



2. L'HIMALAYA ET LE PLATEAU TIBÉTAIN sont visibles, sur cette photographie prise par satellite, comme une vaste étendue blanche au Nord et à l'Est de l'Inde. La chaîne de l'Himalaya – les rides au Sud de la zone blanche – résulte de la collision continentale qui a commencé il y a 50 millions d'années, lorsque la plaque indienne a heurté la plaque asiatique.

précipitations et, donc, une érosion accrue sur la pente la plus exposée. Inversement, ce mécanisme d'«orographie» crée des déserts derrière de nombreux massifs montagneux. L'altitude détermine également l'érosion, parce qu'elle abaisse la température moyenne : les sommets les plus élevés sont moins protégés par la végétation et plus exposés à l'érosion des glaciers. Dans les régions tempérées, la vitesse de l'érosion est proportionnelle à la pente moyenne de la topographie, car celle-ci augmente les glissements de roches et le ruissellement des eaux. Au total, les montagnes modifieraient leur propre climat à mesure qu'elles s'érigent.

Pour comprendre le comportement d'un système aussi complexe qu'une chaîne de montagnes, on doit donc recenser les facteurs d'érosion et comprendre leurs interactions. En raison de celles-ci, des phénomènes assez simples conduisent à des effets d'une complexité surprenante. Des effets de rétroaction, stabilisateurs ou catastrophiques, peuvent survenir entre les différents phénomènes. Considérons, par exemple, la variation d'altitude d'un massif montagneux en fonction de son érosion. Lorsque l'altitude croît, l'intensité de l'érosion augmente, ce qui ralentit cette croissance. Comme cette rétroaction s'oppose à l'effet qui la produit, on la nomme rétroaction négative. À l'inverse, une rétroaction positive amplifie toute

variation du système : la raréfaction des précipitations derrière une montagne est un exemple de rétroaction positive ; l'érosion étant réduite, la montagne peut croître plus rapidement. Au Nord de l'Himalaya, une telle raréfaction des précipitations a contribué à la formation du haut plateau tibétain (voir l'encadré de la page 82).

Ce concept de rétroaction est au cœur des nouvelles théories qui expliquent la croissance des chaînes de montagnes et son impact sur l'ensemble de notre planète. De nombreux types d'interactions ont été identifiés ou imaginés. Déjà les études ont montré comment, par ces interactions, les mécanismes de surface comme le climat ou l'érosion influenceraient les phénomènes tectoniques profonds (et réciproquement).

L'isostasie, une question d'équilibre

L'une des rétroactions importantes fait intervenir le phénomène d'isostasie, qui résulte de la différence de densité de la croûte terrestre et du manteau : la croûte, moins dense que le manteau, flotte sur celui-ci. Si un massif montagneux reste en altitude, c'est que la croûte est rigide et que le manteau exerce une poussée verticale d'Archimède. Comme les icebergs, les sommets de chaque chaîne de montagnes

ont des racines qui s'enfoncent dans le manteau. Dans le cas des icebergs, la densité de la glace est environ 90 pour cent de celle de l'eau, de sorte que la partie de l'iceberg située au-dessus de la surface de l'eau est soutenue par une quantité de glace immergée d'un volume neuf fois supérieur. Dans le cas de la croûte continentale, la densité est 80 à 85 pour cent de celle du manteau sous-jacent, ce qui explique la présence de racines de plusieurs dizaines de kilomètres d'épaisseur pour des montagnes de plusieurs kilomètres d'altitude. Cet équilibre des montagnes sur le manteau est qualifié d'isostatique.

L'isostasie est le mécanisme clef qui relie la tectonique (l'évolution interne d'une montagne) à l'altitude de la chaîne (son évolution externe). Lorsque l'érosion enlève de la matière en surface, la réaction isostatique soulève l'ensemble du massif et ramène en altitude jusqu'à 80 pour cent de la masse érodée. Ce soulèvement explique de nombreux phénomènes qui étonnaient naguère les géophysiciens.

Ainsi, des relevés détaillés de la côte Est des États-Unis avaient montré des vitesses de soulèvement de quelques millimètres à quelques centimètres par siècle. C'était étonnant, car les Appalaches se trouvent à l'intérieur de la plaque nord-américaine, où aucune convergence de plaques ne pouvait expliquer une telle remontée. Après avoir mis en doute les mesures de soulèvement, les géophysiciens reconnaissent aujourd'hui que certaines d'entre elles résulteraient de la réponse isostatique à l'érosion, tout particulièrement dans les régions les plus hautes des Appalaches. L'érosion qui se produit dans le lit des rivières est particulièrement importante, car elle peut engendrer des altitudes supérieures aux altitudes initiales des sommets : la matière éliminée dans les vallées produit un soulèvement de l'ensemble du massif montagneux, sommets et vallées compris.

Bien que l'isostasie puisse maintenir la hauteur des montagnes pendant des millions d'années, celles qui ne bénéficient plus d'apports tectoniques finissent par s'éroder. De grandes parties de l'Australie, par exemple, sont de vieux massifs aplanis : ces régions tectoniquement calmes depuis des centaines de millions d'années s'élèvent à quelques centaines de mètres au-dessus du niveau de la mer. L'évolution de l'altitude est conforme à ce que l'on prévoit quand

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 ?

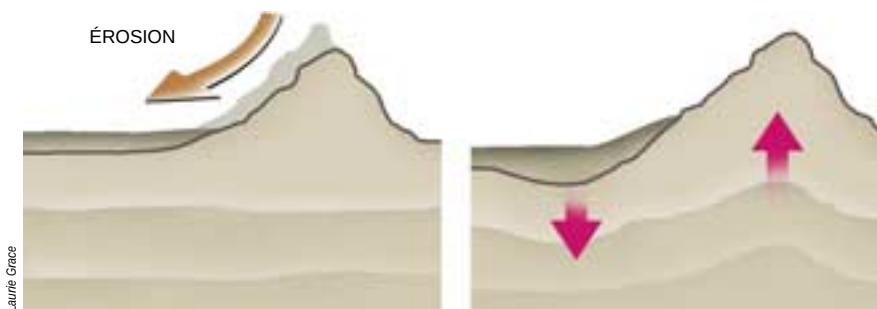
Comment retrouver ces anciens reliefs ? La formation des chaînes de montagnes laisse des traces géologiques comme des coulées de lave, des intrusions magmatiques, des affleurements de roches ayant été enterrés à grande profondeur, ainsi que de grandes quantités de sédiments déposés dans les plaines alluviales 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.