

Ce résultat est un argument de plus en faveur de la théorie de l'origine africaine de l'homme : les premiers hommes seraient partis d'Afrique il y a 100 000 ans, entrant en Asie il y a 60 000 ans. Selon Peter Bellwood, de l'Université de Canberra, certains de ces chasseurs-cueilleurs ont migré vers le Sud, en Nouvelle-Guinée et en Australie, pendant la dernière glaciation, il y a 40 000 ans : une partie de l'eau des océans était prise dans les calottes polaires et dans des glaciers, et le niveau de la mer était plus bas qu'aujourd'hui. L'Asie était alors beaucoup plus étendue, et de nombreuses îles actuelles étaient accessibles à pied sec.

Les plus anciennes traces d'occupation humaine dans les îles Andaman n'ont que 2 200 ans. Toutefois, P. Bellwood pense qu'elles ont été peuplées dès la première vague de migration humaine, il y a au moins 35 000 ans. Puis la mer est

remontée et les a isolées. Le niveau de la mer a ensuite varié plusieurs fois : il a atteint sa position actuelle il y a 10 000 ans. La mythologie des îles Andaman décrit de violents orages et un déluge qui a noyé les îles, obligeant les survivants à se réfugier au sommet des collines.

Presque tous les premiers colonisateurs de l'Asie ont été supplantés par des migrants postérieurs ; seuls ont survécu ceux qui étaient dans des régions isolées et bien défendues. Les habitants des îles Andaman durent leur survie, au moins jusqu'à l'époque moderne, à leur opposition déterminée à tout débarquement d'étrangers. Aujourd'hui encore, les habitants de la petite île Sentinelle septentrionale attaquent à coups de flèches toute embarcation qui approche.

La théorie de l'origine africaine a reçu récemment un autre soutien d'une étude génétique de la population chinoise. La

diversité de l'ADN prélevé dans 28 groupes ethniques de Chine et de Taïwan est très faible : ces groupes auraient eu peu de temps pour se différencier, et ils descendraient tous de migrants africains.

La théorie adverse, l'évolution multirégionale, soutient que les hommes actuels sont issus de l'évolution simultanée dans différentes parties du monde de populations d'*Homo erectus*, espèce aussi originaire d'Afrique, mais qui en est sortie il y a un ou deux millions d'années. Ces groupes n'auraient constitué qu'une seule espèce grâce à des échanges de gènes entre eux. Pour certains paléanthropologues, cette théorie serait confortée par une continuité des fossiles découvertes en Chine entre *Homo erectus* et les populations chinoises actuelles. L'étude de C. Lalueza Fox semble, une fois de plus, leur donner tort.

Cultures de cellules souches embryonnaires

On saura bientôt cultiver des lignées cellulaires dérivées de cellules souches humaines.

Les cellules souches embryonnaires dérivent de cellules totipotentes des embryons précoces de mammifères ; elles peuvent proliférer, *in vitro*, dans un milieu de culture approprié, sans se différencier. C'est ainsi que l'on sait maintenant, *in vitro*, des cellules non différenciées de souris et, en changeant les conditions de culture, déclencher la différenciation en divers types cellulaires.

Si l'on disposait de réserves de cellules humaines différenciées, peut-être

pourrait-on, un jour, transplanter des neurones détruits par la maladie de Parkinson, des cellules cardiaques endommagées par un infarctus, des cellules de Langerhans qui ne produisent plus d'insuline chez les diabétiques, ou encore des cellules de peau pour les grands brûlés. Or, James Thomson et ses collègues du Centre de recherche sur les primates de Madison, de l'Université du Wisconsin et du Centre médical de Haifa ont réussi à obtenir cinq lignées de cellules souches embryonnaires indépendantes à partir des cellules internes d'embryons humains de six jours, nommés blastocystes.

Ces lignées cellulaires non différenciées ont été cultivées pendant cinq à six mois sur des cellules épithéliales de souris qui fournissent les facteurs de croissance indispensables à la réplication cellulaire, et en présence d'un facteur inhibant la différenciation. Des clones de cellules totipotentes ont ainsi été obtenus. On constate une intense activité de la télomérase : cette enzyme assure que le télomère (l'extrémité des chromosomes empêchant qu'ils ne « s'effilochent ») conserve une longueur correcte. Dans les cellules dépourvues de télomérase, les télomères raccourcissent avec l'âge et les cellules entrent en sénescence après un nombre limité de réplifications. Au contraire, une lignée qui synthétise assez de télomérase est quasi immortelle. Le génome des lignées de cellules totipotentes obtenues est normal, et ces cellules expriment les marqueurs spécifiques des cellules souches.

Pour s'assurer que les cellules cultivées ne perdent pas leurs propriétés de totipotence, J. Thomson et ses collègues

ont injecté quelques cellules dans des souris immunodéficientes, c'est-à-dire qui ne rejettent pas les tissus greffés. Ces cellules se sont différenciées en donnant naissance à tous les tissus embryonnaires.

Après s'être multipliées pendant plusieurs mois sans se différencier, les cellules souches embryonnaires conservent la possibilité de se différencier en cellules épithéliales, en cellules musculaires, osseuses ou cartilagineuses, ou en neurones. Pour disposer de telles cellules, encore faudra-t-il imposer la différenciation des cellules totipotentes c'est-à-dire trouver comment produire, « à la demande » tel ou tel type de cellules. Si on les obtient, on pourrait éviter le rejet de ces cellules en disposant de banques de cellules ayant des complexes majeurs d'histocompatibilité bien établis ; on pourrait même créer des lignées de cellules souches qui seraient modifiées pour contenir le génome du receveur (l'organisme les considérerait alors comme faisant partie de soi, et ne les rejeterait pas).

Ces recherches soulèvent la question éthique des recherches sur les embryons humains : peut-on prélever des cellules embryonnaires ? Quels sont les risques de clonage humain ? Quels sont les risques de modification des lignées germinales (les cellules qui se différencient en cellules sexuelles) ? Aux États-Unis, les recherches sur les cellules souches sont autorisées à condition que l'embryon ne soit pas créé à des fins de recherches. Dans le cas présent, les embryons utilisés ont été produits par fécondation *in vitro* et les couples concernés ont donné leur consentement pour que des recherches soient entreprises sur les embryons surnuméraires.



CNRI

On sait désormais maintenir en vie des lignées de cellules embryonnaires humaines dérivées de tels embryons, au stade de quelques cellules.

Les nouveaux Noé

Les animaux de la Bible reviennent en Israël.

Connais-tu le moment où les bouquetins font leurs petits ? As-tu déjà observé leurs femelles quand elles enfantent ?

Ces questions de zoologie, c'est le Créateur lui-même qui les pose, dans le *Livre de Job*. Les scientifiques israéliens ont ainsi trouvé dans la Bible des évocations précises de la faune et de la flore palestiniennes d'il y a 2 000 ans et plus. Depuis 30 ans, le projet d'Haï Bar ramène en Israël des animaux «bibliques», en s'appuyant aussi sur des fouilles archéologiques et sur des récits postérieurs. Récemment, quelques autruches, mentionnées dans le *Livre de Job*, et une vingtaine d'antilopes oryx d'Arabie, appelées «licornes» dans le *Livre des Nombres*, ont ainsi été réintroduites dans le Sud du pays.

Les autruches sont venues d'Éthiopie, les antilopes du Sahara et de zoos du monde entier, et des ânes sauvages ont été importés d'Iran et de Mongolie. Avant de les relâcher, on regroupe ces animaux des milieux désertiques dans un enclos de 16 kilomètres carrés, dans le désert d'Arava, à l'extrême Sud d'Israël, où ils s'acclimatent et se reproduisent. Les autruches et les antilopes africaines ne sont pas dépayssées dans cette savane, la plus septentrionale du monde. Chaque matin, on leur fournit un surplus de nourriture pour qu'elles ne menacent pas les maigres pâturages ni les acacias. Une autre réserve, dans le Nord du pays, en milieu méditerranéen, accueille des daims de Mésopotamie, venus d'Iran, et des chevreuils d'origine française, tandis qu'un troisième espace protégé, dans le centre

du pays, est consacré à la réintroduction de la flore.

Les premiers relâchés ont été les ânes sauvages : en 1982, trois couples ont été remis en liberté dans le désert du Néguev ; ils sont aujourd'hui près d'une centaine. Dans le Nord, des daims de Mésopotamie ont été remis en liberté en Haute Galilée, et des vautours fauves sur le mont Carmel.

La réintroduction des oryx en Israël a été précédée d'expériences similaires, menées avec succès par des États arabes. Cette espèce avait totalement disparu à l'état sauvage et ne doit sa survie qu'à des spécimens détenus dans des zoos. Toutefois, de nouveaux lâchers ne sont pas prévus : il y a peu de place pour les grands herbivores dans le petit morceau de désert israélien, encadré par les frontières avec la Jordanie et avec l'Égypte, des zones militaires et les champs des kibboutz.

La nature «biblique» des animaux n'est pas indispensable à leur hébergement en Israël. Ainsi, l'antilope addax du Sahara, reconnaissable à ses cornes torsadées, n'y avait sans doute jamais vécu, bien que certains aient cru en trouver mention dans la Bible. Mais victime d'une chasse intensive, l'addax est l'une des espèces les plus menacées de la planète, et les Israéliens ont décidé d'en élever chez eux. Ils espèrent ensuite les remettre en liberté dans les pays dont ils ont disparu : Sénégal, Tunisie, Maroc. À condition que leur sécurité y soit garantie...

Aujourd'hui, Israël est en effet le seul pays de la région où les gazelles et les outardes ne sont pas pourchassées. Toutes les espèces sauvages existant encore dans le pays (bouquetins, gazelles, loups, léopards) sont protégées. La préservation des milieux naturels est malheureusement moins satisfaisante : seuls les espaces impropres à l'agriculture et à l'urbanisation ont survécu à 50 ans de colonisation.

Jérôme TUBIANA



De profil, l'oryx d'Arabie semble n'avoir qu'une seule corne : c'est la «licorne» de l'Ancien Testament. Il vient d'être réintroduit en Israël, d'où il avait disparu.

Le jour où le ciel s'enflamma

JEFFREY WYNN • EUGENE SHOEMAKER

Une météorite a creusé trois cratères au milieu du désert.

Au milieu du désert Rub'al-Khali, en Arabie Saoudite, de vastes dunes de sable grisâtre, mouvantes, s'étendent à perte de vue : pas un seul rocher à l'horizon. Au crépuscule, bien que le soleil soit couché, la température de l'air est encore de 50 °C, et le vent souffle du Sud, au début du printemps.

Soudain, un point lumineux apparaît à l'horizon. Son éclat augmente et, en quelques secondes, quatre traînées fulgurantes au moins traversent le ciel. Des objets brillants filent silencieusement, puis heurtent le sol avec un bruit de tonnerre assourdissant. Le sol se soulève, et une onde de choc souffle tout à plus de 100 mètres. Un rideau de sable incandescent s'élève dans le ciel.

Des pierres blanches traversent les airs et sont absorbées par le sable fondu par la chaleur de l'impact. Quelques-unes retombent sur le sol, aspergées d'une pellicule visqueuse et luisante semblable à de la peinture blanche qui se solidifie en quelques secondes, virant au jaune, puis à l'orange, au rouge et, enfin, au noir. Les pierres totalement recouvertes de cette substance noire deviennent poreuses, vitreuses, et si légères qu'elles flotteraient sur l'eau s'il y en avait dans cet enfer.

La brise emporte alors un champignon incandescent aux couleurs de l'arc-en-ciel. Puis, il pleut du verre fondu. Tout est obscurci.

Quand cette scène s'est-elle produite ? Si elle a eu des témoins, ce qui



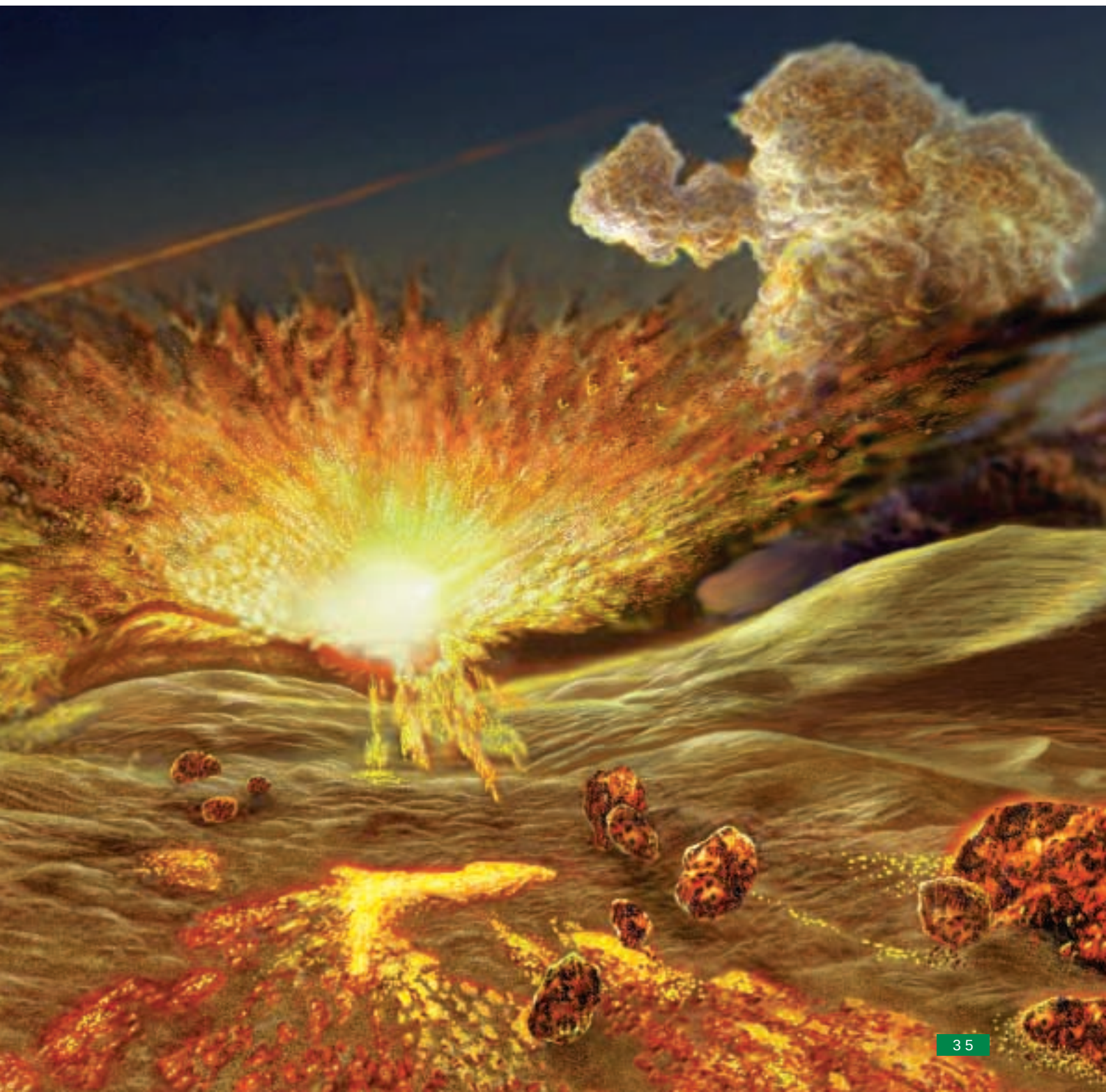
Don Dixon

est peu probable, ils n'ont jamais pu la décrire. Depuis des générations, les bédouins al-Murra nomment al-Hadida, «les choses de fer», une région étrange, d'un demi-kilomètre carré, couverte de verre noir, de cailloux blancs et de scories de fer.

Le Coran et d'autres textes arabes relatent la destruction, par un nuage noir emmené sur les ailes d'un grand vent, de la ville d'Ubar, en punition de l'impiété de son roi, qui s'était moqué d'un prophète. En 1932, alors que l'explora-

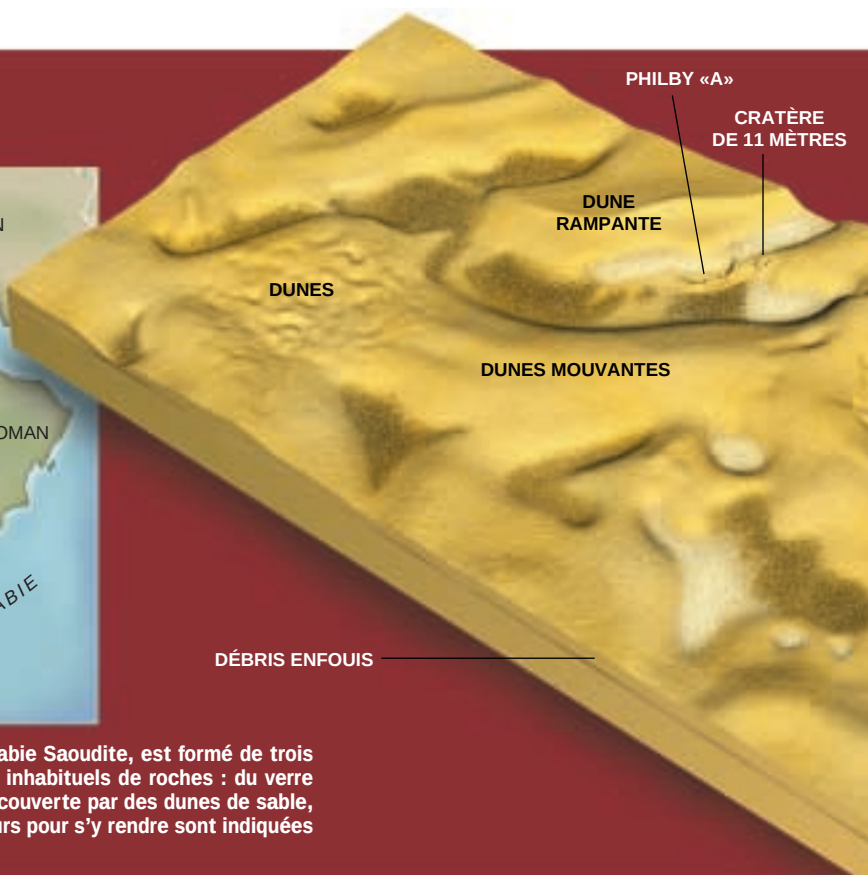
teur britannique Harry Philby voyage dans le Rub'al-Khali, ses guides lui proposent de le conduire sur les ruines de cette cité perdue. Philby, qui nomme le site Wabar, n'y découvre aucun vestige humain (le site d'Ubar a été repéré en 1992 environ 400 kilomètres plus au Sud grâce à des photographies prises par un satellite), mais il observe les restes d'un cataclysme entièrement minéral : la chute d'une météorite. L'énergie dégagée par la collision aurait été proche de celle qui fut libérée à Hiroshima.

L'impact de Wabar n'a pas été le plus violent qu'ait subi notre planète. C'est toutefois l'un de ceux dont on a le plus de traces et, peut-être, le plus simple géologiquement : alors que les météorites heurtent le plus souvent des roches dures ou des roches couvertes d'une mince pellicule de sol ou d'eau, celle de Wabar est tombée dans un environnement très uniforme, la plus grande mer de sable du Globe. En outre, c'est l'un des 17 sites d'impact, sur près de 160 connus, où l'on retrouve





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 hawaïen, 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

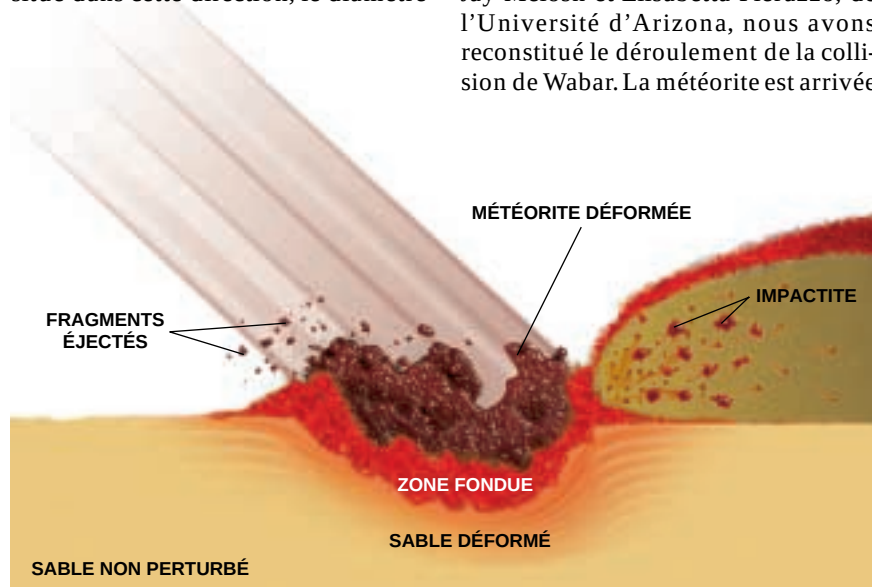
de ces gouttes n'est plus que de quelques millimètres et, s'il y en a au-delà, elles sont enfouies dans les dunes de sable. Ce verre est homogène : il contient 90 pour cent de sable local, qui en forme la matrice, et 10 pour cent de fer et de nickel, concentrés dans des inclusions. Certaines éclaboussures 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

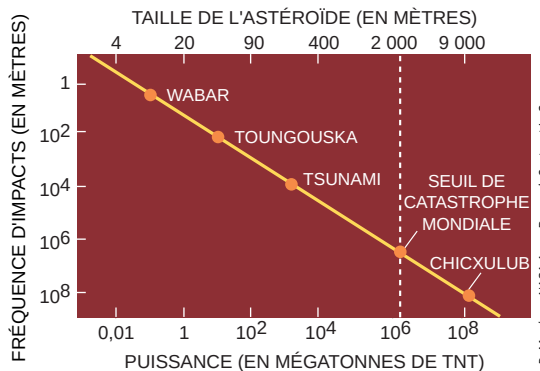


Slim Films

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.

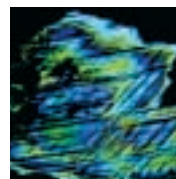
Aucun cône d'éclat n'apparaît à Wabar, parce que le site s'est formé dans du sable meuble.



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.

L'onde de choc a par ailleurs soulevé le sol : une partie de l'impactite a été projetée dans le verre fondu et choquée à nouveau. Dans certains échantillons de roche, ce mélange apparaît comme une épaisse peinture noire, plaquée sur l'impactite. D'autres morceaux d'impactite ont été complètement plongés dans le verre à des températures supérieures à de 1 000 °C : l'impactite a subi une seconde transition et s'est transformée en perles de verre. Tout le sable qui se trouvait là a été soufflé à plusieurs milliers de mètres d'altitude. La brise crépusculaire, sans doute assez faible, a transporté le verre fondu sur une distance de 850 mètres.

Le cratère le plus grand s'est formé en un peu plus de deux secondes, le plus petit en quatre cinquièmes de seconde à peine. Ils ont d'abord été plus grands, peut-être 120 mètres de diamètre pour le plus grand, mais en quelques minutes ils ont été partiellement remplis par des matériaux qui retombaient du ciel et qui glissaient le long des bords.

Une date controversée

Quand ces événements ont-ils eu lieu ? Au début des années 1970, des échantillons de verre ont été datés d'environ 6 400 ans par l'analyse de la décomposition d'éléments radioactifs. Les études des vitesses de remplissage des cratères indiquent toutefois que l'impact de Wabar est plus récent : la profondeur du plus grand cratère était de douze mètres en 1932 et de huit mètres en 1961 ; ce cratère était presque totalement plein de sable en 1982, et son bord Sud-Est ne s'élevait que de trois mètres environ lors de nos visites en 1994 et 1995. Or, des spécialistes des dunes pensent que le remplissage d'un cratère n'est pas un phénomène réversible.

Le site de Wabar aurait sans doute déjà disparu si l'impactite et le verre n'avaient pas fixé le sable. Deux cratères au moins ont une assise rocheuse en impactite : la surface originelle de la cuvette avant le remplissage par le sable. Nous avons prélevé plusieurs échantillons de sable sous ce revêtement d'impactite et nous les avons datés par thermoluminescence (la thermoluminescence mesure depuis combien de temps des grains de quartz sont enfouis à l'abri du rayonnement solaire) : l'impactite s'est formée il y a moins de 450 ans.

Le cataclysme de Wabar n'a même peut-être pas plus de 135 ans : différentes sources rapportent qu'en 1863, ou en 1891, un bolide incandescent est passé au-dessus de Ryad, dans la direction de Wabar, et les météorites qui ont été retrouvées à Nedj après ce passage ont une composition identique aux échantillons de Wabar. Or, les météorites métalliques sont rares, et il est probable que les fragments de Wabar et ceux de Nedj ont la même origine. Les grands-parents des guides de Philby avaient peut-être assisté, de loin, à l'explosion.

Pourquoi nous intéressons-nous tant à la date de cet impact ? Parce que, avec celles des autres chutes de météorites connues, elle permet d'évaluer la fréquence de telles collisions : environ tous les dix ans. Plus généralement, la fréquence des impacts de météorites sur la Terre est inversement proportionnelle à la taille de celles-ci.

On trouve des cratères de météorites métalliques semblables à Odessa, au Texas ; à Henbury, en Australie ; à Sikhote-Alin, en Sibérie, et ailleurs.



Jeffrey C. Wynn

5. LE SECOND GROS CRATÈRE du site de Wabar, «Philby A», a été presque totalement recouvert par une dune rampante. Seul son bord Sud-Est, préservé par un mélange gravillonneux de roches formées durant l'impact, émerge encore du sable. Ce cratère de 64 mètres de diamètre est dû à une météorite de cinq mètres de diamètre, issue d'une météorite plus grosse qui s'est disloquée en vol. Les fragments ont percuté le sol à des vitesses de 25 000 kilomètres par heure.



Joe Polimeni et Bill Chasteen, Zahid Tracer Corporation and A.M. General Corporation

6. LA COUVERTURE D'ÉJECTA qui entoure le cratère «Philby A» est composée de trois types de roches déposées lors de l'impact : l'impactite blanche (semblable au grès et formée par la compression du sable), un verre noir (produit par la fusion du sable) et des fragments de la météorite (du fer presque pur, avec un peu de nickel). Sur cette image, les auteurs utilisent des magnétomètres pour rechercher les débris météoritiques.

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.