

Le verlan et la fracture sociale

L'exclusion sociale a sa langue, qui prend le français à rebours.

L'argot a laissé Peu de traces écrites : peu d'auteurs l'ont employé, et François Villon, qui composa ses ballades en parler de la Coquille, langue d'une confrérie de voleurs, a longtemps fait exception. L'apparition de l'argot a toutefois suivi de peu celle du langage lui-même. Compris seulement des initiés, il a d'abord une fonction de codage : il permet la conversation sur des sujets réprouvés par la morale ou par la loi, ou il est associé à la transmission de savoir-faire dans les corporations. Aujourd'hui, il s'est répandu dans les cités, à la périphérie des grandes villes. Selon Jean-Pierre Goudaillier, du Centre de recherches argotologiques de l'Université René Descartes, son usage s'est aussi transformé : parler argot permet avant tout d'affirmer son identité, sociale et géographique. En outre, en utilisant des mots et des constructions grammaticales qui prennent le français à rebours, notamment le verlan, ses locuteurs marquent leur opposition envers une société dont ils se sentent exclus.

choské : *loc. pronom.*, quelque chose
étymologie : verlan approximatif de quelque chose exemples : «tu veux choské? (Mafia Trece, 1997) ; tu veux quelque chose? (avec le sens de qu'est-ce que tu me veux?) ; t'as chosqué à kesmo? (Goudaillier, CARGO 1998) as-tu quelque chose à fumer?

feumeu : *n. f.*, fille, femme
étymologie : reverlanisation de meuf
synonymes : belette, caille, charnelle, clira, dama, damoche, diig, fatma, fébosse, fillasse, gadji, gavali, gazelle, go, gorette, meuda, meuf, og, racli, radasse, rate, rumo, soua, souris, tasse, taspé, taspèche, taupe, zesse, zessgon, zouz
Exemple : «c'te feumeu, c'est ma pref! » (Goudaillier, CARGO 95-96)

D'après Jean-Pierre Goudaillier, Comment tu tchatches! Dictionnaire du français contemporain des cités, Maisonneuve et Larose, 1998

Le verlan, inversion des phonèmes des mots, est un procédé très utilisé pour la formation de mots nouveaux en français contemporain des cités. Son usage est même parfois redoublé, sur des mots très répandus tel que meuf, verlan de femme, ou fekeu, verlan de keuf, lui-même dérivé de flic (policier).

Les cités d'immeubles construites dans les villes et à leur périphérie, depuis les années 1960 pour la plupart, rassemblent des populations d'origines géographiques et linguistiques très diverses. Elles sont particulièrement touchées par le chômage et la précarité sociale. Depuis une vingtaine d'année, les linguistes observent l'émergence d'une «langue des cités» qui, au français courant, mêle des mots et des expressions d'autres langues, ainsi que des constructions argotiques. Cette langue a remplacé la langue populaire, autrefois parlée par les ouvriers : la plupart des jeunes, n'ayant jamais travaillé, ne ressentent pas d'appartenance à la classe ouvrière, par ailleurs en régression.

La langue des cités utilise largement le verlan, procédé argotique où les phonèmes des mots sont inversés (meuf pour femme, genar pour argent ...). Comme son nom l'indique, le verlan prend la langue à l'envers : ceux qui l'emploient indiquent, consciemment ou non, leur opposition au français académique.

Le verlan n'est pas la seule inversion présente dans ce français des cités. Ainsi, en français, lorsque des mots sont tronqués, c'est le plus souvent par apocope, abandon des dernières syllabes, moins riches en informations sur le sens : auto pour automobile, télé pour télévision, com pour communication... En langue des cités, au contraire, l'aphérèse, troncature des premières syllabes, est très présente : blème remplace problème, dwich, sandwich, vail, travail.

L'usage du verlan s'accompagne aussi du déplacement de l'accent tonique de l'avant-dernière à la première syllabe et de la neutralisation de nombreuses voyelles, remplacées par un son e générique : au contraire du français qui est une langue à voyelles, la langue des cités privilégie les consonnes. Ces deux dernières caractéristiques sont aussi des traits de l'arabe, et la grande proportion d'arabophones dans ces banlieues a sans doute favorisé leur adoption.

Enfin, ce retournement du langage est d'autant plus intense que la cité est séparée du reste de la ville. Ainsi, le verlan est très courant en région parisienne, où la capitale est nettement délimitée par la barrière du périphérique, et où, au sein même des villes de banlieue, les cités sont isolées des quartiers pavillonnaires : le français académique est d'autant plus identifié à la langue des «costard-cravate», ceux qui sont «dans la place» (qui ont un travail.). Il est au contraire rare à Marseille, ville mosaïque où les différentes cités sont autant de quartiers d'une seule grande ville, et où la population est plus homogène.

Le climat variable de Vénus

MARK BULLOCK • DAVID GRINSPOON

APHRODITE TERRA

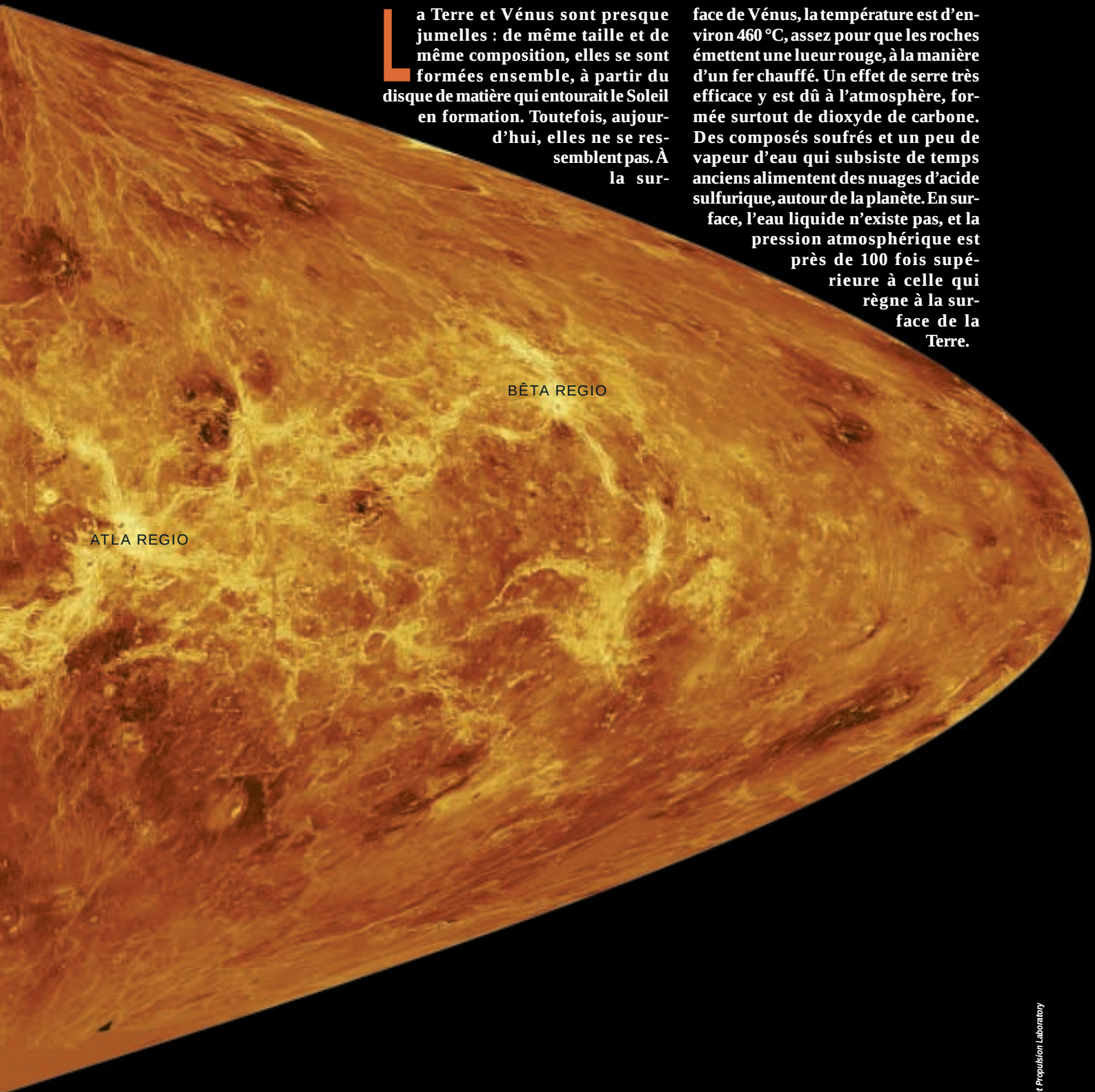
1. LA SURFACE DE VÉNUS

a été révélée dans son intégralité par un système radar embarqué à bord de la sonde *Magellan*, avec une précision qui atteint 120 mètres. C'est la vue la plus complète dont nous disposons pour une planète, y compris la Terre, où nous connaissons mal les fonds océaniques. Un vaste système équatorial de hautes plaines et de rides court depuis le relief de type continental Aphrodite Terra (à gauche du centre) jusqu'à Bêta Regio (à droite et au Nord), en passant par le haut plateau brillant Atla Regio (juste à droite du centre). Cette image est centrée à 180 degrés de longitude. Elle a été réalisée à l'aide d'une projection sinusoïdale qui, contrairement aux projections cartographiques traditionnelles, telle celle de Mercator, ne déforme pas les aires. Les zones sombres correspondent à un terrain lisse à l'échelle de la longueur d'onde du radar (13 centimètres) ; les aires brillantes sont rugueuses. Les stries Nord/Sud sont des imperfections de l'image.

La cartographie précise de la surface de Vénus et l'analyse de son atmosphère actuelle révèlent que le climat de cette planète a fortement varié depuis un milliard d'années.

La Terre et Vénus sont presque jumelles : de même taille et de même composition, elles se sont formées ensemble, à partir du disque de matière qui entourait le Soleil en formation. Toutefois, aujourd'hui, elles ne se ressemblent pas. À la sur-

face de Vénus, la température est d'environ 460 °C, assez pour que les roches émettent une lueur rouge, à la manière d'un fer chauffé. Un effet de serre très efficace y est dû à l'atmosphère, formée surtout de dioxyde de carbone. Des composés soufrés et un peu de vapeur d'eau qui subsiste de temps anciens alimentent des nuages d'acide sulfurique, autour de la planète. En surface, l'eau liquide n'existe pas, et la pression atmosphérique est près de 100 fois supérieure à celle qui règne à la surface de la Terre.



Nous connaissons Vénus grâce à 22 sondes automatiques qui ont photographié, scruté et analysé sa surface, soit quand elles étaient en orbite, soit quand elles y ont atterri. Nous manquons toutefois d'une vue d'ensemble de la surface de Vénus : elle est presque toujours masquée par des nuages opaques aux rayonnements visibles. Nous avons une vision statique de la planète, ignorant si des phénomènes géologiques, tels le volcanisme ou la tectonique des plaques, s'y déroulaient ou non. La carte à haute résolution de toute la surface de la planète, dressée de 1990 à 1994 par la sonde *Magellan*, qui regardait à travers les nuages à l'aide d'un radar, a révélé que des éruptions volcaniques massives se sont produites dans le passé et qu'il s'en produit encore certainement aujourd'hui. Des simulations numériques qui intègrent

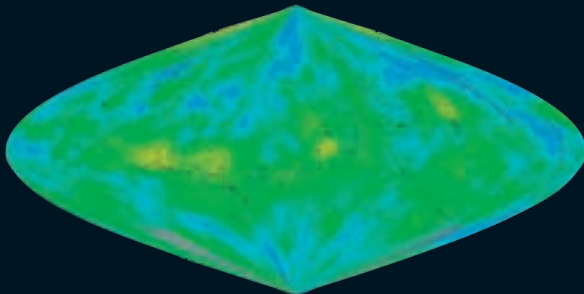
ces informations sur la géologie vénusienne conduisent à des descriptions de l'évolution de cette planète pendant le dernier milliard d'années : un volcanisme intense, notamment, aurait provoqué des changements climatiques de grande ampleur.

Parmi les planètes du Système solaire, Vénus et la Terre sont les seules dont le climat varie et interagit avec l'activité géologique. Mars, autre voisine de la Terre, a aussi connu des changements climatiques importants, mais elle n'évolue plus notablement : son atmosphère actuelle n'est qu'une relique de son passé. L'intérieur de Mars est aujourd'hui trop froid pour que des éruptions volcaniques se produisent, et la surface est profondément gelée. Le climat de Mars ne changerait que si le mouvement de la planète sur son orbite était perturbé.

Comment des mécanismes géologiques semblables à ceux que nous observons sur la Terre ont-ils produit un résultat si différent sur Vénus ? La compréhension de l'évolution climatique d'autres planètes nous éclaire sur les phénomènes qui déterminent le climat sur Terre et nous aidera peut-être à identifier la responsabilité des activités humaines dans les évolutions de celui-ci. En rejetant dans l'atmosphère une quantité croissante de gaz, l'humanité a en effet entrepris involontairement une expérience globale et incontrôlée sur le climat terrestre ; il est peut-être vital de prévoir les résultats de cette opération.

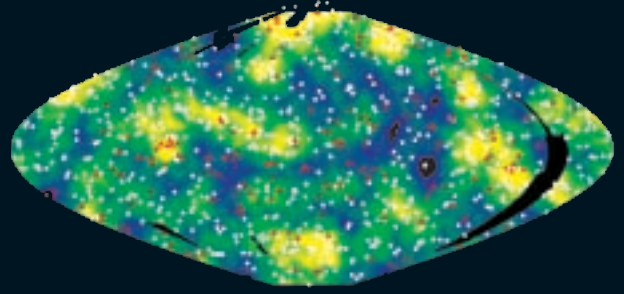
Bien avant que le trou de la couche d'ozone terrestre ne soit connu du public, des astronomes avaient étudié la photochimie de l'atmosphère supérieure de Vénus, et ils avaient

ALTITUDE



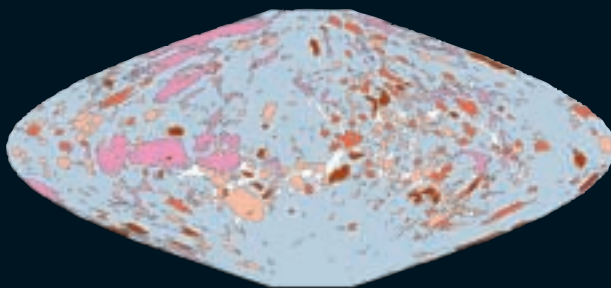
La différence d'altitude entre les points les plus bas de Vénus (*en bleu*) et les points les plus hauts (*en jaune*) est d'environ 13 kilomètres. Trois cinquièmes de la surface sont à une altitude inférieure à 500 mètres par rapport à l'altitude moyenne, qui correspond à un rayon planétaire de 6 051,9 kilomètres. Sur la Terre, les altitudes sont concentrées autour de deux valeurs correspondant aux continents et aux fonds océaniques.

CRATÈRES D'IMPACT



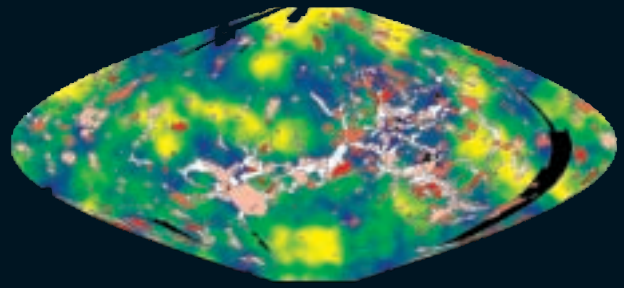
Les cratères dus à des astéroïdes ou à des météorites sont répartis aléatoirement sur toute la planète. La plupart sont intacts (*points blancs*). Ceux qui ont été modifiés par de la lave (*points rouges*) ou par des failles (*triangles*) sont assez groupés. Les régions de faible densité de cratères (*fond bleu*) se situent plutôt sur des hauts plateaux. Les densités de cratères supérieures (*fond jaune*) sont généralement dans les basses plaines.

TYPES DE TERRAINS



Le sol de Vénus est surtout composé de plaines volcaniques (*en bleu*). Dans ces plaines, on trouve des régions déformées, telles les *tesserae* (*en rose*) et les fossés d'effondrement (*en blanc*), ainsi que des formations volcaniques telles que des *coronae* (*en pêche*), des coulées de lave (*en rouge*) et des volcans de tailles diverses (*en orange*). Les volcans ne se concentrent pas en alignement comme sur la Terre, ce qui indique qu'il n'y a pas de tectonique des plaques.

ÂGES DES TERRAINS



Cette carte géologique montre les différents terrains et leurs âges relatifs, déduits de la densité de cratères d'impact. Les volcans et les *coronae* sont à peu près groupés le long de fossés d'effondrement équatoriaux, qui sont plus jeunes (*en bleu*) que le reste de la surface vénusienne. Les *tesserae*, les crêtes et les plaines sont plus anciennes (*en jaune*). Toutefois, la diversité de l'âge des terrains est plus faible que sur la Terre et sur Mars.

découvert que la présence de chlore diminue la proportion d'oxygène libre au-dessus des nuages de la planète. Ce résultat a aidé à comprendre un phénomène analogue sur Terre : dans la stratosphère, le chlore issu des chlorofluorocarbures, utilisés dans des systèmes de réfrigération ou dans des bombes aérosols, détruit l'ozone.

Volcans et plaques mobiles

Le climat de la Terre varie en partie parce que la composition de son atmosphère résulte d'échanges permanents de gaz entre la croûte, le manteau, les océans, les calottes polaires et l'espace extérieur. La source d'énergie fondamentale des processus géologiques intenses, l'énergie géothermique, est produite surtout par la désintégration d'éléments radioactifs dans le noyau ; elle intervient aussi dans l'évolution de l'atmosphère, lorsqu'elle se dissipe par deux mécanismes : le volcanisme et la tectonique des plaques.

Sur la Terre, cette dissipation de l'énergie géothermique est assurée principalement par le mouvement des plaques tectoniques. En outre, lorsque celles-ci plongent dans les profondeurs du manteau, elles recyclent les gaz libérés par les volcans dans l'atmosphère, ce qui stabilise le climat terrestre (*voir l'encadré de la page 41*). Cette stabilité n'est toutefois pas absolue. Ainsi, lors des éruptions volcaniques massives qui ont produit les immenses provinces volcaniques du Globe (des régions couvertes de basaltes probablement issus d'énormes panaches de magma au sein du manteau), l'émission rapide de grandes quantités de gaz dans l'atmosphère a peut-être perturbé temporairement le climat global, qui se serait réchauffé.

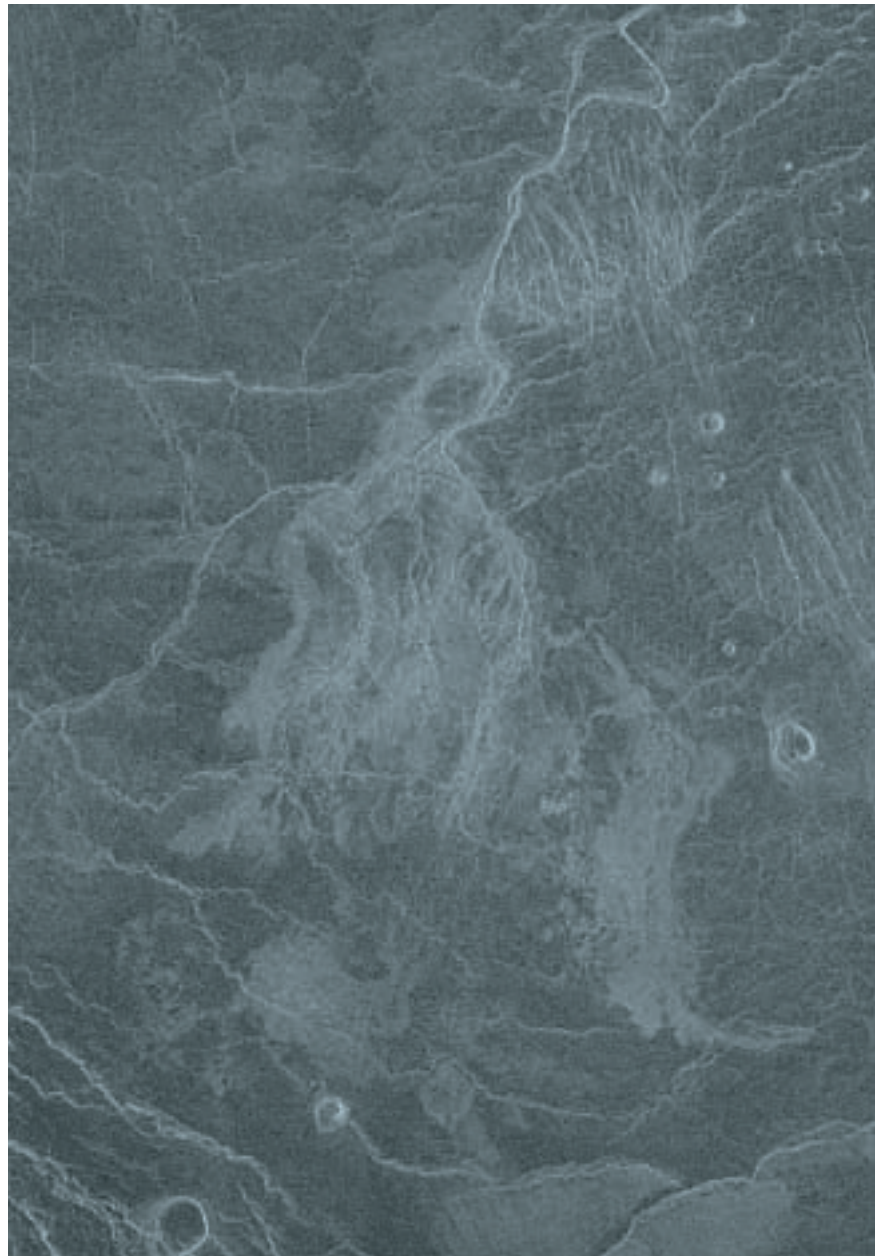
Et sur Vénus ? La surface photographiée par la mission *Magellan* ne semble pas perturbée par une tectonique des plaques, sauf peut-être ponctuellement : au moins dans un passé récent, l'énergie géothermique a été dissipée par l'éruption de grandes quantités de lave basaltique qui ont formé de vastes plaines et, plus tard, par les volcans qui se sont construits dessus.

Peut-on dater ces événements volcaniques ? Comme on ne peut pas analyser de roches pour dater leur formation, on compte les cratères d'impact météoritiques : les observations du nombre d'astéroïdes et de comètes dans le Système solaire interne, ainsi

que le décompte des cratères sur la Lune (dont on a daté directement les roches), permettent de calculer la fréquence des collisions. La surface de Vénus porte peu de cratères d'impact : on n'en dénombre que 963 sur la carte dressée par *Magellan*. L'atmosphère épaisse arrête la plupart des projectiles de diamètre inférieur à un kilomètre, qui creuseraient des cratères jusqu'à 15 kilomètres de diamètre, mais les calculs indiquent qu'environ 1,2 cratère par million d'années devrait apparaître sur Vénus. Les impacts des 3,7 premiers

milliards d'années de l'histoire de la planète ont donc été effacés.

Sur la Terre, les cratères d'impact sont effacés par l'érosion : on observe des états d'altération variés, de la cuvette presque intacte du Meteor Crater, en Arizona, aux contours à peine discernables des impacts de plus de 600 millions d'années enfouis dans la croûte continentale la plus ancienne. Toutefois, la surface de Vénus est bien trop chaude pour que de l'eau y coule, et les vents de surface sont aujourd'hui peu puissants : les cratères ne sont donc pas



NASA/Jet Propulsion Laboratory

2. UNE RIVIÈRE SUR VÉNUS ? Ce delta est à l'extrémité d'un chenal étroit qui court sur 800 kilomètres à travers les plaines volcaniques septentrionales. Il n'a pas été creusé par l'eau : Vénus est trop chaude et trop sèche. C'est peut-être l'œuvre de laves riches en sels carbonatés et sulfatés, qui auraient coulé alors que la température moyenne était supérieure de plusieurs dizaines de degrés à celle d'aujourd'hui. La région représentée a 40 kilomètres de large et 90 kilomètres de long.

altérés ni effacés par l'érosion, mais par les activités volcanique et tectonique.

La plupart des cratères vénusiens semblent récents : les bords de six pour cent d'entre eux seulement sont partiellement recouverts par des coulées de lave, et seulement douze pour cent ont été déformés par un plissement ou par une cassure de la croûte. Où sont donc les cratères plus anciens ? S'ils ont été recouverts par de la lave, pourquoi ne voyons-nous pas plus de cratères partiellement comblés ? Et quel mécanisme les a effacés en préservant la répartition aléatoire et régulière de ceux qui restent ?

Un événement géologique a-t-il brusquement effacé tous les vieux cratères il y a environ 800 millions d'années ? Les cratères que nous observons

se seraient alors formés sur cette surface neuve. On ne connaît toutefois pas, sur Terre, de phénomène géologique qui aurait remodelé l'intégralité de la surface de la planète.

Selon un autre modèle, appelé «renouvellement progressif de la surface», des processus géologiques constants effaceraient en permanence de petits groupes de cratères, préservant une distribution globale qui paraît aléatoire. Toutefois, certaines formations géologiques sur Vénus sont très étendues, et l'activité géologique ne gommerait donc pas les cratères de façon aussi efficace partout sur la planète. La réalité est probablement entre ces deux modèles. La plupart des planétologues pensent aujourd'hui qu'un volcanisme global a effacé la plupart des cratères

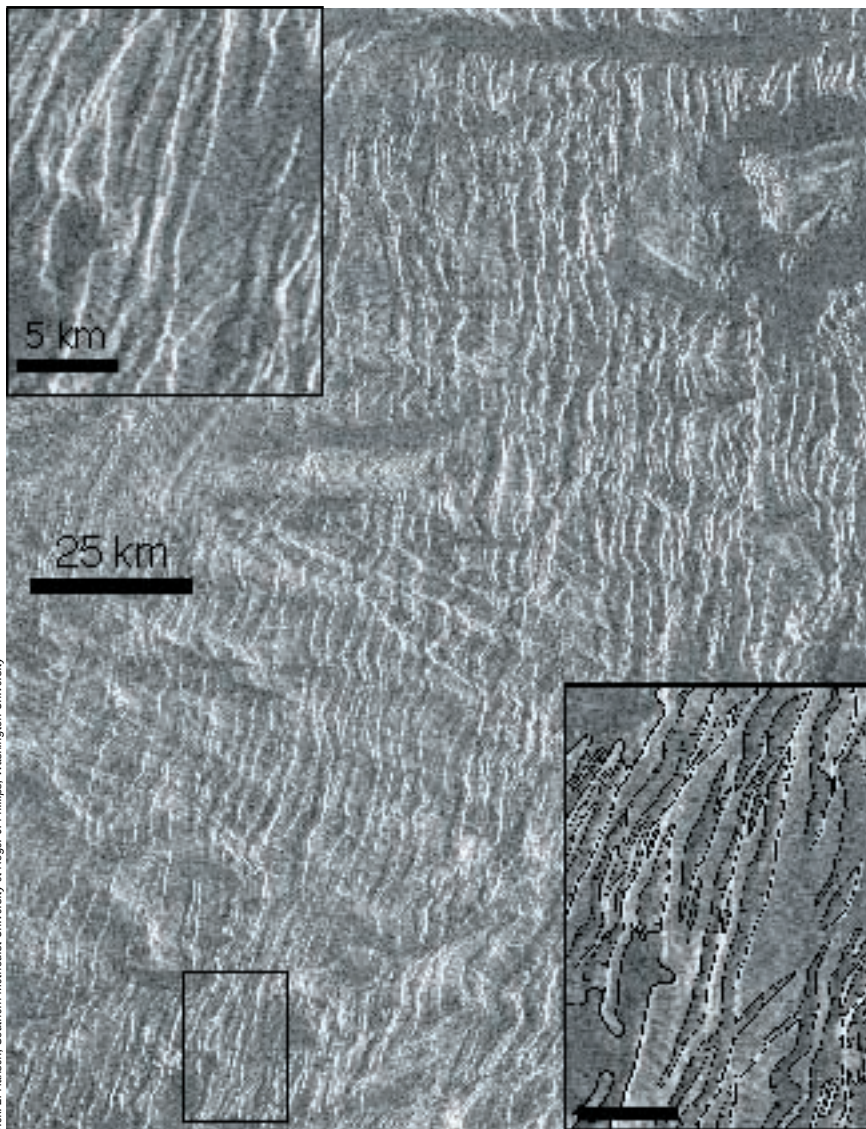
d'impact et a créé les vastes plaines volcaniques il y a 800 millions d'années ; depuis, une faible activité volcanique persisterait.

Des écoulements sans eau

Toutefois, certaines formations géologiques ne semblent pas résulter du volcanisme, mais de profondes variations du climat de Vénus. D'abord, des lignes, dont certaines atteignent jusqu'à 7 000 kilomètres de long, ressemblent aux rivières sinueuses et aux plaines alluviales terrestres. Beaucoup de ces lignes aboutissent à des chenaux d'écoulement semblables à des deltas fluviaux.

L'extrême sécheresse qui règne sur Vénus rend peu probable une érosion par l'eau. En revanche, la surface, en équilibre avec une atmosphère pesante de dioxyde de carbone et de composés soufrés, est vraisemblablement riche en carbonate et en sulfate de calcium : les sondes soviétiques *Vénéra* ont mesuré de sept à dix pour cent de sels de calcium (presque certainement des carbonates) et de un à cinq pour cent de sulfates dans les roches superficielles. Or, les laves riches en composés de ce type fondent à des températures supérieures de quelques dizaines à quelques centaines de degrés aux températures vénusiennes actuelles. De vastes réservoirs de carbonate de calcium et de sodium fondus, analogues aux nappes aquifères terrestres, pourraient exister à quelques centaines de mètres ou à quelques kilomètres sous la surface, et des températures de surface un peu plus élevées dans le passé auraient conduit à l'épanchement de ces laves en surface, où leur écoulement aurait sculpté les reliefs que nous voyons aujourd'hui.

Les *tesserae*, terrains les plus anciens de Vénus, devraient aussi leur aspect actuel à des augmentations de température dans le passé. Ces paysages très ridés sont sur des plateaux comparables aux continents terrestres, à plusieurs kilomètres au-dessus des basses plaines de lave. Ils se seraient formés par extension de la lithosphère (la croûte et le manteau supérieur) : c'est comme si l'on avait étiré du chocolat chauffé au bain-marie, chaud et mou au-dessous, plus froid et cassant au-dessus. Aujourd'hui, la partie externe, cassante, de la lithosphère est trop épaisse pour se casser de cette manière, mais, à l'époque de la formation des *tesserae*, elle devait être plus mince, et donc la surface était un peu



Vicki L. Hansen, Southern Methodist University et Roger J. Phillips, Washington University

3. UN TERRAIN RUBANÉ est composé de dépressions peu profondes (400 mètres) à fond plat et à flancs escarpés. Ces formations peuvent résulter de la fracture d'une couche de roches mince et cassante, au-dessus d'un substrat ductile. Les cartouches présentent un agrandissement de la région encadrée, avec les dépressions indiquées en bas à droite.

plus chaude (comme pour le chocolat, l'épaisseur de la couche externe dépend de sa température).

Enfin, des failles et des plis qui balafrent la planète se seraient aussi formés lors de variations climatiques, en particulier les plis en forme de rides. Toute la lithosphère de la surface de Vénus semble avoir été étirée ou comprimée en même temps. Il est difficile de concevoir un mécanisme interne à la planète qui produise de tels reliefs. En revanche, C. Solomon, de l'Institut Carnegie de Washington, a calculé que des variations de la température de 100 °C, à la surface de la planète, auraient engendré des tensions dans la lithosphère atteignant 100 millions de pascals, proches de celles qui créent les chaînes de montagnes sur la Terre et suffisantes pour produire les déformations que nous observons.

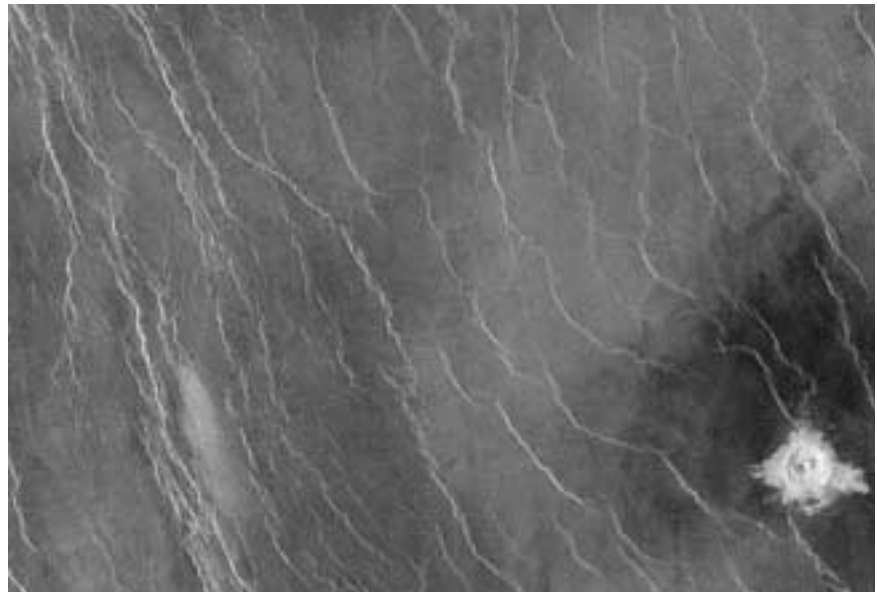
Une serre efficace

Parallèlement à ces recherches géologiques, nous avons modélisé l'atmosphère de Vénus : la température élevée est maintenue par les propriétés complémentaires des constituants de l'atmosphère vénusienne. La vapeur d'eau, même en faible quantité, absorbe le rayonnement infrarouge à des longueurs d'onde où le dioxyde de carbone est transparent, et le dioxyde de soufre et d'autres composés soufrés absorbent à d'autres longueurs d'onde infrarouges encore (voir l'encadré de la page 40). Tous ces gaz à effet de serre rendent l'atmosphère de Vénus partiellement transparente au rayonnement solaire incident, mais presque totalement opaque au rayonnement thermique réémis par le sol. Par conséquent, la température de surface (mesurée en kelvins) est trois fois supérieure à ce qu'elle serait sans atmosphère. Sur la Terre, l'effet de serre n'accroît aujourd'hui la température de surface que de 15 pour cent.

Si le volcanisme a remodelé la surface vénusienne il y a 800 millions d'années, il a aussi injecté rapidement beaucoup de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. On estime que la lave émise pendant ces éruptions aurait formé une couche de un à dix kilomètres d'épaisseur autour de la planète : la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère aurait peu augmenté, malgré la libération d'une grande quantité de ce composé, parce

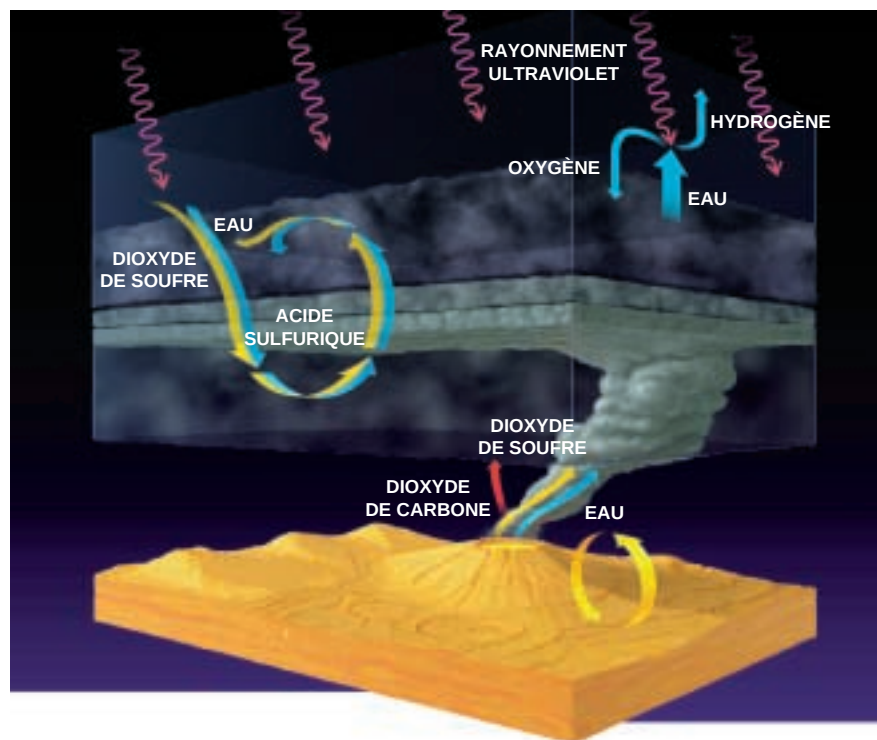
qu'elle était déjà très grande. Au contraire, les concentrations en vapeur d'eau et en dioxyde de soufre auraient été respectivement multipliées par 10 et par 100. Le climat vénusien aurait évolué en raison de

plusieurs phénomènes qui interagissent : le dégazage volcanique, la formation de nuages, la perte d'hydrogène au sommet de l'atmosphère et les réactions des gaz atmosphériques avec les minéraux de surface.



NASA/Jet Propulsion Laboratory

4. LES RIDES PLISSÉES sont les structures les plus fréquentes des plaines volcaniques de Vénus. Parallèles et équidistantes, elles se sont probablement formées quand les plaines ont subi une contrainte, en raison d'une variation importante et rapide de la température de surface. Cette région, qui fait partie des plaines équatoriales Rusalka Planitia, mesure approximativement 300 kilomètres de côté.



Tom Moore, Mark A. Bullock et David H. Grinspoon, d'après Carter Emmert, Hayden Planetarium

5. L'ATMOSPHÈRE DE VÉNUS est à une température de plusieurs centaines de degrés Celsius ; sa pression est élevée, et elle est chargée de nuages composés d'acide sulfurique, parce que Vénus ne possède pas les cycles qui stabilisent le climat terrestre. Le dioxyde de carbone rejeté par les volcans reste dans l'atmosphère ; l'eau, dissociée en oxygène et en hydrogène par les ultraviolets solaires, est à jamais perdue dans l'espace ; le dioxyde de soufre, jadis piégé dans les minéraux, s'accumule en surface.

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

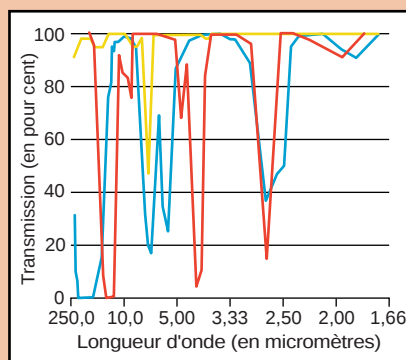
Quand les nuages se sont amincis, la surface a reçu plus d'énergie solaire et s'est réchauffée. Après 200 millions d'années de réchauffement, la base des nuages a commencé à s'évaporer. Une rétroaction positive s'est établie : plus les nuages s'amincissaient, moins le rayonnement solaire était réfléchi 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*.

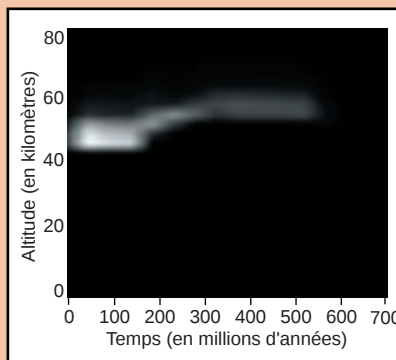
Heureusement, le climat terrestre n'a pas subi de telles variations dans un passé récent. Bien que l'atmosphère terrestre soit aussi perturbée par le volcanisme, elle est riche en oxygène (produit par l'activité biologique et par l'eau), de sorte qu'elle élimine les gaz soufrés. Les nuages d'eau assurent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

EFFET DE SERRE



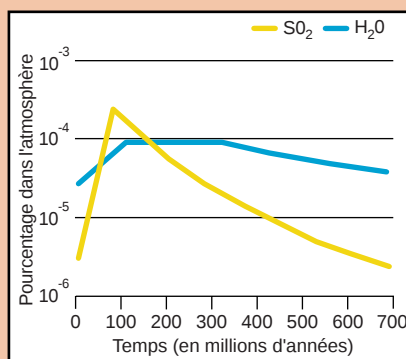
Les gaz à effet de serre laissent la lumière solaire atteindre la surface de Vénus, mais ils bloquent le rayonnement infrarouge réémis par le sol. Le dioxyde de carbone (en rouge), l'eau (en bleu) et le dioxyde de soufre (en jaune) absorbent chacun à des longueurs d'onde différentes. Si ces gaz étaient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

COUVERTURE NUAGEUSE



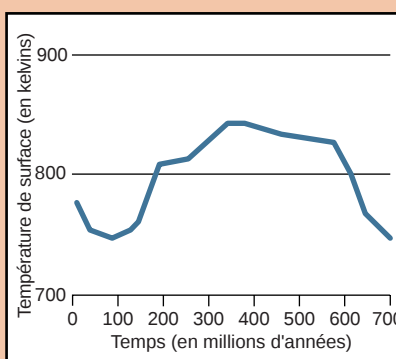
L'épaisseur des nuages, composés d'acide sulfurique, varie après les éruptions volcaniques. D'abord, quand l'eau et le dioxyde de soufre se répandent dans l'air, les nuages s'épaississent. Puis ils se dissipent. Environ 400 millions d'années après le début d'un épisode volcanique global, les nuages acides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

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