

Pourquoi Vénus est-elle un chaudron infernal ?

Les différences frappantes entre les climats actuels de la Terre et de Vénus sont liées à l'histoire de l'eau sur ces deux planètes. Les océans et l'atmosphère terrestres contiennent aujourd'hui 100 000 fois plus d'eau que l'atmosphère de Vénus. L'eau liquide est un intermédiaire dans les réactions du dioxyde de carbone avec les roches de surface : le dioxyde de carbone de l'air terrestre peut ainsi réagir avec le sol et former des minéraux. En outre, l'eau mélangée au manteau sous-jacent est probablement à l'origine de la faible viscosité de la couche sur laquelle glissent les plaques tectoniques terrestres (asthénosphère). La formation de calcaires et leur enfouissement dans le manteau avec les plaques tectoniques évitent l'accumulation excessive de dioxyde de carbone.

Pourtant, selon les modèles de formation des planètes, les quantités d'eau apportées sur les deux planètes par l'impact de corps glacés issus du Système solaire externe devaient être proches. En outre, la sonde *Pioneer Venus*, qui s'est placée en orbite en 1978, a mesuré que l'abondance relative du deutérium (une forme d'hydrogène dont le noyau est composé d'un proton et d'un neutron) et de l'hydrogène (le noyau est réduit à un proton) dans l'eau des nuages vénusiens est 150 fois supérieure à l'abondance terrestre : quand la vapeur d'eau a été dissociée dans l'atmosphère supérieure par le rayonnement ultraviolet solaire, l'hydrogène, plus léger, est parti plus vite vers l'espace que le deutérium, et l'abondance relative du deutérium a augmenté.

Pourquoi ce phénomène s'est-il produit sur Vénus, mais pas sur la Terre ? Si une planète reçoit assez d'énergie solaire, toute l'eau superficielle s'évapore rapidement : l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau dans l'atmosphère déclenche un effet de serre, qui s'emballé, et la majeure partie de l'eau de la planète part dans l'atmosphère supérieure, où elle se dissocie et s'échappe. Selon James Kasting et ses collègues de l'Université de Pennsylvanie, le flux solaire critique nécessaire pour déclencher un effet de serre

qui s'emballé est supérieur d'environ 40 pour cent au flux que reçoit aujourd'hui la Terre. Cette valeur correspond à peu près au flux solaire que recevait Vénus peu après sa formation, quand le Soleil était 30 pour cent moins brillant qu'aujourd'hui. Vénus aurait ainsi perdu l'équivalent d'un océan terrestre pendant les 30 premiers millions d'années de son existence.

Cette description est imparfaite, car si Vénus possédait au début une épaisse atmosphère de dioxyde de carbone, comme c'est le cas maintenant, elle aurait retenu la plupart de son eau. La quantité d'eau perdue dépend de la proportion qui peut monter assez haut pour être décomposée, et cette proportion est inférieure pour une planète qui possède une atmosphère épaisse. En outre, tous les nuages qui se seraient développés au cours du processus auraient renvoyé la lumière solaire vers l'espace et auraient arrêté l'effet de serre.

Selon l'équipe de J. Kasting, si le flux solaire a été un peu inférieur à la valeur critique, Vénus a eu des océans chauds et une stratosphère humide. La dissolution du dioxyde de carbone dans l'océan a maintenu la concentration atmosphérique en ce composé à de faibles valeurs. L'eau a abaissé la viscosité de l'asthénosphère, ce qui a permis une tectonique des plaques. Vénus aurait ainsi possédé des mécanismes stabilisateurs du climat semblables à ceux qui sont actifs sur la Terre aujourd'hui. Ils n'étaient toutefois pas à l'abri de dérèglements : la densité de l'atmosphère, plus faible, n'empêchait pas la diffusion d'eau à haute altitude. En 600 millions d'années, l'équivalent d'un océan aurait ainsi disparu. La tectonique des plaques se serait arrêtée, laissant le volcanisme et la conduction de chaleur comme moyens internes de refroidissement. Ensuite, le dioxyde de carbone s'est accumulé dans l'air.

Ce scénario de serre humide illustre l'interaction étroite du Soleil, du climat et des modifications géologiques. Les phénomènes atmosphériques et superficiels peuvent se renforcer mutuellement et préserver le *statu quo*, ou bien précipiter leur propre destruction.

de l'évaporation des océans, qui dépend elle-même de la température de surface. Un petit accroissement de l'effet de serre accroît l'évaporation de l'eau, ce qui augmente la couverture nuageuse, donc la réflexion du rayonnement solaire, et ce qui diminue la température. Cette rétroaction négative maintient à brève échéance (quelques jours à quelques années) une température de surface modérée. Une rétroaction analogue, le cycle carbonate-silicate, stabilise la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique : en présence d'eau, le calcium des silicates est associé au dioxyde de carbone et forme du calcaire ; si la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone augmente, cette réaction augmente aussi, ce qui piège le dioxyde de carbone. Ce mécanisme, gouverné aussi par la lente tectonique des plaques, opère sur des échelles de temps d'environ un demi-million d'années.

Si ces cycles, associés à la présence de l'eau et de la vie, ont stabilisé le climat de la Terre, les actions humaines

ont des conséquences à des échelles de temps intermédiaires : la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmenté d'un quart depuis 1860. La plupart des climatologues reconnaissent qu'un réchauffement global est en cours, mais ils ne s'accordent pas sur la part de ce réchauffement attribuable à l'homme. Existe-t-il une concentration critique en dioxyde de carbone qui perturberait les cycles de régulation du climat terrestre ? L'étude de Vénus nous apprend en tout

cas que les climats des planètes analogues à la Terre peuvent varier brusquement par l'interaction de phénomènes à l'échelle planétaire. Dans l'avenir, les variations du rayonnement solaire interviendront aussi : en vieillissant, le Soleil devient plus brillant. Dans un milliard d'années environ, les océans s'évaporeront et l'effet de serre augmentera. La Terre et Vénus, presque identiques à leur naissance, se ressembleront à nouveau, avant de mourir ensemble.

Mark BULLOCK et David GRINSPOON sont chercheurs à l'Université de Boulder.

Stephen SAUNDERS, *La surface de Vénus*, in *Pour la Science*, février 1991.

Janet LUHMANN, James POLLACK et Lawrence COLIN, *La mission Pioneer vers Vénus*, in *Pour la Science*, juin 1994.

Mark A. BULLOCK et David H. GRINSPOON, *The Stability of Climate on Venus*, in *Journal of Geophysical Research*, vol. 101, n° E3, pp. 7521-7530, mars 1996.

Venus II : Geology, Geophysics, Atmosphere and Solar Wind Environment, sous la direction de Stephen W. Bougher, Donald M. Hunten et Roger J. Phillips, University of Arizona Press, 1997.

David H. GRINSPOON, *Venus Revealed : A New Look below the Clouds of Our Mysterious Twin Planet*, Perseus Books, 1997.

The New Solar System, quatrième édition, sous la direction de J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Petersen et Andrew Chalkin, Cambridge University Press, 1998.

L'argent de l'ancien Pérou

ALAIN GIODA • CARLOS SERRANO

Entre 1590 et 1600, Potosi produisit plus de 40 pour cent de l'argent mondial ! Un réseau de réservoirs et d'adduction d'eau, construit par les Espagnols, fournissait l'énergie hydraulique nécessaire au traitement du minerai d'argent.

Le Pérou a été l'eldorado, le pays de légende que cherchaient les conquistadors : les colonisateurs y faisaient fortune en quelques semaines. Au début de l'exploitation du gisement de Potosi, en 1545, les filons d'argent pur affleuraient au sommet du Cerro Rico, la montagne d'argent, et les nobles espagnols n'avaient qu'à se baisser pour s'enrichir. Bien évidemment, ils laissaient aux Indiens le soin de collecter et de transporter le minerai.

En moins de 30 ans, le petit chantier andin de Potosi se transforme en une ville-champignon de 120 000 habitants ; la population culmine à 160 000 personnes entre 1611 et 1650. C'est alors la plus grande cité des Amériques, qui rivalise en taille et en opulence avec les capitales européennes. La production d'argent atteint 200 tonnes pendant la seule année 1593 ; la monnaie d'argent espagnole, frappée sur place, est, pendant deux siècles, l'équivalent du dollar américain actuel pour les transactions commerciales de l'Occident.

Aujourd'hui Potosi compte environ 130 000 habitants. Bâtie à 3 980 mètres d'altitude sur les flancs du Cerro Rico (4 890 mètres), le climat y est froid et aride avec 142 jours de gel, une température moyenne de 9 °C et 400 millimètres de pluie seulement par an. Cet héritage de la colonisation espagnole est classé patrimoine de l'humanité par l'Unesco.

En étudiant les archives des colons espagnols et des administrateurs locaux, nous avons reconstitué la grandeur et la décadence des mines de Potosi, à travers les adaptations de l'extraction aux aléas climatiques et économiques,

à la raréfaction du minerai et aux changements d'organisation sociale.

De 1573 à 1650, trois facteurs assurent l'âge d'or, ou plutôt l'âge d'argent, de Potosi : l'utilisation d'un procédé de traitement de l'argent, mis au point en 1555 au Mexique, le régime de travaux forcés imposés aux Indiens (et qui ne fut aboli qu'en 1812), et une énergie hydraulique abondante utilisée jusqu'en 1872, date de l'arrivée de l'électricité et de la vapeur qui alimenteront les usines.

Épuisement du minerai et construction des barrages

Pendant les onze années glorieuses qui suivent la découverte des mines, le minerai d'argent est extrait à ciel ouvert des filons d'argent natif, cinq veines de 10 à 12 mètres d'épaisseur, qui affleurent au sommet de la montagne. Lorsque, en 1556, les filons du sommet s'épuisent, l'exploitation par galeries souterraines commence. Jusque vers 1650, les galeries seront creusées sur 600 mètres de profondeur, sans l'aide d'explosifs. À la fin du XIX^e siècle, plus de 300 entrées de mines sont connues.

Vers 1566, à la fin du premier boum minier, la production commence à baisser. Le vice-roi Francisco Toledo, administrateur des Indes espagnoles de 1569 à 1581, se rend à Potosi en 1572. Il y réunit un groupe de mineurs pour présenter une nouvelle méthode d'extraction de l'argent dans les filons moins riches, méthode qui nécessitait la construction de machines hydrauliques. Quatre entrepreneurs proposent alors de construire, à leurs

frais, une retenue d'eau pour récupérer l'eau de pluie et la stocker (la saison des précipitations ne dure que trois mois, de décembre à février).

Le projet est de tirer parti de la topographie de la région et de réunir tous les lacs naturels en un vaste réseau pour alimenter les usines de traitement du minerai. La construction des barrages commence en 1573 avec celui du lac Chalviri. Cinquante ans plus tard, une vingtaine de lacs aménagés recueillent un volume total de six millions de mètres cubes d'eau. Réparties sur six bassins versants qui couvrent 65 kilomètres carrés, les retenues sont interconnectées pour collecter la totalité des eaux dans un exutoire naturel d'environ 20 kilomètres carrés qui recueille l'écoulement intermittent des vallons de San Ildefonso et de San Sebastian. L'alimentation régulière en énergie hydraulique assure l'apogée des mines coloniales de Potosi, entre 1573 et 1650 : c'est le deuxième boum minier.

À cette époque, les ingénieurs espagnols tirent profit de deux types de lacs naturels : les lacs glaciaires et les retenues d'eau bloquées par une accumulation de moraines. Quand l'écoulement de l'eau est bloqué par un verrou glaciaire, les Espagnols libèrent l'eau du lac naturel en perçant un tunnel dans la barre rocheuse qui ferme la vallée. Les digues naturelles constituées de moraines, plus ou moins étanches selon le degré d'érosion, sont renforcées. Les Espagnols construisent ainsi de grands barrages sur les lacs Huacani et Chalviri, puis, vers 1576, d'autres retenues proches de Potosi, telles celles de San Sebastian et de San Ildefonso. Les grands