

TSAVORITE
de Merelani,
en Tanzanie.



La tanzanite, quant à elle, s'est formée à partir de fluides hydrothermaux lors de la phase de refroidissement du métamorphisme régional (métamorphisme rétrograde). La formation a eu lieu à des températures comprises entre 390 et 450 °C et des pressions de 2×10^8 à 3×10^8 pascals, soit dans des veines de quartz, soit par transformation de la tsavorite par hydratation du grenat. D'après la datation par traces de fission sur la tanzanite – une technique qui examine les traces laissées par la désintégration spontanée de certains éléments radioactifs –, elle aurait cristallisé il y a environ 585 millions d'années.

JADE MAYA en jadéite
(hauteur 20 cm).



moins d'une zone de subduction entre les plaques américaine et caraïbes. Tous les gisements de jadéite (et beaucoup de néphrite) se forment à la périphérie des plaques, où des fluides interagissent avec des péridotites (roches riches en magnésium et en fer) et avec les roches environnantes, à une profondeur atteignant 50 kilomètres.

L'essentiel de la néphrite est un produit de la transformation chimique de roches par la circulation de fluides au contact d'une intrusion siliceuse ou d'une extrusion magmatique (métasomatisme de contact), et ce de deux façons : le remplacement de la serpentinite par du calcium au contact de la roche siliceuse, et le remplacement de la dolomite par des fluides riches en silice associés aux magmas granitiques. Les principaux gisements de la première catégorie sont situés dans des mines du Nord de la Colombie-Britannique et dans le massif du Saïan oriental en Sibérie. Moins étendues et abondantes, les mines de la seconde catégorie se trouvent dans les monts Kunlan en Chine et la province de Co-well dans le Sud de l'Australie.

Si de nombreuses gemmes sont encore extraites par des exploitants isolés dans des endroits difficiles d'accès, l'industrie des gemmes s'est modernisée en systématisant ses méthodes de prospection de nouveaux gisements. Depuis que, dans les années 1980, les images du satellite d'observation de la surface terrestre *Landsat* ont été mises à disposition pour un coût faible, les prospecteurs possédant une technologie de pointe cartographient directement les gîtes minéraux à l'aide de ces clichés dans le domaine visible, voire d'autres bandes spectrales dans des zones dépourvues de végétation. Et les satellites plus récents ont encore amélioré la résolution des images.

Quand la technologie s'en mêle

Au Canada, les images satellites et aériennes ont été utilisées pour rechercher des sites potentiels de kimberlite diamantifère, car les mesures chimiques et magnétiques sur ces formations sont différentes de celles des roches environnantes. La recherche des signatures magnétiques est particulièrement utile pour la découverte de kimberlites sous couverture ou sous l'eau. En 2002, au Canada, 150 millions d'hectares de zones potentielles de kimberlite ont été identifiées, parmi lesquels 4 millions d'hectares se sont révélés diamantifères par échantillonnage direct (dont 22 kimberlites qui devraient avoir un rendement important).

D'autres propriétés physico-chimiques des roches sont utilisées pour l'exploration. Cédric Simonet et ses collègues, de la Société *Akili Mineral Services*, au Kenya, ont trouvé que les roches associées aux gisements de rubis dans ce pays ont une résistance électrique et une radioactivité inférieures à celles des roches hôtes environnantes.

Une autre approche est la géochimie, la recherche de compositions minérales comme signature de certains gisements de gemmes. En Colombie, les roches hôtes à forte teneur en sodium, mais appauvries en lithium, potassium, béryllium et molybdène, se sont révélées de bons indicateurs pour la prospection des émeraude. Il en est de même pour les cours d'eau et les sédiments : des relevés ont montré que, lorsque les cours d'eau et les sédiments s'écoulent de gisements d'émeraude connus, leur composition est différente. Un contenu en sodium anormal dans les sédiments a aussi été utilisé avec succès pour trouver plusieurs nouvelles sources d'émeraude.

Les bérylomètres sont des instruments utiles pour rechercher les émeraude et autres béryls. Ces appareils projettent un rayonnement gamma qui excite les atomes de béryllium, de telle sorte que sa teneur peut être mesurée dans les roches hôtes. Deux modèles sont disponibles, l'un léger (2 kilogrammes), mais lent et peu sensible, l'autre assez lourd (17 kilogrammes), mais plus rapide et sensible. Leurs inconvénients respectifs limitent leur utilisation sur le terrain.

Notre groupe étudie des approches pour explorer des gisements d'émeraude susceptibles d'appartenir au type colombien, telles les vastes étendues de schistes noirs du Nord-Ouest canadien. D'une part, nous effectuons des analyses géochimiques d'échantillons afin de rechercher les régions riches en sodium et pauvres en béryllium et en potassium. D'autre part, nous examinons la géologie structurale à la recherche de régions propices : présence de failles de déchirement, de charriages reliés à des plans de décollement régionaux (où une unité géologique glisse par rapport à une autre).

D'autres études ont montré que les magmas des pegmatites à émeraude sont fractionnés : leurs éléments constitutifs sont séparés selon leur solubilité. Ce processus enrichit le fluide en béryllium, qui atteint son seuil de saturation – une condition nécessaire à la formation des émeraude. De telles pegmatites sont décelées par leurs signatures géochimiques, telles que les rapports potassium-rubidium ou rubidium-strontium. Quant aux zones à pegmatites encore non repérées – des massifs cristallins formés de roches issues du refroidissement d'un magma en profondeur (plutons) –, elles sont identifiées à l'aide de l'imagerie satellitaire.

Ces outils sont bien sûr à utiliser avec prudence, car ils ne sont pas infaillibles. Les analyses géochimiques dépendent de la dissolution correcte des phases minérales qui contiennent les éléments recherchés, et la spectrométrie de masse, qui permet d'étudier la composition chimique d'un échantillon, présente des limites de sensibilité en fonction des éléments en présence.

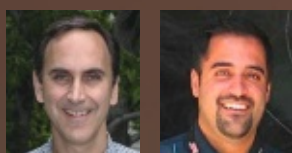
À mesure que la technologie progresse, il est probable que la localisation des régions recelant des gemmes sera facilitée. Deviendront-elles alors moins rares et, de ce fait, moins précieuses ? Pas pour les géologues en tout cas, qui y verront autant de sources d'informations sur les rouages internes de la Terre. ■

Déchiffrer la planète rouge

Le 6 août à 7 h 31, heure de Paris, le robot *Curiosity* de la NASA se posera sur Mars et entamera pour la première fois la recherche directe de traces d'un environnement propice à la vie.

John Grotzinger et Ashwin Vasavada

■ LES AUTEURS



John GROTZINGER est directeur scientifique de la mission *Mars Science Laboratory*.

Ashwin VASAVADA est directeur scientifique adjoint du projet.

■ BIBLIOGRAPHIE

P. Smith, On a creusé sur Mars, *Pour la Science* n° 411, janvier 2012. http://bit.ly/411_smith

J. Bell, Mars : un passé humide, *Pour la Science* n° 352, février 2007. http://bit.ly/352_bell

P. Christensen, Histoires d'eau sur Mars, *Pour la Science* n° 333, juillet 2005. http://bit.ly/333_christensen

Le site de la NASA sur la mission *Curiosity* : www.nasa.gov/mission_pages/msl/index.html#471

F. Forget, F. Costard et Ph. Lognonné, La planète Mars, histoire d'un autre monde, Belin-Pour la Science, 2007.

En science, tout commence souvent comme dans la série *Star Trek* : on explore des territoires encore vierges et on découvre des choses que l'on n'avait pas imaginées auparavant. Mais une fois les premières analyses terminées et une longue liste de questions dressée, on se retrouve plutôt dans *Sherlock Holmes* : il s'agit de formuler des hypothèses précises et d'imaginer des moyens de les vérifier. L'exploration de Mars est à la veille de cette transition. Les sondes en orbite ont établi des cartes topographiques et minéralogiques globales de la surface, et les atterrisseurs ont permis de reconstituer les grandes lignes de son histoire géologique. Il est temps de passer à des recherches plus pointues.

Notre équipe a construit le véhicule d'exploration *Mars Science Laboratory*, surnommé *Curiosity*, en supposant que Mars a jadis été une planète habitable. Ce « rover » embarque un laboratoire d'analyses pour tester cette hypothèse et déterminer ce qu'il est advenu des conditions propices à la vie qu'aurait connues la planète dans sa jeunesse. Pour l'essentiel, un environnement habitable comprend de l'eau, de l'énergie et du carbone. Les missions précédentes ont confirmé que de l'eau liquide était présente sur Mars par le passé. Elles ont également détecté des signes de gradients géochimiques sus-

ceptibles de fournir de l'énergie. Mais aucune trace de carbone sous une forme exploitable par des organismes vivants n'a été décelée.

Comme les missions *Viking* des années 1970, *Curiosity* est doté d'un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectrographe de masse capable d'identifier les composés organiques, qu'ils soient d'origine biologique ou non. Mais contrairement aux sondes *Viking*, *Curiosity* peut se déplacer, et il se posera dans un site bien plus prometteur.

Et, plus que de trouver le carbone lui-même, la mission vise à comprendre comment chercher des traces de vie. Même sur Terre, nous ne savons pas exactement comment explorer les enregistrements géologiques pour dénicher de telles traces. Les caractéristiques qui font un environnement habitable (eau, oxydants, gradients chimiques et de température, etc.) tendent aussi à dégrader les composés organiques. Les paléontologues ont appris à rechercher les conditions qui facilitent la préservation, par exemple la minéralisation précoce. On sait que la silice, le phosphate, l'argile, le sulfate ou le carbonate séquestrent les substances organiques en précipitant. Les cartes minéralogiques établies par les sondes orbitales pour certains de ces minéraux autour du site d'atterrissage de *Curiosity* permettront de guider son exploration...

De l'espace au sol en sept minutes

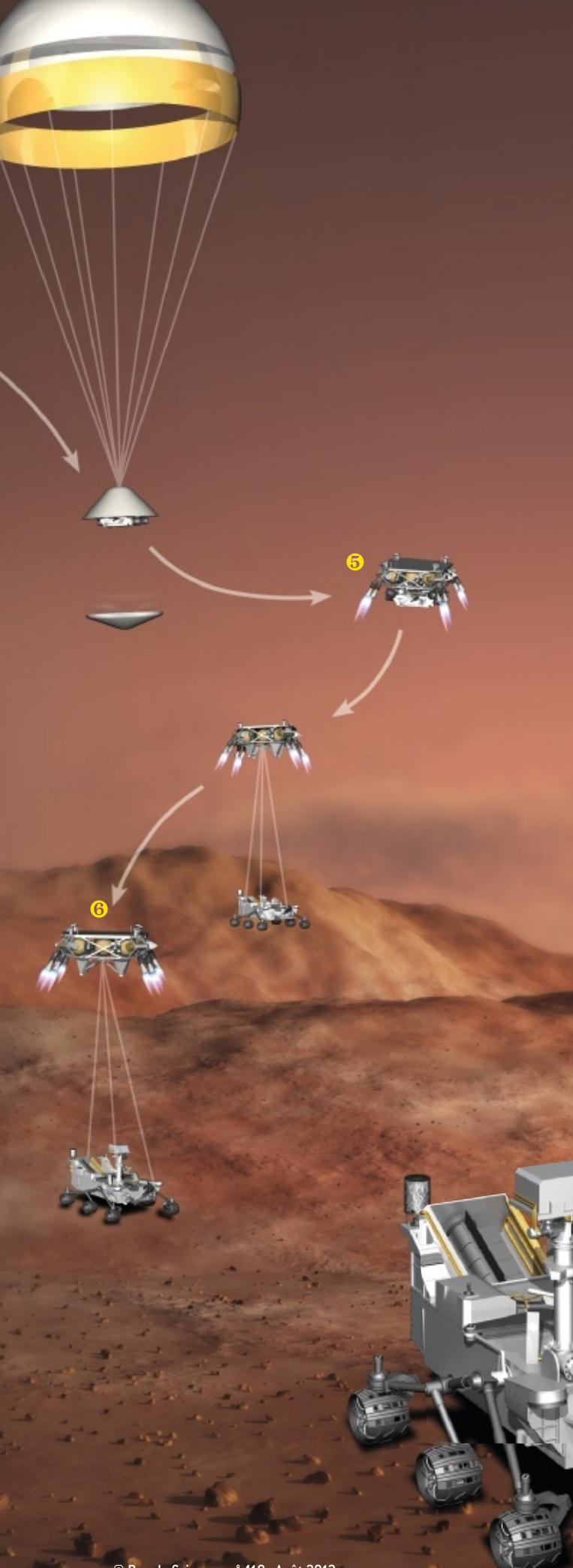
Qui dit rover sophistiqué dit rover volumineux et lourd. *Curiosity* a la taille d'une petite voiture et une masse de 900 kilogrammes. La capsule qui le transporte dans l'espace est plus grosse que celle qui abritait les astronautes d'*Apollo*. Par conséquent, la méthode d'atterrissage retenue pour *Curiosity* est inédite.

La capsule de rentrée atmosphérique commence par se séparer des systèmes de propulsion spatiale et d'alimentation ❶. Elle éjecte du lest (en tungstène) pour déplacer son centre de masse et se transformer en une sorte d'aile pilotable. La capsule rencontre la haute atmosphère martienne à une vitesse hypersonique d'environ six kilomètres par seconde. Son bouclier thermique absorbe l'énorme quantité d'énergie produite par le freinage ❷. Le vaisseau vole alors horizontalement, des propulseurs latéraux le dirigeant vers le site d'atterrissage ❸.

À une altitude de 10 kilomètres, le vaisseau déploie un parachute de 21,5 mètres de diamètre et long de 50 mètres ❹. À ce stade, la vitesse de descente est toujours supersonique. La conception du parachute a été un point délicat : à de telles vitesses, la physique qui gouverne le déploiement du parachute est mal comprise et très difficile à modéliser.

Peu après avoir déployé son parachute, la capsule largue le bouclier thermique et allume le radar de détection du sol. À environ deux kilomètres d'altitude, le vaisseau descend à une centaine de mètres par seconde, presque à la vitesse terminale, la plus lente qui puisse être atteinte grâce au freinage de l'atmosphère. C'est encore trop rapide pour un atterrissage : le rover se sépare alors du parachute, et déclenche son dispositif porteur, doté de moteurs-fusées pour contrôler la descente ❺.

À environ 20 mètres au-dessus de la surface, le porteur se stabilise et le rover est descendu au bout de trois câbles. Il est déposé à la surface, roues et suspensions entièrement déployées, à environ 0,75 mètre par seconde ❻. Après deux secondes, le temps de confirmer qu'il est bien sur un sol dur, le rover coupe les câbles et le « cordon ombilical » qui transmet les données au porteur. Ce dernier s'envole alors pour aller s'écraser quelque 450 mètres plus loin ❼. Une heure plus tard, *Curiosity* devrait envoyer les premières images de la surface et, dès la fin du deuxième mois, il aura analysé les premiers échantillons de sol et de roches.



Steve Lee, Univ. of Colorado ; Jim Bell, Cornell Univ. ; Mike Wolff, Space Science Inst.

Passer les roches au crible

La palette d'instruments de *Curiosity* est conçue pour examiner les roches, le sol et l'atmosphère à la recherche d'indices d'environnements passés ou présents propices à la vie. Ces instruments mesurent la composition chimique et minéralogique de diverses façons complémentaires.

LE SPECTROMÈTRE DAN est un détecteur actif et passif de neutrons qui recherchera la présence d'eau dans le premier mètre du sol à l'aplomb du rover.

UNE STATION MÉTÉOROLOGIQUE (REMS) mesurera les conditions ambiantes et livrera des bulletins quotidiens. Ces données serviront aussi à guider les opérations du rover.

UN DÉTECTEUR DE RAYONNEMENT (RAD) enregistrera le rayonnement solaire et cosmique.

LE LABORATOIRE SAM est un ensemble d'instruments à la recherche de molécules organiques. Il cuit les roches réduites en poudre dans de petits fours à combustion ou à solvants. Les gaz libérés sont analysés par le chromatographe en phase gazeuse/spectrographe de masse et par l'analyseur de gaz. L'instrument peut aussi échantillonner directement l'atmosphère.

40 centimètres

DES CAMÉRAS EN COULEUR (MASTCAM) enregistreront des images en haute résolution des paysages et des textures des roches. Ces dernières aideront à reconstituer les processus de formation des roches et du sol, qui impliquent peut-être l'action de l'eau. L'une des caméras (MARDI), située sous le rover, filmera la descente et l'atterrissage.

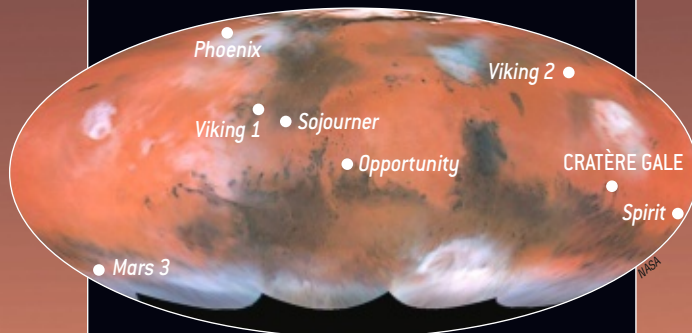
L'INSTRUMENT CHEMIN effectuera l'analyse minéralogique de roches réduites en poudre en envoyant des rayons X pour faire apparaître des motifs de diffraction caractéristiques des minéraux. Contrairement aux missions précédentes, il pourra analyser plusieurs types de minéraux.

LE BRAS ROBOTISÉ, d'une portée allant jusqu'à deux mètres, est équipé de 30 kilogrammes d'outils permettant de percer des trous et de pulvériser des roches. Un ensemble de tamis prépare de la poudre pour les instruments d'analyse.

LE SPECTROMÈTRE PAR ABLATION LASER (CHEMCAM) analysera la composition des roches à distance en les volatilisant en plasma avec un laser et en analysant la lumière qu'elles émettent alors.

LE SPECTROMÈTRE À PARTICULES ALPHA ET RAYONS X (APXS) déterminera *in situ* la composition en éléments lourds des roches par fluorescence induite par rayons X.

LES SITES D'ATTERRISSAGE



Le cratère Gale

Après cinq ans d'études, la NASA a retenu le cratère Gale parmi 50 sites candidats proposés pour faire atterrir *Curiosity*. Dans cet ancien cratère d'impact de 150 kilomètres de diamètre, l'érosion éolienne et des impacts récents ont exposé des matériaux autrefois enterrés, d'anciens dépôts fluviaux qui ont gardé la trace d'écoulements d'eau et des terrains fracturés riches en minéraux, analogues à ceux que l'on trouve sur Terre au-dessus des aquifères.

Le cratère est dominé par un pic central, le mont Sharp, qui culmine à plus de 5 000 mètres au-dessus des plaines environnantes. La majeure partie de ce mont est accessible au rover *Curiosity* par différents chemins. Il en entamera l'ascension 6 à 12 mois après l'atterrissage. Le pic est constitué de strates de roches sédimentaires qui, lues de bas en haut, livreront une chronologie de la jeunesse de la planète. En huit ans, le rover *Opportunity* a examiné 15 à 20 mètres de strate ; trop peu pour retracer l'évolution du climat, mais assez pour donner un aperçu de ce que verra *Curiosity*.

Les roches sédimentaires sont particulièrement intéressantes et pourraient renfermer des signatures éventuelles de vie passée. En se plongeant dans l'histoire martienne, *Curiosity* éclairera de façon indirecte une période de l'histoire terrestre qui a presque disparu des profils géologiques, quand les deux planètes n'étaient peut-être pas si différentes. De quoi mieux comprendre notre propre planète...

Le cerveau STRESSÉ

Amy Arnsten, Carolyn Mazure et Rajita Sinha

Les circuits neuronaux assurant le contrôle de soi sont perturbés par un stress, même modéré. Dès lors, les émotions et les désirs prennent les commandes...

Chez certains étudiants, la pression des examens perturbe, voire bloque totalement, les capacités de raisonnement. Les expressions imagées ne manquent pas pour décrire ce phénomène : être paralysé, sur les nerfs, mort de peur, au bord de l'évanouissement, etc. De même, certaines personnes sont paralysées à l'idée de parler en public. Les situations de stress sont courantes, et chacun en connaît les effets.

Les neuroscientifiques croyaient comprendre les mécanismes cérébraux du stress, mais les recherches récentes ont remis en cause leurs explications. La réponse au stress n'est pas seulement une réaction primitive, qui ne concerne que les aires cérébrales communes à de nombreuses espèces, de la salamandre à l'homme. En réalité, le stress affecte les facultés cognitives, les zones cérébrales les plus élaborées chez les primates.

Auparavant, on décrivait la manifestation physiologique du stress comme une réaction de l'hypothalamus, une structure apparue très tôt au cours de l'évolution et située à la base du cerveau : l'hypothalamus déclencherait la sécrétion d'hormones par l'hypophyse (localisée à la base du cerveau) et les glandes surrénales (juste au-dessus des

reins), hormones qui accélèrent le rythme cardiaque, augmentent la pression sanguine et diminuent l'appétit. Les recherches récentes ont révélé un rôle inattendu du cortex préfrontal, une structure cérébrale située derrière le front. Il est le siège des capacités cognitives les plus élaborées – la concentration, la planification, la prise de décision, l'intuition, le jugement... C'est la partie du cerveau apparue le plus tard au cours de l'évolution.

Le cortex préfrontal agit comme un centre de commande. Quand tout va bien, il maintient nos émotions et nos pulsions « primaires » sous contrôle. En revanche, un stress aigu déclenche une série d'événements chimiques qui réduisent son influence, tout en renforçant celle d'aires cérébrales plus anciennes. Nous pouvons alors nous retrouver en proie à une anxiété paralysante ou à des pulsions que d'habitude nous réussissons à contrôler : excès de nourriture et de boissons, consommation de drogues, frénésie dépensière... En d'autres termes, nous perdons le contrôle de nous-mêmes.

Depuis qu'ils ont découvert que le stress peut perturber des fonctions exécutives supérieures, les neurobiologistes cherchent



Dan Saelinger