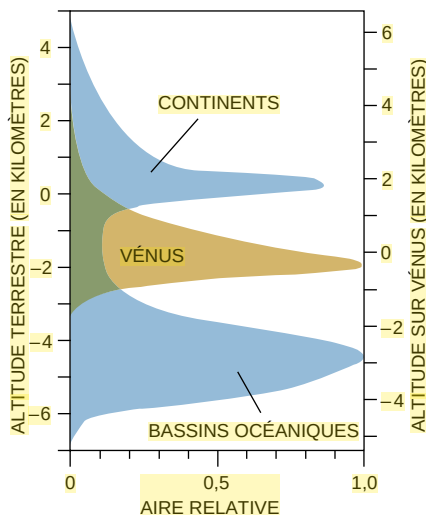


et recouverte d'une mince couche de sédiments, est beaucoup plus dense.

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-continentales 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-continentales profondes, sont vieux de plus de trois milliards d'années, montrant l'antiquité des racines continentales.

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 continentales ; 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.



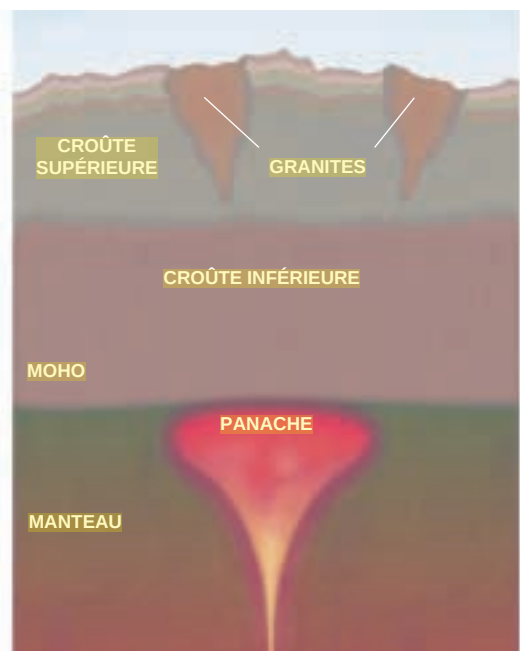
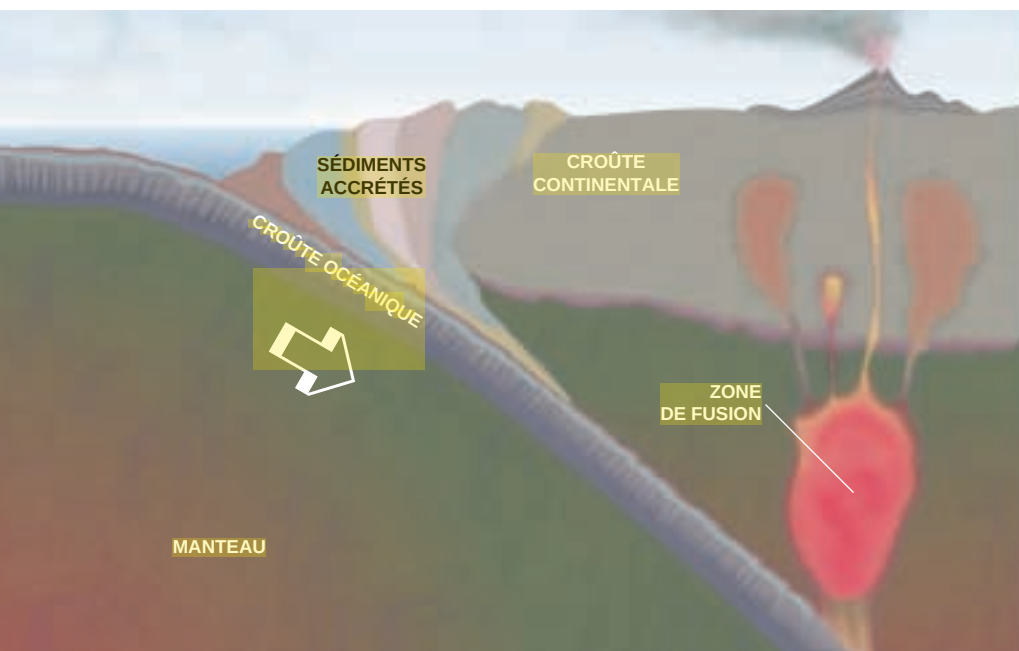
**3. LE RELIEF DE LA TERRE (en bleu) est différent de celui de Vénus (en doré). Sur la Terre, les surfaces sont concentrées autour de deux niveaux principaux. En revanche, la plus grande partie de la surface de Vénus est rassemblée autour d'un seul niveau (l'altitude des points de Vénus est donnée par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

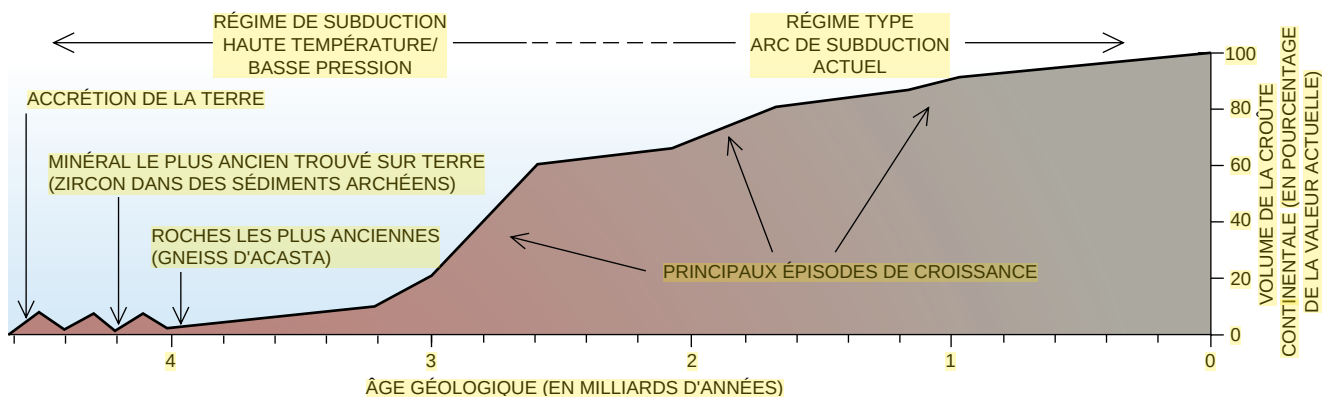
Puis un planétoïde massif, d'une taille comparable à celle de Mars, s'est écrasé sur la Terre primitive. L'impact fut si violent que le manteau rocheux de la proto-Terre fut projeté en orbite, formant la Lune, pendant que le noyau métallique du planétoïde s'enfonçait dans les profondeurs de la Terre (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.

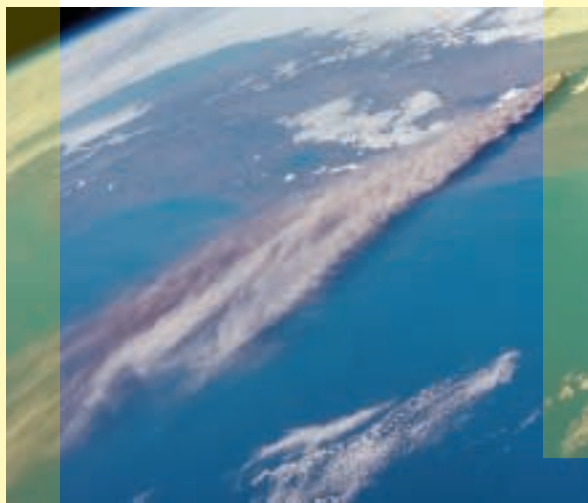
Ce changement de la composition de la croûte, voici 2,5 milliards d'années, résulte du brassage des matériaux terrestres par la tectonique des plaques. Initialement, la croûte océanique était recyclée rapidement, car les fortes concentrations en éléments radioactifs

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.

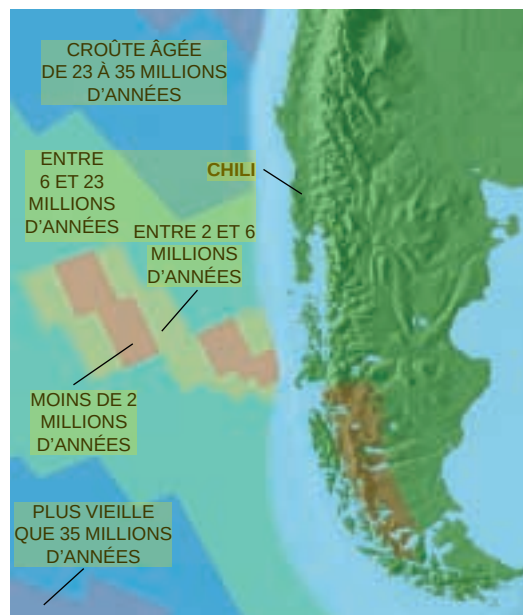
Cependant, le volcanisme résultant de la subduction n'est pas l'unique source de roches granitiques. L'accumulation de chaleur dans les profondeurs de la croûte continentale elle-même peut provoquer la fusion et la migration du magma vers la surface. La décomposition des éléments radioactifs est une 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.