



5. UNE ÉCUME MALSAINE et des poissons morts apparaissaient 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.

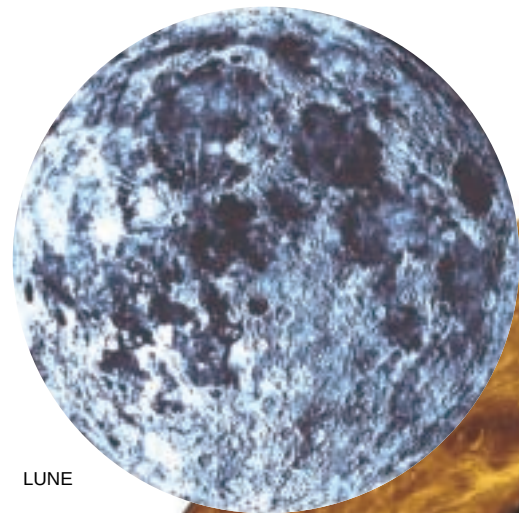
Pourquoi, malgré la longue histoire de la Terre, la petite surface émergée des continents a-t-elle été préservée ? Cette persistance des terres émergées est-elle fortuite ? Comment la croûte continentale est-elle apparue ? Est-elle présente depuis l'origine de la Terre ou bien a-t-elle évolué ? Débattues 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 jumelle ?

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.

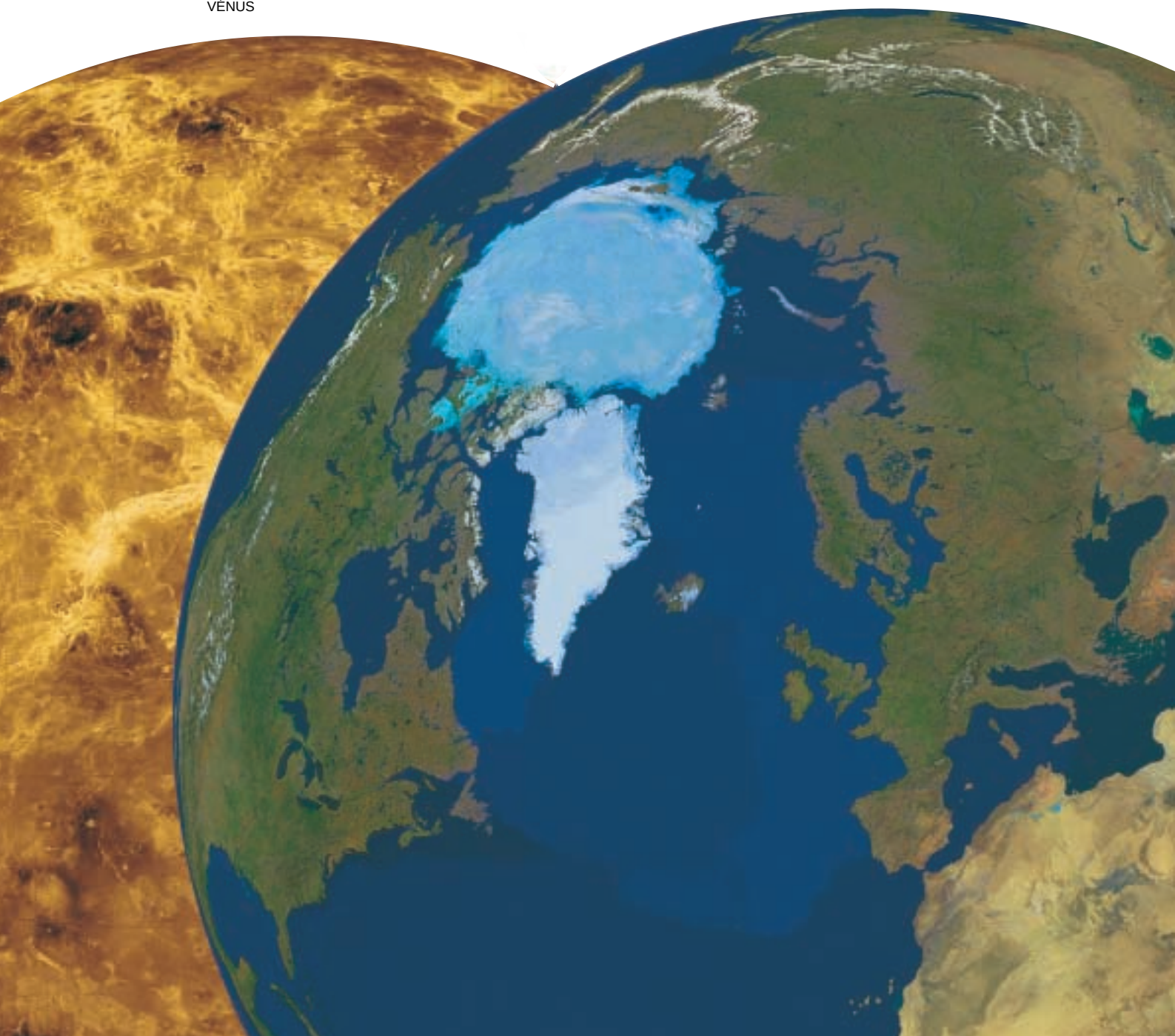
Les observations de Vénus et des autres corps solides du Système solaire montrent que les surfaces planétaires sont de trois types. Les croûtes primaires remontent aux origines du Système solaire : elles apparurent alors que de grandes quantités de matière primordiale s'écrasaient sur les planètes, lors 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

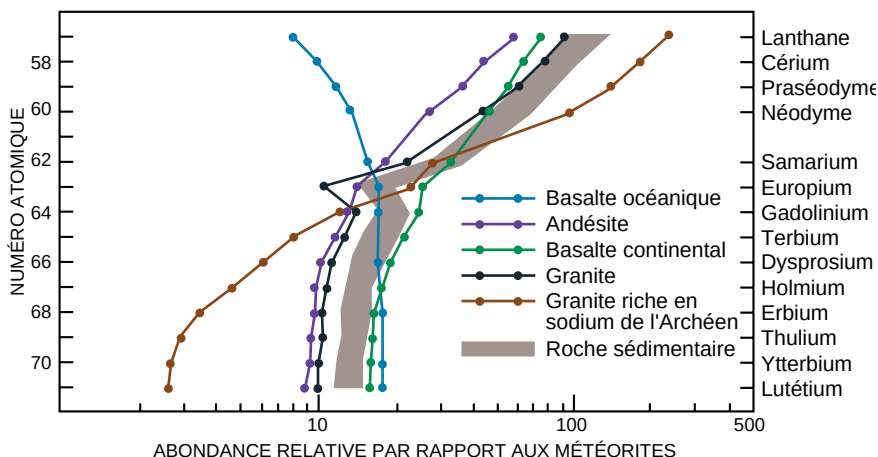
flottaison sur un océan de basalte fondu, est probablement à l'origine des montagnes blanches de la surface de la Lune. De même, les mélanges de roches, de glace, de méthane et d'ammoniac sous forme solide, qui composent les croûtes de nombre de satellites des planètes géantes, sont peut-être dues à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

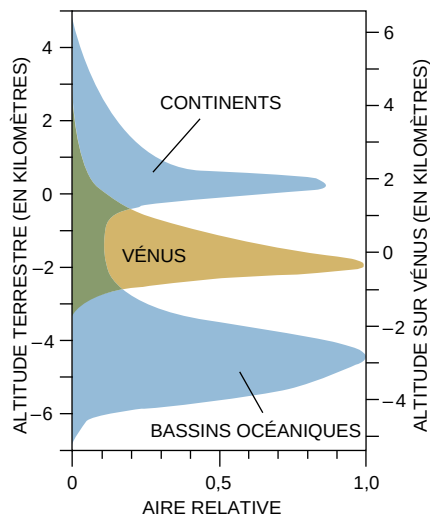
Cette faible densité des roches granitiques explique pourquoi la plus grande partie des continents est émergée. Le niveau moyen de la croûte continentale est à 125 mètres au-dessus du niveau moyen des mers, et 15 pour cent de la surface continentale s'élève à plus de 2 000 mètres d'altitude. En revanche,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

et recouverte d'une mince couche de sédiments, est beaucoup plus dense.

À la base de la croûte se trouve la discontinuité de Mohorovicic, nommée plus familièrement «Moho». Cette surface profonde marque un changement net de composition. Sous le Moho, les roches sont plus denses et riches en olivine : c'est le manteau terrestre, présent aussi bien sous les océans que sous les continents. La réflexion des ondes sismiques sur le Moho a permis de connaître sa profondeur sur tout le Globe. Ces études ont également montré qu'une partie du manteau pouvait être «ancré» sous les continents. Ces racines sous-continentalles atteignent parfois 400 kilomètres d'épaisseur et se déplacent avec les continents, lors des mouvements tectoniques. Pour ces études, les diamants sont des indices... de prix : certains contiennent des inclusions de petits minéraux qui proviennent apparemment du manteau lié aux continents et d'autres, provenant de régions sous-continentalles profondes, sont vieux de plus de trois milliards d'années, montrant l'antiquité des racines continentalles.

Il y a moins de 40 ans, rien ne laissait penser que la nature des roches des bassins océaniques pouvait être fondamentalement différente de celle des roches continentalles ; les géologues pensaient que les océans étaient simple-

ment des continents effondrés et engloutis, et ils supposaient que la croûte était une sorte d'écume résultant de la cristallisation de la surface de la planète, initialement en fusion. Si la Terre primitive fut en fusion, une croûte granitique primaire, au sens de ce qui était imaginé voici quelques décennies, n'a vraisemblablement jamais existé.



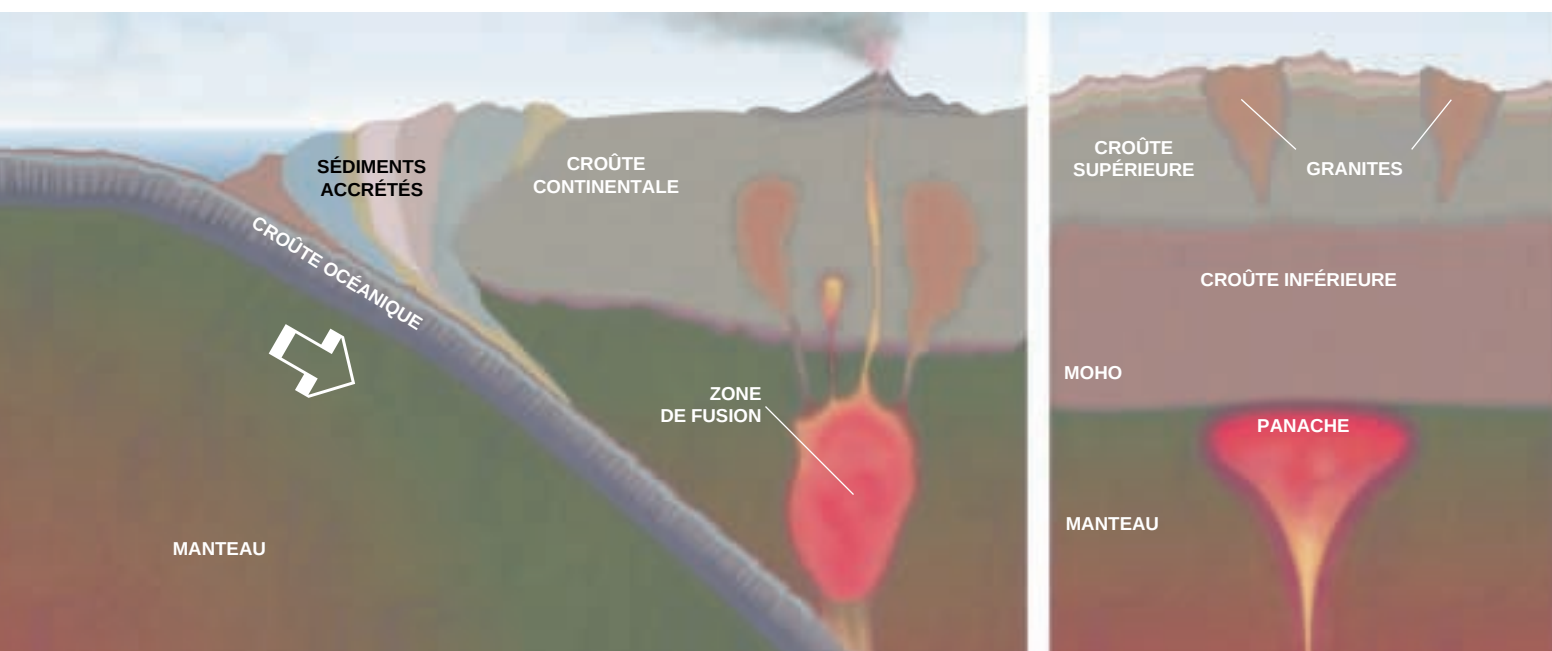
3. LE RELIEF DE LA TERRE (en bleu) est différent de celui de Vénus (en doré). Sur la Terre, les surfaces sont concentrées autour de deux niveaux principaux. En revanche, la plus grande partie de la surface de Vénus est rassemblée autour d'un seul niveau (l'altitude des points de Vénus est donnée par rapport au rayon moyen de la planète).

L'évolution de la diversité géologique

Comment deux types de croûtes aussi différents que la croûte océanique et la croûte continentale sont-ils apparus sur la Terre ? Pour répondre à cette question, il est nécessaire d'examiner la formation du Système solaire. Dans la partie de la nébuleuse solaire primitive qui correspond à l'orbite terrestre, l'activité solaire intense avait balayé les gaz, et seuls des blocs rocheux subsistaient. Ceux-ci, d'abord rassemblés en «planétésimaux», se sont agrégés par accrétion pour former notre planète après 50 à 100 millions d'années.

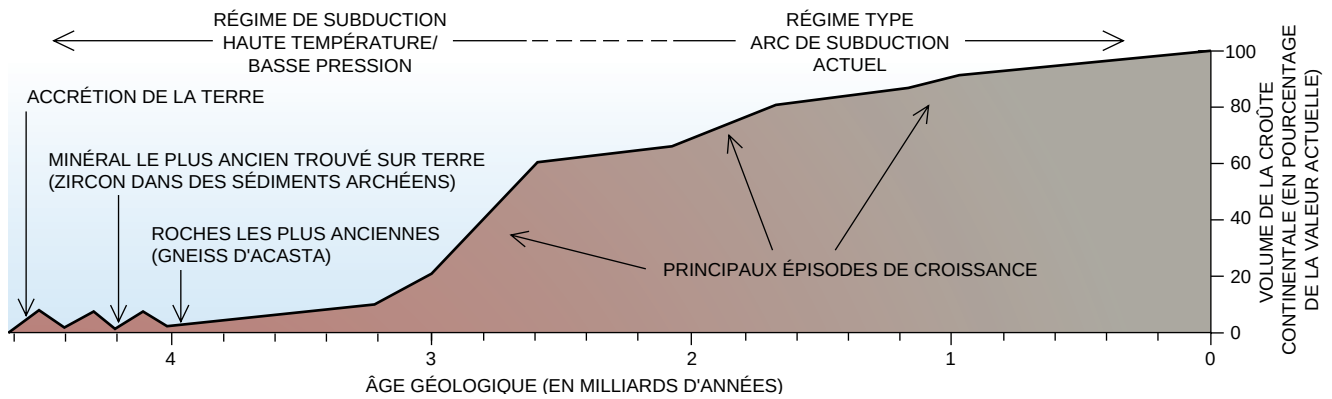
Puis un planétoïde massif, d'une taille comparable à celle de Mars, s'est écrasé sur la Terre primitive. L'impact fut si violent que le manteau rocheux de la proto-Terre fut projeté en orbite, formant la Lune, pendant que le noyau métallique du planétoïde s'enfonçait dans les profondeurs de la Terre (voir *L'héritage scientifique des missions vers la Lune*, par Jeffrey Taylor, *Pour la Science*, septembre 1994). Cette collision provoqua une fusion complète de la planète. Enfin, comme la jeune Terre se solidifiait en refroidissant, une croûte basaltique primitive apparut.

À ce stade, la surface de la Terre ressemblait probablement à celle de Vénus. Il ne reste toutefois aucune trace de cette



4. LA TECTONIQUE DES PLAQUES entraîne la croûte océanique dans les profondeurs du manteau (à gauche), enfouissant les sédiments gorgés d'eau. À une profondeur d'environ 80 kilomètres, l'échauffement expulse l'eau des sédiments, provoquant la fusion des roches sous-jacentes. Le magma produit monte et forme de la croûte conti-

nentale près de la surface. À mesure que la croûte se forme (à droite), la chaleur dégagée par la décomposition des éléments radioactifs (ou par la montée de panaches de magma basaltique) provoque la fusion partielle à faible profondeur. De tels événements sont à l'origine de la croûte continentale supérieure riche en granite.



5. LA CROÛTE TERRESTRE s'est formée en plusieurs fois, au cours des derniers milliards d'années. Une proportion notable de la croûte est apparue il y a 3 à 2,5 milliards d'années, au moment de la tran-

sition entre les ères archéennes et protérozoïques. Des zones de fusion étendues ont alors engendré la majeure partie de la couche supérieure de la croûte continentale.

croûte primitive : soit elle a sombré dans le manteau d'une manière similaire à ce qui se passe de nos jours, soit elle s'est regroupée en roches plus denses, qui ont coulé dans les profondeurs de la Terre. En tout cas, on n'a pas retrouvé trace d'une croûte granitique qui aurait été formée à cette époque, alors qu'elle devrait avoir laissé du zircon (silicate de zirconium), un minéral qui se forme dans le granite et résiste bien à l'érosion. Le très petit nombre de grains de zircon datant de cette époque primordiale (les plus vieux, retrouvés dans les roches sédimentaires d'Australie, ont environ 4,2 milliards d'années) confirme l'absence d'une croûte continentale granitique primordiale.

D'autres informations sur la croûte primitive sont obtenues à partir des plus vieilles roches qui ont traversé intactes les temps géologiques. Ces roches se sont formées profondément dans la croûte il y a un peu moins de quatre milliards d'années, et affleurent maintenant au Nord-Ouest du Canada, dans les gneiss d'Acasta. D'autres roches à peine plus jeunes ont été décrites en divers endroits du Globe, mais les mieux étudiées se trouvent dans les formations anciennes de l'Ouest du Groenland. L'abondance des roches sédimentaires y atteste la présence d'eau qui ruisselait et aussi, à cette époque reculée, de véritables océans. Ces roches du Canada et du Groenland ne datent que de 400 à 500 millions d'années après la phase d'accrétion de la Terre : les traces du début géologique de la Terre ont été effacées par les collisions avec des planétoïdes.

À partir des quelques indices qui subsistent dans les roches sédimentaires, les géologues comprennent que la croûte continentale s'est formée continûment, au cours de la longue histoire de la Terre. Néanmoins cette genèse ne s'est pas toujours opérée selon les mêmes modalités. Ainsi, un changement brusque dans la composition des roches s'est produit entre l'Archéen et le Protérozoïque, il y a 2,5 milliards d'années. Avant la transition, la croûte supérieure était composée d'un mélange de basaltes et de granites riches en sodium nommé tonalite-trondjemite-granodiorite ; après la transition, elle est dominée par des granites riches en potassium.

Ce changement de la composition de la croûte, voici 2,5 milliards d'années, résulte du brassage des matériaux terrestres par la tectonique des plaques. Initialement, la croûte océanique était recyclée rapidement, car les fortes concentrations en éléments radioactifs

assuraient un chauffage qui animait le moteur tectonique. Plus de 100 plaques semblent avoir existé à l'époque archéenne, contre une dizaine seulement aujourd'hui. Contrairement à la croûte océanique actuelle, qui parcourt un long chemin et a donc le temps de se refroidir avant de replonger dans le manteau, la croûte océanique de cette époque plus primitive restait en surface durant un temps plus court ; elle était alors plus chaude lorsqu'elle réintégrait le manteau et fondait à une profondeur moindre. Cette différence de comportement explique la formation de roches ignées riches en sodium. Aujourd'hui, ces roches ne se forment que dans les quelques rares endroits où de la croûte océanique jeune et chaude entre en subduction.

La tendance des magmas à former des granites riches en sodium explique pourquoi la croûte a formé un mélange de basalte et de tonalite à l'ère archéenne.

Une partie importante de la croûte continentale – au moins 50 pour cent, peut-être même, 70 pour cent – émergea alors, avec un maximum de vitesse de croissance situé entre 3 et 2,5 milliards d'années. Depuis lors, la hauteur relative des bassins océaniques et des plates-formes continentales est restée relativement stable. Au début de l'ère protérozoïque, voici 2,5 milliards d'années, la croûte avait presque sa configuration présente, et la tectonique des plaques moderne commença.

Aujourd'hui, de la croûte océanique se forme par l'éruption de lave basaltique par les dorsales médio-océaniques. Plus de 18 kilomètres cubes de roches sont produits chaque année par



6. LES VOLCANS, comme celui qui est en éruption sur la péninsule du Kamtchatka, sont en des zones du Globe où la croûte continentale se forme au-dessus de la croûte océanique en subduction. De telles zones actives se transformeront en croûte continentale stable.

ce mécanisme. Ces nouvelles couches de croûte océanique voyagent sur les couches externes du manteau terrestre et forment avec elles la lithosphère rigide. Cette dernière réintègre le manteau dans les zones de subduction, qui laissent des cicatrices sur les fonds océaniques sous la forme de fosses profondes. En ces lieux, la plaque qui s'enfonce entraîne avec elle du basalte, ainsi que des sédiments marins gorgés d'eau.

À une profondeur d'environ 80 kilomètres, la chaleur expulse l'eau et les autres composés volatiles des sédiments vers le manteau sus-jacent. Ces substances abaissent le point de fusion des matériaux environnants, de sorte que les magmas produits remontent à la surface, où ils provoquent de violentes éruptions volcaniques. Les éruptions du volcan Pinatubo et du mont Saint Helens sont deux exemples récents de ces catastrophes géologiques. Les grandes chaînes de volcans – comme les Andes –, alimentées par ces fluides bouillants, ajoutent en moyenne deux kilomètres cubes de laves et de cendres aux continents chaque année.

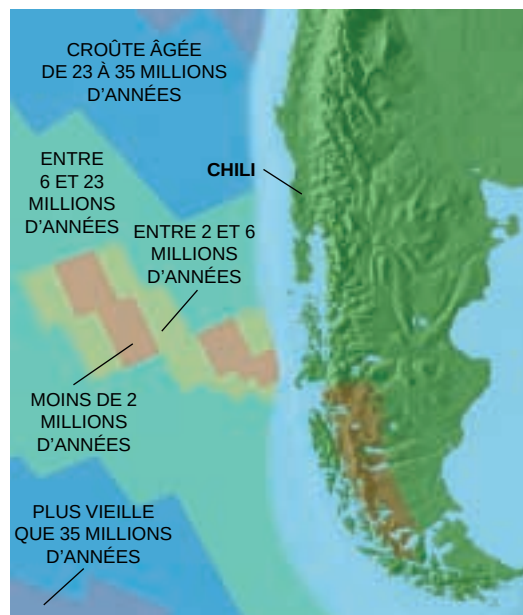
Cependant, le volcanisme résultant de la subduction n'est pas l'unique source de roches granitiques. L'accumulation de chaleur dans les profondeurs de la croûte continentale elle-même peut provoquer la fusion et la migration du magma vers la surface. La décomposition des éléments radioactifs est une source de chaleur, mais elle est plus faible que la convection qui remonte des magmas basaltiques jusque sous la couverture granitique : les roches fondues sont comme une plaque électrique sous une poêle à frire.

Les poussées de croissance

Si la formation de la croûte continentale a notablement changé à la fin de l'ère archéenne, il y a 2,5 milliards d'années, elle a également varié au cours des temps géologiques : des quantités importantes de croûte sont apparues il y a 2 à 1,7 milliards d'années, puis il y a 1,7 à 1,3 milliard d'années, et il y a 500 à 300 millions d'années. Ces poussées sont surprenantes : pourquoi la croûte continentale se forme-t-elle de façon discontinue, alors que la génération de chaleur interne par les éléments radioactifs et son évacuation par le recyclage de la croûte océanique sont continues ?

Une compréhension plus fine de la tectonique des plaques aide à résoudre cette énigme. Pendant le Permien (il y

Un instantané du passé



Les granites riches en sodium sont caractéristiques de l'ère archéenne, une époque au cours de laquelle le moteur de la tectonique des plaques était plus efficace qu'aujourd'hui. Ces granites riches en sodium, les tonalites-trondjemites-granodiorites, ne se forment que lorsque de la croûte océanique jeune pénètre dans le manteau, provoquant des réactions de fusion partielle à faible profondeur. Ces conditions existent aujourd'hui dans la partie méridionale des côtes du Chili : de la croûte océanique jeune plonge sous la plaque américaine. Les régions où affleurent des granites riches en sodium sont en brun.

a environ 250 millions d'années), les grandes masses continentales de la Terre ont convergé pour créer un énorme continent nommé la Pangée (voir *La Terre avant la Pangée*, par Ian Dalziel, *Pour la Science*, mars 1995). Au cours des temps géologiques, la formation de tels continents géants semble s'être reproduite à intervalles irréguliers d'environ 600 millions d'années. Les cycles tectoniques majeurs qui écartent, puis rapprochent les continents ont été étudiés jusqu'au Protérozoïque ancien, et il est probable que le premier continent géant ait été formé au cours de l'Archéen.

De tels cycles tectoniques modulent le rythme de la création de croûte continentale. Lorsqu'un continent se brise, la croûte océanique est ancienne et peut donc former plus facilement de la nouvelle croûte continentale après sa subduction. Lorsque les continents isolés se rapprochent, les arcs volca-

niques (les chaînes de volcans qui naissent près des zones de subduction) percutent les continents. De la nouvelle croûte se forme par l'accrétion de ces roches aux marges des continents.

Depuis plus de quatre milliards d'années, les continents errants se sont assemblés et séparés de multiples façons. Nous avons, enfouis sous nos pieds, les derniers témoignages de l'histoire de notre Terre. Il aura fallu du temps pour reconstituer cette histoire à partir de l'étude des roches, mais notre connaissance de l'origine de la croûte terrestre et de son évolution est maintenant suffisante pour affirmer que la Terre est bien une planète exceptionnelle. Par une bonne fortune de la nature – la capacité de maintenir une tectonique des plaques –, une seule planète a été capable de créer des volumes de croûte continentale stable où nous pouvons vivre.

Ross TAYLOR travaille à l'Institut australien de recherche en sciences physiques. Scott MCLENNAN est professeur à l'Université Stony Brook, de New York.

Claude ALLÈGRE, *12 clés pour la géologie*, collection Regards sur la Science, Éditions Belin.

S. Ross TAYLOR et Scott M. MCLENNAN, *The Continental Crust : Its Composition and Evolution*, Blackwell Scientific Publications, 1985.

Preston CLOUD, *Oasis in Space : Earth History from the Beginning*, W.W. Norton, 1988.

S. Ross TAYLOR et Scott M. MCLENNAN, *The Geochemical Evolution of the Continental Crust*, in *Reviews of Geophysics*, vol. 33, n° 2, pp. 241-265, mai 1995.

Roberta L. RUDNICK et David M. FOUNTAIN, *Nature and Composition of the Continental Crust : A Lower Crustal Perspective*, in *Reviews of Geophysics*, vol. 33, n° 3, pp. 267-309, août 1995.

