

Droit de réponse

par Jules Leveugle

Dans son article Einstein ou Poincaré (voir Pour la Science n° 330, avril 2005), où il n'est pas avare de propos blessants, Jean Eisenstaedt tente de discréditer mon Histoire véridique de la théorie de la relativité, où sont discutées les contributions respectives d'Henri Poincaré et d'Albert Einstein dans la découverte de cette théorie. La critique est légitime, bien entendu, à condition qu'elle porte sur le fond. Mais le procès d'intention qui m'est fait n'est pas admissible, car mon but n'a été que la recherche de la vérité. J. Eisenstaedt a visiblement trouvé blasphématoires les résultats exposés dans mon ouvrage. Cela ne l'autorisait pas à déformer mes positions. Ne pouvant accepter la présentation qu'il en a faite, je suis obligé de lui répondre, pour rétablir la vérité.

1) Première thèse de mon livre, que J. Eisenstaedt s'attache à réfuter : Poincaré a l'antériorité sur Einstein, dans la découverte de la théorie de la relativité, en 1905. Je n'ai fait, sur ce point, que confirmer les conclusions de Whittaker. En effet, Poincaré a, le premier, énoncé le principe de relativité et il a découvert le groupe de transformations appelé par lui « de Lorentz », qui laisse invariantes les équations de l'électromagnétisme et conduit à une « mécanique nouvelle ». Comment attribuer à Einstein la paternité d'une théorie dont le principe et les équations ont été trouvés avant lui ? Les arguments de J. Eisenstaedt sont les suivants :

a) Poincaré « continue de tenir à l'éther », dont Einstein serait le premier à avoir compris l'inutilité. En réalité, Poincaré avait écrit, dès 1902 : « Il n'y a pas d'espace absolu. Peu nous importe que l'éther existe réellement. C'est l'affaire des métaphysiciens. » Du reste, cette objection est hors sujet, puisque l'hypothèse de l'éther n'intervient nullement dans la théorie de la relativité exposée par Poincaré.

b) Poincaré ne propose pas « une théorie physique », « il passe d'une bonne idée à l'autre sans mettre tout cela en ordre, sans structurer l'ensemble » ; il « a bien jalonné le terrain, il n'en a pas vu le plan ». On a du mal à prendre au sérieux cette critique, s'agissant de l'immense théoricien qu'était Poincaré. Celui-ci a si bien vu « le plan », qu'il a énoncé, le premier, le principe de relativité, et il a si bien « structuré l'ensemble » qu'il a démontré que les transformations « de Lorentz » avaient la structure d'un groupe...

c) Poincaré n'aurait jamais « reconnu le bien-fondé de la relativité einsteinienne » ! Il est vrai que le grand savant français n'a jamais eu la tentation de qualifier d'« einsteinienne » la théorie qu'il avait découverte. Mais il ne pouvait avoir de difficulté à en « reconnaître le bien-fondé », puisque c'était la sienne...

d) Selon J. Eisenstaedt, Poincaré, à la différence d'Einstein, ne démontre pas que « les deux principes, de relativité et d'indépendance de la vitesse de la lumière par rapport à sa source, impliquent les transformations de Lorentz ». En effet, car la constance de la vitesse de la lumière, qu'Einstein prend comme postulat, est, à l'inverse, un résultat évident qui se déduit immédiatement de la structure de groupe des transformations de Lorentz établie par Poincaré.

e) « L'article de Poincaré de 1905 », c'est-à-dire sa note à l'Académie des sciences du 5 juin 1905, « ne contient pas tous les points nécessaires à monter la théorie ». Il est vrai que Poincaré ne répète pas, dans cette note, tout ce qu'il a dit sur le sujet dans ses travaux précédents, mais celle-ci contient clairement l'essentiel : le principe de relativité et le groupe de transformations. La théorie de la relativité présentée par Einstein dans son article du 26 septembre 1905 n'ajoute rien d'important aux résultats déjà publiés par Poincaré à cette date.

2) Deuxième thèse de mon livre, que J. Eisenstaedt ne juge pas moins insupportable que la précédente : l'article d'Einstein n'est pas seulement postérieur aux travaux de Poincaré et Lorentz, il en est une compilation. Whittaker l'avait suggéré, mais j'ai été le premier à le démontrer, dans l'article que j'ai publié en 1994 dans La Jaune et la Rouge et que j'ai reproduit dans mon livre, en effectuant une comparaison terme à

terme de l'article d'Einstein et des écrits de Poincaré. Comme le concède J. Eisenstaedt, il est troublant que l'article d'Einstein ne comprenne aucune référence. Mais cela s'explique aisément si l'auteur a voulu occulter ses sources.

3) Une fois admis qu'Einstein avait emprunté l'essentiel de son article aux textes de Poincaré, il restait à expliquer dans quelles conditions celui-ci avait été élaboré. J'ai donc été conduit, après une longue enquête dans les documents de l'époque, à énoncer une troisième thèse : l'article d'Einstein est le résultat de la volonté délibérée de Planck et de Hilbert d'occulter les découvertes de Poincaré, dans le contexte de la rivalité franco-allemande qui a conduit à la Première Guerre mondiale. Cela ne résulte nullement d'une « lecture paranoïaque de la physique », comme l'écrit aimablement J. Eisenstaedt, car j'ai notamment mis au jour deux faits nouveaux considérables, dont il ne fait pas mention :

– d'abord, Hilbert a écarté des travaux du séminaire qu'il dirigeait sur la théorie des électrons en juin et juillet 1905 la note du 5 juin 1905 de Poincaré à l'Académie des sciences ;

– ensuite, Planck a écarté la publication dans sa revue d'un compte rendu de la note de Poincaré.

Or, le même Planck a organisé, dès la fin de 1905, un colloque retentissant sur l'article signé Einstein et publié dans sa revue, ne faisant, à cette occasion, aucune référence au travail de Poincaré. Ce silence n'aurait pas été possible si celui-ci n'avait pas été préalablement occulté, et dans le séminaire de Hilbert, et dans la revue de Planck, ce qui révèle une entente entre Hilbert, Planck et Einstein.

Ainsi, l'explication la plus simple est que l'article dit « fondateur » a été compilé en quelques jours, en juin 1905, à Göttingen, à l'initiative de Hilbert, en accord avec Planck, et qu'Einstein a volontiers consenti à signer cette compilation.

Einstein est devenu un tel mythe, aujourd'hui, qu'il est difficile de discuter de la paternité de la théorie de la relativité sans déclencher des passions. Nous avons, cependant, pris ce risque, pour rester fidèle à cette belle pensée de Poincaré : « La recherche de la vérité doit être le but de notre activité : c'est la seule fin qui soit digne d'elle. »

Simuler quoi ?

Les simulations que nous présentent Chris Barret, Stephen Eubank et James Smith dans *Et si la variole frappait Paris* (voir Pour la Science n° 330, avril 2005) tiennent-elles compte de la sociologie d'une population ? Les auteurs considèrent qu'en cas de contamination, la population resterait cloîtrée chez elle. Or dans un pays tel que les États-Unis, une proportion élevée de la population n'a pas de protection sociale. Les gens iraient probablement au travail malgré une très forte fièvre et sèmeraient leurs germes pathogènes parmi la population encore saine – d'où un risque important de surmortalité.

David Daniel, par courriel

Réponse d'Éric Bonabeau,
directeur scientifique chez Icosystem

Au-delà du niveau de vie, ce sont les habitudes et activités de la population, ainsi que sa réponse à des mesures de santé publique, qui influent sur la diffusion des épidémies. Le degré d'applicabilité d'une mesure de santé publique doit être pris en compte dès sa conception et doit faire partie des hypothèses de la simulation pour que celle-ci produise des résultats à caractère prédictif. Quels que soient les motifs et motivations des individus, le comportement est une composante importante des simulations. Soulignons que la simulation n'est qu'un outil qui produit des projections dont la qualité dépend de celle des hypothèses sous-jacentes et des données disponibles. En d'autres termes, elle est à utiliser avec précaution.

Histoires d'eau sur

Le premier des deux robots envoyés sur Mars en 2004 a trouvé un ancien désert, le second s'est posé sur une région jadis aquatique. L'eau liquide a été rare sur Mars, mais sa présence passée est aujourd'hui une certitude.

Philip Christensen

Nombreux sont ceux que le désert attire par son aspect désolé et sa sobriété dépouillée. Pour ma part, je le trouve fascinant par sa complexité. Les pierres de l'Arizona témoignent d'une histoire des plus embrouillées. Des couches de calcaire, de limon, de sable de quartz et de lave solidifiée attestent que durant les derniers 600 millions d'années, cette région a été successivement une mer chaude et peu profonde, un marécage boueux, un désert de dunes brûlantes, une étendue glacée, avant de redevenir une mer peu profonde. Des volcans en éruption ont alors formé de grandes îles, avant que le soulèvement et l'érosion ne sculptent finalement le paysage désertique actuel.

Ce type de reconstitution historique a longtemps été impossible pour Mars. Au fil des ans, j'ai vu le statut de la planète rouge passer de celui de simple point dans le ciel à celui d'un monde familier aux hommes, une contrée dominée par des volcans, des lits de rivières et des lacs asséchés, et des plaines de laves balayées par le vent. Mars a sans doute une des histoires les plus passionnantes du Système solaire. Cependant, les scientifiques n'ont pu s'en faire jusqu'ici qu'une vague idée. Pendant des années, on s'est demandé si Mars avait été par le passé chaude et humide comme la Terre ou froide et sèche comme la Lune.

La question a depuis pris de l'ampleur. Durant la dernière décennie, nous avons entamé la troisième phase de l'exploration martienne, après les observations au télescope du XIX^e siècle et les reconnaissances spatiales des années 1960 et 1970. Les récentes missions orbitales et les modules d'exploration au sol ont cartographié le relief de la planète, déterminé sa minéralogie et livré des images suffisamment détaillées de la surface pour que l'on puisse interpréter les processus géologiques et confronter les résultats des vols orbitaux avec les données de terrain. Les planétologues peuvent enfin étudier Mars à la façon des géologues, en utilisant les roches, les minéraux et les motifs du relief pour reconstruire une histoire.

Nous avons découvert que Mars a connu une grande diversité de processus et de conditions au cours de son histoire. Le sol de la planète rouge a été à la fois complètement desséché, gorgé d'eau, recouvert de glace ou de neige. Les descriptions sommaires ne suffisent plus. Les questions portent aujourd'hui sur les niveaux de chaleur et d'humidité et leur répartition dans l'espace et dans le temps. La réponse contient en germe ce qui motive beaucoup d'entre nous à étudier la planète rouge : sa capacité, passée ou actuelle, à héberger la vie.

Deux sites, deux planètes ?

En janvier 2004, la NASA a fait se poser deux engins sur des sites très distincts de Mars. Les deux modules d'exploration *Spirit* et *Opportunity*, truffés de caméras et de spectromètres destinés à déterminer la composition du sol et des roches, sont partis en exploration pour répondre à la question centrale de la géologie martienne : quel rôle a joué l'eau ?

Spirit s'est posé dans le cratère de Gusev, choisi car les images prises en orbite avaient montré qu'une vallée, Ma'adim, débouche dans le cratère comme si celui-ci avait été un lac par le passé. Dans un premier temps, ce site s'est révélé décevant. *Spirit* n'a détecté aucun signe d'une présence ancienne d'eau. Il a trouvé au contraire des roches volcaniques qui, s'est-il avéré, sont de l'olivine et du pyroxène, des minéraux qui sont altérés par la moindre trace d'eau liquide. Le cratère de Gusev n'a donc pas été exposé de façon notable à l'eau durant les quelque trois milliards d'années qui ont suivi l'éruption volcanique. La situation est devenue plus intéressante lorsque *Spirit* s'est aventuré dans les collines de Columbia, qui surplombent le site d'atterrissage. Le robot y a découvert des sels de soufre en abondance. Les roches volcaniques semblent avoir été broyées en grains fins et avoir ensuite été cimentées par le sel – un processus qui a pu faire intervenir de l'eau percolant à travers les roches ou de l'acide sulfurique réagissant avec les minéraux présents dans ces roches. Malgré ces indices de la présence d'eau,

Mars

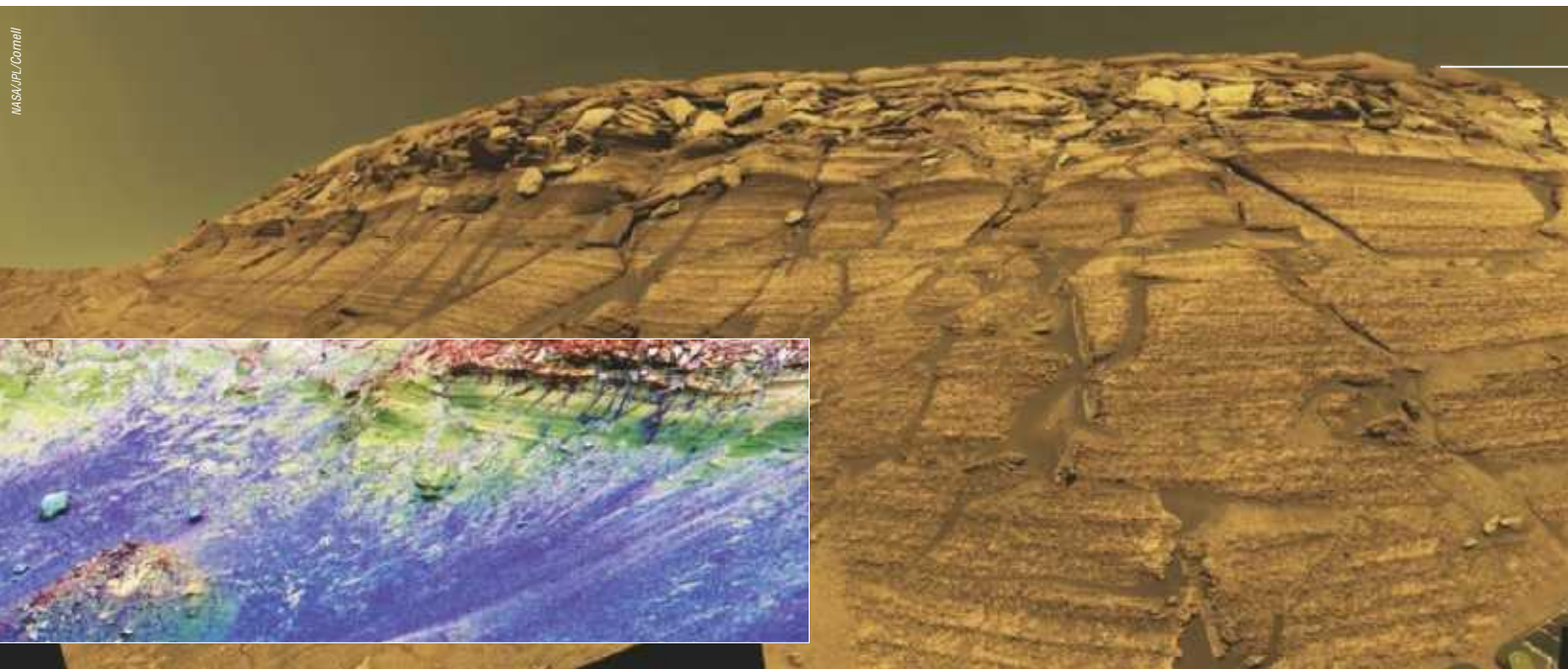
Vasistas Borealis

Utopia Planitia

Cratère Lyot

Arabia Terra

1. Lever de Soleil sur Arabia Terra, vue de l'Ouest vers *Utopia Planitia*. Cette vue d'artiste est une reconstruction d'images de Mars prises en orbite. Elle montre les bords de *Vasistas Borealis*, une vaste plaine qui a pu être inondée par les eaux d'anciens canaux. Au centre, le Soleil projette ses premiers rayons sur la lèvre Ouest du cratère Lyot.



ces roches contiennent néanmoins une quantité significative d'olivine et de pyroxène. De fait, même pour ce qui a pu être un jour le fond d'un lac, l'eau semble avoir joué un rôle mineur au cours des derniers milliards d'années.

Le robot *Opportunity* s'est posé, lui, dans la plaine de *Meridiani*. C'est la première fois que les planétologues choisissent une zone d'exploration en fonction de sa minéralogie. Les premières missions spatiales vers Mars avaient étudié la composition de sa surface en termes d'éléments chimiques, mais pour identifier les minéraux par leur composition et leur structure cristalline, il a fallu attendre que *Mars Global Surveyor*, l'orbiteur de la NASA équipé du spectromètre à émission thermique TES (pour *thermal emission spectrometer*), atteigne la planète en 1997. Dans les cartes minéralogiques ainsi établies, *Meridiani* se distinguait par son abondance en hématite cristalline, une signature possible de la présence d'eau.

Cet oxyde de fer, commun sur Terre, se forme en effet par différents processus faisant en général intervenir l'eau. L'un d'entre eux est la précipitation de fluides circulant à travers des sédiments ; un autre correspond au dépôt et à la déshydratation de minéraux ferreux riches en eau comme la goëthite, une roche ocre présente dans de nombreux sols désertiques. De surcroît, les roches riches en hématite de la plaine de *Meridiani* semblent s'être finement stratifiées et facilement érodées ; elles reposent sur la couche superficielle plus ancienne et constellée de cratères, ce qui suggère un dépôt sédimentaire ; et elles ont rempli les canaux préexistants ainsi que les régions de basse altitude, ce qui suggère qu'elles ont été déposées par un écoulement d'eau (des cendres volcaniques ou des poussières portées par les vents auraient recouvert l'ensemble du paysage).

Quelques jours après s'être posé, *Opportunity* a confirmé que *Meridiani* s'était trouvée sous l'eau par le passé. Le robot a repéré des affleurements de roches sédimentaires en couches, les premières trouvées sur Mars. Les roches contien-

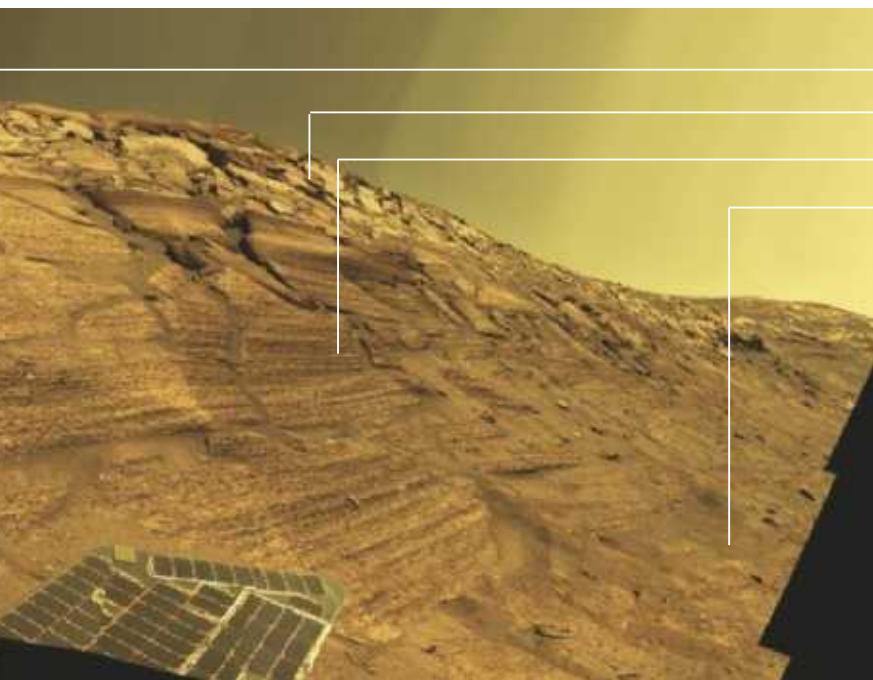
nent tant de sulfate, de 30 à 40 pour cent de leur masse, que seule l'évaporation d'une eau riche en soufre peut en rendre compte. L'hématite est présente sous forme de boulettes de quelques millimètres de diamètre surnommées myrtilles, ancrées dans la roche ou dispersées sur le sol.

Opportunity a exploré pendant six mois un des affleurements, nommé *Burns Cliff*, pour la première fois sous différents angles, à la façon des géologues sur Terre. Les 11 couches visibles se présentent sous la forme d'une série de dunes de sable mouillées par des eaux de surface et de sous-sol. Elles comportent de nombreux grains de sulfates formés par l'évaporation d'eau stagnante, peut-être dans les dépressions (nommées *playas*) entre les dunes. En comparant cela à des phénomènes terrestres similaires, on conclut que les roches de *Burns Cliff* ont dû se former en plusieurs centaines de milliers d'années. Les boulettes d'hématite se sont sans doute formées plus tardivement à partir des fluides riches en fer qui circulaient dans les sédiments.

L'hématite, un marqueur d'eau

Même la morphologie des plaines de *Meridiani*, un des paysages les plus plats de tout le Système solaire, évoque le fond d'un lac. L'étendue de l'hématite suggère que c'était un grand lac isolé ou une petite mer plutôt qu'une partie d'un grand océan. Plusieurs cratères au Sud et à l'Ouest du dépôt principal d'hématite contiennent aussi des roches stratifiées riches en hématite ; peut-être constituaient-ils des lacs séparés. L'eau était, en tout cas, omniprésente dans cette région.

En somme, les deux sondes semblent s'être posées sur deux planètes totalement différentes, l'une plus sèche que tous les déserts de la Terre, l'autre parsemée de lacs. Mars présente-t-elle deux visages très contrastés, ou ses paysages se déclinent-ils à l'infini ? Ces deux sites, séparés par des milliers de kilomètres, représentent-ils l'ensemble du spectre de la composition rocheuse et de l'activité aqueuse sur Mars ?



Sédiments riches en sulfates déposés par l'eau

Sable laminé d'origine éolienne

Sable éolien déposé en couches rugueuses

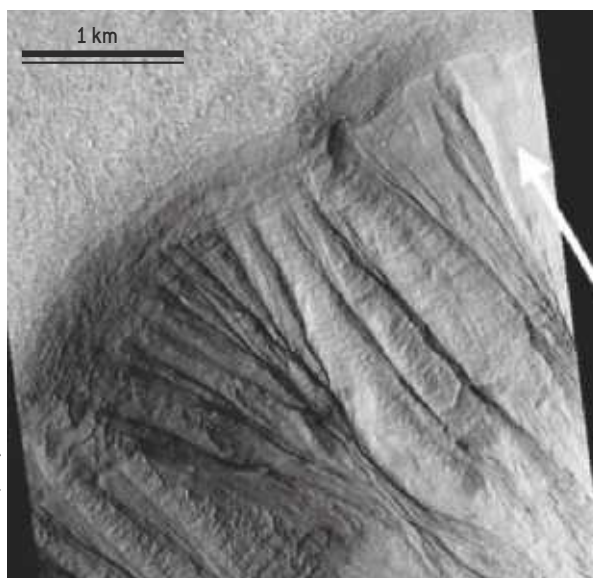
Sable en vrac

2. Burns Cliff est un affleurement rocheux intensivement exploré par le robot *Opportunity*. Cette falaise, haute comme trois étages, forme une partie du bord du cratère *Endurance*, situé à 700 mètres du lieu où s'est posé le robot. Les couches supérieures, comme celles du site d'atterrissage, sont riches en sels de sulfate (*en rouge et jaune sur le cartouche en fausses couleurs*) et ont probablement été déposées lors des inondations et assèchements successifs de la région. En dessous se trouvent de fines couches rugueuses, composées d'un mélange d'hématite, un minéral lié à l'eau, et de basaltes incompatibles avec l'eau. Il s'agit sans doute d'anciennes dunes de sable restées sèches la plupart du temps, mais situées près d'un grand bassin aqueux. Le fond du cratère est couvert de sable basaltique (*en bleu*).

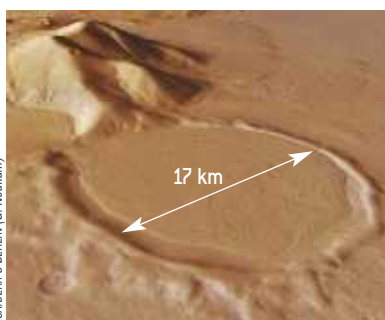
Pour répondre à ces questions, les scientifiques se sont replongés dans les données orbitales de *Mars Global Surveyor*.

Depuis huit ans, le spectromètre TES de cet orbiteur scrute les roches et les sables martiens. Il a révélé qu'ils sont constitués presque exclusivement de minéraux volcaniques tels le feldspath, le pyroxène et l'olivine, à savoir les composants du basalte. Au printemps de 2004, l'orbiteur *Mars Express* de l'Agence spatiale européenne, avec son spectromètre OMEGA fonctionnant dans l'infrarouge proche, s'est joint aux efforts et a confirmé la présence massive de ces minéraux. On trouve de l'olivine jusqu'à 4,5 kilomètres sous la surface dans les parois des canyons de *Valles Marineris*, et elle est présente dans toutes les plaines équatoriales, y compris au fond des canaux. La découverte de basalte, roche qui recouvre en grande partie la surface de la Terre et de la Lune, n'a pas été une grande surprise (sur Terre, la lave basaltique, primitive, s'est formée lors de la première fusion du manteau de la planète et continue de jaillir des failles océaniques, créant les fonds marins).

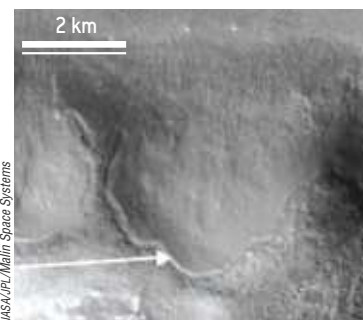
Plus surprenant : alors que les roches des terrains anciens et couverts de cratères sont basaltiques, les roches plus jeunes des plaines du Nord ressemblent à un type de lave plus évolué, l'andésite : elles contiennent davantage de verre et de minéraux riches en silice, mais moins de minéraux ferreux. Sur Terre, l'andésite se forme lorsque les plaques tectoniques mélangent, en plongeant, de l'eau à des roches souterraines fondues. La présence possible d'andésite sur Mars est intrigante. Elle indique peut-être que le manteau martien est plus riche en eau que le manteau terrestre, ou que la lave plus jeune a fondu à des températures, ou pressions, différentes de celles du vieux basalte. Certains scientifiques avancent que les supposées andésites sont en fait du basalte déguisé : un brouillard d'eau ou d'acide aurait réagi avec le minéral pour donner à sa surface une apparence d'andésite. Les planétologues devront attendre des études au sol détaillées de ces roches pour répondre à cette question.



NASA/JPL/Malin Space Systems/P. Christensen



ESA/AFU/BERLIN (G. Neukum)



NASA/JPL/Malin Space Systems

3. L'orbiteur *Mars Odyssey* a détecté des dépôts de neige sur les versants froids des montagnes (*flèche blanche en haut et en bas à droite*). Cette neige est peut-être à l'origine de l'eau qui a récemment creusé des ravins (*en haut*). Si des micro-organismes vivent sur Mars, ces névés sont le lieu idéal pour les chercher. La sonde *Mars Express* a pour sa part observé les traces de glaciers récents qui se sont écoulés dans un cratère (*à gauche*).

Portrait *Express* de Mars

En 2003 étaient lancées trois missions vers Mars : la mission européenne *Mars-Express* et les deux robots de la NASA *Spirit* et *Opportunity*. Philip Christensen replace les résultats des deux robots américains dans le contexte géologique global dévoilé grâce aux instruments de télédétection placés sur trois satellites en orbite autour de Mars, dont la caméra hyperspectrale infrarouge OMEGA embarquée sur *Mars-Express*. La complémentarité entre les observations effectuées de l'espace et les mesures *in situ* est démontrée dans cet article, mais ne rend que partiellement compte des résultats obtenus par la sonde européenne.

La caméra OMEGA a révolutionné notre connaissance de la minéralogie de surface de la planète Mars, en cartographiant les minéraux silicatés caractéristiques de roches volcaniques (pyroxènes et olivine), en caractérisant les sulfates, témoins d'un environnement aqueux révolu, mais aussi en révélant l'absence de carbonates à la surface de la planète rouge et celle de minéraux hydratés dans les plaines de l'hémisphère Nord. C'est encore grâce à OMEGA que l'on a caractérisé l'étendue des glaces d'eau et de dioxyde de carbone aux pôles et posé des contraintes sur leur cycle de variation en fonction des saisons. La caméra HRSC (*High Resolution Stereo Camera*) toujours à bord de *Mars-Express* a permis d'affiner l'échelle de temps géologique par comptage de cratères, outil indispensable pour dater les événements géologiques et par exemple noter l'extrême jeunesse (au sens géologique du terme) de coulées volcaniques décrites dans l'article. Cette caméra, grâce à sa vision stéréoscopique, étudie le relief et la morphologie des terrains avec une résolution de deux mètres, ce qui a conduit en particulier à mettre en évidence des coulées de glaciers récentes. Enfin, la deuxième antenne du radar MARSIS devait être déployée durant la troisième semaine du mois de juin 2005. Ses mesures devraient révéler le contenu en glace et en eau du sous-sol martien jusqu'à des profondeurs de plusieurs kilomètres, complétant ainsi les mesures de neutrons obtenues par la sonde *Mars-Odyssey*, qui ne concernent la présence d'hydrogène (supposé contenu dans l'eau) que dans le premier mètre du sol martien. Le spectromètre SPI-CAM de *Mars-Express*, enfin, vient de détecter pour la première fois sur Mars l'équivalent d'une aurore polaire, ce qui est surprenant, car Mars est dépourvue de champ magnétique global. Cette aurore est localisée à une altitude de 130 kilomètres au-dessus d'une zone de champ magnétique fossile déjà mise en évidence par la sonde américaine *Mars Global Surveyor*. MARSIS étudiera plus en détail ces phénomènes d'ionisation de l'atmosphère martienne.

Philip Christensen insiste avec raison sur la nécessité de comprendre la planète Mars comme un système global où les différentes enveloppes interagissent. On ne peut comprendre le climat martien et le cycle de l'eau sans préciser son évolution orbitale, son activité volcanique et son histoire magnétique. Les récentes découvertes de la mission *Mars-Express* et des robots *Spirit* et *Opportunity* montrent l'importance d'une meilleure connaissance de la structure interne de cette planète, qui reste encore mystérieuse. Les techniques qui permettront de répondre à ces questions sont développées en Europe, où existe un véritable savoir-faire qui n'attend qu'une opportunité de programmation pour se concrétiser.

Christophe SOTIN,

professeur de géophysique à l'Université de Nantes.

Le spectromètre TES a une assez faible résolution : un pixel correspond à une étendue de plusieurs kilomètres. De fait, l'immense variété de la minéralogie martienne n'est devenue apparente qu'en 2001, lorsque THEMIS, une caméra infrarouge portée par une autre sonde de la NASA, *Mars Odyssey*, a commencé à cartographier la planète avec une résolution de 100 mètres. THEMIS et OMEGA ont dévoilé une diversité des roches ignées – provenant du manteau – qui rivalise avec celle de la Terre.

Une faible activité tectonique

Non loin de l'équateur martien se dresse un volcan de 1100 kilomètres de diamètre nommé *Syrtis Major*. Son sommet présente une série de cratères effondrés, ou *caldeiras*. La majeure partie du volcan est basaltique, mais ses flancs sont constellés de cônes et d'écoulements de laves vitreuses riches en silice, nommées dacites. Ce type de roche provient des chambres magmatiques des volcans. Quand le magma refroidit, l'olivine et le pyroxène, riches en fer et en magnésium, cristallisent les premiers et se déposent au fond de la chambre. Le reste du magma, enrichi en silice et en aluminium, fournit les dacites. Les pics centraux de plusieurs cratères situés sur les flancs de *Syrtis Major* sont constitués de roches encore plus riches en silicates, les granites, qui se sont peut-être formées par une refonte à grande échelle de basaltes.

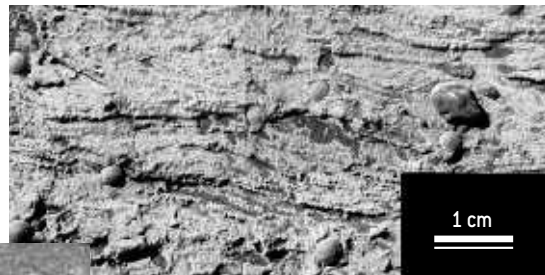
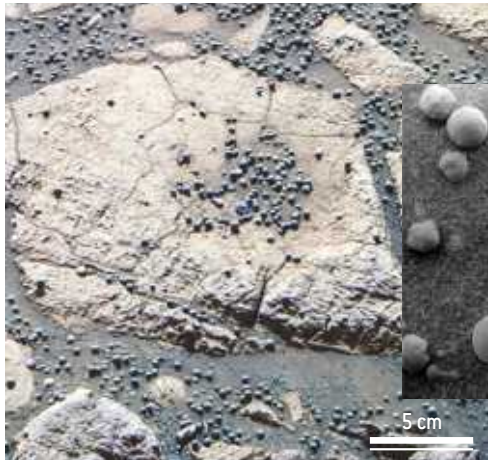
Les planétologues en concluent que ce volcan est passé par de nombreux stades de développement. La lave basaltique a d'abord été éjectée à partir du centre pour former le volcan. À mesure de son évolution chimique, le magma s'est retiré du haut de la chambre, ce qui a entraîné un effondrement du sommet et alimenté des éruptions sur les flancs. Les volcans martiens sont non seulement gigantesques, ils sont aussi étonnamment complexes.

Ce que l'on ne trouve pas sur Mars est aussi intéressant que ce qu'on y trouve. Le quartz, commun sur Terre, est extrêmement rare sur Mars. Cela suggère que le granite, dont il provient, y est rare. Il n'y a pas non plus de traces de minéraux métamorphiques tels l'ardoise ou le marbre, produits quand des roches volcaniques ou sédimentaires subissent des pressions ou des températures élevées. Cela implique que l'activité tectonique martienne est trop faible pour entraîner les roches en profondeur dans le manteau, où elles seraient chauffées et comprimées, puis pour les faire remonter.

La Terre regorge de vastes dépôts de roches carbonées tel le calcaire, qui s'est formé à partir des océans chauds et riches en dioxyde de carbone. Si Mars a été jadis plus chaude et plus humide, elle devrait posséder d'épaisses couches de carbonates. Aucune n'a cependant été découverte. Cela signifie que tout océan passé était froid, éphémère, couvert de glace ou encore hostile aux carbonates. La poussière martienne, omniprésente, contient certes de petites quantités de carbonates, mais ceux-ci se sont sans doute formés par interaction directe avec la vapeur d'eau atmosphérique plutôt qu'au contact de l'eau liquide à la surface. Les argiles, une autre classe de minéraux liés à la présence d'eau, sont également rares sur Mars. Tous ces indices s'accordent avec la présence généralisée de minéraux qui sont dégradés par l'eau, tels l'olivine ou le pyroxène, pour dresser le portrait d'une planète majoritairement sèche.

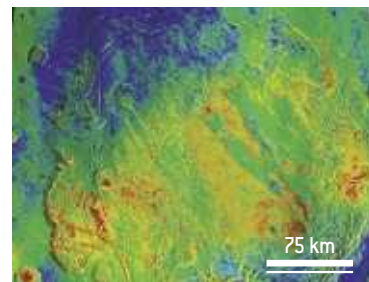
Le site où s'est posé *Opportunity*, le cratère de l'Aigle, présente des concentrations variables d'hématite, un minéral lié à l'eau (*ci-dessus*, concentration faible en bleu à élevée en rouge). Les marques bleues au premier plan correspondent aux rebonds des coussins d'air protégeant le module à l'atterrissage. Les zones blanches à l'arrière-plan sont des affleurements rocheux, tel *Le Capitaine* (à droite), qui, après examen, se sont révélés être des dépôts de sulfate et d'hématite.

Les « myrtilles » sont des sphérules de la taille d'une baie qui jonchent le site d'atterrissage d'*Opportunity*. L'analyse de celles rassemblées dans ce « bol de myrtilles » (*en fausses couleurs*) a montré qu'il s'agit d'hématite. Ce minéral s'est probablement déposé par précipitation de l'eau dans les pores des sédiments.



Ces clichés pris par *Opportunity* montrent des globules d'hématite dans le sol (*ci-contre*) et enchâssés dans une roche composée de couches d'environ un millimètre d'épaisseur (*ci-dessus*). La courbure des couches atteste probablement de la présence passée d'un écoulement.

Aram Chaos est un cratère d'impact également rougi par l'hématite. Les températures nocturnes, mesurées par *Mars Odyssey*, permettent de distinguer la roche, plus chaude (*en rouge*), du sable et de la poussière plus froids (*en bleu*). Les roches plates au centre du cratère (*en orange*) seraient des sédiments lacustres. Le terrain fracturé au Sud trahit un effondrement soudain du sol, peut-être quand l'eau souterraine s'en est échappée.



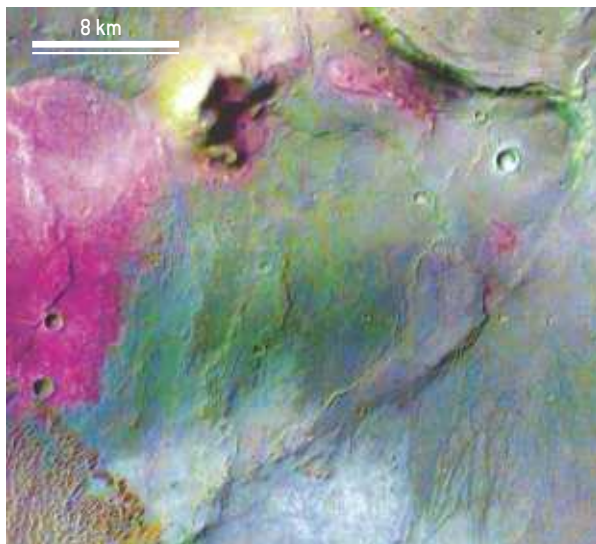
En ce sens, ce que *Spirit* a observé à Gusev est plus représentatif de Mars que ce qu'*Opportunity* a trouvé sur *Meridiani*. Les plaines de *Meridiani* ne sont cependant pas les seuls endroits où l'on aperçoit des « lacs » sur les clichés pris en orbite. *Aram Chaos*, un cratère de 280 kilomètres de diamètre, présente un canal d'écoulement rempli de roches stratifiées qui contiennent de l'hématite, tandis que de gigantesques blocs de roche jonchent le sol du cratère. Il semble qu'un torrent d'eau souterraine ait été libéré de façon brutale et ait entraîné l'effondrement du terrain sous-jacent. Une partie de l'eau a stagné, ce qui a conduit à la formation de sédiments contenant de l'hématite.

De façon similaire, des dépressions situées dans *Valles Marineris* abritent de fines couches de roches tendres où l'hématite est présente, une configuration compatible avec la présence d'eau stagnante. Ces roches, et d'autres de la région équatoriale, sont riches en sulfates, un indice révé-

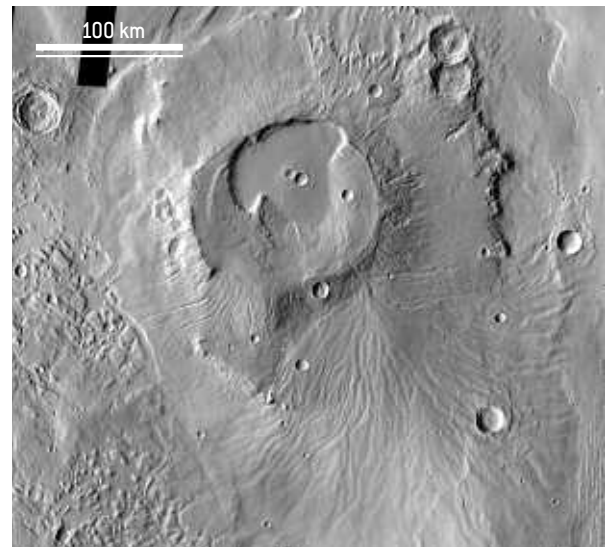
lateur de sédiments recouverts d'eau. Ces anciens lacs ont peut-être subi de nombreux épisodes d'inondation, d'évaporation, voire de congélation, et d'assèchement. Outre les anciens fonds de lacs, on a des régions sculptées par des réseaux denses de canaux, apparemment créés par des précipitations ou des écoulements de surface.

L'eau a coulé, mais... brièvement et par endroits

Sur la base d'images et de données topographiques qui évoquent des lignes de côte et des fonds océaniques lisses, certains spécialistes affirment même que Mars avait de vastes océans. Mises bout à bout, ces découvertes semblent indiquer que, pendant de brèves périodes, l'eau a été présente de façon stable dans des régions isolées. Pourquoi l'eau



4. Nili Patera, au sommet du volcan géant Syrtis Major, est couverte à la fois de laves basaltiques anciennes (en bleu) et de cônes d'éjection de dacite plus récents (en violet). Les dunes de sable (en orange) sont un mélange des deux. La présence de dacite, une lave plus évoluée que le basalte, montre que le volcanisme martien est plus complexe que prévu.



5. Apollinaris Patera, un volcan étendu, mais peu actif, a déversé des laves de compositions diverses. Il est peut-être la source des poussières trouvées par le module d'exploration Spirit 350 kilomètres plus au Sud. Les dépôts volcaniques ont été fortement modelés par l'eau. Les sondes spatiales ont repéré plusieurs glissements de terrain dans la région.

s'est-elle accumulée de façon stable dans ces sites ? L'hypothèse la plus répandue fait intervenir une combinaison de chaleur géothermique, de concentrations élevées en sels (qui abaissent le point de congélation) et d'une couche de glace protectrice. Des impacts de grosses météorites ont peut-être sporadiquement réchauffé l'atmosphère.

L'idée d'une planète jadis semblable à la Terre semble néanmoins être derrière nous. L'impression dominante est celle d'une surface ancienne dont les minéraux volcaniques originels ont été préservés de l'eau. Même à *Meridiani*, les sables basaltiques recouvrent les sédiments lacustres, ce qui indique que le site est asséché depuis deux ou trois milliards d'années. Il existe des lacs et des réseaux d'aspect hydrographique, mais il est possible que l'eau n'y ait circulé que brièvement. Elle était peut-être gelée la majeure partie du temps, et occasionnellement libérée avant de regeler rapidement. Cependant, les planétologues restent perplexes à l'idée d'un monde qui puisse être aussi aride en général, mais aussi aqueux à certains endroits et par moments.

Le passé de Mars mobilise l'essentiel de l'attention, mais des avancées récentes ont relancé l'étude de son activité actuelle. Tout d'abord, un consensus émerge sur le fait que Mars a été géologiquement active dans un passé récent. La plupart des grands volcans trônant au milieu des plaines de lave datent des premiers âges de la planète, mais l'absence de cratères d'impact ou d'écoulements de lave dans des régions telles que *Athabasca Vallis* suggère qu'elles sont jeunes et résultent d'éruptions datant de quelques millions d'années. Mais aucun volcan actif ou point chaud géothermique n'a été détecté jusqu'à présent, et Mars semble s'être refroidie au point que le volcanisme y est très rare.

La seconde découverte est qu'un colossal réservoir d'eau gelée migre autour de la planète au gré des changements climatiques. Les deux pôles sont actuellement recouverts de dépôts de glace ou de sédiments riches en glace qui atteignent par endroits plusieurs kilomètres d'épaisseur, sur une sur-

face totale équivalente à celle de la France. Des mesures de température datant des années 1970 avaient montré que la calotte du pôle Nord est constituée de glace d'eau, mais la composition de la calotte Sud restait mystérieuse. Sa température de surface est compatible avec l'hypothèse d'une glace de dioxyde de carbone, mais des mesures de température récentes par THEMIS ont mis en évidence des affleurements de glace d'eau, et il est possible qu'il y en ait aussi sous la glace de dioxyde de carbone.

Il convient d'ajouter à cet inventaire la glace souterraine détectée par les instruments de *Mars Odyssey* qui captent les rayons gamma et les neutrons produits lorsque des rayons cosmiques frappent le sol. La répartition en énergie de ces rayons gamma et de ces neutrons nous renseigne sur les éléments chimiques du sol jusqu'à plusieurs mètres de profondeur. Par exemple, l'hydrogène absorbe beaucoup les neutrons, donc un déficit de neutrons indique la présence d'hydrogène sous la surface, le plus vraisemblablement sous forme d'eau (H₂O).

Dans les hautes latitudes, au-delà du 60° parallèle, l'eau semble par ailleurs constituer plus de 50 pour cent du sol. Une telle abondance de glace ne peut s'expliquer par la simple diffusion de vapeur d'eau atmosphérique dans le sol poreux. La glace doit avoir été déposée sous forme de neige ou de givre.

Aux latitudes intermédiaires, certaines formations trahissent aussi la présence probable de glace. Des sols zébrés sont visibles entre 30 et 50 degrés de latitude dans les deux hémisphères. Cette texture pourrait résulter du réchauffement du sol et de l'évaporation de la glace, processus qui entraînerait un effritement. Dans les dépressions des pentes froides orientées vers les pôles, on trouve un autre type de dépôts : des couches de matériaux atteignant jusqu'à dix mètres d'épaisseur et correspondant peut-être aux résidus de neige d'eau presque pure. Une des découvertes les plus remarquables a été celle de petits ravins fraîchement creusés à des latitudes intermédiaires, résultant peut-être

d'eau de source, de la fonte de la glace de surface, ou de la fonte de blocs de neige par leur base.

Tous ces éléments suggèrent que Mars, comme la Terre, connaît des cycles de glaciation. L'inclinaison de l'axe de rotation de la planète oscille en effet avec une amplitude de 20 degrés, suivant une période de 125 000 ans. Lorsque l'inclinaison est faible, les pôles sont les régions les plus froides de la planète, et il y tombe plus de neige l'hiver qu'il ne s'en évapore l'été, ce qui conduit à une accumulation de glace au fil des ans. Quand l'inclinaison augmente, les pôles reçoivent plus de lumière et se réchauffent au détriment des latitudes intermédiaires. L'eau se déplace alors des pôles vers l'équateur. Pendant que la neige s'accumule à la surface, l'eau liquide peut s'écouler par-dessous. Actuellement les latitudes intermédiaires se réchauffent et la couverture de neige a presque disparu. Si ce modèle de glaciation, conçu par Benjamin Levrard et Jacques Laskar, de l'Observatoire de Paris, est correct, elle reviendra dans 25 000 à 50 000 ans.

Les spécialistes de Mars sont comme des aveugles qui voulant décrire un éléphant l'explorent à tâtons, mais peinent à s'en faire une image globale. La géologie martienne varie d'un endroit à l'autre. La planète présente une grande variété de textures, un passé complexe, voire paradoxal, et un présent dynamique. Les roches volcaniques sont aussi variées que sur Terre, et les manifestations de la présence d'eau sont fort diverses. La planète a subi autrefois d'énormes inondations et peut-être même des pluies, même si ses roches anciennes contiennent encore des minéraux qui se dégradent rapidement dans un environnement humide. Le cli-

mat est sec et froid, mais le module d'exploration *Opportunity* a atterri sur le fond d'une ancienne mer, témoin d'un climat autrefois très différent. L'eau liquide est instable dans les conditions actuelles, mais des ravins se sont formés récemment et continuent peut-être à se former.

La diversité des environnements d'un lieu à l'autre et d'une époque à l'autre est un élément favorable si l'on envisage l'existence d'une vie sur Mars. Même si c'était de façon intermittente, des lacs ont existé pendant de longues périodes, peut-être suffisamment pour que la vie apparaisse. Des organismes pourraient encore aujourd'hui s'accrocher à la vie, hibernant pendant les épisodes froids, et se réveillant quand les conditions s'améliorent. Lors des missions à venir, c'est dans les plaques de glace qui subsistent et les ravins que les robots devront chercher des traces de vie.

Philip R. CHRISTENSEN est professeur à l'Université de l'Arizona à Tempe, et a participé au développement des missions *Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey* et *Mars Exploration Rover*.

Mars Express, mapping with Omega, in *Science*, vol. 307, numéro spécial, pp. 1574-1597, 11 mars 2005.

Spirit at Gusev Crater, in *Science*, vol. 305, numéro spécial, pp. 793-845, 6 août 2004.

Opportunity at Meridiani Planum, in *Science*, vol. 305, numéro spécial, pp. 1697-1756, 3 décembre 2004.

P. CHRISTENSEN et al., *Morphology and composition of the surface of Mars : Mars Odyssey themis results*, in *Science*, vol. 300, pp. 2056-2061, 27 juin 2003.

UN VOYAGE DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS QUE VOUS NE REGRETTerez PAS !



« Ne boudons pas notre plaisir de découvrir ce très bon ouvrage qui nous propose un tour d'horizon complet des caractéristiques de la planète rouge, dans un langage simple et visiblement destiné pour une grande part aux béotiens. (...) Bref, une réussite. »

Astronomie Magazine

« Il s'agit là d'un document de référence sur nos connaissances de la planète rouge au moment où elle passe au plus près de la Terre. »

Bulletin de l'Union des physiciens



Chez le même éditeur :

À la recherche de l'eau dans l'Univers
de Thérèse Encrenaz

D'où vient cette eau extraterrestre ? Quel rôle y joue-t-elle ?
A-t-elle permis l'éclosion de la vie ailleurs ?
L'eau liquide existe-t-elle ?

Format 18,5 x 24,5 • 176 pages ISBN 2-7011-3707-1

23,50 euros

En vente chez votre libraire ou sur www.pourlascience.com



Des avalanches sous la mer

Les avalanches sous-marines transportent plus de matière à la surface de la Terre que tout autre phénomène. Après des dizaines d'années d'observation, les géologues comprennent aujourd'hui leurs causes, leurs natures et leur pouvoir dévastateur.

Bruno Savoye



Décembre 2000 à bord du navire océanographique *L'Atalante*, nous nous apprêtons à plonger à bord du robot submersible *Victor*. Après avoir cartographié un vaste réseau d'anciennes vallées (ou paléovallées) sous-marines au large du fleuve Congo, nous réalisons une série de plongées jusqu'à 5 000 mètres de profondeur le long de la vallée actuelle. La dernière plongée de *Victor* a lieu dans le canyon sous-marin qui prolonge l'estuaire du Congo. La structure géologique de cette gorge sous-marine nous intrigue, notamment parce que, par endroits, elle entaille le fond sur près de 1 400 mètres. À 2 580 mètres de profondeur, *Victor* achève sa descente, et nous nous attendons à découvrir le fond du canyon, mais... les écrans vidéo se brouillent. Plus d'images, aucun parasite, rien. Aussitôt c'est le branle-bas chez les ingénieurs, qui, croyant à une panne, relancent plusieurs fois le système. En vain. Inquiet, car *Victor* «vit» l'une de ses premières campagnes, je donne l'ordre de remonter. Trente mètres au-dessus du fond, les écrans tournent brusquement au rouge sang, puis à mesure que nous montons, nous voyons sur les écrans une image se reconstituer sur laquelle une sorte de neige semble tomber à gros flocons. Nous ne retrouvons une visibilité correcte qu'à 200 mètres au-

dessus du fond. *Victor* n'est pas en panne, mais est au cœur d'une avalanche sous-marine. Par la suite, le système de localisation acoustique fonctionnant bien, nous replongerons dans l'avalanche pour estimer sa vitesse: quatre kilomètres par heure. Nous venons d'assister au travail de l'une des plus grandes forces à l'œuvre au fond des océans!

Il y a seulement 50 ans, le fond des océans était plus mystérieux que la Lune. On décrivait les abysses comme des endroits tranquilles, où rien ne semblait se passer. Tout a changé depuis que l'évolution des techniques d'exploration – particulièrement la cartographie acoustique – a rendu accessible la géologie de vastes régions sous-marines jusqu'alors inconnues. Les cartes dressées ont révélé de nombreux canyons creusés par le passage régulier des avalanches sous-marines, des écoulements qui démarrent près des continents et atteignent souvent les plaines abyssales. Ce système de transport de matière vers les grands fonds a un impact notable sur la sédimentation et la vie dans les grands fonds. À l'IFREMER, nous avons acquis de nombreuses connaissances sur ce phénomène dans le cadre de projets européens et de collaborations avec l'industrie. Nous allons en exposer l'essentiel ici.

Les avalanches sous-marines représentent la plus importante forme de transport de matière à la surface de la Terre. Un petit calcul simple et... faux l'illustre.

1. Cette avalanche sous-marine turbulente a été déclenchée par un glissement de terrain sur la pente continentale (à l'arrière-plan), qu'elle a dévalée jusqu'à la plaine abyssale (premier plan). Nommées courants de turbidité, les avalanches turbulentes

empruntent les chenaux creusés par les avalanches précédentes; elles transportent d'énormes quantités de sédiments vers les plaines abyssales, «cannibalisent» les sédiments présents sur leur passage et peuvent rompre les câbles téléphoniques.