

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

travaux d'aménagement des barrages sont achevés en 1621.

Pendant cette période, la production d'argent augmente proportionnellement au débit d'eau utilisable, jusqu'à ce que l'appauvrissement du minerai diminue fortement la rentabilité et impose la construction de nouveaux réservoirs pour traiter de plus grandes quantités de minerai. Hélas, en dépit des efforts des ingénieurs, la production d'argent sous la colonie ne retrouvera jamais son activité du début du XVII^e siècle.

Avant la construction des réservoirs, les usines sont installées à une dizaine de kilomètres de Potosi, sur la rivière Cayara. Pour éviter de trop longs transports de minerai, les Espagnols construisent des barrages plus près de la ville et creusent le canal collecteur de la Ribera de la Vera Cruz, qui traverse Potosi en suivant le lit d'un cours d'eau intermittent. Les travaux du canal de la Ribera, commencés en décembre 1574, mobilisent 200 officiers espagnols et 4 000 manœuvres indiens. La Ribera est inaugurée en mars 1577, six mois après l'achèvement des premiers réservoirs. Son débit moyen est de l'ordre de 160, voire 250 litres par seconde.

Les barrages, d'environ 200 mètres de longueur et de huit mètres d'épaisseur, sont construits dans des défilés proches de la ville, où les eaux se rassemblent. Les grands lacs de barrage mesurent plus de un kilomètre de circonférence et sont profonds de près de cinq mètres en leur centre. Sous la colonie, la quasi-totalité des eaux des barrages se jettent dans le lac San Sebastian par un système de petits canaux et de cascades. Puis l'eau atteint la Ribera où sont déployées la plupart des usines (sur une quinzaine de kilomètres le long des rives). Au début du XVII^e siècle, l'eau du



Carlos Serrano



1. LES FILONS D'ARGENT MASSIF affleuraient au sommet (4 890 mètres) de la montagne d'argent, le Cerro Rico (à l'arrière-plan, sur la photographie du haut). Pour traiter des quantités plus importantes d'un minerai qui s'appauvissait, les colons espagnols ont conçu un système de réservoirs (en bleu dans le cartouche clair) collectant les eaux venant de la montagne, lesquelles se rassemblaient dans la Ribera. Ce canal traversait la ville de Potosi ; les usines de traitement du minerai, alimentées par l'énergie hydraulique, étaient alignées le long du canal. Cinq périodes de forte production ont marqué l'exploitation des mines d'argent de Potosi : juste après la découverte des mines en 1545, entre 1573 et 1650, entre 1750 et 1800, entre 1840 et 1850 (plutôt une reprise d'activité qu'un véritable boom), entre 1872 et 1895. La production annuelle d'argent a dépassé 200 tonnes vers 1600.



lac San Ildefonso et de quelques sources alimente les 286 fontaines de la ville.

Quand les pluies sont abondantes au cours de la saison humide, les réserves en eau suffisent à l'alimentation des usines de purification du métal pendant six ou sept mois. Nous tenons ces informations de Luis Capoché, un Espagnol natif de Séville et propriétaire de deux usines hydrauliques. En 1583, dans un texte dédié au vice-roi des Indes Torrès y Portugal, il décrit les difficultés de l'exploitation de l'argent et l'installation d'une cinquantaine d'usines hydrauliques le long de la Ribera. Les machines qui concassent les blocs de minerai sont mues par l'énergie des hommes et des chevaux, progressivement remplacée par l'énergie hydraulique. Les machines hydrauliques s'imposent à la fin du XVI^e siècle. En 1633, 81 concasseurs hydrauliques d'une puissance totale de 350 kilowatts fonctionnent sur la Ribera.

Le début de la décadence

Natif de Potosi, Bartolomé Arzáns (1676-1736) était maître d'école. Dès 1705, il retrace l'activité de la ville depuis sa création, en 1545. Cette chronique sera poursuivie par son fils jusqu'en 1737. Arzáns est marqué par la rupture du barrage de San Ildefonso, le 15 mars 1626, où plus de 2 000 habitants de Potosi trouvent la mort (voir l'encadré de la page 46) ; selon le pieux Arzáns, Dieu a puni l'impiété des riches habitants de Potosi.

Même si la rupture a marqué son histoire, la ville se remettra vite de cet épisode (quelques années après la catastrophe, il y a plus d'usines sur la Ribera qu'en 1626). D'autres calamités, telles rigueurs climatiques et épidémies, frappent la ville. Au cours de la seconde moitié du XVII^e siècle et de la plus grande partie du XVIII^e siècle, la population de Potosi diminue inexorablement. Environ 160 000 vers 1610, les habitants ne seront plus que 70 000 vers 1700, puis 40 000 après l'épidémie (vraisemblablement de peste) de 1719, qui tue le tiers des citadins, et 24 000 en 1778.

La baisse de l'activité minière et la chute de la population de Potosi à partir de 1650 résultent surtout de la fin de l'approvisionnement régulier en mercure bon marché en provenance du Pérou, car le procédé d'extraction par amalgame nécessite des quantités notables de ce métal (voir l'encadré

ci-dessous). Dès le milieu du XVII^e siècle, le Mexique devient le plus grand producteur d'argent des Indes espagnoles, supplantant définitivement Potosi.

Le Petit Âge glaciaire, une période anormalement froide, commence vers 1500 et perdure jusqu'à vers 1850, presque toute la période coloniale espagnole à Potosi (1545-1825). La période 1560-1641 est plutôt sèche. Dans la région de Potosi, la vie est d'une grande dureté et la sécheresse accompagne la dépression économique. Entre 1705 et 1742, deux années sur trois sont marquées par une sécheresse dévastatrice.

Pedro Vicente Cañete, administrateur assistant du gouverneur de Potosi pendant une trentaine d'années, consigne l'histoire de la région dans

un ouvrage achevé dans les années 1780. Il retrace les réformes du despote éclairé Charles III : pendant son règne (1759-1788), les Bourbons tentent un ultime effort pour restaurer les colonies espagnoles et relancer l'exploitation des mines d'argent.

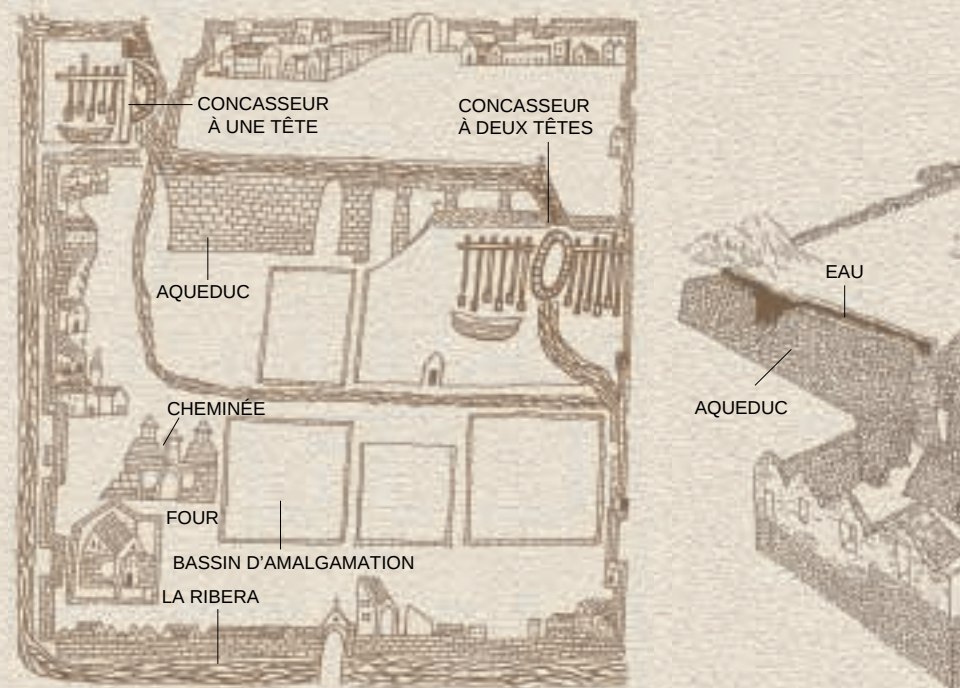
Le nombre des concasseurs installés sur la Ribera et dans la région de Potosi sur d'autres cours d'eau varie selon le degré d'exploitation des mines et la concentration des filons en argent. Dans toute la région de Potosi, on dénombre 96 concasseurs en 1601 et 140 en 1610. Sur la seule Ribera, on passe de cinq concasseurs en 1576, à 49 en 1583 et à 81 en 1633. Ensuite, les têtes ne sont plus que 34 en 1693, année caractéristique de la grande crise qui

Le procédé de purification de l'argent

Au temps de la colonie, le minerai d'argent est transporté de la mine jusqu'à la cour de l'usine, ou patio, dans des sacoches, à dos de lama, d'âne, de mulet et de cheval. Le lama est l'animal le plus utilisé, des dizaines de milliers de bêtes étant réquisitionnées par l'administration espagnole. Le minerai est sous forme de petits blocs d'une dizaine de centimètres de diamètre ; il est déposé dans un coin de la cour et sèche pendant quelques jours. Les concasseurs utilisés à Potosi ressemblent à ceux inventés au début

du XVI^e siècle dans les usines de la Saxe, en Allemagne (où l'on extrayait également l'argent) : ils sont équipés de quatre à six pilons chaussés, à leur extrémité, d'une masse de fer ou de bronze.

Grâce à une série d'engrenages, ces marteaux-pilons se soulèvent les uns après les autres d'une vingtaine de centimètres avant de retomber sur le minerai. L'axe auquel sont reliés les pilons est entraîné par une roue hydraulique, de diamètre compris entre quatre et huit mètres. Les roulements et les arbres



Ce schéma (à gauche) réalisé au XVIII^e siècle par le chroniqueur Arzáns, qui vivait à Potosi, illustre le rôle essentiel de l'eau dans la purification de l'argent. L'eau coulait dans la Ribera, un canal traversant la ville, et des dérivations alimentaient des aqueducs

dura de 1650 à 1750, et atteignent 79 en 1788, lors d'une phase de croissance de la métallurgie de l'argent, le troisième boum minier.

La mita

Les Indiens payèrent un lourd tribut à l'exploitation de l'argent à Potosi. En 1573, au début des grands travaux, quelque 20 000 Indiens, dont certains étaient contraints aux travaux forcés, la *mita*, auraient été mobilisés pour la construction du premier barrage, sur le lac Chalviri. On faisait venir à Potosi des travailleurs qui habitaient à plus de 600 kilomètres de là. Ces travaux forcés frappaient tous les hommes de 18 à 50 ans des communautés indigènes,

du lac Titicaca, au Nord (le Pérou actuel) jusqu'à la région de Tarija (à la frontière actuelle avec l'Argentine), au Sud.

Vers 1750, la population andine, éprouvée par les épidémies et les conditions de travail, particulièrement dures dans les mines et dans les usines, n'était plus que le quart de celle de 1533, date de l'arrivée des Espagnols (les concasseurs dégageaient une épaisse poussière, et les ouvriers manipulaient sans précaution le mercure toxique). Fuyant la *mita* dans la région voisine de Cochabamba, les métis, les petits commerçants et toutes les catégories exemptées des travaux forcés se multiplièrent. Des travailleurs libres étaient également employés dans les mines.

En 1780, les Indiens soumis aux travaux forcés n'étaient plus que 2 880, contre 13 340 appelés en 1573 et 10 460 en 1617. En 1750, le roi d'Espagne reconnaît l'ampleur des pertes humaines depuis le début de la *mita*, en confirmant qu'une vingtaine d'Indiens soumis aux travaux forcés travaillaient comme ouvriers et manœuvres dans chaque usine d'argent, contre une quarantaine au début de l'exploitation hydraulique.

Selon certains historiens, c'est uniquement grâce à l'exploitation accrue de cette main-d'œuvre gratuite qu'aurait eu lieu le troisième boum minier, entre 1780 et 1800 (la *mita* ne sera abolie qu'en 1812). Toutefois, la reprise de l'activité à Potosi est fragile, à la fin du XVIII^e siècle. Certes, l'Espagne envoie des administrateurs, des experts internationaux et des missions scientifiques pour réactiver et moderniser les mines, mais les résistances sont fortes. La technique des barils, qui aurait accéléré la formation de l'amalgame, est rejetée par les entrepreneurs, qui ne veulent pas investir dans de nouvelles installations. Dans la technique des barils, au lieu de laisser l'argent s'amalgame au mercure dans des bassins, le minerai et les réactifs chimiques sont placés dans des barils qui tournent ; cette agitation augmente la vitesse de réaction, qui est achevée en 24 heures tandis qu'il faut une quinzaine de jours avec le procédé des bassins. De surcroît, à la fin du XVIII^e siècle, la main d'œuvre est insuffisante, le mercure manque et l'approvisionnement en énergie hydraulique est déficitaire, à cause d'une sécheresse générale dans les Andes, entre 1780 et 1810.

Le début du XIX^e siècle est marqué par deux crises de production de l'argent. Entre 1800 et 1805, la Ribera tarit souvent, et l'importation du mercure extrait des mines espagnoles est interrompue par les guerres napoléoniennes de sorte que le minerai ne peut plus être traité ; ensuite, la lutte pour l'indépendance des États Sud-américains désorganise les circuits de production. La population de Potosi atteint son minimum historique durant cette période troublée. En 1807, seules 13 700 personnes vivent dans la cité. Lors de la visite du libérateur Simón Bolívar en octobre 1825, Potosi n'est plus qu'une ville-fantôme de 8 000 habitants, soit moins du dixième de la population du début du XVIII^e siècle. La plupart des habitants ont fui le site à cause de la longue guerre d'indépendance de la Bolivie qui dure 16 ans

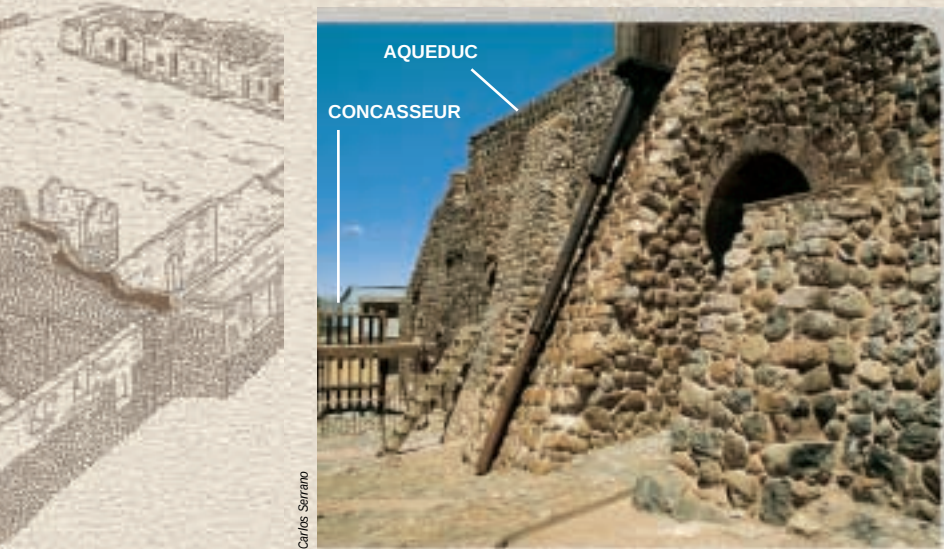
à cames sont en bois et en cuir, puis en fer, et abondamment lubrifiés par de la graisse de lama. Le minerai est broyé en grains de quelques millimètres, et chaque marteau-pilon de concasseur traite 20 tonnes par mois.

Une meule circulaire en pierre, actionnée et refroidie à l'eau, réduit ensuite le minerai en une poudre fine. L'ensemble des deux phases de pulvérisation mécanique — concassage et mouture — est nommé trituration. Le matériel est ensuite passé au crible et classé selon sa granulométrie. Le matériel le plus fin est transporté au centre du patio et placé dans des bassins carrés de deux mètres sur trois environ, contenant entre 20 et 100 caissons placés côte à côte.

L'amalgamation a lieu dans ces caissons. À la poudre de minerai, on ajoute les uns après les autres différents réactifs (notam-

ment du sulfate de cuivre, de l'étain ou du plomb, du chlorure de sodium, de la chaux) et du mercure, dont le rôle est essentiel dans le procédé. Pendant une quinzaine de jours, le mélange reste à réagir dans les caissons, qui sont alors rincés à l'eau. La gangue, plus légère, se déverse dans un canal d'évacuation, tandis que l'amalgame d'argent et de mercure reste au fond des bassins. On le recueille à la pelle. Après égouttage, l'amalgame est pressé dans des moules, puis mis au four et porté à près de 1 000 °C, où le mercure se vaporise. Dans chaque moule, on recueille de l'argent pur à 95 pour cent.

Dans cette chaîne de production, l'eau intervient à toutes les étapes. Pour chaque usine, l'eau de la Ribera est déviée vers un petit aqueduc qui déverse l'eau sur la roue hydraulique et alimente l'usine.



(au centre) qui conduisaient l'eau jusqu'au cœur des usines. L'eau actionnait les concasseurs et elle était également très utilisée au cours du procédé d'amalgamation, qui avait lieu dans des bassins. À droite, un aqueduc restauré et un concasseur (à l'arrière-plan).

La rupture du barrage de San Ildefonso, en 1626

Le barrage de San Ildefonso, achevé en 1576, est l'un des premiers ouvrages réalisés par les colonisateurs. Il est constitué de dépôts morainiques remaniés par l'homme, qui n'ont pas été suffisamment consolidés. Les barrages espagnols sont construits sans déversoir, et le niveau des lacs doit être étroitement surveillé. En cas de trop-plein, des vannes sont ouvertes, et si cela ne suffit pas, les ouvriers pratiquent à la hâte un passage pour les eaux lors de leur montée.

Le dimanche 15 mars 1626, vers 13 heures, après une saison de pluies abondantes, le lac San Ildefonso (à 4 410 mètres d'altitude) est plein. Hélas, l'incurie d'un haut fonctionnaire de la couronne amène la catastrophe. Malgré les avertissements du technicien chargé de la maintenance des lacs, l'incompétent gouverneur de la ville ne se préoccupe pas de la montée des eaux et ne fait pas ouvrir les vannes à temps. Le vent amorce le déversement, une vague déborde et une brèche s'ouvre dans la digue : toute l'eau s'y engouffre. Le barrage se rompt, et le contenu de la réserve d'eau se déverse sur Potosi. Selon certains témoins, sur 122 usines installées à Potosi et à Tarapaya, moins de la moitié résistèrent aux

flots. La moitié de la ville, quelque deux kilomètres en aval du barrage, est sous l'eau, 360 maisons d'Espagnols et 800 maisons d'indigènes sont détruites. Deux facteurs expliquent l'ampleur de la catastrophe : la fragilité des constructions et la surpopulation le long de la Ribera. Les auteurs contemporains ont décrit l'exiguïté et la précarité des maisons, qui s'effondraient par fortes pluies ou averses de grêle. De plus, à l'heure de la catastrophe, tous les habitants sont chez eux. Les roues hydrauliques de trois tonnes, entraînées par le flot, écrasent les fragiles demeures.

La catastrophe, une des plus meurtrières dans l'histoire des barrages, fit plus de 2 000 victimes immédiates. À cela s'ajouta une forte contamination chimique en mercure, en chaux vive, en sulfate de cuivre, qui se déversèrent dans la Ribera.

Après le désastre, les Espagnols reconstruisent et consolident les barrages de San Ildefonso et de San Sebastian. Le barrage de San Ildefonso a été restauré une dernière fois, en 1935-1936 ; il mesure aujourd'hui 500 mètres de longueur et, au point le plus haut, la digue enserrant l'ouvrage atteint une hauteur de huit mètres... La digue de 1626 était sans doute moins haute.

(de 1809 à 1825) et ruine l'activité minière. Potosi est tour à tour pillée, perdue ou reprise par les indépendantistes venus d'Argentine et par les royalistes espagnols.

La vapeur est salvatrice, mais le Gold standard...

En 1825, année de l'indépendance, le Haut-Pérou prend le nom de Bolivie, et c'est le début de la période républicaine de l'exploitation de l'argent. Vers 1840,

la production s'améliore, et c'est le quatrième boum minier de l'histoire de Potosi. Le maximum de la production n'atteint cependant pas la moitié de celle du boum des années 1750-1800. L'arrivée de la vapeur et de l'électricité en 1872 correspond au cinquième boum. La force hydraulique n'est plus l'unique moteur de l'exploitation. Pourtant, le système hydraulique colonial est entretenu pour alimenter en eau la population de la fin du XIX^e siècle. Il subsiste encore quelques petits ateliers sur la

Ribera, où le minerai de contrebande et de faible teneur est concassé, mais l'outillage est obsolète. En 1892, il ne reste que 65 ateliers.

En 1891, tournant pour l'économie bolivienne : les États-Unis adoptent le *Gold Standard*, qui sonne le glas de l'argent dans le système monétaire international. La démonétisation de l'argent marque la fin de la principale demande. Les mineurs et les entrepreneurs boliviens décident alors d'exploiter l'étain, lui-même extrait du Cerro Rico et dont la demande croît jusqu'à la crise mondiale déclenchée par le krach boursier d'octobre 1929. La production record de la même année est 47 100 tonnes. Néanmoins, la demande d'étain se maintient pendant et après la crise économique des années 1930, car le métal est indispensable à la production de bronze. Qui plus est, l'étain sert alors beaucoup à la fabrication des boîtes de conserve. Le prix de l'étain ne s'effondre définitivement qu'en 1985, avec la mise en place de l'industrie du recyclage des métaux dans l'économie occidentale : l'étain recyclé, les revenus liés au métal échappent aux Boliviens.

En 1935-1936, William Rudolph, un ingénieur Nord-américain, restaure, avec 800 ouvriers, le système de barrages en cascade hérité des Espagnols. Il a été engagé par le propriétaire de mines, un Bolivien d'origine allemande, Mauricio Hochschild, l'un des trois magnats de l'étain. En 1929, le groupe Hochschild fournit 10 pour cent de la production bolivienne.



2. L'EAU UTILISÉE POUR LE CONCASSAGE coulait dans un aqueduc et actionnait les roues hydrauliques construites dans la maçonnerie (à gauche). L'axe de la roue était relié au concasseur (la poutre horizontale, sur la photographie de droite), dont les piliers faisaient subir au minerai réduit en poudre par une meule un traitement par le mercure pour récupérer l'argent.

Vers 1930, six lacs alimentent encore Potosi qui compte 35 000 habitants, soit environ le cinquième de la population de la ville, à son apogée. Néanmoins, on décide de restaurer les barrages, parce que les besoins en eau de la population du XX^e siècle sont supérieurs à ceux de la population coloniale. De plus, les sociétés qui exploitent l'étain veulent disposer d'eau durant toute l'année.

La restauration

La restauration des barrages est œuvre difficile. À Potosi, toutes les vannes d'évacuation (à l'exception de deux d'entre elles) sont en très mauvais état. Taillées à l'origine dans un tronc d'arbre, puis fondues en bronze, les vannes sont l'élément fragile de l'ingénierie coloniale. De surcroît, les remblais des barrages ont subi des infiltrations : lorsqu'il est plein, le lac Chalviri perd 80 litres par seconde.

Pour améliorer l'alimentation en eau de Potosi, on construit de nouveaux barrages, qui s'appuient sur les anciennes digues ; les fondations sont enterrées de un mètre dans la roche saine. Le lac Chalviri pose une difficulté particulière, parce qu'il ne peut pas être vidangé : on édifie un nouveau barrage légèrement à l'aval de celui de la colonie, et l'espace entre les deux est comblé par du béton, l'ensemble formant une seule digue de cinq mètres de large. Enfin, les barrages ne sont généralement pas assez élevés pour retenir toute l'eau en cas de fortes pluies : l'eau déborde et s'écoule en cascades qui dégradent les ouvrages. Aussi la crête des barrages sans réservoir est-elle relevée, et les tunnels d'évacuation sont-ils reconstruits.

Toutefois, tout ne peut être restauré et nombre de lacs de la colonie disparaissent à jamais. De plus, la forte sédimentation de certains lacs posait un problème insoluble : le lac San Sebastian, remblayé sur une épaisseur de 95 centimètres, avait perdu 80 000 mètres cubes de capacité de stockage. Les lacs coloniaux, n'ont pas été restaurés depuis 1936 ; ils continuent à alimenter la population et les industries de Potosi. Une trentaine d'usines fonctionnent encore, produisant zinc, plomb, argent et étain.

Aujourd'hui, les machines hydrauliques en bois de Potosi fonctionnent à nouveau, moyennant la substitution des pièces usées et le remplacement de quelques composants par des éléments en fer. Essentiellement conçues à la fin du XVI^e siècle, elles ne sont devenues

L'argent de Potosi et l'économie française

L'argent de Potosi était soit frappé sur place (à partir de 1575), soit expédié en Europe (dès 1545, en passant par Lima). Il apparaît massivement dans les émissions monétaires françaises de 1575, date de la réforme monétaire d'Henri III, et surtout du début du deuxième boom des mines de Potosi, après les améliorations apportées à l'exploitation de l'argent par le vice-roi Toledo. Toutefois, les guerres de religion nuisent à la production de monnaie.

En revanche, au cours de la décennie 1580, grâce à l'afflux d'argent de Potosi quasi pur, la production des pièces frappées dans les hôpitaux de monnaie de la façade atlantique double.

Comme en Espagne, le métal précieux en provenance de Potosi s'ajoute au métal circulant et augmente la masse monétaire.

À la fin du XVI^e et au début du XVII^e siècles, l'arrivée massive d'argent de Potosi en Europe a eu une influence notable sur l'économie : les émissions monétaires espagnoles décuplent.

En France, l'émission monétaire des ateliers atlantiques baisse à partir de 1590, notamment en raison des guerres de la Ligue. La banqueroute de l'Espagne, en 1596–1597, empêche l'importation d'argent espagnol, ce qui provoque une pénurie dans le Sud de la France et une augmentation du prix du métal. L'avènement d'Henri IV amène une décennie (1600–1610) de paix : les frappes monétaires reprennent.

Pourtant, c'est la fin de la « phase Potosi » en France, et la décrue de la frappe de monnaie avec le métal issu des hautes Andes péruviennes.



obsolètes qu'en 1872, au début de la modernisation de l'industrie minière. Leur grande robustesse et leur réparation aisée furent un obstacle au changement technique, et elles favorisèrent indirectement la décadence de Potosi.

Néanmoins, Potosi reste, dans le cœur de ses habitants et des Espagnols, ainsi qu'aux yeux des historiens, la fabuleuse cité impériale du Nouveau Monde, celle où les chevaux des nobles avaient caparaçon d'argent et harnais couverts d'émeraudes, celle qui fit rêver Cervantès. En 1590, ce dernier rédigea une demande pour être nommé gouverneur de la cité de La Paz, voisine de Potosi. Dans *Don Quichotte*, il cite les mines de Potosi comme le symbole de

la richesse absolue. Au contraire, après l'indépendance des États Sud-américains, Potosi devint pour les Boliviens et pour les Péruviens le symbole de l'exploitation des Indiens, de l'humiliation des colonisés et du pillage des ressources minières par les étrangers. Le travail forcé de générations d'indigènes, de 1573 à 1812, dans les mines et les usines d'argent, reste le noir visage de Potosi. D'ailleurs, les Indiens célébraient leur départ vers la montagne d'argent comme une offrande à la déesse de la Terre, comme un voyage sacrificiel et sans retour. Olympe généreuse pour les colonisateurs, Potosi fut aussi l'enfer, dans les entrailles de la Terre, pour nombre d'Indiens.

Alain GIODA étudie l'histoire du climat des Andes, dans le cadre du programme Neiges et glaciers tropicaux, à l'IRD (Institut de recherche pour le développement) et au SENAMHI (Service national bolivien de météorologie et d'hydrologie), à Cochabamba. Carlos SERRANO, professeur à l'Université autonome Tomas Frias de Potosí, a dirigé le Laboratoire de concentration des minéraux jusqu'en 1998.

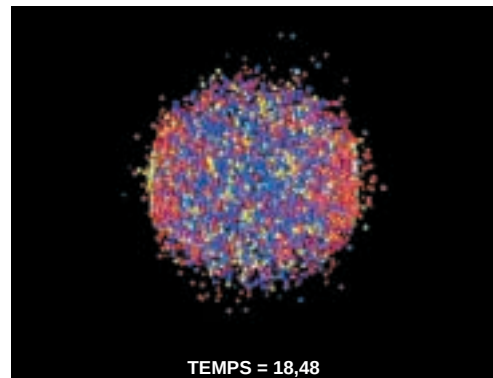
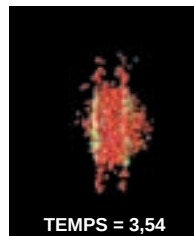
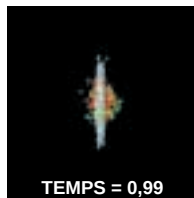
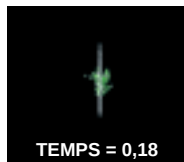
Pedro V. CAÑETE (1787), *Guía histórica, geográfica, física, civil y legal del gobierno e intendencia de la provincia de Potosí*, sous la direction de A. Alba, Editorial Potosí, 1952.

Luis CAPOCHE (1583), *Relación general de la villa imperial de Potosí*, sous la direction de L. Hanke, tome 122, Atlas, Madrid, 1959.

Bartolomé ARZÁNS (1705–1737), *Historia de la villa imperial de Potosí*, sous la direction de L. Hanke et G. Mendoza, Brown University, Providence, 1965.

Emmanuel LE ROY LADURIE et al., *Sur les traces de l'argent de Potosi*, in *Annales ESC*, n° 2, pp. 483–505, Librairie Armand Colin, mars-avril 1990.

Carlos SERRANO, Julio PELÁEZ, *Potosí y sus lagunas*, in *Revista de Investigaciones Históricas (Potosí)*, pp. 14–130, 1995–1997.



Un Big Bang miniature

MADHUSREE MUKERJEE

Des collisions de noyaux atomiques pourraient créer de la matière aussi dense et chaude que dans l'Univers primordial.

Nous sommes dans le tunnel, là où il se divise en deux branches ; les deux tubes étroits qui contiennent le faisceau s'incurvent, de sorte qu'ils sont bientôt cachés à notre vue. La lumière douce se réfléchit sur le gris du béton, de l'acier et des matériaux d'isolation brillants. Une odeur d'atelier flotte dans l'air frais, et l'on perçoit le cliquetis étouffé d'une machine qui vérifie l'étanchéité au vide des tubes. Nous continuons à marcher. Le tunnel devient rectiligne, et les tubes se rejoignent en un seul, plus large. Nous escaladons un ensemble de tuyaux entrecroisés, et nous débouchons dans un vaste hall, baigné par la lumière jaune de projecteurs au sodium. Sur le sol est peint un cercle noir où est écrit «Point de collision».

Juste au-dessus de ce point, les physiciens créeront, au mois de juin 1999, de la matière aussi chaude et aussi dense qu'à la première microseconde après le Big Bang, l'explosion primordiale qui aurait donné naissance à l'Univers. Le Collisionneur d'ions lourds relativistes (le RHIC), dont la construction vient de s'achever au laboratoire américain de Brookhaven, à Long Island, accélérera des noyaux atomiques dont la masse est comprise entre celle de l'hydrogène (un seul proton), et celle de l'or (197 protons et neutrons). Au repos, un nucléon (un proton ou un neutron) a une énergie d'environ un

gigaélectronvolt (un milliard d'électronvolts). Le RHIC accélérera ces noyaux jusqu'à ce que chaque nucléon ait une énergie 10 à 100 fois supérieure.

Des paquets de noyaux atomiques accélérés circuleront dans des directions opposées, dans les deux tubes, et ils se rencontreront dans les quatre détecteurs répartis sur les 3,8 kilomètres de la circonférence du tunnel. Lorsque deux noyaux lourds entreront en collision, chaque paire de nucléons libérera une énergie de 200 gigaélectronvolts, élevant la température à plus de 10^{12} kelvins (mille milliards de kelvins), soit 100 millions de fois la température de la surface du Soleil.

Les physiciens pensent qu'à ces températures les protons et les neutrons devraient se désintégrer et libérer les particules qui les composent : des quarks et des gluons. Un proton est constitué de deux quarks de type «haut» et d'un quark de type «bas», collés par des gluons ; un neutron contient deux quarks bas et un quark haut. Lors de la désintégration, un plasma de quarks et de gluons se formerait dans un volume de 10^{-15} mètre de côté. Ce plasma subsisterait pendant 10^{-23} seconde environ (le temps nécessaire à la lumière pour traverser un noyau atomique) ; il se désintégrerait ensuite en une multitude de particules, qui parcourraient encore mille milliards de fois cette distance avant

d'atteindre les détecteurs. Les physiciens de Brookhaven rechercheront la preuve de l'existence de ce plasma éphémère dans les traces enregistrées par ces détecteurs. Ce sera plus difficile encore que la recherche d'une aiguille dans une botte de foin ; ils devront se contenter de contempler la botte de foin, afin d'en déduire si elle contient ou non une aiguille.

Un problème de couleur

Pis encore, ils ne connaissent même pas la forme de l'aiguille. Comment la matière se comporte-t-elle à ces énergies, où la force dominante est l'interaction forte «de couleur», transportée par les gluons, qui assure la cohésion des nucléons ? La très grande intensité de cette force et les interactions des gluons compliquent considérablement les calculs de la chromodynamique quantique, la théorie de l'interaction forte de couleur.

Aujourd'hui, les physiciens ne savent décrire l'interaction forte que dans quelques cas particuliers, par exemple quand elle est de faible intensité. Paradoxalement, l'interaction forte s'affaiblit quand les quarks et les gluons sont très proches. Tout se passe comme si les gluons, qui lient les quarks entre eux et avec les antiquarks (des particules de même masse, mais dont le nombre baryonique, paramètre