



5. UNE ÉCUME MALSAINE et des poissons morts apparaissent encore souvent sur le Rhin, en 1980 (à gauche). Aujourd'hui la même



région du fleuve, ici au pied de l'usine de production d'électricité de Voerde, dans le bassin industriel de la Ruhr, est bien plus propre.

2 novembre 1986, lorsqu'un entrepôt de pesticides de la Société *Sandoz* prit feu à Schweizerhalle, près de Bâle. L'eau pulvérisée sur le feu entraîna les produits chimiques dans la rivière, où l'un d'eux, le Disulfoton, empoisonna même les anguilles, qui sont des animaux résistants.

Ce désastre suscita des efforts sans précédents pour suivre le rétablissement du Rhin et déterminer son état biologique. Durant le projet, des biologistes utilisèrent des cloches de plongée pour étudier systématiquement les poissons, les macro-invertébrés et les autres occupants du fleuve : on découvrit ainsi que la faune du fleuve s'était complètement rétablie dès le mois d'octobre 1988, soit moins de deux ans après l'incendie.

Les études ont montré la présence de 155 espèces de macro-invertébrés, qui se regroupaient près des rives, entre Bâle et Düsseldorf. Les espèces les plus courantes étaient les éponges d'eau douce, les sangsues, les moules d'eau douce, les amphipodes benthiques (de petits crustacés), les éphémères, les phryganes et leurs larves, et des larves de chironomes (ou vers de vase). Certaines espèces comme l'éphémère *Ephron virgo* et l'escargot *Theodosius fluviatilis*, qui semblaient avoir disparu du Rhin, ont été trouvées en grand nombre. D'autres espèces qui étaient autrefois communes, comme la moule *Spaerium solidum* ou la mouche *Euleuctea geniculata*, étaient représentées par quelques individus et commencent seulement aujourd'hui à réapparaître en plus grand nombre. En revanche, l'amphipode *Corophium curvispinum*, qui vient de la mer Caspienne et de la mer Noire, s'est récemment établi dans

le Rhin et y prolifère au point qu'il chasse certaines espèces d'éponges et de mollusques.

Certains poissons, également, réintègrent le fleuve : une étude récente a répertorié 40 des 47 espèces endémiques connues pour peupler le Rhin. Environ 75 pour cent des poissons identifiés individuellement étaient des espèces communes, tels le gardon, l'ablette et la brème. Les zoologistes ont également noté la présence de carpes, de perches, d'anguilles, de brochets, de chevesnes et de vandoises (ou dards), et ils ont recensé 15 espèces qui avaient été introduites dans la rivière, notamment la perche-brochet, la truite arc-en-ciel et la môle. En 1992, pour la première fois depuis des décennies, des saumons *Salmo salar* ayant atteint leur maturité sexuelle ont été pris dans le Rhin. Ils avaient été lâchés, encore immatures (au stade de tacons), dans les affluents du fleuve un ou deux ans auparavant, et avaient survécu à leur migration dans la mer du Nord. Même l'esturgeon, qu'on pensait disparu du Rhin depuis 40 ans, y a été vu occasionnellement.

L'étude du fleuve n'est pas le seul héritage de l'incendie de Bâle. Les États riverains ont lancé un Programme commun d'assainissement à quatre objectifs : la préservation de l'eau potable, la décontamination des sédiments, la réintroduction des poissons supérieurs (tels les saumons ou les truites de mer), la protection de la mer du Nord. Pour commencer, les États ont recensé les décharges de 30 substances dangereuses. De 1986 à 1995, les rejets de 15 d'entre elles furent réduits de plus de 50 pour cent. En outre, des mesures ont été prises pour

que les rejets en rivière soient évités ou limités en cas d'accident industriel. Dans les prochaines années, la construction d'échelles à poissons devrait aider les saumons à remonter le fleuve jusqu'à leur site de frai, et l'amélioration de ces frayères permettra de rétablir les montaisons.

En 1991, lors d'une conférence sur les travaux effectués dans le bassin versant des eaux du Rhin, le ministre hollandais de l'environnement proposa d'utiliser l'expérience acquise avec le Rhin pour assainir la Meuse et l'Escot. À la fin de la guerre froide, des commissions internationales ont été créées pour purifier l'Elbe, qui coule de la République tchèque et la Pologne à travers l'Allemagne, jusqu'à la mer du Nord, et l'Oder, qui forme une partie de la frontière germano-polonaise. Même la Volga a bénéficié des leçons tirées du Rhin. Pour le Danube, l'assainissement commencera dès que possible, également. Ainsi, au cœur de l'Europe, le Rhin est devenu un symbole de coopération internationale. Le succès des efforts communs d'assainissement est de bon augure.

Karl-Geert MALLE est membre de la Commission allemande de protection du Rhin.

William M. STIGLIANI, Peter R. JAFFÉ et Stefan ANDERBERG, *Heavy Metal Pollution in the Rhine Basin*, in *Environmental Science and Technology*, vol. 27, n° 5, pp. 786-793, mai 1993.

Rehabilitation of the River Rhine, sous la direction de J.A. van de Kraats, numéro spécial de *Water Science and Technology*, vol. 29, n° 3, 1994.

L'évolution de la croûte continentale

ROSS TAYLOR • SCOTT MCLENNAN

Les continents actuels se sont formés en plusieurs fois. Leur étude éclaire le passé géologique de la Terre, montrant que notre planète est une exception dans le Système solaire.

Nous considérons généralement les continents comme des structures permanentes de notre planète. Pourtant, ce ne sont que des structures mineures et dispersées à la surface d'une planète recouverte par les océans. De l'espace, on perçoit mieux le véritable visage du Globe : c'est une planète bleue.

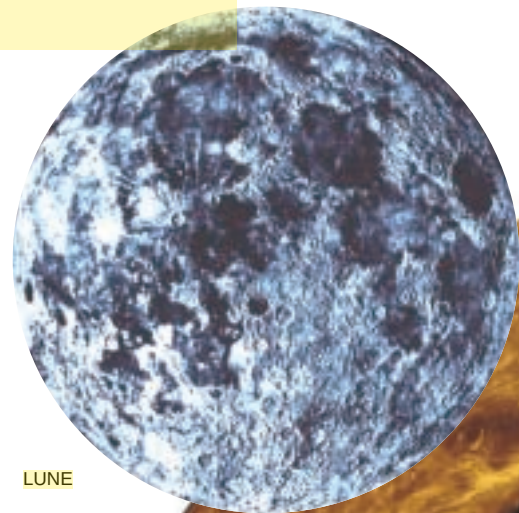
Pourquoi, malgré la longue histoire de la Terre, la petite surface émergée des continents a-t-elle été préservée ? Cette persistance des terres émergées est-elle fortuite ? Comment la croûte continentale est-elle apparue ? Est-elle présente depuis l'origine de la Terre ou bien a-t-elle évolué ? Débattues depuis des décennies par les géophysiciens, ces questions ont aujourd'hui une réponse. Notamment, les spécialistes pensent que la Terre est un cas unique et que les conditions nécessaires à la formation des continents n'existent probablement pas ailleurs dans le Système solaire.

Vénus est parfois considérée comme la planète jumelle de la Terre, parce que sa taille, sa masse et sa distance au Soleil diffèrent peu de celles de la Terre. Aussi a-t-on supposé que la croûte de Vénus ressemble à celle du Globe. Des siècles d'observation au télescope nous ont peu appris, car Vénus est recouverte d'une épaisse couche de nuages opaques à la

lumière visible, mais depuis 1990, le radar de la sonde spatiale *Magellan*, en orbite autour de la planète, a percé la couche nuageuse, nous révélant enfin les détails de sa surface. À partir de ces images, les planétologues essaient de déterminer la nature des roches qui composent sa surface.

Fausse jumelles ?

La sœur de notre planète semble recouverte d'une couche de basaltes fins, semblables à ceux qui couvrent le fond des océans terrestres. En revanche, la sonde *Magellan* n'a pas révélé de grandes étendues analogues aux continents terrestres. Même les régions en altitude, nommées Aphrodite Terra et Ishtar Terra, semblent être des restes de laves basaltiques déformées. La surface de Vénus comprend également des dômes plus petits dont la forme



LUNE

1. LA CROÛTE TERRESTRE est principalement composée de roches basaltiques, qui tapissent les fonds océaniques. Des roches granitiques constituent l'essentiel des continents émergés. Vénus est approximativement de la même taille que la Terre, mais les images obtenues par le radar de la sonde *Magellan* montrent que sa surface est presque entièrement basaltique. Seule une minuscule partie de sa surface possède des dômes qui, comme les continents terrestres, pourraient être composés de matériaux granitiques. La surface de la Lune, d'autre part, possède des montagnes blanches, formées lors du refroidissement de notre satellite ; des éruptions volcaniques postérieures ont créé les mers de basaltes plus sombres.

indiquerait une composition rocheuse différente par endroits, mais il n'est pas exclu que ce soient aussi des basaltes.

L'analyse des données de la sonde *Magellan* montre l'absence de tectonique des plaques sur Vénus : on n'y voit aucune trace d'une création continue de matière, d'un déplacement, puis d'une subduction de la surface de la planète. On n'y distingue pas non plus de grandes structures semblables aux dorsales médio-océaniques ou aux profondes fosses sous-marines des océans terrestres. Au total, la quantité de lave expulsée par l'intérieur de la planète correspond approximativement à celle qui est libérée par le volcan hawaïen Kilauea : c'est négligeable, pour une planète de cette taille. Aussi

le recyclage régulier de la croûte de Vénus dans le manteau de la planète et la formation d'une nouvelle croûte sont-ils improbables.

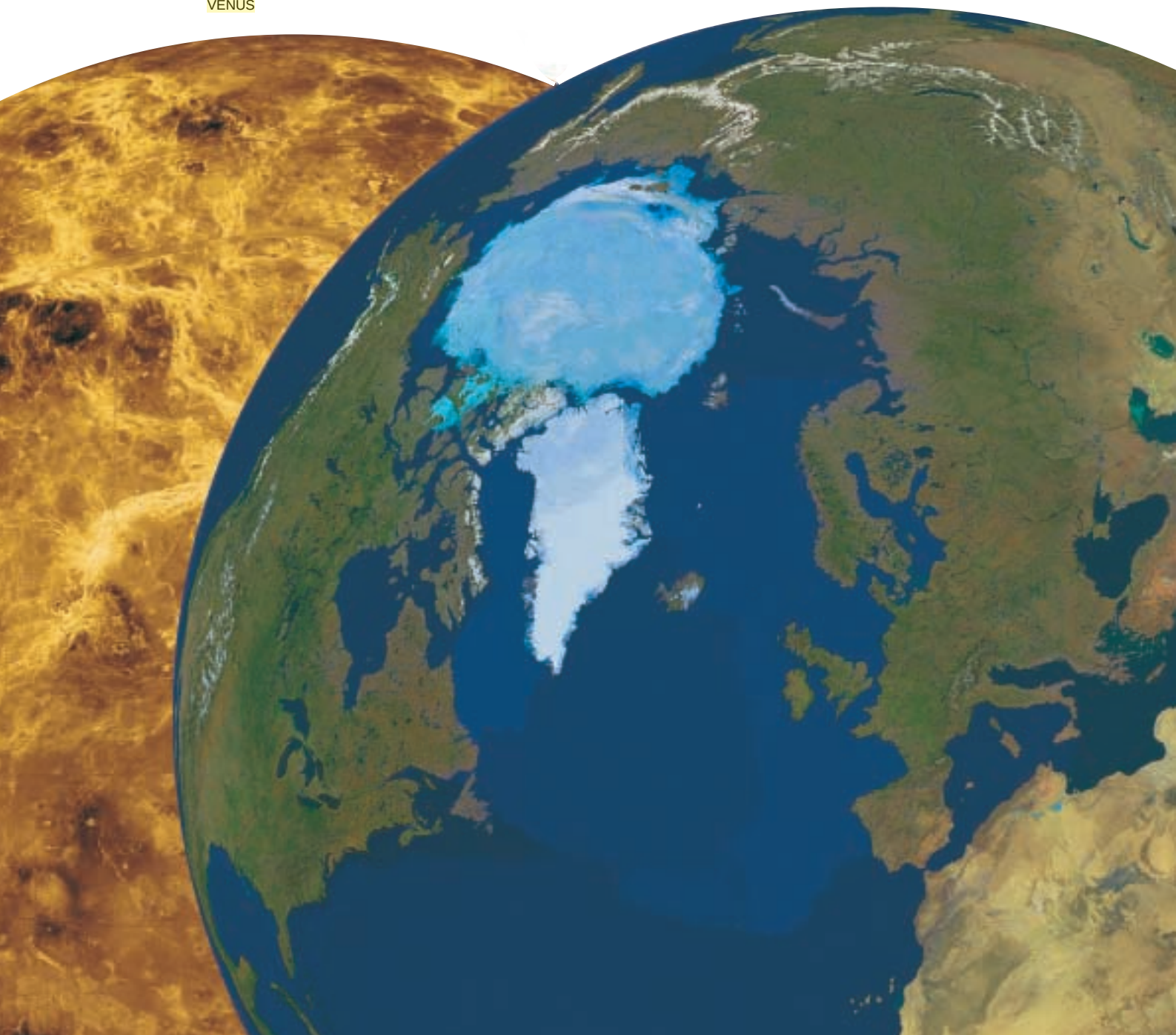
Les observations de Vénus et des autres corps solides du Système solaire montrent que les surfaces planétaires sont de trois types. Les croûtes primaires remontent aux origines du Système solaire : elles apparurent alors que de grandes quantités de matière primordiale s'écrasaient sur les planètes, lors de leur phase d'accrétion. L'énergie de collision libérée était suffisante pour provoquer la fusion de la protoplanète ; puis, lors du refroidissement, les roches cristallisaient, séparant les premiers cristaux du reste du magma. La séparation des minéraux de feldspath, par

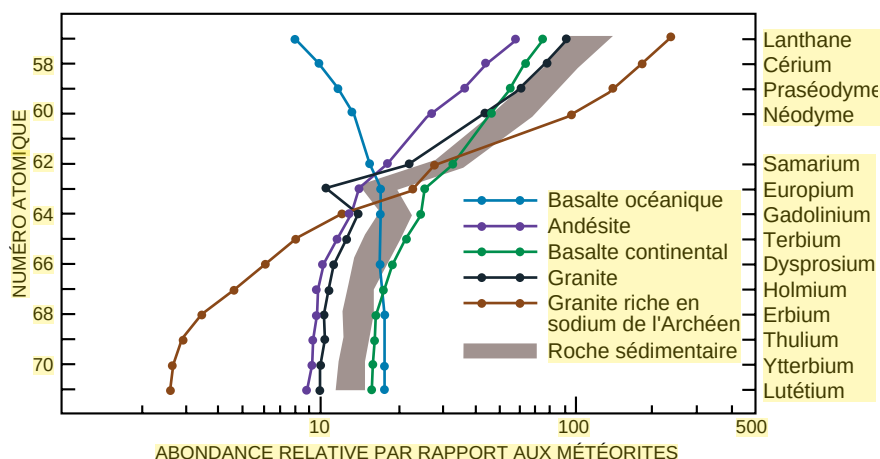
flottaison sur un océan de basalte fondu, est probablement à l'origine des montagnes blanches de la surface de la Lune. De même, les mélanges de roches, de glace, de méthane et d'ammoniac sous forme solide, qui composent les croûtes de nombre de satellites des planètes géantes, sont peut-être dues à ces mécanismes de fusion catastrophique lors des phases d'accrétion.

Si la croûte primaire est apparue lors d'épisodes brusques de fusion générale, la croûte secondaire résulte de l'échauffement plus régulier dû à la décomposition des éléments radioactifs, piégés à l'intérieur des planètes : seule fond une petite partie du man-

VÉNUS

TERRE





2. LES ÉLÉMENTS DE LA FAMILLE DES TERRES RARES permettent de caractériser les roches qui composent la croûte terrestre. Bien que la plupart des roches ignées (celles qui se solidifient à partir de magma) aient des abondances relatives en terres rares très variables (lignes colorées), les caractéristiques de la plupart des roches sédimentaires se rejoignent dans une étroite bande (en brun) : les roches sédimentaires indiquent la composition moyenne de la croûte continentale supérieure.

teau rocheux de la planète, ce qui provoque généralement des éruptions de laves basaltiques. Les surfaces de Mars, de Vénus, les fonds des océans terrestres et les mers lunaires sont tapissés de ces croûtes secondaires. Sur les satellites des planètes les plus éloignées du Soleil, les déformations internes dues aux forces de marées (l'attraction exerce sur la partie solide des corps célestes les mêmes déformations que la Lune sur les océans terrestres) sont d'autres sources d'énergie qui contribuent à la fonte des manteaux planétaires et à la création de croûte secondaire.

En plus de ces deux types courants, une troisième sorte de croûte se forme lorsque l'activité tectonique recycle la surface de la planète dans les profondeurs du manteau. Analogue à une distillation continue, le volcanisme produit alors un magma qui est composé essentiellement de roches granitiques très différentes du basalte. Ce mécanisme de formation par recyclage n'est possible que sur une planète possédant une activité tectonique ; la Terre en est l'unique exemple connu.

Malgré le petit nombre de corps célestes où l'on étudie la croûte, des lois se dégagent. La formation de la croûte primaire, feldspathique, de la Lune (qui représente 12 pour cent de son volume) n'a duré que quelques millions d'années. Les croûtes secondaires évoluent beaucoup plus lentement : les mers de basalte de la Lune se sont formées en plus d'un milliard d'années, alors que leur épaisseur n'est que de quelques centaines de mètres et que leur volume est 1 000 fois infé-

rieur à celui de la planète. Une autre croûte secondaire, le plancher basaltique des océans terrestres (un millième de sa masse), s'est formée durant les 200 derniers millions d'années. Aussi faibles que soient ces vitesses de formation, la création de croûte tertiaire est encore plus lente : il aura fallu plusieurs milliards d'années pour créer les continents terrestres qui représentent un demi pour cent de la masse de notre planète.

Les continents flottent

De nombreux éléments, rares à la surface de la Terre, sont concentrés dans les roches granitiques. Cette présence confère à la croûte continentale une importance sans commune mesure avec la faible proportion massique qu'elle représente. Toutefois, les géologues n'ont pas encore réussi à déterminer la composition globale de la croûte terrestre, information cruciale pour l'étude de son origine et de son évolution : la composition de tous les affleurements rocheux de la croûte continentale ne permet pas de connaître la composition en profondeur. Un programme de forages profonds qui permettraient d'échantillonner la croûte de façon significative se heurterait aux limites actuelles des techniques de forage et coûterait très cher.

Heureusement, l'érosion et la sédimentation pallient ces difficultés. De simples boues solidifiées révèlent une composition moyenne représentative de la croûte continentale affleurante. Ces échantillons ont perdu les composés les

plus solubles dans l'eau, tels le sodium et le calcium, mais les 14 éléments de la famille des terres rares, sont de ceux dont les abondances relatives sont conservées durant le transfert de la croûte aux sédiments. Ces éléments sont des traceurs géochimiques uniques pour connaître la composition de la croûte : comme leurs atomes ne se placent pas bien dans le réseau cristallin des minéraux habituels, ils se concentrent dans les roches granitiques qui cristallisent tardivement. Ces granites forment la plus grande partie de la croûte continentale.

Les abondances relatives des terres rares sont si semblables, dans de nombreux sédiments, que les géochimistes pensent que les précipitations, l'érosion et la sédimentation brassent les produits détritiques de suffisamment de types de roches ignées (c'est-à-dire solidifiées à partir du magma) pour donner un échantillonnage représentatif de l'ensemble de la croûte continentale. Les éléments de la famille des terres rares révèlent ainsi la composition moyenne de la croûte continentale et enregistrent, par leurs variations d'abondance, les circonstances de la formation de la croûte.

Grâce à ces traceurs géochimiques, on a déterminé que la partie supérieure de la croûte continentale avait essentiellement la composition d'une granodiorite, une roche ignée commune composée de quartz clair, de feldspath et parsemée de minéraux sombres. Au-dessus d'une profondeur de 10 à 15 kilomètres dans la croûte continentale, il est probable que la roche la plus abondante possède une composition plus basaltique. Les géochimistes confrontent leurs hypothèses aux mesures de chaleur produite au sein de la croûte par la désintégration des éléments radioactifs, les trois plus abondants étant le potassium, l'uranium et le thorium. On pense que cette région, aussi énigmatique qu'inaccessible, serait constituée de basaltes piégés sous les continents, de densité plus faible.

Cette faible densité des roches granitiques explique pourquoi la plus grande partie des continents est émergée. Le niveau moyen de la croûte continentale est à 125 mètres au-dessus du niveau moyen des mers, et 15 pour cent de la surface continentale s'élève à plus de 2 000 mètres d'altitude. En revanche, le plancher océanique est, en moyenne, à 4 000 mètres sous le niveau de la mer, parce que la croûte océanique, composée de basaltes