

Les interactions de ces phénomènes empêchent la détermination de leurs conséquences individuelles sur le climat. Ainsi, l'augmentation des concentrations en vapeur d'eau et en dioxyde de soufre a des conséquences contradictoires : d'un côté, la vapeur d'eau et le dioxyde de soufre réchauffent la surface par effet de serre et, d'un autre côté, la vapeur d'eau et le dioxyde de soufre forment des nuages qui réfléchissent la lumière solaire vers l'espace et refroidissent ainsi la planète.

Nos simulations montrent que la réflexion du rayonnement solaire par les nuages l'a d'abord emporté : la température de surface a diminué

d'environ 100 °C. Puis les nuages ont lentement disparu : l'eau a diffusé vers les hautes couches de l'atmosphère, où elle a été dissociée par le rayonnement ultraviolet solaire. L'hydrogène produit par cette dissociation s'est lentement échappé dans l'espace : la moitié de la quantité initialement présente a été perdue en 200 millions d'années. Entre-temps, le dioxyde de soufre réagissait avec les roches carbonatées. Des expériences de laboratoire démontrent que la vitesse de réaction du dioxyde de soufre de l'atmosphère vénusienne avec les carbonates a été bien supérieure à la vitesse de dégazage de l'eau dans l'espace.

L'évaporation favorise l'évaporation

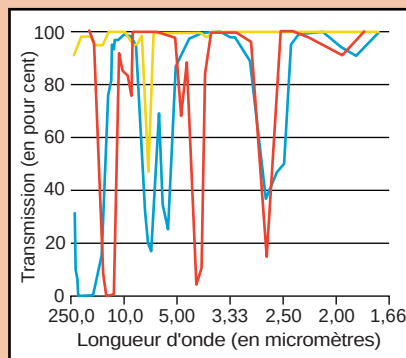
Quand les nuages se sont amincis, la surface a reçu plus d'énergie solaire et s'est réchauffée. Après 200 millions d'années de réchauffement, la base des nuages a commencé à s'évaporer. Une rétroaction positive s'est établie : plus les nuages s'amincissaient, moins le rayonnement solaire était réfléchi vers l'espace, donc plus la surface s'échauffait, et plus les nuages s'amincissaient. Les nuages ont ainsi rapidement disparu.

Pendant environ 400 millions d'années, seule une haute bande vaporeuse essentiellement composée d'eau a subsisté. Les températures de surface ont augmenté jusqu'à 100 °C au-dessus de leurs valeurs actuelles, d'une part à cause de l'effet de serre dû à la vapeur d'eau atmosphérique et d'autre part à cause du faible filtrage du rayonnement solaire par les nuages. Si toute activité volcanique avait cessé, les nuages se seraient complètement dissipés environ 600 millions d'années après le début du volcanisme global.

Or, des nuages subsistent aujourd'hui autour de Vénus. Nous avons calculé qu'une activité volcanique a dû se poursuivre pendant les 30 derniers millions d'années pour alimenter ces nuages. Comme les mécanismes internes qui engendrent le volcanisme se déroulent sur des périodes dépassant plusieurs dizaines de millions d'années, des volcans sont probablement encore actifs aujourd'hui. Cette hypothèse est soutenue par les mesures de la concentration en dioxyde de soufre au sommet des nuages de Vénus : elle a été divisée par plus de dix pendant les cinq premières années de la mission *Pioneer Venus*, de 1978 à 1983. Ces variations, et celles de la concentration en aérosols, résulteraient du volcanisme. Les fluctuations des températures de surface, accélérées par le volcanisme, expliquent aussi la formation naturelle des nombreuses structures géologiques découvertes par *Magellan*.

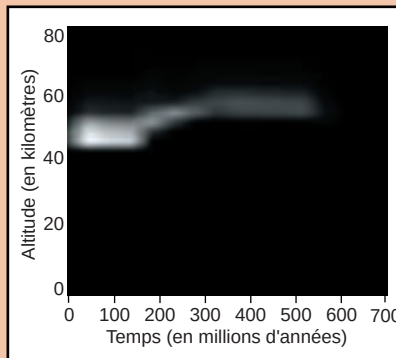
Heureusement, le climat terrestre n'a pas subi de telles variations dans un passé récent. Bien que l'atmosphère terrestre soit aussi perturbée par le volcanisme, elle est riche en oxygène (produit par l'activité biologique et par l'eau), de sorte qu'elle élimine les gaz soufrés. Les nuages d'eau assurent l'équilibre thermique de notre planète. La vapeur d'eau qui les compose résulte

EFFET DE SERRE



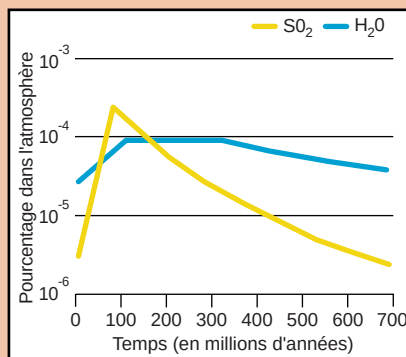
Les gaz à effet de serre laissent la lumière solaire atteindre la surface de Vénus, mais ils bloquent le rayonnement infrarouge réémis par le sol. Le dioxyde de carbone (en rouge), l'eau (en bleu) et le dioxyde de soufre (en jaune) absorbent chacun à des longueurs d'onde différentes. Si ces gaz étaient absents, la température moyenne serait d'environ 30 °C.

COUVERTURE NUAGEUSE



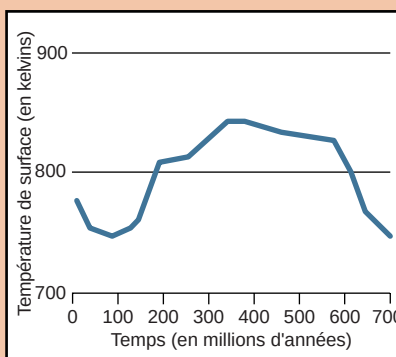
L'épaisseur des nuages, composés d'acide sulfurique, varie après les éruptions volcaniques. D'abord, quand l'eau et le dioxyde de soufre se répandent dans l'air, les nuages s'épaississent. Puis ils se dissipent. Environ 400 millions d'années après le début d'un épisode volcanique global, les nuages acides sont remplacés par de minces nuages d'eau, à haute altitude.

LES GAZ DE L'ATMOSPHÈRE



L'eau et le dioxyde de soufre s'éliminent de l'atmosphère après avoir été émis par les volcans. Le dioxyde de soufre (en jaune) réagit assez vite avec les carbonates de la surface, tandis que l'eau (en bleu) diffuse vers les couches de haute altitude où elle est lentement dissociée par le rayonnement ultraviolet solaire.

TEMPÉRATURE



La température de surface dépend de l'importance relative des nuages et de l'effet de serre. Initialement, le volcanisme produit des nuages épais qui refroidissent la surface. Toutefois, comme l'eau disparaît plus lentement de l'atmosphère de la planète que le dioxyde de soufre, la surface est réchauffée par effet de serre.

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.