

I. Formation de nouvelles croûtes aux frontières divergentes (en expansion)

La plupart des frontières de plaques sont immergées sous les mers et les trois-quarts des laves volcaniques de la planète (moyenne d'environ $4 \text{ km}^3/\text{an}$) sont en éruption, invisibles, le long d'étroites frontières de plaque divergentes (expansion ou distension) (traits rouges sur la carte principale). Un réseau de crevasses associé à ces frontières de plaques permet à l'eau de mer froide d'y circuler. Ces eaux sont réchauffées par les roches volcaniques brûlantes et elles émergent à nouveau, par endroits, sous forme de « cheminées » actives (*smokers* ; figure 1). Une nouvelle croûte océanique, généralement recouverte de coulées de lave (figures 2, 3) se forme par solidification de la roche en fusion (magma) qui s'élève du manteau et qui remplit continuellement le vide créé par la séparation des plaques l'une de l'autre (figures 4 à 6). Les frontières de plaques divergentes sont décalées par les failles transformantes océaniques (minces lignes noires). Ces failles actives (figures 4, 5, 7) — équivalentes marines de la faille de San Andreas (voir l'encadré VII) — et leurs composantes passives (désignées zones de fracture) permettent de retracer les orientations passées et présentes du mouvement des plaques. Les vallées transformantes et les crêtes escarpée qui leur sont associées délimitent les frontières des plaques à l'endroit où les plaques se heurtent horizontalement l'une contre l'autre causant ainsi des tremblements de terre (voir la carte principale). Par endroits, le socle profond est dénudé le long de failles transformantes océaniques, mais le volcanisme est rare.

Les frontières de plaques divergentes et les failles transformantes qui leur sont associées forment la crête de la dorsale médio-océanique (figures 4, 5, 7). Ce bombement linéaire sur le plancher océanique profond constitue la chaîne de montagnes la plus longue et la plus imposante de la planète — environ 65 000 km de longueur, sur 1 000 km de largeur — et s'élevant à 3 000 m, voire plus, au-dessus des bassins profonds adjacents. La dorsale médio-océanique est le résultat d'une dilatation thermique : plus les plaques sont situées près de la crête de dorsale, plus elles sont récentes et chaudes. Par conséquent, elles sont soumises à une plus forte dilatation et sont situées plus haut au-dessus des plaques plus froides et plus anciennes, donc plus profondes du fond marin. Le relief le long de la dorsale médio-océanique est plus prononcé à proximité des failles transformantes qui décalent la dorsale en expansion, formant une frontière de plaques en

échelon caractéristique (voir la carte principale et la carte interprétative de la tectonique des plaques, sur la couverture). Par exemple, la zone de fracture de la Romanche située dans l'océan Atlantique équatorial — dont la profondeur atteint jusqu'à 7 728 m—est plus profonde que plusieurs fosses de subduction (voir l'encadré II). Les taux d'expansion (ouverture complète) varient d'environ 150 mm/an le long de la dorsale du Pacifique Est (figures 5, 8) à moins de 10 mm/an le long de l'extension arctique de la dorsale médio-atlantique. Les scientifiques qualifient généralement de « lentes » les vitesses d'ouverture inférieures à 60 mm/an et de « rapides » les vitesses supérieures à 90 mm/an. Cependant, les « demis-vitesses d'ouverture » ne sont pas toujours les mêmes sur les côtés opposés de la frontière de plaques. Remarquer dans la partie sud de la figure 7 comment la frontière actuelle est plus près des lignes de l'est que des lignes de l'ouest d'âge équivalent (0,78 Ma).

À l'échelle locale, le relief et les structures situés le long des crêtes de dorsales varient considérablement en fonction du taux d'expansion. Un relief élevé (1 à 2 km) et une vallée axiale bien développée caractérisent les segments de la dorsale médio-océanique en expansion lente à l'endroit où la formation de failles de distension et le volcanisme créent ensemble une structure complexe (figure 4A). Dans ce cas, on trouve parfois sur le fond océanique des affleurements de roches magmatiques profondes ayant subi un refroidissement plus lent. À l'opposé, les segments à expansion rapide sont caractérisés par un relief émoussé (<1 km) et des dorsales étroites bien définies le long des crêtes. Les vallées médianes y sont absentes et la topographie, moins accidentée, est dominée par le volcanisme (figures 5, 8). Le long des dorsales à expansion intermédiaire, le relief des vallées axiales, est, en général, moins découpé. Les roches présentes le long des dorsales en expansion rapide sont d'âge récent et donc encore chaudes. Par conséquent, les tremblements de terre qui se déclenchent à cet endroit sont trop faibles pour être mesurés au moyen d'instruments sismiques. La différence entre ces types de dorsales traduit des conditions de température différentes. À la crête d'une dorsale, l'expansion rapide de la croûte océanique empêche les eaux froides sus-jacentes de pénétrer en profondeur, ce qui favorise des températures élevées et une production accrue de roches en fusion (magma) à des profondeurs plus faibles.

Certaines dorsales sont décalées par des failles transformantes qui sont demeurées actives au même endroit pendant plusieurs millions d'années. D'autres dorsales décalées, en particulier le long des frontières à expansion rapide (figure 5B), sont actives moins longtemps et peuvent se déplacer le long de certaines dorsales qui s'allongent (propagation) durant l'expansion. Les frontières en expansion de la dorsale médio-océanique ne sont pas toujours perpendiculaires à la faille transformante la plus proche. L'expansion oblique (non perpendiculaire) (par exemple, au nord de $30,5^\circ$ de latitude N. dans la figure 4B) est plus fréquente aux dorsales à expansion lente. Certains rifts peuvent même chevaucher le long des frontières à expansion rapide (figure 5B).

Heureusement pour les scientifiques, la croûte océanique fonctionne comme un énorme « magnétophone » qui enregistre toutes les étapes de sa formation et, par conséquent, les variations du taux d'expansion des plaques au cours du temps. Au fur et à mesure qu'une nouvelle croûte océanique se forme le long de l'axe de la dorsale médio-océanique, elle se refroidit et se magnétise, préservant ainsi l'orientation du champ magnétique terrestre de l'époque. Cette magnétisation est préservée en majeure partie dans de petits cristaux de magnétite qui se forment dans la coulée de lave au moment où celle-ci se refroidit pour former de la roche. Les inversions épisodiques du champ magnétique de la Terre sont enregistrées dans la croûte océanique sous forme d'anomalies magnétiques en forme de bandes, de faible envergure mais mesurables, parallèles aux dorsales (bandes d'anomalies magnétiques). Les cartes d'anomalies magnétiques obtenues à partir d'un navire ou d'un avion peuvent être utilisées pour calculer la magnétisation de la croûte océanique (figure 7). Grâce à la datation radiométrique des périodes d'inversion magnétique, on peut calculer les vitesses d'expansion successives de la croûte océanique en se basant sur la configuration en forme de bandes étroites de la croûte normalement ou inversement magnétisée. À l'aide de ces données et des traces de failles transformantes, on peut reconstituer les mouvements antérieurs des plaques et réassembler les continents!

« L'embryon » d'un segment futur de la dorsale médio-océanique a commencé à se former quand la croûte continentale a commencé à se détacher le long des zones d'effondrement actives comme dans l'Afrique de l'Est. À cet endroit, les volcans, jeunes d'un point de vue géologique (mont Kilimanjaro), les bassins formés par des blocs de croûte terrestre qui se sont enfoncés (lac Tanganyika) et l'activité sismique laissent

présager la formation future d'un segment de dorsale océanique entre les plaques nubienne et somalienne. La distension continentale continue donne naissance à un nouveau bassin comme celui de la mer Rouge. Durant une longue période géologique, de nouveaux rifts traversent certaines plaques, d'autres frontières de plaques deviennent inactives (voir la carte interprétative) et certaines frontières de plaques migrent sur le manteau profond dans une mosaïque de plaques en constante migration (déplacement). Les océans meurent tôt ou tard, au fur et à mesure que la croûte océanique est recyclée par subduction, que les continents entrent en collision et laissent des chaînes de montagnes comme unique trace de leur passage (voir l'encadré III).

Figure 1— Un « fumeur noir » (évent hydrothermal) crachant de l'eau de mer bouillante (364 °C) noircie par de minuscules particules de sulfure métallique. Les objets de couleur blanche accrochés à une cheminée sont des crevettes. Photographie : gracieuseté de Peter Rona (Université Rutgers). B : monticule multi-annulaire en forme de beignet formé pendant des milliers d'années par des dépôts résultant de l'activité hydrothermale comme celle présentée en A. L'image a été produite par sonar latéral, une technique importante qui utilise la réflexion sonore pour « mettre en évidence » des entités de part et d'autre d'un ensemble d'instruments tracté près du plancher océanique. Ce monticule, situé dans le champ hydrothermal « TAG », est le plus vaste qui ait été découvert jusqu'à ce jour; d'autres entités hydrothermales similaires plus petites ont été recensées par des scientifiques uniquement à partir de submersibles de plongée profonde (comparer les différentes échelles graphiques des deux images). Image de Marty Kleinrock (Université Vanderbilt), utilisée avec la permission de l'American Geophysical Union.

Figure 2 — Coulées de lave sous-marine formant le plancher océanique observées à partir du submersible russe Mir explorant la dorsale Knipovich à expansion lente, à 3,5 km de profondeur dans l'Atlantique Nord (76° N.). Quelques siècles de sédimentation ont empoussiéré ces jeunes laves. A : coulée en nappes de lave mélangée. B : lave en coussins sur laquelle adhèrent des anémones de mer (blanc). Photographies de Peter Vogt.

Figure 3 — Pilier de lave — creux, de 2 m de hauteur, sur lequel se sont fixés des crinoïdes (haut) — sur la dorsale du Pacifique Est à rapide expansion. Ce pilier s'est formé quand de l'eau de mer froide, piégée sous une coulée de lave, s'est échappée vers le haut en un petit filet et a refroidi la lave en fusion accumulée tout autour. La surface nervurée du pilier est attribuable au drainage discontinu de l'étang de lave encore fluide, qui a laissé des « auréoles de baignoire » témoins, marquant les pauses, durant laquelle la lave s'est solidifiée à l'intersection de sa surface du pilier. Photographie prise à bord du submersible Alvin, gracieusement fournie par Rodey Batiza (Fondation nationale des sciences) et John Sinton (Université d'Hawaii) .

Figure 4 — A : coupe transversale schématique montrant la structure et les types de roche présumés à la frontière de plaques à lente expansion le long de la dorsale médio-atlantique. Le long de ces frontières, le relief local le plus élevé peut atteindre jusqu'à 2 000 m. Coupe de Pearce modifiée (2002). B : image produite par ordinateur de la topographie cartographiée à faisceaux multiples (voir la discussion « en savoir plus sur cette carte ») d'une partie à lente expansion (ici 22 mm/an) de la dorsale médio-atlantique, illustrant une faille transformante (trait noir) et d'autres discontinuités décalant l'axe d'expansion (trait rouge). Image de Carbotte et Scheirer modifiée (2004), avec la permission de la Cambridge University Press.

Figure 5 — A : coupe transversale schématique montrant la structure et les types de roche présumés sous la frontière de plaques à lente expansion le long de la dorsale du Pacifique Est. Ici, le relief local est seulement de quelques dizaines de mètres de hauteur, beaucoup moins haut que celui longeant les dorsales à lente expansion (comparer avec la figure 4A). Coupe de Pearce modifiée (2002). B : image informatique de la topographie cartographiée à faisceaux multiples d'une partie en rapide expansion (ici 110 mm/an) de la dorsale du Pacifique Est, montrant deux failles transformantes et un rift chevauchant se déplaçant vers le sud (trop petites pour être visibles sur la carte principale). Image de Carbotte et Scheirer modifiée (2004), avec la permission de la Cambridge University Press.

Figure 6 — L'Islande est un « point chaud » (voir la carte interprétative de la tectonique des plaques, sur la couverture) et un des rares endroits où le réseau de la dorsale médio-océanique émerge au-dessus du niveau de la mer. Cette vue aérienne orientée vers le sud-est montre l'éruption du volcan Krafla (Islande), le 8 septembre 1977. Des jets de lave jaillissent d'une fissure de 900 m de longueur — faisant partie de la dorsale médio-atlantique en expansion — et alimentent des coulées de lave qui avancent sur le sol enneigé. Durant cette éruption intermittente, qui a eu lieu de 1975 à 1984, la fissure s'est élargie de 8 m. Photographie de Sigurdur Thorarinsson.

Figure 7 — Exemple de « bandes magnétiques » mettant en évidence la magnétisation de la croûte océanique, cartographiées à bord du même navire qui a recueilli les données topographiques de la même zone présentée dans la figure 5B. La cartographie des variations magnétiques recense la puissance et la polarité évolutives du champ magnétique de la Terre ainsi que le temps géologique, fournissant ainsi l'histoire du mouvement des plaques (voir le texte pour discussion). Les périodes d'inversion des pôles magnétiques sont données en Ma. Carte de Suzanne Carbotte (observatoire terrestre Lamont-Doherty).

Figure 8 — A : image informatique de la topographie cartographiée à multiples faisceaux (cartographiée à partir d'un navire de surface) de la partie à expansion la plus rapide (146 mm/an) de la dorsale du Pacifique Est, montrant une élévation axiale, de petits monts sous-marins et des collines abyssales sur ses versants. Des taches grises indiquent les zones ne comportant aucune donnée. B : topographie détaillée montrant une infime partie de l'élévation axiale, cartographiée à partir d'un submersible autonome, mais exploité à distance (à partir d'un navire de surface), par l'Autonomous Benthic Explorer (ABE) balayant le fond marin en un mouvement de va-et-vient, de 5 à 40 m au-dessus du plancher océanique profond. Remarquer la vallée centrale étroite garnie de fissures (50 m de large), de 10 m de profondeur et les vestiges d'un long lac de lave se déversant dans des chenaux alimentant des lobes à l'ouest. Images de Marie-Hélène Cormier (observatoire terrestre Lamont-Doherty).