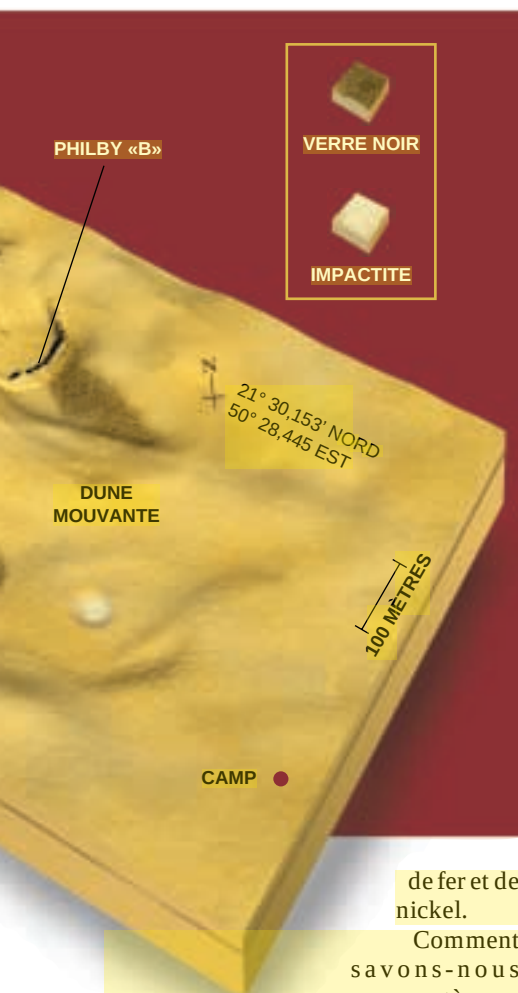
Trois cratères

Le site de Wabar mesure environ 500 mètres sur 1 000 mètres. On y trouve au moins trois cratères, de 116, 64 et 11 mètres de diamètre, presque entièrement remplis de sable. Leurs bords visibles sont formés de sable soulevé, consolidé dans un grès grossier et découlé, l'«impactite», et de grandes quantités de scories et de pelotes vitreuses noires. Ces bordures sablonneuses sont fragiles et facilement entamées par des traces de pneumatiques. On y trouve aussi quelques fragments d'un alliage



Jeffrey C. Wynn

2. UN CRATÈRE PLEIN DE SABLE, de onze mètres de diamètre, a été découvert à Wabar en décembre 1994. Sous le sable, le cratère est tapissé d'impactite, un grès qui se forme lorsque des pressions et des températures énormes soudent les grains de sable ensemble. Juste à l'extérieur du cratère, on trouve des fragments de fer et de nickel de taille centimétrique. Ce cratère se serait formé quand une météorite métallique de un mètre de diamètre a percuté le sable. Cette météorite était le plus petit fragment des trois qui ont creusé des cratères à Wabar.



Carte : Laurie Grace. Illustration : Slim Films

de fer et de nickel.

Comment savons-nous que ces cratères sont formés lors d'un impact météoritique plutôt que sous l'action de l'érosion ou du volcanisme ? L'impactite de Wabar est grossièrement stratifiée, comme d'autres grès, mais elle contient une alternance de couches de sable soudé et de vides. En outre, l'impactite contient de la coésite, une variété de quartz qui se forme à très haute pression. Ce minéral est rare à la surface de la Terre et a été observé sur les sites d'explosion nucléaire ou d'impact météoritique.

L'impactite est concentrée sur les bords Sud-Est et Est des cratères, mais presque absente des bords Nord et Ouest. Cette asymétrie proviendrait d'un impact oblique : les projectiles sont arrivés du Nord-Ouest, sur une trajectoire inclinée de 22 à 45 degrés par rapport à l'horizontale.

Les déchets de fer et de nickel, quasi absents du reste du désert, sont probablement des fragments de la météorite elle-même. On en trouve deux types. Dans le sable, ce sont des billes oxydées et friables, de diamètre inférieur à dix centimètres, semblables à celles que l'on trouve sur plusieurs sites

d'impact de météorites ferreuses. À la surface du sol, les fragments de fer et de nickel sont plutôt lisses et couverts d'une mince patine de vernis noir, comme de nombreuses roches du désert. Le plus gros bloc, nommé Bosse de chameau pèse 2 200 kilogrammes. Conique et aplati, il a été rapporté en 1965 à l'Université de Riyad. Il s'est probablement détaché de la météorite principale avant l'impact. Comme la surface d'un objet est proportionnelle au carré de son rayon, tandis que sa masse est proportionnelle au cube de son rayon, un objet plus petit a une surface proportionnellement plus grande et est donc proportionnellement plus freiné par l'air. Donc, un fragment est plus freiné que l'objet principal, et il peut rebondir sur le sol au lieu d'y creuser un cratère.

On trouve à Wabar un dernier type de roche caractéristique de la collision : un verre noir. Les sites d'impacts contiennent souvent des roches vitreuses qui se seraient formées à partir de poches de matière fondue, éjectée du cratère. Près des bords des cratères de Wabar, le verre noir ressemble superficiellement au pahoehoe hawaïien, une roche d'aspect cordé, plissée, qui se forme par refroidissement de coulées de lave épaisses. Plus loin, on trouve des gouttes solidifiées, de plus en plus petites à mesure que l'on s'éloigne des cratères. À 850 mètres au Nord-Ouest du cratère situé dans cette direction, le diamètre

de ces gouttes n'est plus que de quelques millimètres et, s'il y en a au-delà, elles sont enfouies dans les dunes de sable. Ce verre est homogène : il contient 90 pour cent de sable local, qui en forme la matrice, et 10 pour cent de fer et de nickel, concentrés dans des inclusions. Certaines éclaboussures vitreuses sont si fines et si fragiles qu'elles se sont brisées pendant le transport, malgré toutes les précautions que nous avons prises.

La répartition du verre indique que le vent soufflait du Sud-Est au moment de l'impact. Au Nord du Rub'al-Khali, le vent souffle du Nord dix mois par an, mais il vire au Sud-Est au début du printemps, saison des tempêtes de sable et de la mousson dans la mer d'Arabie. Toute l'année, l'air est immobile au lever du soleil, mais le vent se lève au début de l'après-midi : au crépuscule, le vent souffle si fort que le sable fouette le visage du voyageur ; il ne cesse que vers minuit.

La faible diversité des roches que l'on trouve à Wabar indique que la météorite n'a pénétré que dans le sable et n'a pas atteint la roche sous-jacente. Nous n'avons d'ailleurs trouvé aucun affleurement de cette roche dans un rayon de 30 kilomètres.

Un freinage puissant

Grâce à nos relevés de terrain et aux simulations d'impacts effectuées par Jay Melosh et Elisabetta Pierazzo, de l'Université d'Arizona, nous avons reconstitué le déroulement de la collision de Wabar. La météorite est arrivée

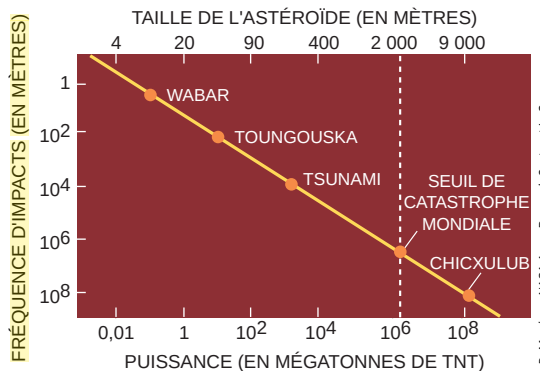


Slim Films

3. CETTE COUPE D'UN IMPACT MÉTÉORITIQUE, réalisée à partir de simulations numériques, montre comment les cratères de Wabar se sont formés. La météorite s'est aplatie en touchant le sol ; une onde de choc l'a parcourue d'avant en arrière et en a éjecté des fragments ; le reste de la météorite a fondu et s'est amalgamé au sable sous-jacent ; le sable environnant a été comprimé en impactite. Cette dernière a alors été projetée en l'air avec une partie de la météorite fondue. Les couches de sable plus profondes ont été peu perturbées.

du Nord-Ouest en fin d'après-midi ou en début de soirée, probablement au début du printemps. Comme la plupart des météorites, elle a pénétré l'atmosphère à une vitesse de 11 à 17 kilomètres par seconde. Sa trajectoire, assez rasante, a été assez longue dans l'atmosphère : l'objet a été fortement freiné, parce qu'il arrivait dans les couches denses de l'atmosphère, près du sol. Ce freinage atmosphérique brise la majorité des météorites, qui explosent entre 8 et 12 kilomètres d'altitude, mais le projectile de Wabar, constitué de fer, a résisté plus longtemps. Toutefois, il s'est finalement disloqué en quatre fragments au moins et a ralenti jusqu'à la moitié de sa vitesse initiale : selon nos calculs, la vitesse d'impact a été de cinq à sept kilomètres par seconde, environ 20 fois plus grande que celle d'une balle de pistolet automatique.

Une relation générale entre la taille des météorites, celle des cratères et les vitesses d'impact a été déduite de calculs, d'expériences balistiques et d'observations d'explosions nucléaires. Dans une roche dure, le cratère est environ 20 fois plus grand que le projectile ; dans le sable, qui absorbe plus efficacement l'énergie de la collision, ce rapport est plutôt de 12. Ainsi, si le



4. LA FRÉQUENCE MOYENNE DES IMPACTS météoriques sur la Terre est évaluée à partir de la quantité de débris présents dans le Système solaire et du nombre de cratères sur la Lune. Une météorite de deux kilomètres de diamètre, dont l'impact a des conséquences dans le monde entier, tombe en moyenne une fois tous les millions d'années. Dans ce graphique, la relation entre la taille et l'énergie dégagée par l'explosion est donnée pour des astéroïdes pierreux qui se déplacent à la vitesse de 20 kilomètres par seconde.

plus gros fragment est tombé à Wabar à cinq kilomètres par seconde, il avait un diamètre d'environ 9,5 mètres de diamètre. La météorite initiale avait une masse supérieure à 3 500 tonnes, et elle est entrée dans l'atmosphère avec une énergie cinétique équivalant à environ 100 kilotonnes de TNT. Lors de la collision, l'énergie cinétique du plus gros fragment était comprise entre 9 et 13 kilotonnes de TNT.

Autour du point d'impact, un rideau conique de fluide brûlant, mélange de

matériau météoritique et de sable, a jailli dans l'air et s'est dilaté à mesure que la météorite s'enfonçait dans le sol. Ce fluide, en refroidissant, est devenu le verre noir. Le projectile lui-même a été comprimé et aplati en quelques millisecondes.

Une onde de choc s'est propagée vers l'arrière de la météorite, éjectant lentement de petits fragments. Certains de ces débris ont été absorbés par le rideau incandescent, mais la plupart sont retombés dans le sable, jusqu'à 200 mètres de là : ce sont les vestiges inaltérés de la météorite. Le même phénomène arrache parfois des morceaux de la surface d'une planète sans les chauffer ni les comprimer beaucoup : on trouve des microstructures fragiles dans des météorites martiennes projetées dans l'espace, puis retombées sur Terre.

Une onde de choc s'est aussi propagée dans le sol, chauffant et mélangeant le sable. Les proportions de fer et de sable dans les billes vitreuses indiquent que la météorite s'est mélangée avec dix fois son volume de sable, soit un hémisphère de sable d'environ 27 mètres de diamètre pour le plus gros fragment. En dehors de ce volume, l'onde de choc, affaiblie par sa progression, n'a pas mélangé le sable mais l'a au contraire compacté en impactite.

Repérer les cratères d'impact

Comment reconnaître les cratères d'impact ? La Lune, où il ne pleut pas et où il n'y a pas de dérive des continents, est couverte de cratères qui restent où ils sont pendant des temps très longs. Sur la Terre, au contraire, la surface est remodelée et lissée en permanence. En outre, d'autres phénomènes, tels le volcanisme ou l'érosion, creusent aussi des trous circulaires. Les géologues n'ont reconnu l'origine météoritique de certains cratères qu'au début du xx^e siècle, et on ne connaît aujourd'hui qu'environ 160 structures d'impact.

Deux pour cent des astéroïdes qui circulent dans le Système solaire interne sont constitués de fer et de nickel : l'origine extra-

terrestre de leurs fragments est facile à établir quand ils arrivent sur la Terre. D'autres types de météorites se camouflent parmi les roches terrestres. C'est dans l'Antarctique qu'on les repère le plus facilement, parce que l'on trouve peu d'autres roches au milieu des champs de glace. Ailleurs, la reconnaissance d'un cratère météoritique nécessite une cartographie minutieuse et un travail de laboratoire. Les géologues cherchent plusieurs caractéristiques distinctives des roches, qui résultent des vitesses et des pressions énormes mises en jeu lors de la collision. Même une éruption volcanique ne soumet pas les roches à des conditions si extrêmes.

Cônes d'éclat. Les roches que l'on trouve autour d'un cratère d'impact ont souvent un aspect qui évoque des cornets de glace ou des chevrons si les cônes sont fracturés longitudinalement.

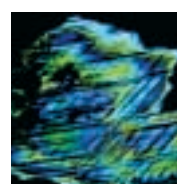
Aucun cône d'éclat n'apparaît à Wabar, parce que le site s'est formé dans du sable meuble.



Roches formées à haute température. Des blocs de sable laminés et soudés ont été observés à Wabar et sur des sites d'essais nucléaires. En outre, des tectites (roches vitreuses qui se formeraient lorsque la roche fondue est éjectée dans l'atmosphère et se solidifie en retombant) sont présentes autour de nombreux sites d'impact.



Déformation microscopique des roches.



La structure cristalline de certains minéraux est transformée par les ondes de choc pendant l'impact. Le quartz, par exemple, est parcouru de fractures à différentes échelles, des clivages et des dislocations. Il peut aussi recrystalliser en d'autres minéraux, comme la coésite et la stishovite.

Carolyn Shoemaker