

on tient compte de l'isostasie et de l'érosion. En revanche, dans des massifs tectoniquement actifs comme la chaîne de l'Himalaya ou les Alpes, les variations d'altitude correspondent aux trois effets d'isostasie, d'érosion et de soulèvement par les forces tectoniques. Connaissant aujourd'hui les vitesses de soulèvement et d'érosion, on suppose que des dizaines de grands massifs montagneux sont apparus et ont été détruits au cours de l'histoire de la Terre.

Des ères tectoniques particulières ?

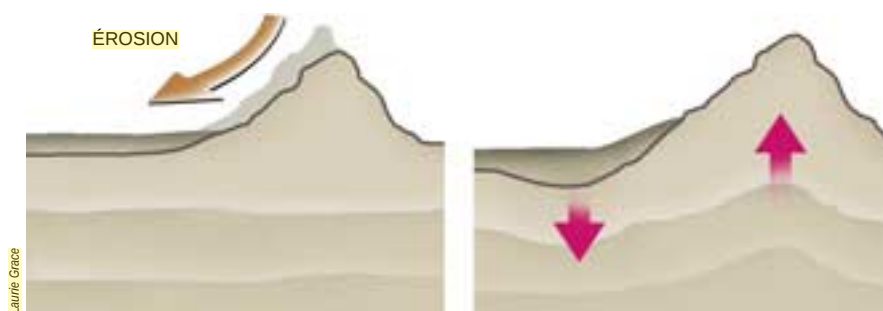
Comment retrouver ces anciens reliefs ? La formation des chaînes de montagnes laisse des traces géologiques comme des coulées de lave, des intrusions magmatiques, des affleurements de roches ayant été enterrés à grande profondeur, ainsi que de grandes quantités de sédiments déposés dans les plaines alluviales et des fossiles de plantes d'altitude. En datant ces restes, les géologues déduisent la dynamique de la formation des chaînes de montagnes au cours de l'histoire de la Terre.

Par l'examen des quantités de sédiments, des activités volcaniques passées, ainsi que de plusieurs autres indicateurs, on a conclu que l'activité tectonique, particulièrement intense au cours des 40 derniers millions d'années, a créé de nombreuses chaînes de montagnes. Au cours de la même période, le climat de la planète a considérablement changé : un refroidissement généralisé a transformé en terres recouvertes d'une calotte glaciaire le Groenland et le continent antarctique, qui étaient jadis tempérés et couverts de végétation. Ce refroidissement a culminé avec l'extension des glaciers d'Amérique du Nord et d'Europe, qui ont recouvert les continents au cours des deux derniers

millions d'années. Deux théories opposées expliquent le phénomène : soit la surrection des chaînes de montagnes aurait modifié le climat, soit la modification du climat serait responsable de la surrection accrue des montagnes.

Examinons d'abord la première de ces deux théories, qui propose que l'apparition de puissantes et nombreuses chaînes de montagnes ait modifié le climat en abaissant la température. Les glaciers, par exemple, tendent à se perpétuer : une fois en place, ils augmentent le pouvoir réflecteur, ou albédo, de la surface, ce qui diminue encore la température et accélère la formation de glace. Au cours des 40 derniers millions d'années, l'apparition de nombreuses chaînes de montagnes aurait augmenté la surface de la Terre recouverte de glaciers, ce qui aurait refroidi la planète en augmentant son albédo. Le dioxyde de carbone atmosphérique pourrait également avoir participé à ces modifications du climat : comme la surrection des montagnes modifie la répartition globale des pluies et des chutes de neige, les roches auraient été davantage altérées, et l'érosion chimique accrue aurait diminué la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique ; l'effet de serre aurait été moindre, et le climat global se serait refroidi.

La seconde théorie stipule, au contraire, que les grands changements climatiques de ces 40 derniers millions d'années sont indépendants des modifications du relief, et que les changements climatiques ont produit des indices qui ont été interprétés, à tort, comme résultant d'une rapide croissance des montagnes. De nombreux climatologues pensent que le refroidissement global résulte de la dérive des continents, qui a redistribué les continents à la surface de la planète et



3. LE SOULÈVEMENT dû à la compensation isostatique est le résultat de la densité inférieure des terrains qui constituent le massif montagneux par rapport au manteau terrestre sous-jacent : les montagnes «flottent» sur le manteau. L'érosion provoque un soulèvement de la croûte, et le dépôt de sédiments épaissit la croûte de part et d'autre des montagnes. La redéposition ne se fait pas au même endroit que l'érosion.

a modifié la circulation des courants océaniques. Ces derniers sont les principaux vecteurs du transfert de chaleur entre les zones équatoriales et les zones polaires (voir *L'origine des glaciations*, par Wallace Broecker, *Pour la*

Science, janvier 1996). Comment les modifications climatiques auraient-elles eu des effets analogues à ceux de la surrection des montagnes ? En raison de l'équilibre isostatique : le refroidissement généralisé aurait accru

l'érosion de nombreuses chaînes de montagnes, mais une érosion supérieure du fond des rivières ou des vallées glaciaires aurait soulevé les massifs montagneux par l'effet de compensation isostatique.

L'Himalaya et les Appalaches

L'Himalaya et les Appalaches sont parmi les chaînes de montagnes les plus imposantes de la Terre. Bien qu'elles résultent toutes deux de la collision de deux blocs continentaux, elles sont très différentes. Leur comparaison fait ressortir les principes clefs de la compréhension actuelle de l'orogénèse.

Courant sur plus de 2 500 kilomètres au travers de l'Inde et du Sud du Tibet, la chaîne de l'Himalaya est la reine des montagnes. La plupart des plus hauts sommets s'y trouvent. Du plateau tibétain jusqu'à la Chine du Sud-Ouest, au Nord du massif, la chaîne de l'Himalaya contient la plus grande masse montagneuse du monde. Il est même possible que cette chaîne soit la plus grande que la Terre ait connue au cours du dernier milliard d'années. Le plateau tibétain, d'autre part, a l'aspect d'une plaine désertique dont l'altitude peut couper le souffle. C'est la plus grande surface terrestre (grande comme la moitié de l'Europe) située à plus de 5 000 mètres d'altitude.



Clyde H. Smith, Peter Arnold, Inc.



Galen Rowell, Mountain Light

LES APPALACHES ET L'HIMALAYA se sont formés par des processus géologiques similaires mais à 250 millions d'années d'intervalle. Une érosion plus longue a donné aux Appalaches (*en haut*) un aspect moins hérissé que l'Himalaya (*en bas*) qui subit encore un soulèvement tectonique. La chaîne de l'Himalaya est peut-être la plus grande que la Terre ait connu depuis un milliard d'années.

Ce système géologique résulte de la collision, pendant les 50 derniers millions d'années, de la plaque indienne et de la plaque asiatique. La collision, qui écrasa l'Inde et le Tibet, activa une série de failles qui ont encastré une partie du continent indien sous l'Asie. Avant la collision, l'Inde dérivait vers le Nord, à une vitesse de 15 à 20 centimètres par an ; depuis le choc, la vitesse de déplacement n'est plus que de cinq centimètres par an environ. Ainsi l'Inde a-t-elle pénétré de 2 000 kilomètres à l'intérieur de la plaque asiatique, doublant l'épaisseur de la croûte, soulevant la chaîne de l'Himalaya et le plateau tibétain et rejetant vers l'Est et le Sud-Est d'immenses zones de l'Indochine et de l'Est de la Chine.

Lors de la formation de la chaîne de l'Himalaya et du plateau tibétain, plusieurs phénomènes ont interagi. La formation du plateau a apparemment déclenché un bouleversement climatique, il y a environ huit millions d'années, qui a renforcé la mousson, la saison des pluies intenses qui tombent sur la partie Sud de l'Asie. L'intensification de l'érosion due à cette mousson a provoqué, par réaction isostatique, un soulèvement de la chaîne de l'Himalaya, augmentant de plus d'un facteur dix la quantité de sédiments charriés par l'Indus et le Bengale. Pendant ce temps, l'intérieur du plateau tibétain évoluait beaucoup plus lentement, car il était partiellement protégé de la mousson par l'Himalaya et parce que les principales rivières n'y creusaient pas leur lit.

Quoique les Appalaches soient moins spectaculaires que l'Himalaya, elles ont été créées par le même mécanisme tectonique et évoluent aujourd'hui selon le même type d'interactions. La principale différence est l'âge : la chaîne de l'Himalaya a environ 50 millions d'années, alors que la période de plus forte croissance des Appalaches se situe entre 250 et 350 millions d'années.

Géologiquement, la côte Est des États-Unis est aujourd'hui la moins active du continent. Il y a 200 millions d'années, au contraire, c'était une zone orogénique très active. Pendant les centaines de millions d'années précédentes, l'ancêtre de l'océan Atlantique (nommé océan Iapetus) s'était progressivement refermé, en raison d'une subduction sous la côte Est de l'Amérique du Nord. Lors de cette fermeture, au moins trois blocs de terres émergées, probablement des arcs insulaires semblables au Japon actuel, se sont agrégés au continent. Plus tard, l'activité orogénique a culminé avec la collision de l'Afrique et de l'Amérique du Nord. Les premières montagnes des Appalaches qui sont nées de cette collision mesuraient 250 à 300 kilomètres de large et avaient une altitude moyenne comprise entre 3 500 et 4 500 mètres, avec des sommets sans doute d'altitude supérieure. Apparemment l'érosion a arraché 4 500 à 7 500 mètres de matériaux aux Appalaches pendant les 270 derniers millions d'années (les montagnes n'étaient pas plus hautes de 4 500 à 7 500 mètres, car la compensation isostatique a maintenu l'altitude de la montagne à mesure de son érosion). Pendant les 200 derniers millions d'années, alors que l'Amérique du Nord s'éloignait de l'Afrique et que l'océan Atlantique s'ouvrait, d'autres événements ont provoqué quelques épisodes isolés de soulèvement, mais l'érosion a été le mécanisme dominant d'évolution de la chaîne de montagnes.