

4. DES MATÉRIAUX SUPRACONDUCTEURS peuvent aussi être obtenus par chimie combinatoire. Cette banque de 128 dérivés d'oxyde de cuivre a fourni plusieurs films supraconducteurs.

créait des principes actifs, les projets se sont multipliés. Au cours des cinq dernières années, des dizaines de petites sociétés entièrement consacrées à la chimie combinatoire ont vu le jour. La plupart des grands laboratoires pharmaceutiques ont fondé leur propre département de chimie combinatoire ou se sont associés à un laboratoire plus petit, spécialisé dans ce domaine.

Les chimistes ne se sont naturellement pas limités aux benzodiazépines et ont appliqué la synthèse combinatoire à des molécules variées. Soit ils ont cherché de nouvelles têtes de série, soit ils ont formé des dérivés de têtes de série déjà connues. Dans le premier cas, on crée souvent de grandes banques, composées de dizaines de milliers, voire de millions de produits. En revanche, les banques utilisées pour l'amélioration des têtes de série déjà isolées sont plus petites, avec seulement quelques centaines de molécules.

Quelques principes actifs découverts par chimie combinatoire sont en cours d'essais cliniques chez l'homme. Aucun n'est encore sur le marché, car les essais ne sont pas terminés, mais les premiers médicaments issus de la chimie combinatoire devraient être bientôt commercialisés.

Ainsi, en 1993, le Laboratoire pharmaceutique *Pfizer* a synthétisé, par les méthodes classiques, une tête de série qui semblait prévenir l'athérosclérose (un durcissement des artères). En moins d'un an, utilisant la synthèse en parallèle, le laboratoire a fabriqué plus de 1 000 dérivés de la structure initiale : certains étaient 100 fois plus actifs que le composé de départ. L'un d'eux est en cours d'essais cliniques chez l'homme. Il a fallu fabriquer plus de 900 molécules avant de constater une amélioration de l'activité biologique. La méthode exigeait de modifier la molécule pas à pas, et peu de laboratoires auraient ainsi consenti à investir autant de temps et d'argent pour synthétiser près de 1 000 dérivés avant d'en trouver un plus efficace que le produit d'origine.

De même, des chimistes du Laboratoire pharmaceutique *Eli Lilly* ont utilisé la synthèse en parallèle pour mettre au point un médicament contre les migraines, qui est en cours d'essais cliniques. Ils avaient trouvé une molé-

cule qui se liait à la cible voulue, mais aussi à d'autres récepteurs analogues à la cible, ce qui aurait déclenché des effets secondaires indésirables. Ils fabriquent environ 500 dérivés de cette molécule par synthèse en parallèle avant d'obtenir celle qui est en cours d'évaluation.

Les chimistes apprendront certainement à créer des banques combinatoires encore plus vite et à des coûts inférieurs. Des techniques qui augmentent le rendement et évitent l'utilisation des billes de polystyrène sont déjà en cours d'élaboration. Les méthodes d'évaluation de l'activité des produits testés seront certainement améliorées. Par exemple, la façon dont les milliers de composés d'une banque combinatoire se lient à un récepteur spécifique renseigne les chercheurs sur la forme, la taille et la charge électrique de ce récepteur, même si l'on en ignore la structure exacte. De telles informations aident les chimistes à modifier des composés existants ou à choisir les molécules qui seront à l'origine de nouvelles banques combinatoires.

La chimie combinatoire ne se limite pas au domaine pharmaceutique : elle est déjà utilisée en chimie des matériaux. Peter Schultz et ses collègues de l'Université de Berkeley ont utilisé les méthodes combinatoires pour synthétiser des supraconducteurs fonctionnant à haute température. D'autres chimistes ont appliqué ces méthodes aux cristaux liquides qui seraient utilisés dans des écrans plats et aux matériaux pour batteries en couches minces. Ils espèrent produire rapidement de nouveaux matériaux bon marché.

La chimie combinatoire peut sembler aléatoire : combiner diverses sous-

unités et espérer pêcher une molécule intéressante dans le mélange, ne serait-ce pas le triomphe de la chance aveugle sur le savoir et sur le raisonnement? Non, car les résultats ne sont probants que lorsque les banques sont intelligemment construites. Les chimistes doivent choisir la nature des sous-unités qu'ils utiliseront et les méthodes d'analyse qui détermineront l'activité biologique des composés obtenus. La chimie combinatoire bouleverse les habitudes des chimistes qui cherchent de nouveaux médicaments. L'imitation du système immunitaire aboutira vraisemblablement à la synthèse de molécules qui... pallieront les insuffisances du système immunitaire!

Matthew PLUNKETT travaille au Laboratoire pharmaceutique *Arris*, où il prépare des banques combinatoires. Jonathan ELLMAN travaille dans le département chimie de l'Université de Berkeley.

Lorin A. THOMPSON et Jonathan A. ELLMAN, *Synthesis and Applications of Small Molecule Libraries*, in *Chemical Reviews*, vol. 96, n° 1, pp. 555-600, janvier 1996.

Combinatorial Chemistry, numéro spécial de *Chemical & Engineering News*, vol. 74, n° 7, pp. 28-73, 12 février 1996.

Combinatorial Chemistry, numéro spécial d'*Accounts of Chemical Research*, sous la direction d'Anthony W. Czarnik et Jonathan A. Ellman, vol. 29, n° 3, mars 1996.

James R. BROACH et Jeremy THORNER, *High-Throughput Screening for Drug Discovery*, in *Nature*, vol. 384, n° 6604, pp. 14-16, 7 novembre 1996.



Peter G. Schultz

Comment l'érosion construit les montagnes

NICHOLAS PINTER • MARK BRANDON

Paradoxalement, l'interaction des forces tectonique, érosive et climatique façonne les montagnes et éclaire l'histoire de la Terre.

Pour les Grecs, les montagnes étaient des symboles de la puissance divine : au sommet de l'Olympe, la plus haute des montagnes grecques (2917 mètres), régnaient les dieux, qui régissaient l'existence des mortels. Cependant, ainsi placés, les dieux n'auraient pas dominé longtemps le monde : les montagnes naissent, vivent et meurent selon des cycles complexes.

Contrairement à ce qu'on pensait jusque dans les années 1970, les montagnes ne sont pas uniquement dues aux collisions des plaques qui constituent l'extérieur de notre planète : elles sont aussi créées et façonnées par l'éro-

sion et le climat. Les interactions des forces tectoniques, de l'érosion et du climat déterminent la forme et la hauteur des sommets, ainsi que le temps nécessaire à la création ou à la disparition des chaînes de montagnes. Paradoxalement, la formation des montagnes semble dépendre autant des forces destructrices, l'érosion, que des forces constructives, la tectonique. Après avoir considéré pendant plus d'un siècle l'érosion comme un facteur secondaire, de nombreux géologues y voient aujourd'hui un mécanisme géophysique puissant : les montagnes les plus imposantes devraient leurs formes à de minuscules gouttelettes de pluie.

Ce résultat a d'importantes conséquences en sciences de la Terre. Les plaines, les vallées et, surtout, les montagnes renseignent les géologues sur l'histoire de notre planète durant des centaines de millions d'années. Les montagnes sont les témoins irréfutables de l'activité des forces tectoniques et de leur durée.

Les modèles de formation et d'évolution des montagnes ont une longue histoire. Selon le modèle du cycle géologique publié en 1899, les montagnes naissaient soudainement, en raison d'un spasme tectonique, puis elles vieillissaient lentement, en raison d'une érosion régulière. La simplicité et la logique de ce modèle ont conduit les géologues à oublier ses imperfections jusqu'à la révolution tectonique des années 1960, après laquelle on a relié la surrection des chaînes de montagnes aux collisions des grandes plaques lithosphériques qui constituent la partie relativement froide et fragile de l'exté-



1. CETTE VALLÉE SPECTACULAIRE, dans les montagnes Rocheuses canadiennes, a été creusée par les glaciers – l'un des plus puissants facteurs d'érosion – pendant la dernière époque glaciaire, il y a 20 000 ans.

rieur de la Terre. L'énergie interne de la planète façonne la surface de la Terre en comprimant, chauffant et cassant la lithosphère, dont l'épaisseur est comprise entre un peu moins de 100 kilomètres sous les océans et 200 kilomètres ou plus sous les continents. La lithosphère n'est pas une coquille solide : elle est formée de plusieurs dizaines de plaques qui sont entraînées par la convection du manteau terrestre. Ces déplacements expliquent la plupart des phénomènes naturels de notre planète comme les séismes, la formation des bassins océaniques ou la création des chaînes de montagnes.

Si la tectonique des plaques est le principal moteur de la formation des chaînes de montagnes, elle donne une description insuffisante : depuis 20 ans, les géologues comprennent que les montagnes résultent de l'interaction complexe de trois mécanismes : l'érosion, les phénomènes climatiques et la tectonique.

La tectonique des plaques explique la répartition des chaînes de montagnes à la surface de la Terre. La formation des montagnes est toujours expliquée par des apports de matière ou de chaleur, ou bien des deux, dans une partie de la croûte terrestre (la croûte est la partie externe de la lithosphère). Une croûte plus chaude ou plus épaisse s'élève en formant des montagnes, car elle flotte sur le manteau plus dense qu'elle. La tectonique des plaques contribue à l'épaississement de la croûte par la convergence de deux plaques ou par un apport de chaleur ou de magma fondu.

La convergence de deux plaques a deux conséquences possibles. Dans certains cas, une plaque s'enfonce dans le manteau en glissant sous la seconde plaque : c'est la sub-

duction. Au-dessus de la zone de subduction, la plaque supérieure est épaissie par le rejet en altitude de la croûte comprimée et par l'apport de magma qui remonte après la fusion partielle de la plaque qui s'enfonce. De nombreuses montagnes, dont presque toutes celles qui forment la ceinture de feu du Pacifique (des volcans qui bordent les zones de subduction de l'océan Pacifique), se sont formées ainsi.

Subduction ou collision

D'autre part, quand deux plaques qui entrent en collision sont toutes deux surmontées de blocs continentaux, aucune des plaques ne s'enfonce sous l'autre. Toute la matière crustale apportée par la compression contribue à l'épaississement et à l'élévation de la zone montagneuse. Ce type de collisions a créé des reliefs spectaculaires comme le plateau tibétain et la chaîne de l'Himalaya, qui compte les dix sommets les plus élevés du monde.

Les apports de magma et de chaleur dans la croûte, au cours des épisodes d'activité volcanique, peuvent aussi créer des chaînes de montagnes : les plus longues chaînes de la planète, les dorsales médio-océaniques, résultent de remontées de magma entre des plaques qui s'écartent, renouvelant ainsi le plancher océanique. Ces dorsales divisent l'océan Atlantique, l'Est du Pacifique et l'océan Indien comme les coutures d'un ballon ; la dorsale médio-Atlantique mesure plus de 15 000 kilomètres de long, culminant jusqu'à 4 000 mètres au-dessus des plaines abyssales des fonds océaniques.

Sur les continents, la chaleur associée aux apports de magma peut aussi contribuer au soulèvement de grands ensembles de terrain en diminuant la densité de la croûte par rapport au manteau sous-jacent.

En plus des causes tectoniques, les nouveaux modèles de formation des montagnes prennent en compte les effets de l'érosion et du climat. L'érosion désagrége les roches, évacue les sédiments des pentes et les transporte dans les rivières. Sur un terrain géologique donné, l'activité des différents agents érosifs – la gravité, le ruissellement, le vent, le gel – dépend du climat, de la déclivité des pentes et de la nature des roches qui affleurent.

Le climat ne peut être découplé de l'érosion, car il détermine le volume moyen de matériaux éliminés d'un terrain. En général, l'érosion est importante quand le climat est humide, mais une forte humidité favorise aussi la croissance d'une végétation, qui protège la surface. Les montagnes des régions polaires, telles celles de l'Antarctique et du Groenland, sont moins sensibles à l'érosion, car elles sont arides et recouvertes par des manteaux de glace quasi immobile. À l'inverse, les glaciers des Alpes ou de la Sierra Nevada, en Californie, attaquent fortement la couche rocheuse, si bien que cette forme d'érosion est, peut-être, la plus puissante à la surface de la Terre.

De nombreuses autres relations existent entre l'érosion, le climat et le relief. Par exemple, les montagnes perturbent les vents et provoquent des



Richard Sisk: Panoramic Images



The Geosphere Project/Tom Van Sant, Inc.

2. L'HIMALAYA ET LE PLATEAU TIBÉTAÏN 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 ?

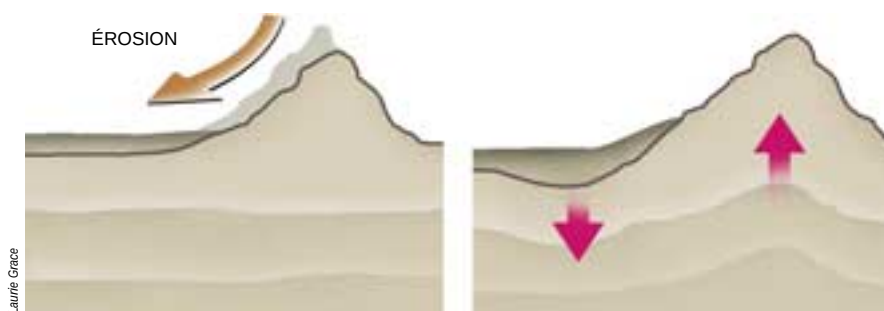
Comment retrouver ces anciens reliefs ? La formation des chaînes de montagnes laisse des traces géologiques comme des coulées de lave, des intrusions magmatiques, des affleurements de roches ayant été enterrés à grande profondeur, ainsi que de grandes quantités de sédiments déposés dans les plaines alluviales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

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

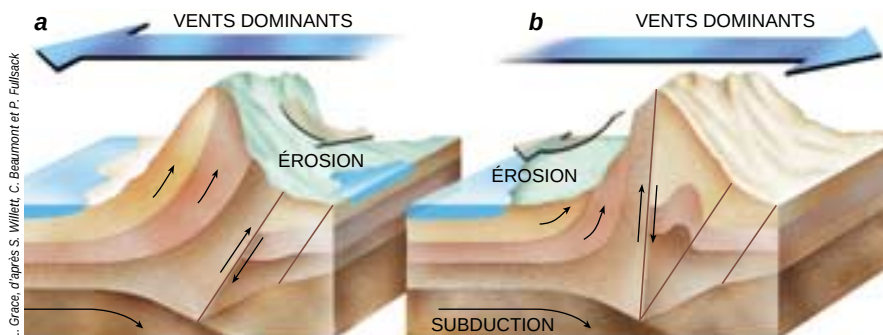
LES APPALACHES ET L'HIMALAYA se sont formés par des processus géologiques similaires mais à 250 millions d'années d'intervalle. Une érosion plus longue a donné aux Appalaches (*en haut*) un aspect moins hérissé que l'Himalaya (*en bas*) qui subit encore un soulèvement tectonique. La chaîne de l'Himalaya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



4. L'OROGRAPHIE est due à la déflexion vers le haut des vents par les reliefs montagneux, ce qui augmente les précipitations sur les sommets et sur les pentes du massif exposées aux vents dominants. Pour une chaîne de montagnes côtière, lorsque les vents dominants soufflent vers le large, en sens opposé à la subduction (a), l'érosion est supérieure sur le versant continental du massif montagneux, ce qui y fait affleurer les roches d'origine les plus profondes et les plus déformées. Lorsque le vent souffle dans le même sens que la subduction (b), l'érosion dénude le versant côtier de la chaîne de montagnes, entraînant les roches les plus profondes vers la surface. Dans ce cas, le versant continental de la chaîne de montagnes reçoit peu de précipitations. C'est pour une telle raison que l'Est de la Sierra Nevada, en Californie, est désertique.

Ainsi apparaît un dilemme, analogue à celui de la poule et de l'œuf, naturel pour un système où s'exercent de nombreuses rétroactions. Les géologues ignorent quel mécanisme a déclenché les changements climatiques et topographiques qui se déroulent depuis 40 millions d'années, mais ils ont compris que de nombreuses interactions peuvent amplifier de petites variations et que la tectonique, le climat et l'érosion ont travaillé ensemble pour façonner les structures géologiques qu'ils étudient aujourd'hui.

L'érosion

La mise en évidence des nombreuses interactions dans la constitution des chaînes de montagnes montre que l'érosion, qui façonne les montagnes en surface, participe également aux mécanismes tectoniques profonds, dans la croûte. En dernier lieu, la force qui limite la croissance des montagnes est la gravité. Ainsi, l'érosion, en diminuant le poids des massifs montagneux, accélère les processus tectoniques sous les montagnes. En un sens, l'érosion «aspire» la croûte de l'intérieur du massif vers

la surface et laisse une empreinte différente sur les faciès des roches et sur les types de déformation crustale à l'intérieur ou sous les chaînes de montagnes.

La nature des roches affleurant à la surface des montagnes dépend en partie du climat local, de la vitesse de l'érosion et de sa nature. De cette manière, l'érosion agit sur la topographie, sur la composition et sur la structure des montagnes. Le métamorphisme des roches (les transformations minéralogiques qui résultent de la compression et de l'échauffement, dans le sous-sol) et l'apparition de minéraux susceptibles de former des roches dépendent des conditions de température et de pression à l'intérieur de la croûte. Des modifications apparemment négligeables du climat ou de l'érosion, comme une variation de vitesse ou de direction du vent, ou encore de petites variations en latitude, peuvent changer l'histoire des températures et modifier la nature des roches créées durant l'évolution des chaînes de montagnes.

Récemment, des modélisations numériques ont testé les effets des vents dominants et de l'orographie sur la répartition des différentes zones

Collection
Astronomie
Mécanique Céleste

**Introduction aux éphémérides
astronomiques**

Cet ouvrage fournit aux chercheurs, étudiants et astronomes amateurs, les outils de base pour aborder la mécanique céleste.

- unités et données astronomiques concernant les corps du système solaire
- échelles de temps utilisées
- systèmes de référence pour repérer les corps célestes et transformations entre les différents repères
- théorie de la rotation de la Terre
- solutions les plus récentes des mouvements des corps du système solaire
- présentation des éphémérides de la *Connaissance des Temps*
- éphémérides pour le Soleil, la Lune, les planètes et les satellites

Il contient un grand nombre de tables, de figures et est accompagné d'un glossaire.

Bureau des Longitudes

ISBN 2-86883-298-9 - 450 pages - Prix : 380 FF

Connaissance des Temps
1998

Cet ouvrage donne les positions du Soleil, de la Lune, des planètes ainsi que des divers satellites (de Mars, Jupiter, Saturne...). Le lecteur peut calculer les coordonnées d'un astre à l'aide de la disquette fournie.

Bureau des Longitudes

ISBN : 2-86883-304-7 - 200 pages - Prix : 250 FF

Ces ouvrages sont disponibles soit
chez votre libraire soit aux

Éditions de Physique

7 av du Hoggar - Z.I. de Courtabœuf
91944 Les Ulis Cedex A

Tél. : 01 69 18 75 75 - fax : 01 69 28 84 91

<http://www.ed-phys.fr>

e-mail : customers@ed-phys.fr

de métamorphisme dans les chaînes de montagnes. Elles ont révélé que, si les vents dominants vont dans le même sens que la subduction, la majeure partie des précipitations tombe sur le versant côtier de la chaîne de montagnes, au-dessus de la plaque qui s'enfonce. Ce phénomène y intensifie la déformation et l'exhumation des roches profondes de la croûte. À l'inverse, si les vents dominants sont opposés au sens de la subduction, l'érosion est plus forte sur le versant continental de la chaîne : la déformation du massif montagneux est relativement uniforme, et l'exhumation des roches profondes est limitée au versant continental. Une étude de la répartition des roches altérées dans le cœur de certains vieux massifs montre que les empreintes laissées par l'orographie et par les vents dominants restent visibles plus de deux milliards d'années après que la chaîne a cessé d'être active.

Ayant observé que le soulèvement tectonique et l'érosion peuvent se produire sur des échelles de temps et à des vitesses similaires, de nombreux géologues admettent aujourd'hui que certaines montagnes sont stationnaires : leur hauteur et leur forme générale peuvent rester stables, sans changement notable, durant des centaines de milliers d'années, voire des millions d'années, parce que la vitesse d'érosion est compensée par l'activité tectonique.

Les trois étapes

Si peu de montagnes actuelles sont dans cet état d'équilibre parfait, la plupart d'entre elles l'ont sans doute atteint durant leur histoire. L'évolution des chaînes de montagnes se divise en trois phases. La première, la phase de formation, commence avec la convergence de deux plaques ou avec la survenue d'un événement tectonique qui provoque l'épaississement de la croûte et l'élévation du relief ; durant cette période, la croissance tectonique est plus rapide que l'érosion. Puis, lorsque l'altitude devient très importante, l'érosion s'intensifie. Selon la taille de la chaîne et le climat local, le soulèvement continue jusqu'à ce que l'érosion ou la résistance de la croûte limitent la croissance de l'altitude moyenne de la chaîne. Cette deuxième période stationnaire dure aussi longtemps que la

tectonique compense l'érosion. Enfin, lorsque la surrection ralentit, l'érosion prend le dessus, et les montagnes vieillissent ; leur altitude moyenne décroît lentement. Lors de n'importe laquelle des trois phases, l'évolution des montagnes peut être compliquée par l'intervention d'événements tectoniques ou climatiques, et par les interactions entre ces mécanismes et l'érosion.

Les nouvelles théories sur la formation des chaînes de montagnes promettent d'être aussi fructueuses que le fut la tectonique des plaques il y a 30 ans. De la même manière que celle-ci a permis d'expliquer la répartition globale des séismes, des volcans, des fossiles et de nombreux types de roches et de minéraux, les nouvelles idées orogéniques montrent comment les forces tectoniques, le climat et la topographie interagissent pour créer les paysages les plus spectaculaires de la planète. Les simulations numériques prenant en compte ces théories rendent compte d'histoires tectoniques complexes, de la variabilité des climats, et des particularités géologiques locales.

Nicholas PINTER enseigne la géologie à l'Université de l'Illinois, à Carbondale. Mark BRANDON enseigne à l'Université Yale, dans le Connecticut.

T. YOSHIKAWA, *Landform Development by Tectonics and Denudation*, in *Themes in Geomorphology*, sous la direction de A. Pitty, Croom Helm, 1985.

C. BEAUMONT, P. FULLSACK et J. HAMILTON, *Erosional Control of Active Compressional Orogens*, in *Thrust Tectonics*, sous la direction de K.R. McClay, Chapman and Hall, 1992.

B.L. ISAACS, «Long-Term» *Land Surface Processes: Erosion, Tectonics and Climate History in Mountain Belts*, in *TERRA-1 : Understanding the Terrestrial Environment : The Role of Earth Observations from Space*, sous la direction de P.M. Mather, Taylor and Francis, 1992.

R.E. RAYMO et W.F. RUDDIMAN, *Tectonic Forcing of Late Cenozoic Climate*, in *Nature*, vol. 359, n° 6391, pp. 117-122, 10 septembre 1992.

E. FIELDING, B. ISACKS, M. BARAZANGI et C. DUNCAN, *How Flat Is Tibet?*, in *Geology*, vol. 22, n° 2, pp. 163-167, février 1994.

E.A. KELLER et N. PINTER, *Megageomorphology*, in *Active Tectonics : Earthquakes, Uplift and Landscape*, Prentice Hall, 1996.
