



# La Terre en 301 questions/ réponses



...vue par un géologue

David Huguet

Illustrations de Patrick Schouler - Artitudes

# Sommaire

- 6 Préambule
- 9 Avertissement
  
- 10 1. Qu'est-ce que la géologie ?**
- 12 Comment la géologie est-elle apparue ?
- 13 De l'usage de la géologie dans la société
- 17 Le temps en géologie
- 20 2. Lieu d'intervention du géologue : la Terre**
- 22 Carte d'identité de la planète Terre
- 23 L'anatomie de la Terre
- 27 Le patateïde terrestre
- 29 La Terre : une jeune adulte de 4,55 milliards d'années
- 30 La formation de la Terre
- 33 La Lune, une planète morte
- 34 Rôle des météorites dans la formation de la Terre
- 38 3. Matière première du géologue : la roche**
- 40 Les origines des roches
- 45 Du sédiment à la roche
- 49 Les roches magmatiques et métamorphiques
- 51 La transformation des roches
- 55 L'usage des roches par l'homme
- 56 4. Une planète endiablée**
- 58 Tectonique des plaques et dérive des continents
- 60 Alfred Wegener et ses héritiers
- 62 Les preuves de la dérive des continents
- 64 Le moteur de la dérive des continents
- 66 Formation et destruction des plaques tectoniques
- 69 Mobilité et vitesse de déplacement des continents
- 74 5. Le volcanisme**
- 76 Volcan, volcanisme et volcanologie
- 79 Le magma, carburant des volcans
- 81 Les éruptions volcaniques : dynamismes et scories
- 85 Vie et mort d'un volcan
- 88 Geysers, sources chaudes et volcans de boue
- 90 Vie, climats et volcans
- 92 Prévission et prévention du risque volcanique
  
- 100 6. Les séismes**
- 102 Pourquoi la Terre tremble-t-elle ?
- 104 Mobilité des fractures terrestres
- 107 Causes et moteur des tremblements de terre
- 110 La répétition des séismes
- 112 Magnitude et intensité
- 115 Prévission et prévention
- 118 Les séismes dans le monde
- 126 7. Les montagnes : conséquences de la dérive des continents**
- 128 Définition et répartition
- 131 La formation des montagnes
- 135 Les types de montagnes
- 137 Les montagnes sont enracinées
- 140 L'altitude des montagnes
- 142 Déformations tectoniques et incidences climatiques
- 146 8. La vie géologique à l'air libre**
- 148 L'érosion, premier sculpteur de paysages
- 151 L'évolution du relief et des paysages
- 155 Le rôle de l'eau
- 158 Le rôle du vent
- 159 L'érosion par les glaciers
- 161 L'érosion souterraine
- 166 9. La géologie au service de l'homme**
- 168 Gîtes métallifères et minerais
- 172 L'énergie : pétrole, gaz naturel, charbon
- 176 Le stockage des polluants
- 177 Les ressources en eau sur Terre
- 179 Le génie géologique et civil (aménagement, risques naturels)
- 182 10. Merveilles géologiques**
- 184 Europe
- 191 Afrique
- 194 Amériques
- 199 Arctique-Antarctique
- 200 Asie
- 204 Le Système solaire
  
- 208 Glossaire
- 212 Index
- 215 Bibliographie et adresses utiles
- 220 Remerciements

## Préambule

La Terre peut être décrite, observée, auscultée, étudiée sous plusieurs angles. Nous avons choisi de la considérer en tant qu'objet géologique où ont lieu des phénomènes spectaculaires et violents, comme une éruption volcanique cataclysmique, et d'autres, plus discrets, telle la pluie.

L'intérêt pour la Terre pointe tôt dans la vie d'un homme. Ainsi, les enfants s'exaltent pour des roches et surtout des fossiles qu'ils y discernent. En même temps que des collections géologiques se construisent, des passions s'affirment et promettent de conduire ces jeunes érudits vers des destins géologiques. Pourtant, en grandissant, beaucoup prennent leurs distances avec cette discipline qui les embrasait un temps. Pourquoi cet éloignement alors que la géologie joue un rôle essentiel dans nos vies ? Peut-être en raison du faible nombre d'heures allouées à cette discipline dans l'enseignement au profit de sciences moins naturalistes et plus rémunératrices, si l'on considère les brevets dont elles peuvent être la source.

D'abord centrée sur la Terre, son histoire, son fonctionnement, la géologie s'est rapprochée de l'humanité et de ses préoccupations. À présent, chacun d'entre nous recourt à la géologie dans sa vie quotidienne sans en avoir conscience. Il suffit de deux exemples ordinaires pour apprécier le rôle et la permanence de cette science dans notre existence. Ainsi, l'eau du robinet provient souvent de sources et de nappes souterraines qu'il a fallu prospecter. Le pétrole est également une ressource géologique dont nous sommes gravement dépendants et sur laquelle les économies mondiales sont dangereusement érigées.

L'unique visée de ce livre est d'offrir une synthèse de ce qu'est la géologie, de ses enseignements sur la Terre et, par extension, sur nous-mêmes. Depuis plus de deux cents ans, la géologie et nos connaissances sur notre planète se sont métamorphosées. La raison de cette mutation : l'édiction éloquente d'une théorie aussi révolutionnaire qu'unificatrice – la dérive des continents (ou tectonique des plaques).

Ce livre est donc un outil qui permettra d'avoir une vision générale de la géologie et d'en élargir l'horizon aux problématiques environnementales et sociétales auxquelles l'homme est confronté. Par conséquent, l'objet de cet ouvrage est d'une part de faciliter la compréhension de phénomènes régulant le fonctionnement de la planète et, d'autre part, d'éclaircir la vision du lecteur sur les tourments environnementaux affligés à la Terre, et donc à l'humanité.

---

## Avertissement

---

La Terre est un objet géologique démesuré pour un homme et la géologie est une discipline vaste et ramifiée. C'est bien pour cette raison que l'objectif matériel de ce livre est de constituer une base qui, sans être encyclopédique, sera un outil pour le lecteur curieux qui ne dispose pas de la qualité de géologue. Ainsi, les professionnels et puristes ne devront pas se torturer l'esprit ou envisager de pilonner avec leurs marteaux l'auteur de ces lignes si une parole blasphématoire, usant de mots familiers, heurte la rhétorique du monde scientifique. La vulgarisation n'est pas un exercice aisé. En revanche, il est rendu nécessaire et sain afin qu'une majorité de personnes ait accès à des connaissances endiguées dans les laboratoires et universités.

# Qu'est-ce que la géologie ?

«Rébarbatif», «inintéressant», «ennuyeux», tels pourraient être les mots des élèves lorsque leur professeur annonce qu'il va tout de même falloir entamer le programme de géologie... Dans ce cas précis, la crainte des enseignants de s'impliquer dans un domaine qu'ils ne maîtrisent pas et le peu de notoriété de cette discipline la restreignent souvent à un labeur intellectuel. Malgré cela, elle reste une science fondatrice de la pensée scientifique moderne et a contribué à l'élaboration de la théorie de l'évolution. Son rôle historique et quotidien est largement mésestimé.



## Comment la géologie est-elle apparue ?

### 01 Qu'est-ce que la géologie ?

C'est une discipline scientifique et naturaliste qui se pratique avant tout sur le terrain. Les objets d'études favoris des géologues sont les roches, véritables mémoires de notre planète. Grâce à elles et à leurs minéraux, il est possible de reconstituer, partiellement pour les périodes les plus anciennes, l'histoire de notre planète depuis au moins 4 milliards d'années selon leur provenance (l'âge de la Terre est estimé à 4,55 milliards d'années). Toutefois, la géologie évolue avec les hommes, les techniques, les méthodes et les questions. Aujourd'hui, la géologie, peut-être trop naturaliste pour certains géoscientifiques, est confinée à la cartographie, la recherche de potentialité pour l'exploitation de futures carrières ou bien à des applications, telle la prévention des risques naturels, ou encore à des interventions dans le BTP (métiers du bâtiment et des travaux publics). Au lieu de géologie, on parle dorénavant davantage des sciences de la Terre, champ disciplinaire regroupant toutes les matières et arts qui étudient notre planète, et dont la géologie n'est qu'une branche noyée parmi d'autres disciplines connexes. Parmi celles-ci, reconnues pour leur unicité due à leurs méthodes et objets d'étude, citons la volcanologie, l'hydrogéologie, la sismologie, la géochronologie, la minéralogie, la sédimentologie, la géochimie, la géodynamique, la paléoclimatologie et même la planétologie. D'autres disciplines chevauchent les géosciences comme la géomorphologie et la biogéochimie. La géologie, mère de toutes ces disciplines, présente l'avantage de connaître toutes ses filles, de n'en négliger aucune et d'offrir aux géologues quelques compétences pour chacune d'elles.

### 02 Qui fut le premier géologue ?

>>> 58, 62

Mettons volontairement de côté les philosophes, théologiens et naturalistes (tels René Descartes, Benoît de Maillet, Thomas Burnet) qui ont discoursu sur la formation de la Terre. Considéré comme le père de la géologie moderne, l'Écossais James Hutton (1726-1797) posa les bases de l'observation et de

la réflexion scientifique de terrain. Il exposa que les roches subissaient perpétuellement une transformation mécanique et chimique et une érosion qui fournissait les sédiments. Ainsi, il posa les bases du cycle des roches, en soufflant que celles-ci et les fossiles qu'elles contiennent ne pouvaient être les témoins d'un désastre biblique mais étaient bien plus anciens.

L'Anglais William Smith (1769-1839) est l'auteur de la première carte géologique au monde, parue en 1815, celle de son royaume. Son mérite majeur, outre celui d'avoir parcouru l'Angleterre à pied et à dos d'âne pendant des milliers de kilomètres, réside dans l'identification d'un principe fondamental en géologie : la superposition, soit la mise en place et l'empilement successif de roches singulières par leur composition chimique ou les fossiles qu'elles contiennent. Cette reconnaissance de la superposition, qui aboutit à la notion de stratification des roches, a aidé Darwin dans son travail pour sa théorie évolutionniste, et a valu à W. Smith de s'attirer la colère de l'Église.

En France, dès 1756, Jean-Étienne Guettard (1715-1786) identifie la nature volcanique de certains cônes et dômes auvergnats lors d'un voyage à Vichy. En 1746, il publie une ébauche de carte géologique, *Mémoire et Carte minéralogique sur la nature des terrains qui traversent la France et l'Angleterre*, sans équivalence avec celle, bien plus tardive et plus aboutie, de W. Smith, où il montre la continuité des couches et bancs géologiques entre le Bassin parisien et celui de Londres. Ces deux documents ont été publiés dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*.

## De l'usage de la géologie dans la société

### 03 À quoi sert la géologie ?

Pour le scientifique ou le béotien amoureux et curieux de la planète Terre, qui s'appuie sur la nature des roches ainsi que sur les fossiles qu'il peut trouver principalement dans les sédiments, la géologie offre des outils permettant de dévoiler une partie de l'histoire naturelle d'un territoire. Son premier usage est donc

d'approfondir la connaissance de la planète, de son fonctionnement, de son passé et de son avenir en investiguant les roches, les couches, les montagnes, les volcans qui parsèment sa surface. La géologie a également une utilité civile et intervient pleinement dans la protection des biens et des personnes, comme, par exemple, la prévention des risques naturels. Rien qu'en France, le risque de mouvement de terrain concerne 7000 communes sur 36 679. Quant aux risques d'inondation, ce sont près de 12000 d'entre elles qui y sont exposées. La géologie est aussi ingénierie quand elle concourt à la recherche de matières premières. L'eau, le pétrole, le gaz, mais aussi les minerais comme le platine, l'argent, le nickel ou le fer sont des matières premières dont nous avons quotidiennement besoin pour maintenir notre niveau de vie.

## 04 Quels sont les outils indispensables au géologue ?

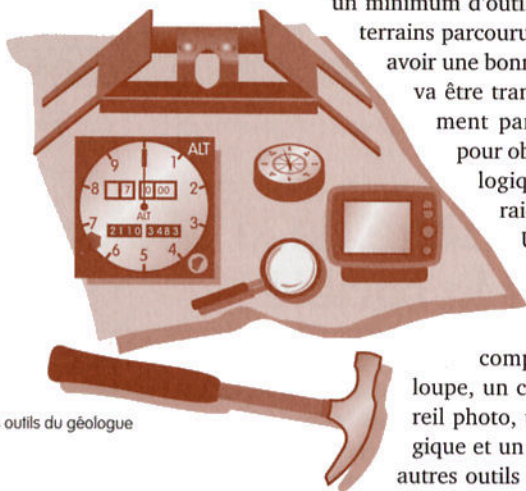
Chacun peut être géologue, au moins par passion. Cheminer dans des paysages rocheux plus ou moins végétalisés à la recherche de roches, minéraux, fossiles ou simplement prendre des photos est un plaisir qui allie la découverte à la contemplation. Là se trouve le luxe du géologue ! Pour exercer ce métier,

un minimum d'outils est nécessaire selon les terrains parcourus. En premier lieu, il faut avoir une bonne vision car l'information va être transmise presque exclusivement par les yeux. Des jumelles pour observer des structures géologiques trop éloignées pourraient être de bonnes alliées.

Un marteau de géologue (une extrémité pour trancher, une autre pour marteler) est le second

compagnon obligatoire. Une

loupe, un carnet de notes, un appareil photo, un GPS, une carte géologique et un bon casse-croûte sont les autres outils nécessaires, voire vitaux, pour l'exercice de la géologie.



Les outils du géologue

## 05 Comment devient-on géologue ?

On l'est avant tout par passion ! La géologie exige souvent une très bonne forme physique doublée d'une grande ténacité en raison des campagnes de terrain. Ainsi, la plupart des géologues ont commencé très jeunes en collectant roches et fossiles.

Les études scientifiques universitaires mènent à des licences et doctorats en Sciences de la Terre qui attribuent, après passage devant quelques éminences, la qualité de géologue. Les écoles d'ingénieurs, notamment l'École nationale supérieure de géologie de Nancy, délivrent des diplômes dont l'orientation est industrielle (carrières, métallogénie, prospection). L'École des mines de Paris reste également une référence et verse autant dans la recherche géoscientifique que dans l'industrie. Les études pour devenir géologue sont donc longues et peuvent exiger quelques détachements matériels et humains. Au bout du compte, la récompense est belle et permettra au tout nouveau géologue de vivre de sa passion. Obtenir le titre de géologue n'est pas non plus une finalité. De nombreuses personnes impliquées dans la vie locale de territoires différents ont une connaissance encyclopédique remarquable de la géologie et peuvent être aisément dispensées de toute reconnaissance académique.

## 06 Qu'est-ce qu'une carte géologique ?

C'est l'outil de base du géologue. Pour se promener, le randonneur utilise une carte topographique de l'Institut géographique national (IGN) sur laquelle sont notamment consignées et retranscrites graphiquement des informations concernant le relief, l'hydrographie et la toponymie. La carte du géologue contient toutes ces informations avec en sus des données géologiques comme la nature des roches et leurs âges respectifs, leur extension en surface, les mines, les puits ou encore les nappes aquifères. Ainsi, une carte géologique ressemble souvent à un immense champ de couleurs panachées qu'il faut savoir décrypter pour reconstituer l'histoire géologique d'un paysage.

## 07 Qui produit les cartes géologiques ?

En général, ce travail est confié à un organisme d'État. En France, le Bureau de recherches géologiques et minières



(BRGM) produit ces documents et les commercialise. Une carte géologique exige plusieurs années de travail sur le terrain et souvent l'intervention de plusieurs dizaines de personnes aux compétences très vastes, allant de celles du géologue à celles de l'imprimeur. Ces documents sont des références scientifiques en évolution constante, partagés entre la carte *stricto sensu* et la notice qui l'accompagne et dans laquelle sont déposées toutes les informations géologiques ainsi que l'interprétation finale. L'échelle la plus utilisée pour la cartographie géologique est le 1/50 000 (1 cm sur la carte = 500 m sur le terrain). L'ensemble de la couverture française n'est pas réalisé (non plus que la couverture mondiale) ; certains territoires restent orphelins d'investigation et d'exploration géologiques, comme des espaces englacés antarctiques et arctiques. Utiliser une carte géologique et la déchiffrer exige un minimum de savoir-faire. Pour les débutants, nous nous permettons un conseil : pour comprendre une carte géologique, l'idéal est de débiter avec la carte d'un bassin sédimentaire comme celui de Paris, où l'architecture géologique n'offre pas de complication particulière. Il faut noter que les cartes géologiques évoluent et changent de support. Le BRGM les propose sur support numérique, ce qui constitue un avantage pour observer l'armature géologique d'un paysage en profondeur et en trois dimensions.

## 08 Quel rôle la géologie a-t-elle joué dans le développement de la civilisation humaine ?

Pour tailler et fabriquer des outils efficaces, il a fallu trouver des métaux et reconnaître les roches qui les contiennent. Dans un deuxième temps, il a fallu réduire ces roches pour en soustraire les matériaux qui serviraient à la fabrication des outils. Les hommes ont donc développé une perception très précise de leurs milieux de vie. La construction d'édifices parfois majestueux, telles les pyramides, n'aurait pu se faire sans le choix de granite distant de plusieurs dizaines de kilomètres du site de Gizeh. La sélection des sols les plus arables pour la mise en culture est aussi liée à une investigation pointue des milieux naturels habités par l'homme. La géologie est donc intervenue très tôt pour favoriser le déploiement de la civilisation humaine.

## Le temps en géologie

### 09 Existe-t-il un calendrier géologique ?

>>> 10

Le temps en géologie est difficilement saisissable car les géologues discutent en millions d'années, parfois même en milliards. Pour mieux considérer cette durée, imaginons que 1 million d'années correspond à environ 40 000 générations humaines, 1 milliard d'années à 40 millions de générations, tandis qu'un siècle, durée déjà considérable pour un homme, n'en regroupe que quatre à cinq. Pour mesurer le temps, les géologues ont élaboré un calendrier dans lequel sont différenciées les ères géologiques, divisées en périodes (ou systèmes), elles-mêmes scindées en époques et étages.

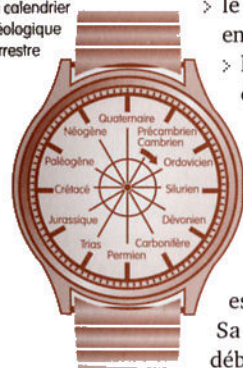
### 10 Comment mesure-t-on le temps en géologie ?

Grossièrement, les géologues distinguent quatre ères principales :

- > le Précambrien :  
entre – 4,55 milliards d'années et – 540 millions d'années ;
- > le Paléozoïque (jadis appelé Primaire) :  
entre – 540 millions d'années et – 250 millions d'années ;
- > le Mésozoïque (que l'on a appelé Secondaire) :  
entre – 250 millions d'années et – 65 millions d'années ;
- > le Cénozoïque (anciennement nommé Tertiaire) :  
de – 65 millions d'années à aujourd'hui.

Le Quaternaire a un statut équivoque d'ère distincte et est pourtant intégré dans la continuité du Cénozoïque. Sa durée est très faible, puisque les géologues le font débiter il y a peine 1,75 million d'années.

Le calendrier géologique terrestre



### 11 Comment distingue-t-on les ères géologiques ?

Le Précambrien débute avec la formation de la Terre et se distingue par sa longueur (approximativement 4 milliards d'années, soit près de 90 % de l'âge de la Terre) et par des événements primordiaux comme l'apparition d'une activité microscopique bactérienne. Toute cette vie naissante n'existait

que dans les océans primitifs ; les continents restaient des déserts biologiques.

Le Paléozoïque marque le développement spectaculaire de la vie avec les premières grandes extinctions biologiques, accidents brutaux et en partie inexplicables correspondant à la disparition rapide (quelques centaines de milliers à millions d'années) de très nombreuses espèces animales et végétales, qui permettent notamment le renouvellement de la vie biologique. Le Mésozoïque est le temps des dinosaures, ère durant laquelle ces grands sauriens s'épanouissent sur les continents pendant que d'autres reptiles envahissent les océans et les airs.

Le Cénozoïque voit débiter le règne des mammifères aux dépens des reptiles, dont les espèces les plus imposantes ont été éliminées à la fin du Mésozoïque. Peu à peu, les mammifères gagnent tous les milieux naturels.

Enfin, le Quaternaire, intégré au Cénozoïque, correspond à l'apparition de l'Homme, à son émancipation vis-à-vis de sa condition naturelle et à sa domination sur le règne animal. Pour la première fois dans l'histoire de la Terre, une seule espèce décide de l'existence de millions d'autres !

## 12 Comment met-on en évidence les ères géologiques sur le terrain ?

Pour une fois, les roches ne sont pas totalement déterminantes pour distinguer les ères géologiques. Les géologues s'appuient davantage sur les fossiles qu'elles contiennent. Ainsi, des restes de grands sauriens terrestres seront associés aux dinosaures et donc à l'ère mésozoïque. La distinction des ères géologiques reste tout de même moins simpliste, car il faut croiser des restes de faune et de flore et tenter d'identifier des événements géologiques qui ont laissé des traces dans les roches, comme la surrection d'une chaîne de montagnes ou encore une inondation marine.

## 13 L'homme laissera-t-il une empreinte dans les roches ?

Les roches sont des enregistreurs automatiques et naturels des événements qui se produisent et se succèdent sur la planète. Ainsi, même si l'homme n'est réellement présent sous sa forme actuelle que depuis 195 000 ans, il a déjà gravé la marque de son passage

sur Terre. Les roches se souviendront de cet animal qui a dominé la Terre, et que les paléontologues futurs décriront avec autant de difficulté que nous le faisons pour d'anciennes civilisations pourtant proches dans le temps : égyptienne, précolombienne...

Les traces humaines pourraient être principalement de deux ordres : d'abord des traces urbaines fossiles, car les agglomérations actuelles sont posées sur des fondations épaisses et solides que l'on retrouvera très ponctuellement sans nécessairement se douter de l'extension de ces villes gigantesques ; ensuite, en termes géologiques, l'homme déplace davantage de matière que ne le font les mouvements de terrain naturels et émet également plus de CO<sub>2</sub> que l'ensemble des volcans actifs. Ces manifestations humaines esquisseront des marques dans la chimie des roches et des sédiments. Il faut également imaginer que les corps humains pourraient être très nombreux à se fossiliser. Les futurs paléontologues et géologues remarqueront donc l'abondance soudaine de restes humains voisins d'autres fossiles animaux.

Toutefois, les changements que nous infligeons à la Terre ne seront perceptibles, dans des millions d'années, que sur des épaisseurs de roche d'à peine quelques millimètres dans lesquelles seront consignées quelques milliers d'années d'histoire. Le changement géologique enregistré sera donc très brutal. Ce constat amène des géologues à proposer la création d'une nouvelle période temporelle dans le calendrier terrestre, l'Anthropocène, qui débiterait soit avec la première révolution industrielle, il y a deux siècles, soit avec la fabrication des premiers outils métalliques manufacturés, il y a environ 5 000 ans.

## 14 Quelle importance représente la géologie pour l'homme ?

Puisque, aujourd'hui, tout n'est qu'économie, les matières premières sont sans conteste le premier enjeu profitable, et le pétrole symbolise l'implication fondamentale de la géologie dans la globalisation. L'eau sera à moyen terme le premier enjeu pour lequel des hommes s'affronteront lors de conflits armés violents. À l'instar de l'archéologie, qui au Moyen-Orient est à usage politique pour prouver l'antécedence d'un peuple sur l'autre, la géologie pourrait devenir un arsenal économique et politique pour des régimes douteux avides de s'approprier des réserves d'eau et d'en priver leurs voisins.

## Lieu d'intervention du géologue :

# la Terre

---

La Terre est une petite planète du Système solaire dont le passé est sondé depuis environ 200 ans par les géologues. Les observations très fines permettent dorénavant d'écrire le scénario de sa formation et d'explorer, au moins virtuellement, ses entrailles. Ainsi, la Terre que nos ancêtres ont fréquentée il y a 6 à 7 millions d'années au moins était très différente de celle que les libellules géantes du Carbonifère survolaient, ou encore de celle que les météorites bombardaient à ses débuts. En dépit de ces millions d'observations, de ces milliers de tonnes de fossiles délogés de leurs gangues rocheuses, notre astre, qui gravite autour du Soleil, conserve des côtés inconnus, voire mystérieux. Du reste, nous connaissons moins finement le cœur de notre planète, pourtant situé à peine à 3 000 km sous nos pieds, que la surface de Mars, dont l'éloignement à la Terre varie de 56 à 400 millions de km !

Avant de percer l'intimité de la planète et d'en décrire l'anatomie, interrogeons-nous sur ce globe rocheux, comme il en existe possiblement des millions dans l'univers, et dont l'une des caractéristiques, en tout cas actuellement, est d'abriter et de préserver la vie. Ainsi, la formation de la Terre a suscité des interrogations auxquelles les géologues ont été confrontés et dont les suites restent perceptibles. Aujourd'hui, nous sommes capables de mettre en scène la naissance de la Terre, intimement associée à celle du Système solaire dans une vaste chorégraphie dont nous pouvons recomposer les pas successifs. Cependant, la Terre n'est pas née de la dernière pluie... sauf si nous considérons que celle-ci fut composée de météorites et d'astéroïdes. En effet, les apports de ces corps extraterrestres en termes de matière et d'énergie furent primordiaux et décisifs pour que naisse la Terre et que nous existions.



## Carte d'identité de la planète Terre

### 15 Qu'est-ce que la Terre?

&gt;&gt;&gt; 17

Cette première question est à la fois aussi évidente que légitime car la Terre présente des caractéristiques singulières. La Terre est une planète de taille modeste (12 756 km de diamètre équatorial) qui gravite autour de son étoile, le Soleil, au sein du Système solaire. Notre petite planète est rocheuse (on emploie également le terme « tellurique »), à l'inverse des grosses planètes telles Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, composées de gaz. Seule l'atmosphère de la Terre est gazeuse. La Terre est structurée en trois enveloppes concentriques et emboîtées : la croûte, le manteau et le noyau.

### 16 Pourquoi la Terre est-elle unique?

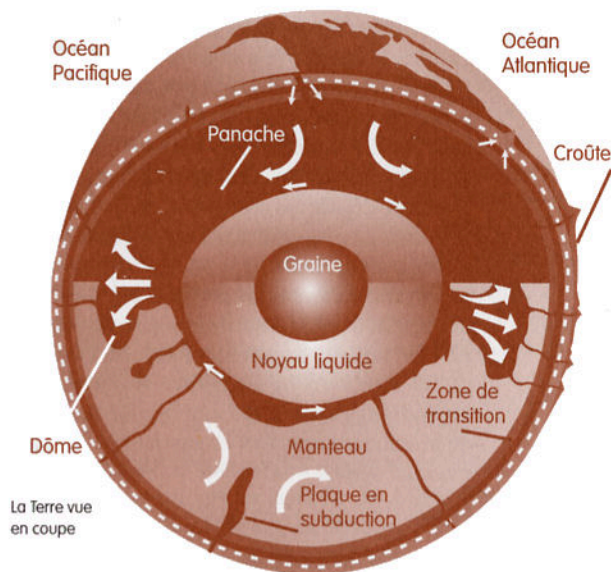
&gt;&gt;&gt; 72

La Terre offre donc deux caractéristiques majeures qu'il n'a pas encore été possible d'identifier ailleurs, et qui signent son unicité. La première est la vie animale et végétale, mais nous ne nous attarderons pas davantage sur ce phénomène qui n'est pas notre propos. L'autre caractéristique strictement géologique de la Terre est la tectonique des plaques\* (ou dérive des continents), qu'elle alimente par son propre carburant situé dans son cœur. Le compartimentage de la croûte terrestre en plaques mobiles s'entrechoquant les unes contre les autres est la distinction primordiale de notre planète par rapport aux autres. Ce phénomène est le résultat d'une activité profonde de notre planète, à l'origine des montagnes et des volcans notamment. La tectonique des plaques a également une influence directe sur le climat, la vie et les écosystèmes qui animent et organisent la surface de la planète. Par conséquent, la géologie n'a pas d'incidences sur le fonctionnement interne de la planète uniquement, mais elle entretient des relations exclusives et profondes avec le climat et la vie. Ainsi, prendre le temps de connaître la Terre, s'intéresser à son histoire et à son évolution, l'expliquer, c'est aussi prendre connaissance de phénomènes sensibles et fragiles

qui nous alertent sur l'état de la planète. D'ailleurs, les géologues se comportent de plus en plus souvent comme des médecins au chevet de leur malade en identifiant des maux et en les interprétant au regard de l'histoire de la Terre. Le réchauffement climatique actuel en est un bel exemple.

## L'anatomie de la Terre

### 17 À quoi ressemble l'anatomie de la Terre?



La Terre vue en coupe

La Terre est composée d'enveloppes concentriques dont les épaisseurs – caractéristiques chimiques (composition) et physiques (chaleurs et pressions) – diffèrent fortement. Elles sont résumées dans le tableau suivant :

		Profondeur sous la surface (km)	État	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Température (°C)
Lithosphère*	Croûte terrestre continentale	0-100	Solide	2,7	< 1000 (à la base)
	Croûte terrestre océanique	0-10	Solide	3,2	< 1000 (à la base)
	Manteau supérieur	100-700	Solide	3,5	< 1000 (à la base)
	Manteau inférieur	700-2 885	Solide	5,5	1000 à 3 500
	Noyau externe	2 885-5150	Liquide	10	3 500 à 4 000
	Noyau interne (ou graine)	5 150-6 370	Solide	12	4 000 à 4 700

## 18 Comment a-t-on mis en évidence la structure interne de la Terre ?

Ce sont les ondes provoquées par des séismes qui dessinent l'existence de ces trois enveloppes concentriques que sont la croûte, le manteau et le noyau. Les ondes sismiques émises se propagent dans toutes les directions à des vitesses distinctes, selon les milieux qu'elles traversent et dont les propriétés physiques et chimiques diffèrent. Ainsi, à mesure que les milieux traversés par les ondes sont plus denses, la vitesse des ondes sismiques augmente.

La structure interne de la Terre n'a pas pu être mise en évidence par l'exploration physique directe, puisque l'homme n'est jamais allé dans les profondeurs terrestres autrement que par la littérature et le cinéma, à l'exception des Soviétiques cependant qui, en 1990, ont atteint modestement -12 360 m de profondeur lors d'un forage sur la presqu'île de Kola (record mondial actuel).

## 19 Quelle est la composition chimique de la Terre ?

Succinctement, la silice et l'oxygène sont les éléments les plus présents dans les roches de notre planète. On les trouve majoritairement dans la croûte terrestre et le manteau. À l'opposé, le fer, le nickel et, pour environ 10%, le soufre, constituent les ingrédients supposés quasi uniques du noyau interne.

## 20 Comment le noyau, le manteau et la croûte terrestre se sont-ils formés ?

Par « accrétion\* homogène ». Alors que la Terre primitive était bombardée par des bolides qui alimentaient notre planète naissante, les éléments chimiques légers, tels la silice, l'oxygène et l'aluminium, et ceux plus lourds, comme le fer et le nickel, se sont séparés. Les éléments denses (donc lourds) ont migré vers le cœur de la planète pour en former le noyau, alors que les éléments chimiques légers, peu denses, restaient en périphérie pour former la croûte et le manteau. La formation du noyau est supposée avoir eu lieu il y a environ 4,4 milliards d'années.

## 21 À quoi ressemble le manteau de la Terre ?

La composition chimique du manteau terrestre est dominée par les minéraux appelés silicates, caractérisés par la présence conjointe de silice et d'oxygène, auxquels s'ajoutent du calcium, du potassium, du magnésium, du fer, de l'alumine ainsi que d'autres éléments minoritaires. Les géologues retrouvent ponctuellement des morceaux de manteau, pourtant inatteignable, à la surface. Il s'agit notamment de roches appelées « péridotites » pouvant contenir des cristaux d'olivine de couleur vert émeraude et dont le diamètre peut excéder plusieurs dizaines de centimètres. Ce manteau ne doit pas être considéré comme un océan de magma sur lequel la croûte terrestre flotterait. Bien que très chaud, le manteau a un comportement plastique, c'est-à-dire qu'il est à peine capable de se déformer, mais fait preuve d'une grande robustesse.

## 22 Le centre de la Terre est-il creux ?

>>> 72

Dans *Voyage au centre de la Terre*, Jules Verne s'est trompé. Le centre de la planète n'est ni vide, ni occupé par un océan peuplé de bêtes légendaires, mais bien comblé par un noyau très chaud de fer et de nickel. D'un diamètre total d'environ 3 500 km, le noyau est scindé en deux parties : un noyau externe (2 160 km de diamètre) et un noyau interne, autrement nommé « graine » (1 220 km de diamètre). Ce noyau représente 16% du volume global de la planète et c'est dans cette immense usine thermique que se trouve la clef du moteur qui va animer





public implique que la surface terrestre est déformée et présente, en dehors des montagnes et volcans, des zones en creux et en relief très amples imperceptibles à l'échelle humaine. Ces déformations à grands rayons de courbure sont visibles à la surface des océans et mesurables grâce à des satellites.

#### LE GÉOÏDE

Considérons la Terre comme un volume hétérogène dont la masse est distribuée de façon irrégulière, avec des variations importantes de composition chimique. Naturellement, la Terre génère un champ de pesanteur grâce auquel chacun de nous garde les pieds au sol. Toutefois, ce champ de pesanteur, qui n'est que la conséquence de la force de gravité, varie selon les endroits et en fonction de la densité des roches. Autrement dit, la Terre exerce sur nous une attraction différente selon les endroits où nous nous trouvons. De ce fait, au sommet d'une montagne, l'attraction exercée sur notre personne sera plus importante que dans une vallée, car davantage de masse rocheuse se trouve sous nos pieds et donc accentue l'effet de gravité.

## 27 La surface des océans est-elle plane et lisse ?

>>> 17, 21, 26

Le niveau marin coïncide avec le géoïde\*, ce qui implique que la surface des océans n'est pas plane. Il en résulte des régions marines en creux et d'autres en relief – où l'océan est bombé. De fait, les géophysiciens ont pu mettre en évidence que la surface des océans et des mers n'était pas plane et régulière mais déformée par des zones en creux (ou négatives) et d'autres enflées (dites positives) seulement visibles à grande échelle. Ainsi, à la pointe de la péninsule indienne, il est montré par des mesures satellitaires que la surface de l'océan forme une dépression de – 120 m ! Ces irrégularités des masses dans le manteau et la croûte terrestres, induisant des effets locaux sur le champ de pesanteur.

# La Terre : une jeune adulte de 4,55 milliards d'années

## 28 Quel est l'âge de la Terre ?

29, 33

Environ 4,55 milliards d'années. Il s'agit également de l'âge du Système solaire, soit des sept autres planètes qui le composent avec la Terre : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. À noter que, depuis le 24 août 2006, l'Union astronomique internationale a décidé de considérer Pluton comme une planète naine (statut intermédiaire entre celui de planète et de corps céleste).

Pourquoi 4,55 milliards d'années ? Parce qu'il existe des roches témoins, des reliques géologiques, contemporaines de la période pendant laquelle la Terre et le Système solaire se sont formés. Ce sont les météorites. Elles sont les plus vieux objets géologiques de notre univers proche. Ainsi, grâce aux minéraux encore contenus dans ces roches nomades, l'âge de la Terre a pu être évalué à 4,55 milliards d'années.

## 29 Comment a-t-on calculé l'âge de la Terre ?

Grâce à la radioactivité et aux isotopes trouvés sur des météorites qui existaient déjà alors que la Terre naissait. La radioactivité (terme inventé par Marie Curie en 1898 à la suite des travaux d'Henri Becquerel) est un phénomène naturel de transformation d'un élément chimique en un nouveau dû à la destruction de noyaux atomiques.

La matière, qu'il s'agisse d'un être humain ou d'une montagne, est faite d'atomes et de molécules. Un atome est l'addition d'un noyau composé d'un nombre égal de neutrons et de protons, autour duquel gravite un cortège d'électrons. Certains de ces noyaux atomiques sont réputés instables et se détruisent en émettant des rayonnements (alpha, bêta ou gamma). Cette instabilité des noyaux atomiques, à mesure que le temps passe, enclenche une transformation de la matière initiale en une

nouvelle. De la sorte, l'uranium tend à se transformer spontanément en plomb (plus précisément l'uranium 238 mute en plomb 206), stable et non radioactif, en approximativement 4,5 milliards d'années. Ce sont donc ces éléments résiduels instables et radioactifs que les géologues recherchent pour dater les roches.

### 30 Quelles sont les plus vieilles roches sur Terre ?

Les plus vieilles roches identifiées l'ont été au Groenland et ont été datées à 3,8 milliards d'années. Il s'agit d'ophiolites, ce qui montre qu'une tectonique des plaques\* devait déjà exister. Les ophiolites sont des roches typiques des zones de contact entre deux plaques tectoniques préfigurant la naissance d'une chaîne de montagnes.

### 31 Quelle est la trace de vie fossile la plus ancienne ?

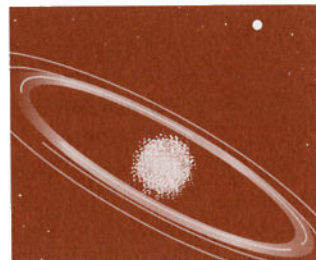
Formellement, bien que cette question anime les débats entre paléontologues, les premières traces de vie avérée datent d'il y a 3,4 milliards d'années (Pilbara, Australie). Cette signature de vie fossile patente est attribuée à des stromatolithes, c'est-à-dire des constructions géologiques de forme conique que l'on peut observer en bord de mer, de taille inférieure à 1 m et semblables à des champignons. Ce sont des bactéries qui édifient petit à petit ces stromatolithes en formant, en leur périphérie, des lits d'épaisseur millimétrique, à l'image d'un mille-feuille. Les traces de vie fossile les plus anciennes sont donc attribuées à des bactéries et à leurs travaux de maçonnerie.

## La formation de la Terre

### 32 Comment la Terre s'est-elle formée ?

La Terre et le Système solaire se sont formés alors qu'un nuage de gaz et de poussières traversait l'un des bras spiraux de notre galaxie, la Voie lactée. L'explosion d'une étoile voisine (supernova), seule capable de générer une énergie assez intense pour

provoquer la transformation d'éléments chimiques solides, provoqua dans un premier temps la contraction du nuage et, dans un deuxième temps, l'accrétion\* de la matière solide en des globes rocheux dont l'un allait devenir la Terre.



La Terre en gestation

### 33 Quelle est la taille originale de la Terre ?

À l'origine, la Terre et le Système solaire n'étaient que poussières et gaz mélangés dans un nuage céleste. Un phénomène de condensation (passage d'un état gazeux à un état solide) s'est produit dans le nuage au sein duquel le Système solaire était en gestation. Au centre du nuage commençait alors à se former le Soleil, autour duquel gravitait un disque formé de roches solides et d'éléments volatils. Ces derniers ont été absorbés par l'étoile solaire alors que les éléments rocheux épargnés s'accrétionnaient pour former les planètes telluriques comme la Terre. À l'échelle des grains rocheux, des collisions intergranulaires ont amené la formation des grains gros comme des billes, qui en ont donné de plus gros, de la taille de ballons, etc. Ainsi, la Terre s'est formée par accrétion\* sur une durée très rapide, évaluée à 100 millions d'années. Cet âge de la Terre et le temps nécessaire pour sa formation sont estimés grâce notamment aux plus vieilles roches du Système solaire, les météorites, toutes datées à 4,667 milliards d'années. La Terre est apparue environ 100 millions d'années plus tard, soit il y a environ 4,55 milliards d'années.

### 34 Est-ce que la Terre grossit ?

Non. Cependant, il suffit d'observer le ciel en août pour apercevoir les pluies d'étoiles filantes, les fameuses Perséides. Ce phénomène reste aujourd'hui mineur, puisqu'il existe très peu d'objets célestes proches et disponibles pour entrer en collision avec la Terre. On ne peut donc pas dire que la formation de la Terre se poursuive ni qu'il y ait un gain de volume, car l'apport de ces



météorites actuelles ne représente que quelques milliers de tonnes de roches annuellement, valeur très négligeable au regard de la masse de notre planète, évaluée à  $6 \times 10^{24}$  kg (6 millions de milliards de milliards de kg). Par comparaison, la Terre pèse 330 000 fois moins que le Soleil, ou autant que 1,5 million de milliards de milliards d'éléphants, ou 600 milliards de milliards de tours Eiffel!

### 35 La Terre a-t-elle ressemblé à une boule de magma ?

>>> 17

La formation de la planète Terre ne peut être reconstituée qu'en laboratoire, grâce à des modèles informatiques et mathématiques desquels résultent des images théoriques difficiles à valider avec des preuves géologiques factuelles. Cependant, on suppose qu'un océan de magma visqueux d'environ 600 km de profondeur a pu exister. Celui-ci aurait permis, vers 4,4 milliards d'années, la ségrégation du fer et sa migration vers le cœur de la planète pour en constituer le noyau. Des scientifiques associés des universités de Lyon I, de British Columbia (Canada), du CNRS et de l'École normale supérieure de Lyon pensent avoir mis en évidence l'existence de poches résiduelles de cet océan de magma à la limite du noyau et du manteau, soit à environ 2 900 km de profondeur.

### 36 Comment l'atmosphère s'est-elle formée ?

Les gaz atmosphériques se sont extraits du manteau terrestre en formation il y a à peu près 4,4 milliards d'années. La composition atmosphérique originelle devait être constituée de 80 % de  $\text{CO}_2$  (ou dioxyde de carbone), le tout plongé dans une pression de surface équivalente à celle de 400 à 500 atmosphères actuelles. Cette atmosphère originelle était traversée par des météorites. La vapeur d'eau, autre grand élément constitutif de cette atmosphère originelle, est devenue liquide en raison des fortes pressions. Dès lors, les scientifiques imaginent le scénario suivant : l'atmosphère s'est peu à peu vidée de son  $\text{CO}_2$ , piégé par la formation des roches calcaires, ou carbonates. Toutefois, ces derniers n'ont pas été trouvés. Par conséquent, il peut avoir existé des continents primitifs vers 4,3 milliards d'années mais qui, semble-t-il, ont été détruits rapidement avant que de nouveaux naissent.

## La Lune, une planète morte

### 37 D'où vient la Lune ?

>>> 17, 32, 33

De la Terre ! Pendant le processus d'accrétion\* à l'origine de notre planète, un petit corps planétaire de la taille de Mars est entré en collision avec la Terre. Des morceaux de notre planète originelle furent éjectés du manteau terrestre et ont orbité autour d'elle avant de se lier pour former la Lune. Cet épisode titanesque semble s'être produit il y a environ 4,5 milliards d'années, alors que la Terre se formait. Cette datation est attestée par les roches lunaires, plus riches en fer que celles de la Terre, ce qui implique que le noyau terrestre n'était pas encore différencié lorsque cette collision s'est produite.

### 38 Pourquoi y a-t-il tant de différences entre la Terre et la Lune ?

Bien que la Lune puisse être considérée comme la fille d'une union explosive entre deux planètes telluriques, son aspect de surface est totalement dissemblable de celui, coloré et lisse, de la Terre. La Lune a le même âge que la Terre, et pourtant sa surface est constellée de cratères dus à des météorites dont les impacts semblent être survenus il y a 3 à 4 milliards d'années. Ce sont donc de très anciennes structures géologiques, sans équivalent sur Terre. Cette différence entre les deux planètes réside dans l'absence d'eau et l'absence d'atmosphère lunaire, soustrayant ainsi les cratères de notre satellite aux attaques de l'érosion. Néanmoins, l'atmosphère lunaire n'existant pas, la Lune n'est pas protégée par un bouclier gazeux naturel, et doit subir tous les chocs des bolides croisant près d'elle. À l'inverse, la Terre reste relativement épargnée grâce à son bouclier atmosphérique. Par conséquent, la Lune accumule les cratères et ne les élimine pas, ou très lentement, alors que la Terre reste ménagée et gomme les impacts de sa surface.

## 39 Est-ce que la Terre a pu avoir une surface aussi meurtrie que celle de la Lune?

>>> 33, 72, 186

Oui, durant la phase d'accrétion\*, et pendant au moins 100 millions d'années, la Terre a présenté un visage météorisé par les chutes incessantes de corps extraterrestres de tailles très diverses. Aujourd'hui, tous ces cratères ont disparu à la faveur de deux phénomènes dont les effets s'additionnent : l'érosion et la tectonique des plaques\*, qui ont effacé les traces de ces impacts.

### LE PLUS JEUNE CRATÈRE LUNAIRE

En 1953, un éclat fugace, dont la source se trouvait sur la Lune, fut aperçu et photographié depuis la Terre. Les scientifiques ont estimé qu'un cratère d'un diamètre oscillant entre 1 et 2 km avait pu se former à la suite de cet impact contemporain. La taille du bolide qui entra en collision avec la Lune fut évaluée à 300 m de diamètre. Bien que très furtif et silencieux depuis la Terre, cet impact lunaire, le seul réellement observé de mémoire d'homme, dégagea une énergie équivalente à 35 fois la bombe d'Hiroshima !

## Rôle des météorites dans la formation de la Terre

### 40 Qu'est-ce qu'une météorite?

>>> 271

De composition généralement rocheuse, les météorites sont des pierres dont la composition chimique varie. Certaines de ces météorites, plutôt rares, sont des « fers » – roches célestes exclusivement composées de fer. Leur source se trouve dans la Ceinture d'astéroïdes, un vaste anneau fermé de roches et de fers localisé entre Mars et Jupiter. Ces météorites sont de toutes tailles, allant du gravier jusqu'à l'astéroïde large de plusieurs centaines de kilomètres.

Les météorites croisent l'orbite de la Terre, qui les attire grâce à sa force de gravité importante. Les météorites libres sont alors irrémédiablement entraînées vers notre planète où certaines se

consument dans l'atmosphère ; ce phénomène lumineux et parfois accompagné d'une déflagration est appelé « météore » ou, plus communément, « étoile filante ». Ce n'est qu'une fois sur Terre que l'on parle de météorite.

### 41 Existe-t-il plusieurs types de météorites?

>>> 50

Oui, nous distinguons quatre types majeurs de météorites :

- > les météorites rocheuses, ou chondrites, assemblages de minéraux et de métaux comme l'olivine, le pyroxène, la silice et le fer. Elles sont les plus vieilles roches du Système solaire et résultent de l'agglomération de sphérules, appelées chondres, au moment de la formation des planètes. Elles représentent 85 % des météorites récoltées sur Terre ;
- > les météorites rocheuses non différenciées, ou achondrites, dans lesquelles on ne distingue pas de chondres ;
- > les météorites ferreuses, sans doute celles qui tiennent le plus de place dans l'imaginaire de chacun. Essentiellement composées de fer et de nickel dans des proportions variables, elles doivent provenir de la fracturation du cœur d'un astéroïde. Elles ont, en outre, la même composition que le noyau terrestre ;
- > les météorites mixtes (à peine 1 % des chutes atteignant le sol), les plus belles de toutes (les pallasites), qui mêlent matières minérales et fer.

Ces quatre catégories sont elles-mêmes divisées en sous-catégories.

### 42 Comment interpréter les chutes de météorites actuelles?

>>> 32, 34

Chacun d'entre nous a pu observer, même fortuitement, des étoiles filantes, phénomènes lumineux aussi appelés météores. Ce sont des poussières qui pénètrent dans l'atmosphère et s'y consomment en une traînée brillante. Il arrive que des roches plus volumineuses, insuffisamment érodées par les frottements dans l'atmosphère, échappent à la combustion et arrivent jusqu'à nous sous forme de météorites.

La Terre primitive s'est formée à l'occasion d'un intense bombardement météoritique. Certains bolides devaient atteindre des tailles gigantesques allant jusqu'à plusieurs centaines de kilo-



Un météore traversant l'atmosphère terrestre

mètres de diamètre avant impact avec la Terre. Aujourd'hui, nous ne pouvons pas considérer que ces bombardements timides et rares dont la beauté nous stupéfie sont les ultimes soubresauts de l'accrétion\* de la Terre, car notre planète ne connaît pas d'expansion mais subit impassiblement l'apport dérisoire et négligeable de quelques milliers de tonnes de roches extraterrestres chaque année. Certaines d'entre elles, comme les météorites originaires de Mars ou de la Lune, sont collectées et nous initient indirectement à la géologie d'autres planètes, ou bien à celle d'astéroïdes.

### 43 D'où viennent les météorites ?

D'un nuage de particules appelé Ceinture d'astéroïdes, en orbite entre Mars et Jupiter et composé exclusivement de roches et de fers extraterrestres de toutes tailles, allant du centimètre jusqu'au bloc gros comme l'Everest. Selon la loi de Titius-Bode portant sur la distribution géométrique des planètes autour du Soleil, la Ceinture d'astéroïdes aurait dû aboutir à la formation d'une planète, avortée en raison des perturbations gravitaires très fortes engendrées par le Soleil d'un côté et par Jupiter de l'autre.

Notons que d'autres météorites proviennent de la planète Mars ou encore de la Lune après qu'un morceau de croûte en eut été expulsé à la suite d'un impact violent.

### 44 Quel est le plus vieux cratère d'impact sur Terre ?

Il s'agit du grand cratère du Vredefort (Afrique du Sud), dont l'âge estimé est de 2 milliards d'années et le rayon d'environ 100 km. La météorite à l'origine de cet impact devait atteindre une taille de 10 km de diamètre.

En Russie, il existe des brèches conglomeratiques produites par un impact appelé Suavjärvi. Daté à 2,4 milliards d'années, cet impact a laissé quelques traces dans la géologie locale, dont la forme grossière d'un cratère très érodé occupé par un lac en son centre supposé.

### 45 Quel est le plus jeune cratère d'impact sur Terre ?

En 1947, en URSS, une météorite connue sous le nom de Sikhote-Alin impacta la Terre et engendra notamment la formation d'un cratère modeste : 28 m de diamètre pour 6 m de profondeur maximale.

Concernant des cratères dont le diamètre dépasse le kilomètre, citons le cratère Barringer (Arizona, États-Unis, 35° 2' N – 111° 1' W), aussi appelé Meteor Crater, son âge est estimé à 50 000 ans. En Inde, le cratère Lonar (19° 58' N – 76° 31' E) est le fruit d'un impact à peine plus ancien (52 000 ans).

#### LE CRATÈRE BARRINGER OU LA RUINE D'UN MINEUR

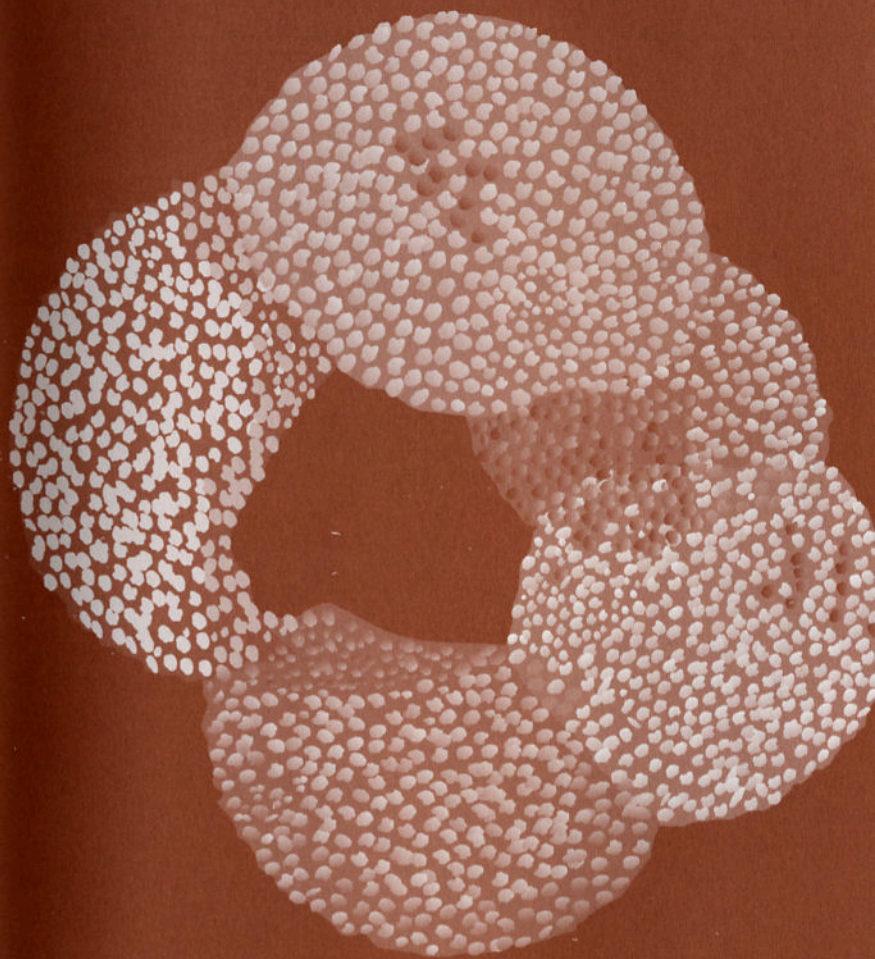
Situé en Arizona, le cratère Barringer doit son nom à son acquéreur, Daniel Moreau Barringer, qui en devint propriétaire en 1903. Durant 26 ans, ce brillant ingénieur des Mines va se jeter dans l'aventure industrielle en espérant trouver des métaux rares dans cette cuvette désertique, dont il avait compris l'origine météoritique. En 1929, D. M. Barringer meurt, ruiné d'avoir consommé sa fortune (600 000 dollars, l'équivalent de 13 millions de dollars actuels) dans cette triste aventure humaine. Aujourd'hui, la famille Barringer reste propriétaire du cratère et en assure l'exploitation commerciale depuis 1955, par le biais de la Meteor Crater Enterprise Inc.

D. M. Barringer avait raison d'espérer trouver des minerais dans ce cratère. Pourtant, il n'en fut rien. Ce n'est que très récemment que des scientifiques élucidèrent le mystère de cette absence de minerais : il semble que la météorite, de nature ferreuse, se soit morcelée durant la traversée de l'atmosphère. Le débris principal, d'un diamètre estimé à 20 m, forma le cratère actuel et se désintégra totalement lors de l'impact. Barringer chercha cette météorite, jusqu'à la crise cardiaque qui le foudroya après que l'astronome F. R. Moulton lui eut annoncé que la météorite n'avait pu être conservée après l'impact en raison de la petitesse de sa taille estimée. L'expert avait été juste dans ses calculs dès 1928, seulement un an avant la mort de Barringer, qui ne récolta que quelques morceaux ferriques alentour, trop modestes pour rendre son projet industriel viable et reconstituer sa fortune.

# Matière première du géologue : la roche

---

Pour les géologues, les roches sont des objets d'étude qui conservent partiellement en mémoire une fraction de l'histoire d'une région dont elles forment le socle. Ces informations doivent être extraites ou simplement lues et interprétées par le géologue, qui déduira les conditions dans lesquelles ces roches se sont formées et ont évolué. Il est fréquent qu'elles livrent des traces de vie, fossile, végétale ou animale.



## Les origines des roches

### 46 Qu'est-ce qu'une roche ?

>>> 51, 55,  
60, 61

C'est un assemblage de minéraux et de cristaux, voire de fossiles, dont les proportions et identités chimiques varient et déterminent la nature de la roche. Il existe plusieurs types de roches ; ainsi, on distingue les roches magmatiques (liées à une activité volcanique), sédimentaires, issues de l'érosion des reliefs terrestres continentaux et marins, et enfin celles, moins connues, dites métamorphiques\*. Certaines roches se présentent en masse plus ou moins hétérogène, telles les brèches et conglomérats ; d'autres prennent une allure finement feuilletée jusqu'à être stratifiée.

### 47 De quoi se compose une roche ?

>>> 48

On peut y trouver beaucoup d'éléments très divers par leur nature, leur forme, leur taille, leur couleur et leur origine. On trouve principalement des minéraux se présentant sous l'aspect de cristaux.

Un minéral est un solide naturel réputé homogène, avec une composition chimique qui lui est propre. Ajoutons la morphologie du minéral qui révèle une structure atomique ordonnée. Il existe plus de 4 000 minéraux recensés sur Terre, classés selon des critères chimiques et répartis en neuf classes principales :

Classes de minéraux	Nombre de minéraux	Caractéristiques	Exemples de spécimens fameux
1 - Éléments	~ 110	Rares, voire très rares, ces minéraux représentent des enjeux économiques majeurs, voire vitaux pour les sociétés humaines.	Cuivre natif Soufre natif Diamant Mercure natif Nickel Or natif Platine natif

Classes de minéraux	Nombre de minéraux	Caractéristiques	Exemples de spécimens fameux
2 - Sulfures et sulfosels	> 530	Cette classe renferme les principaux constituants (sauf le fer et le manganèse) des minerais dont sont constitués les métaux exploités.	Coballite Galène Goethite Marcasite Pyrite
3 - Halogénures	~ 140	Ces minéraux, comme le sel gemme (halite), sont souvent peu résistants, se cassent et se détruisent facilement et sont même solubles dans l'eau.	Atacamite Fluorine Halite
4 - Oxydes et hydroxydes	~ 500	Cette classe comporte des minéraux durs ou tendres, transparents ou opaques, formés par l'association d'éléments métalliques avec l'oxygène.	Chromite Corindon Hématite Opale Rubis Saphir
5 - Carbonates, nitrates, borates et iodates	> 310	Généralement, ce sont des minéraux de faible dureté formés après évaporation de l'eau dans les régions arides.	Aragonite Calcite Dolomite Magnésite Natron Sidérite
6 - Sulfates, chromates, molybdates et tungstates	> 300	Ces minéraux sont vitreux, n'ont qu'une dureté moyenne, et se forment principalement dans les zones d'oxydation, des veines, près des zones de métamorphisme* ainsi que dans les dépôts d'évaporites. Certains sont solubles et beaucoup sont fluorescents.	Anhydrite Barite Célestite Gypse Wolframite

Classes de minéraux	Nombre de minéraux	Caractéristiques	Exemples de spécimens fameux
7 - Phosphates, arséniates et vanadates	~ 500	Opaques, voire gris, ces minéraux apparaissent par précipitation des ions phosphate dans une roche sédimentaire en formation.	Autunite Purpurite Roséilite Turquoise
8 - Silicates	~ 900	Les silicates entrent dans la composition de 90 % des roches de la croûte terrestre. On les trouve dans toutes les roches métamorphiques et magmatiques, et dans une grande proportion des roches sédimentaires. Très divers par leurs couleurs, formes et aspects, les singularités les plus communes sont leur dureté et leur éclat vitreux.	Albite Amazonite Améthyste Amphibole Biotite Calcédoine Cornaline Émeraude Grenat Jadéite Kaolinite Quartz Talc Topaze
9 - Composés organiques	~ 30	Cette classe contient tous les minéraux contenant un composé d'origine organique issu d'une activité géologique et non biologique.	Mellite Oxamide

## 48 Qu'est-ce qu'un cristal ?

Un cristal est un minéral dur à la forme géométrique ordonnée due à une organisation régulière des atomes. De ce fait, il peut adopter toutes les combinaisons chimiques des minéraux auxquels il est rattaché, le plus connu étant le cristal de quartz. La distinction du cristal est sa forme géométrique qui

cache à l'échelle atomique une géométrie très ordonnée. Cette charpente construite par l'ordonnement très précis des atomes est une structure qui commandera la forme définitive du cristal si aucune contrainte extérieure ne perturbe ce travail d'édification très lent. Ainsi, il présente des faces lisses séparées par des arêtes souvent aiguës avec des angles spécifiques. Les cristaux adoptent sept formes cristallines (on parle aussi de systèmes cristallins) : cubique, hexagonale, monoclinique, orthorhombique, tétragonale, trigonale et triclinique.



Un cristal de quartz

## 49 Comment identifier un cristal ?

Cet exercice est un apprentissage qui s'exerce sur les roches directement en extérieur ou bien dans les collections des musées, et permet de renouer avec la géologie de terrain. Tout d'abord, il faut examiner la géométrie du cristal, sa forme, sa symétrie pour le rattacher à un des systèmes cristallins. Toutefois, les cristaux sont rarement simples avec un dessin et une forme reconnaissables immédiatement. On regarde alors les macles, c'est-à-dire l'association physique de deux cristaux se rapportant à la même espèce minérale. Les clivages constituent un autre critère objectif ; en effet, les cassures survenant au sein de cristaux ne prennent pas n'importe quelle forme et respectent l'ordonnement du squelette atomique du cristal. Les cristaux ne résistent pas tous de la même façon à l'érosion. Certains présentent une dureté importante alors que, pour d'autres, elle est faible. On l'exprime sur une échelle graduée de 1 à 10. De ce fait, le talc a une dureté de 1 alors que celle du diamant est de 10 (le quartz a une dureté de 6). La densité peut représenter un critère, mais est difficilement estimable sur le terrain, car elle est comprise entre 2,4 et 2,9. Au-delà de 2,9, ce sont les minéraux lourds. Enfin, ultime critère, les propriétés optiques des cristaux, dont la détermination nécessite d'avoir recours à un microscope polarisant. Selon les propriétés optiques des minéraux propres à

leur structure et à leur composition, la lumière les traversant est plus ou moins altérée. Grâce à cette propriété, on distingue les minéraux constitutifs d'une roche après avoir fait tailler une lame-mince dans l'échantillon de roche.

## 50 Depuis quand existe-t-il des cristaux sur Terre ?

>>> 29

Aucun élément n'a pu survivre au bombardement météoritique très intense que la Terre a subi au début de son existence. Pourtant, un cristal de zircon a été trouvé en Australie. Le zircon (silicate de zirconium) est réputé pour sa dureté et sa très forte résistance à l'érosion. Les informations que les géologues ont soutirées du cristal de zircon révèlent que ce minéral a dû se former dans un magma et semble montrer l'existence de protocontinents naissants alors que notre planète subissait un bombardement. Ce zircon, dont le diamètre ne dépasse pas celui de deux cheveux humains réunis, a été daté à 4,4 milliards d'années !

### LA LÉGENDE DES PIERRES DE COADRY (BRETAGNE)

Les minéraux, au-delà des collectionneurs, intéressent beaucoup de monde. Dans le Finistère, les pierres de Coadry, nommées « stauroïdes » (ou silicate d'alumine) par les géologues, sont deux minéraux emboîtés dont l'association adopte une silhouette de croix chrétienne polie que l'homme aurait pu façonner. Ces minéraux, outre leur très bel aspect, étaient encore ramassés au <sup>xix</sup><sup>e</sup> siècle par les habitants qui leur attribuaient des vertus de guérison des maux d'yeux et de protection divine contre les chiens et les naufrages.

Une chanson composée de 46 couplets fut écrite en breton à la fin du <sup>xix</sup><sup>e</sup> siècle et dédiée à ce cristal. Seul le premier couplet est présenté ci-dessous :



Un stauroïde  
ou pierre  
de Coadry

*BULLIOU AN AOTROU CHRIST  
Mar plich ganeoc'h e selaoufet  
Eur verz nevez a zo composet  
Da eur plaç santel ez e gret  
Da Jesus-Christ ez e formet.  
Abalamour da eur Chapel  
Hon eus ebars en Breiz Izel  
En eur barres hanvel Scaër  
En escopti euz a Guemper.*

Cette chanson était plus destinée à charmer le pèlerin aisé que le chrétien pieux et pauvre... Et voilà comment vanter le caractère touristique de sa région grâce à la géologie !

## 51 Comment se forme une roche ?

Tout dépend de la nature de la roche. Il existe des roches sédimentaires formées à partir de la destruction de roches préexistantes à la surface terrestre, des roches magmatiques dont les racines se trouvent dans les entrailles de la Terre, et des roches métamorphiques\* résultant d'une transformation chimique et mécanique des deux premiers types. Le mode et le lieu de formation des roches diffèrent donc selon la nature de la roche.

## 52 Où trouve-t-on des roches ?

La croûte terrestre est uniquement constituée de roches. En s'enfonçant dans le manteau terrestre, les roches existent toujours, se réchauffent, mais gardent un comportement solide (elles cassent) ou plastique (elles se déforment plus facilement).

## 53 Existe-t-il une discipline scientifique dédiée aux roches ?

Oui, il s'agit de la pétrologie, littéralement « étude des roches ». Les spécialistes de cette discipline sont les pétrologues. Ils décrivent et analysent les roches pour en déduire le mode de formation et tirer des conclusions élargies sur le contexte géologique local ou global.

## Du sédiment à la roche

## 54 Combien y a-t-il de types de roches ?

>>> 51, 55,  
60, 61

Si l'on peut dire qu'il existe trois familles de roches regroupées selon leurs modes de formation respectifs – les roches sédimentaires, magmatiques et métamorphiques\* –, il est néanmoins impossible de quantifier l'amplitude de la variété des roches sur Terre. Le basalte est une roche familière, et pourtant il est préférable de parler de basaltes, car les proportions de minéraux qui en sont constitutifs peuvent varier d'un basalte à l'autre. *Idem* pour les calcaires, dont certains sont tendres et d'autres bien plus robustes. De ce fait, la variété des roches est tellement grande, y compris au sein d'une même famille, qu'il est difficile de l'inventorier avec exactitude.

## 55 Que sont les roches sédimentaires ?

>>> 186, 190

Ce sont par exemple les marnes, les argiles, les calcaires. Ces roches sont le fruit de deux phénomènes successifs : l'érosion et la sédimentation. L'érosion comprend tous les mécanismes naturels engendrant une usure, voire la destruction de la roche (gel, pluie, écarts thermiques...); la sédimentation est un phénomène qui aboutit à l'accumulation en un seul endroit des débris rocheux fabriqués par l'érosion.

Par conséquent, les roches sédimentaires résultent de la destruction de roches préexistantes qui pouvaient être magmatiques, métamorphiques\* ou déjà sédimentaires.

Pour mieux figurer cette notion de roches sédimentaires, imaginons les sables atlantiques, qui avant d'être des grains millimétriques se trouvaient dans les corps rocheux du Massif central ou des Pyrénées et étaient partie intégrante, pour certains, de granites ou de roches volcaniques.

Les roches sédimentaires sont relativement connues, pas sous cette désignation géologique, mais parce qu'elles sont familières à chacun de nous. Le calcaire, roche sédimentaire la plus répandue sur Terre, est utilisé dans la construction, de même que le grès, alors que les maîtres d'école écrivent au tableau avec de la craie, un autre calcaire.

Enfin, les roches sédimentaires peuvent se présenter sous deux aspects. Elles sont dites tendres, ou meubles, lorsque leur consolidation n'est pas parfaite. C'est le cas des sables. À l'opposé, elles peuvent être consolidées, comme les calcaires massifs des Grands Causses du Massif central.

Les roches sédimentaires et les sédiments sont étudiés par une discipline des sciences de la Terre : la sédimentologie. Il est fait appel à cette discipline notamment en archéologie, dans la prévention des risques naturels, la géotechnique, et bien d'autres domaines scientifiques ou civils.

## 56 Doit-on parler de sédiments ou de roches sédimentaires ?

>>> 55

Les sédiments sont les dépôts détritiques servant à la formation de roches sédimentaires. Ainsi, l'érosion fabrique des sédiments qui, en se compactant, se transformeront en roches sédimentaires meubles ou solides. Le processus de la transformation de sédiments en roches sédimentaires est appelé diagenèse.

Les grès sont des roches sédimentaires issues de la compaction de sables quartzeux le long des plages.

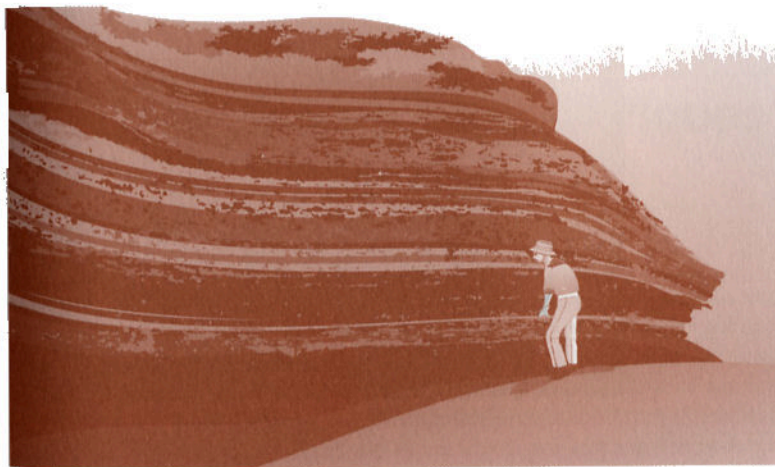
## 57 Qu'est-ce qu'une strate ?

Une strate est le fruit de l'accumulation de sédiments meubles sur une surface donnée. Ce processus d'entassement et de stratification est principalement perceptible dans les roches sédimentaires. Il s'agit de la superposition de couches (ou strates) de roches de nature différente ou similaire, mais mises en place à des périodes successives. Les causses du Massif central méridional sont une suite verticale de strates calcaires d'épaisseurs très variables (de quelques centimètres à plusieurs mètres) et déposées au fond d'une mer il y a 100 à 200 millions d'années. Généralement, la stratification est correctement lue et décryptée par tous les géologues. Toutefois, certains d'entre eux, les stratigraphes, en ont fait une discipline : la stratigraphie.

## 58 Qu'est-ce que la stratification des roches ?

>>> 2

Chacun d'entre nous a déjà eu l'occasion de remarquer que les strates rocheuses pouvaient s'empiler à la manière d'assiettes. Cette accumulation successive de strates en un seul endroit induit une notion fondamentale en géologie : la superposition. Ce concept



Un géologue devant une coupe stratifiée



primordial touche à la durée des temps géologiques, et implique que la strate la plus jeune se trouve au sommet de la pile alors que la plus ancienne s'observe à la base de l'empilement.

Il existe un second principe permettant de tirer quelques conclusions simples en n'utilisant que ses yeux. Il s'agit du principe d'horizontalité. D'une façon générale, les sédiments se mettent en place sur des surfaces horizontales, ou presque. Si une strate n'est pas trouvée dans cette position, on en déduit, selon sa nature, qu'elle a été chahutée postérieurement à sa formation par des phénomènes tectoniques (formation d'une montagne), ou encore qu'elle a été déplacée par un mouvement de terrain rapide ou lent.

#### EN APPARENCE, LA SCIENCE FRANÇAISE RESTE RELATIVEMENT ÉPARGNÉE PAR LE CRÉATIONNISME,

notamment les sciences de la Terre, alors qu'elles devraient y être particulièrement exposées. Pourtant, au début des années 1990, Guy Berthault (qui fit carrière dans la grande distribution), dans le but de démontrer que les principes de la stratigraphie étaient erronés, déclencha une polémique violente autour de ses conclusions, mais aussi de sa personnalité.

Guy Berthault préside l'association CESHE, Cercle historique et scientifique, dont l'ambition écrite est de « *réconcilier la science et la foi* ». Selon lui, les expériences qu'il a menées, selon des protocoles pourtant très discutables, pour démontrer le fourvoiement des fondements de la stratigraphie et de la géologie, tentent d'établir que les principes de superposition et d'horizontalité n'existent pas et ne peuvent être utilisés pour décrire une séquence stratigraphique.

Ainsi, dans la revue *Expériences* (1996), Guy Berthault déclarait : « *Je ne fais pas une œuvre fondamentalement religieuse, bien qu'elle ait été et demeure inspirée par ma préoccupation spirituelle, avec l'aide du Saint-Esprit, j'en suis convaincu. Mais je ne présente pas mon travail comme tel. Mon juge est Dieu, le reste est du vent !* »

L'ambition à peine masquée des créationnistes, et de Guy Berthault avec ses expériences réfutées depuis, est de déliter la théorie évolutionniste darwinienne et donc d'accréditer les écrits bibliques pour lesquels, d'une part, la Terre n'a pas 4,55 milliards d'années et, d'autre part, les espèces animales et végétales naissent spontanément.

Pour en savoir plus sur cette manœuvre où la religion commande à la science, consultez le site Internet à l'adresse suivante :

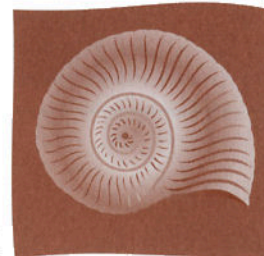
<http://www.charlatans.info/berthault.shtml>

## 59 Que peuvent contenir les roches sédimentaires ?

Des fossiles ! Des restes de vie animale et végétale parfois anciens de 600 millions d'années pour les plus vieux. La conservation de fossiles constitue la singularité des roches sédimentaires. Pour se former, les organismes végétaux et animaux doivent rencontrer des conditions que seules les roches sédimentaires offrent. Verra-t-on un animal tombé dans une coulée de lave être conservé et rendu plusieurs millions d'années plus tard ? Non, cela n'arrivera pas, car c'est impossible. En effet, l'organisme mort (ou vivant !) doit être recouvert rapidement de sédiments pour que ses parties dures (os, carapace) puissent être ensevelies et conservées, les parties molles étant rapidement détruites, sauf exception. Ce n'est qu'ensuite qu'un processus de minéralisation intervient et transforme les restes osseux en roches, tout en conservant fidèlement la morphologie du squelette.

Les roches métamorphiques\* peuvent renfermer quelques fossiles souvent très vieux. Les schistes, roches très peu métamorphosées, délivrent quelques trilobites (un arthropode de plus de 500 millions d'années).

Une ammonite



## Les roches magmatiques et métamorphiques

### 60 Qu'est-ce qu'une roche magmatique ?

Une roche magmatique est le produit des manifestations naturelles les plus spectaculaires de la nature engendrées par l'activité volcanique – que celle-ci ait lieu en surface avec les volcans ou dans les profondeurs de la croûte terrestre, loin de nos yeux. Le magma, qui naît en profondeur, est un mélange de roches en fusion et de gaz très chauds (souvent plusieurs centaines de

Émission de roches magmatiques depuis un volcan



degrés), animé d'un mouvement ascendant le menant presque irrémédiablement à la surface de la planète. Lorsqu'il arrive à proximité de son but, le magma se sépare en expulsant les gaz dans l'atmosphère, alors que la roche en fusion s'épanche parfois en de grandes coulées de lave. Les roches magmatiques sont donc associées à une activité volcanique.

Toutefois, certaines d'entre elles n'atteignent pas la surface et, au contraire, entament un processus de refroidissement très lent dans la croûte terrestre, après avoir été bloquées dans leur ascension. Ces roches magmatiques, aussi appelées « intrusives » ou « plutoniques », stagnent dans la croûte, cristallisent, se solidifient et forment à leur tour des roches connues de tous, tels les granites, les gabbros, ou encore la diorite.

Les roches magmatiques sont une grande famille de roches extrêmement diversifiée, dont on ne citera que les plus fameux représentants : les basaltes, l'andésite ou encore la trachyte.

## 61 Qu'est-ce qu'une roche métamorphique ?

>>> 62

Avant de définir ce type de roches, il faut préciser la notion de métamorphisme\*. Ce phénomène se produit au sein de la croûte terrestre et décrit les changements mécaniques et chimiques que subissent les roches enfouies, sous les effets conjoints de la pression et de la température. Le métamorphisme se produit en profondeur, de plusieurs kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres dans la croûte terrestre. Ainsi, une fois incorporées dans la lithosphère\* (par exemple à la suite de la formation d'une chaîne de montagnes), des argiles peuvent se transformer en schistes ou encore le calcaire devenir un marbre. Une roche magmatique comme le granite peut aussi être reprise et se transformer en une nouvelle roche appelée gneiss.

De ce fait, les roches métamorphiques marquent le recyclage permanent supporté par les roches sédimentaires et volcaniques, mais également métamorphiques, dans les premiers kilomètres de la croûte terrestre et du manteau supérieur. L'introduction de cette notion de métamorphisme induit l'idée du recyclage et de la formation des roches. Les géologues parlent de cycle des roches. Parmi ces roches, citons notamment les amphibolites qui initialement étaient des basaltes, les quartzites dont les sables et grès sont à l'origine, ainsi que les calcschistes issus de la transformation des marnes.

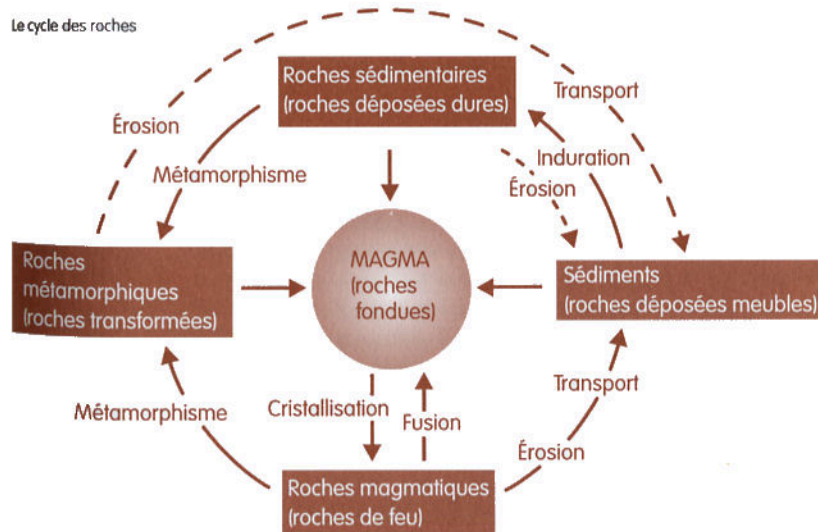
## La transformation des roches

### 62 Les roches se recyclent-elles ?

>>> 34

Oui, l'existence des roches métamorphiques\* induit l'existence d'un cycle très lent se déroulant sur des millions, voire des milliards d'années, pendant lequel les roches évoluent et passent d'un

Le cycle des roches



état sédimentaire à un état métamorphique puis à une phase magmatique. Il n'existe pas de constante dans ce cycle, aucun ordre naturel ne peut être tracé avec exactitude. Une roche volcanique, tel un basalte, épanchée sur la surface terrestre à la faveur d'une éruption, se refroidit et est immédiatement attaquée par des processus érosifs qui la désagrègent et la transforment en sédiments. Ces derniers, mêlés à d'autres issus d'une roche différente également détruite par l'érosion, se déposeront en un endroit précis, s'y accumuleront, se compacteront pour devenir de véritables roches sédimentaires compactes, comme un calcaire ou un grès. Bien plus tard, ces roches sédimentaires seront incorporées dans la croûte terrestre par le jeu des plaques tectoniques, où elles se transformeront en marbre ou en schiste avant d'être entièrement fondues et reprises sous forme de roches magmatiques.

Ce cycle des roches est continu et démontre que la Terre est une planète finie qui utilise ses propres ressources et moyens pour s'animer, ce qui contredit la théorie de l'expansion de la planète.

### 63 Existe-t-il des roches molles ?

Oui, les craies sont des calcaires dont certains font preuve de tendreté. Parmi ces craies, les diatomites (roche crayeuse issue de l'accumulation d'enveloppes de petites algues appelées diatomées) peuvent se déformer très facilement, rien qu'en exerçant une simple pression du pouce, surtout si elles sont imbibées d'eau.

### 64 Les roches ont-elles un goût ?

Oui, certaines, les roches hyalines (c'est-à-dire toutes celles de la famille des gemmes, aussi appelées sulfates de sodium ou encore tout simplement... sel), peuvent être goûtées pour en déterminer la nature. Goûter ne veut pas dire consommer ! Le géologue y pose sa langue mais ne se nourrit pas de minéraux...



Le goût salé de certaines roches !

### 65 La végétation et les animaux transforment-ils la roche ?

Non, végétaux et animaux ne peuvent pas transformer une roche en une autre, comme cela se produit dans le cycle des roches où les processus actifs ne sont que de nature géologique. En revanche, les roches peuvent être dégradées, voire détruites par les animaux fouisseurs ou bien les racines des plantes qui s'insinuent dans les fractures rocheuses et qui, peu à peu, altèrent la roche.

### 66 Quel est le plus gros monolithe au monde ?

Un monolithe peut être perçu comme un gros caillou homogène composé d'un seul type de roche. À ce titre, le « plus gros caillou » au monde se trouve en Australie (24° 19' 05" S – 116° 49' 35" E). Il est baptisé mont Augustus, mesure 825 m de haut et couvre une superficie d'environ 48 km<sup>2</sup> (soit près de la moitié de la superficie de Paris). Géologiquement, il est uniquement composé de grès vieux de 1,8 milliard d'années. Jusque récemment, c'est le mont Uluru (de son ancien nom Ayers Rock), également en Australie, qui était considéré comme le plus gros monolithe sur Terre, en dépit de ses dimensions deux fois inférieures à celles du mont Augustus.

### 67 Les roches peuvent-elles se déformer ?

>>> 167

Bien qu'elles cassent, les roches peuvent se déformer et, paradoxalement, apparaître comme de fines draperies. Pour le constater, il suffit d'emprunter les routes de montagne. Assez régulièrement, dans les régions aux reliefs accidentés, les versants montrent des figures géométriques donnant l'impression que les roches ont été étirées et pliées. Ces figures sont dues aux forces tectoniques, par exemple celles existant entre l'Afrique et l'Europe, qui engendrent la formation de montagnes. Ainsi, la plupart des roches cassent alors que d'autres, voire les mêmes selon les conditions, se rabattent sur elles-mêmes ou « s'enroulent », parfois sur des kilomètres de longueur. Un exemple fameux de roches plissées est le Chapeau de Gendarme situé sur la commune de Septmoncel (Jura).

## 68 Quelle est la roche la plus commune sur Terre ?

>>> 85

Il est difficile de définir la nature de la roche la plus répandue à la surface du globe. Le basalte et le granite sont réputés être les roches les plus communes : le basalte tapisse les fonds marins grâce aux longues chaînes volcaniques qui zèbrent les fonds océaniques.

Le granite est également une roche magmatique, mais qui se rencontre sous forme d'intrusions parfois géantes après avoir perforé la croûte terrestre.

## 69 Existe-t-il des roches en formation aujourd'hui ?

Oui. Pour observer ce processus, il faut considérer le début de la dégradation des roches par des agents d'érosion comme le gel, qui harcèle notamment les contreforts calcaires des Alpes. La roche est démantelée, se morcelle et tombe le long des versants montagneux. Il s'agit de la première étape de la formation de nouvelles roches conglomératiques. Une eau chargée en silice viendra cimenter le dépôt pour former une brèche compacte en amont, alors qu'à l'aval les particules argileuses les plus fines (millimétriques à micrométriques) seront transportées par le Rhône et en atteindront le delta. Ces argiles se déposeront sur le fond marin, se compacteront, expulsant l'eau qu'elles contiennent, et se transformeront finalement en roches calcaires. Bien que ce processus soit très lent et invisible à l'échelle d'une vie humaine, on peut en observer des étapes distinctes dans plusieurs endroits du globe, souvent en milieu marin.

## L'usage des roches par l'homme

### 70 Les roches ont-elles des effets vertueux pour la santé humaine ?

S'ils existent, ces effets ont beaucoup à voir avec l'effet placebo qu'ils provoquent chez ceux qui espèrent fortement un bénéfice pour leur santé précaire. Malheureusement, la crédulité, et souvent le malheur des uns, fait naître une inspiration mercantile prolifique chez d'autres, qui en retirent une prospérité matérielle scandaleuse. La lithothérapie ou « santé par les pierres », voilà une idée que ces marabouts mettent à profit pour dépouiller leurs victimes.

Non, les roches n'ont pas d'effets vertueux démontrés pour la santé humaine.

### 71 Depuis quand l'homme utilise-t-il les roches pour son usage ?

En Éthiopie et en Tanzanie, notamment dans la vallée de l'Omo, sur les sites d'Olduvai, de Koobi-Fora et de Gona-Hadar, les paléoanthropologues (spécialistes de l'évolution humaine) pensent avoir découvert les plus vieux outils au monde. Il s'agit de galets taillés par coups portés pour que les bordures soient tranchantes. Leur longueur est modeste, à peine quelques centimètres. Ces galets, aussi appelés « *choppers* », ont été aménagés il y a 2,3 à 2,6 millions d'années, possiblement par notre ancêtre *Homo habilis*.

# Une planète endiablée

Qui n'a jamais été frappé par l'étonnante et étrange correspondance des côtes africaines et sud-américaines à la vue d'un planisphère ? Ce constat peut être fait pour d'autres littoraux géographiquement opposés. Madagascar peut être « recollée » à la côte est-africaine, ou encore l'Australie peut s'emboîter contre l'Antarctique. Ce constat, plate-forme de la plus grande révolution géoscientifique du xx<sup>e</sup> siècle, équivaut à la découverte de l'ADN ou encore à l'écriture de la théorie de la relativité restreinte. Cette théorie que l'on nomme « dérive des continents » offre aux géologues la possibilité d'expliquer des faits d'une façon satisfaisante, et permet de considérer les phénomènes géologiques à l'échelle de la Terre.



Portrait d'Alfred Wegener (1880-1930)

## Tectonique des plaques et dérive des continents

### 72 Qu'est-ce que la «tectonique des plaques\*» ?

La théorie scientifique de la «tectonique des plaques» s'appuie sur le concept brillant et les preuves qui lui sont associées que la croûte terrestre (ou lithosphère\*) est morcelée en plaques mobiles indépendantes. Ces plaques lithosphériques\* ont des superficies souvent équivalentes à plusieurs dizaines de millions de km<sup>2</sup> et se déplacent à des vitesses de quelques centimètres par an. Sur leurs bordures, les plaques sont limitées par des frontières où la croûte terrestre se fabrique (les dorsales\* océaniques) ou est détruite (les subductions\*).

### 73 Qu'est-ce qu'une plaque lithosphérique\* ou plaque tectonique ?

Imaginons la Terre comme un puzzle, dont les pièces aux silhouettes changeantes et mobiles s'emboîteraient continuellement depuis au moins 4 milliards d'années. Les plaques tectoniques sont des compartiments rigides de la croûte terrestre, variablement épais de quelques kilomètres à des dizaines de kilomètres. Une plaque tectonique est composée de deux types de croûtes. Il existe une croûte nommée «océanique», non parce qu'on la trouve en grande majorité sur les fonds marins, mais à cause des roches essentiellement composées de basaltes, donc des roches plutôt denses et lourdes. Le mécanisme à l'origine de la création de croûte océanique est appelé «océanisation\*». Le second type de croûte se réfère aux roches formant les continents, des roches comme le calcaire, peu denses et moins lourdes que celles armant la croûte océanique. Une plaque tectonique est donc l'addition de ces deux types de croûte.

### 74 De quoi se compose une plaque lithosphérique\* ?

De roches, mais qui diffèrent d'une croûte à l'autre. Dans les sections de croûte continentale des plaques, le granite et les

sédiments consolidés dominent. À l'inverse, la croûte océanique est composée majoritairement de basaltes, sur lesquels reposent des roches sédimentaires en formation.

### 75 Combien existe-t-il de plaques tectoniques ou plaques lithosphériques\* ?

Il y a 15 grandes plaques tectoniques : antarctique, arabe, pacifique, eurasienne, africaine, de Juan de Fuca, indienne, australienne, d'Amérique du Nord, d'Amérique du Sud, de Nazca, des Philippines, des Cocos, de Scotia et des Caraïbes.

Dans le détail, ces immenses plaques sont morcelées en 39 microplaques singulières. Parmi elles, les géologues ont identifié la microplaque de la mer Égée, celle des Galápagos, celle de Kermadec, ou encore la microplaque iranienne.

À proximité de la France, la microplaque italienne peut être considérée comme indépendante, bien que géologiquement rattachée à la plaque africaine.

Depuis quelques années, les géologues identifient ces microplaques en bordure des grandes plaques tectoniques, révélant que les frontières entre celles-ci ne sont pas aussi bien dessinées qu'on le pensait.



- 1 - Plaque eurasienne
- 2 - Plaque des Philippines
- 3 - Plaque australienne
- 4 - Plaque antarctique
- 5 - Plaque de Nazca
- 6 - Plaque d'Amérique du Sud
- 7 - Plaque d'Amérique du Nord
- 8 - Plaque des Caraïbes
- 9 - Plaque Juan de Fuca
- 10 - Plaque des Cocos
- 11 - Plaque de Scotia
- 12 - Plaque du Pacifique
- 13 - Plaque africaine
- 14 - Plaque arabe
- 15 - Plaque indienne

Géographie des plaques lithosphériques

## 76 La croûte terrestre est-elle constituée des mêmes plaques lithosphériques\* depuis qu'existe la dérive des continents?

&gt;&gt;&gt; 75

Non, la croûte terrestre se recycle continuellement depuis plus de 4 milliards d'années par la fabrication et la destruction permanentes des plaques qui la constituent. Aujourd'hui, la plus grande plaque tectonique est celle qui forme le fond de l'océan Pacifique. En revanche, les plaques des Cocos et de Nazca, qui encadrent l'Amérique centrale, sont en voie de destruction complète, à l'instar de celle de Juan de Fuca, au large de la frontière occidentale américano-canadienne.

Les scientifiques s'affrontent pacifiquement sur le début de la dérive des continents. Pour certains, des indices évidents démontrent que cette dérive existait déjà il y a 4 milliards d'années. En revanche, pour d'autres, l'activité terrestre interne était telle qu'aucune activité tectonique n'a pu aboutir à une dérive stable et régulière des continents. La vérité pourrait être entre les deux, avec une dérive des continents précoce, mais plus rapide et vigoureuse, et dont les chocs interplaques herculéens ont pu engendrer une activité sismique et volcanique inimaginable.

## 77 Y a-t-il une différence entre les notions de «tectonique des plaques» et de «dérive des continents»?

Non, la deuxième appellation est davantage «géopoétique» alors que la première est celle que les géologues appliquent à cette théorie. Ces deux expressions se réfèrent donc au même phénomène de mobilité et de déformation de la croûte terrestre.

# Alfred Wegener et ses héritiers

## 78 Qui est à l'origine de la théorie de la dérive des continents?

C'est Alfred Wegener, un météorologue allemand (1880-1930), qui proposa les fondements de cette théorie. En 1915, il publie

*La Genèse des continents et des océans (Die Entstehung der Kontinente und Ozeane)*, réédité trois fois jusqu'en 1929 avec de nombreuses traductions. Cependant, la théorie de Wegener, qui induit une refonte complète, va à l'encontre de l'orthodoxie géologique de l'époque, qui s'y oppose abruptement. Durant près de vingt ans, Wegener s'attache à collecter des preuves géologiques et paléontologiques appuyant sa théorie, sans parvenir à déterminer le moteur de la mobilité des continents. Il meurt en mission sur l'inlandsis groenlandais en 1930. Cette révolution scientifique connaîtra un second souffle dans les années 1960 et 1970, grâce à la découverte de l'expansion des fonds océaniques.

## 79 Avant la dérive des continents, quelle était la vision géologique globale?

Les géologues fixistes n'admettaient pas que les continents puissent être mobiles. Ainsi, la formation des montagnes, pour laquelle la dérive des continents apporte maintenant une explication fiable, était supposée être due au refroidissement de la croûte terrestre, et les plissements étaient attribués à la contraction des roches sur elles-mêmes.

Des corrélations paléontologiques entre les continents avaient déjà été notées par le géologue autrichien Eduard Suess (1831-1914). Il développait sa théorie en imaginant des passerelles naturelles et résiduelles entre les continents, à une époque où ceux-ci étaient bien plus étendus avant qu'ils ne s'effondrent.

Le géologue français Marcel Bertrand (1847-1907) pensait que les chaînes de montagnes américaines et européennes étaient reliées à travers l'Atlantique. Il reprenait l'idée de l'effondrement général de l'océan Atlantique, mais ne songeait pas, à l'instar d'Eduard Suess, à une éventuelle mobilité des continents, comme le proposera Wegener.

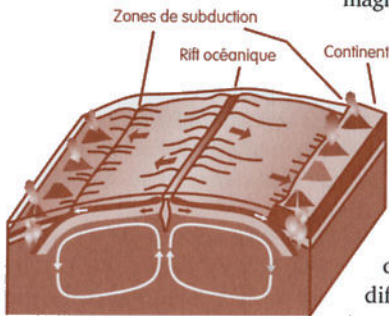
En 1910, le géologue américain Frank B. Taylor propose que les montagnes andines et rocheuses le long de la façade pacifique sont nées du glissement des continents, ayant engendré un plissement général le long des deux continents américains. À cet argument, il ajoute l'habituelle mais toujours frappante similarité des côtes africaines et sud-américaines. Il semblerait que Alfred Wegener n'eut pas été au courant des travaux de son homologue américain.

## Les preuves de la dérive des continents

### 80 Comment a-t-on définitivement mis en évidence la théorie de la dérive des continents ?

>>> 85 Durant la Seconde Guerre mondiale, les militaires avaient remarqué que les fonds marins présentaient des aimantations, qui ne furent expliquées qu'en 1962 par le géologue américain Harry Hess, les Anglais Fred Vine et Drummond Matthews (1963), puis enfin le géologue canadien Tuzo Wilson en 1965. En se fabriquant, la croûte océanique basaltique adopte l'aimantation du champ

magnétique\* terrestre régnant à cette époque :



Formation de la croûte océanique dans un rift

en fonction de cette aimantation, les minéraux qui lui sont sensibles (notamment la magnétite) s'orientent dans la direction du champ magnétique et conservent cette position en se figeant. Par conséquent, les minéraux contenus dans certaines laves basaltiques indiquent une orientation vers le sud alors que d'autres, dans des coulées de lave différentes, ont adopté une aimantation inverse. Ce phénomène est révélateur de

l'existence d'un tapis roulant géologique qui produit de la croûte océanique en permanence de part et d'autre des dorsales\*. À mesure que la nouvelle croûte océanique est fabriquée, elle remplace l'ancienne qui est chassée vers les marges. Outre ce mécanisme puissant, les géologues ont pu mettre en évidence qu'il n'existe pas de croûte océanique (à l'exception des lambeaux fossiles écaillés sur les continents) plus vieille que 200 millions d'années. Notons que les grandes révolutions scientifiques font rarement l'unanimité, puisqu'elles forcent beaucoup de savants à remettre en cause leurs travaux et méthodes. Cette opinion est sous-tendue par la citation du géologue R. T. Chamberlin lors d'une contribution intitulée *Quelques objections à la théorie de Wegener*, délivrée pendant un congrès consacré à la dérive des continents en 1928 : « Si nous croyons l'hypothèse de Wegener, nous

devons oublier tout ce que nous avons appris dans les soixante-dix dernières années et retourner sur les bancs de l'école<sup>1</sup>. »

La dérive des continents a donc été contestée, voire raillée jusque dans les années 1970, et les scientifiques cités plus haut ont en commun d'avoir été quelque peu écartés, voire isolés de la communauté scientifique d'alors. Toutes ces contributions individuelles ont permis d'élaborer la théorie que l'Anglais Arthur Holmes (1890-1965), un géologue pionnier oublié, avait pressentie dès 1945 en proposant un modèle d'expansion des fonds océaniques, entraînée par de grands courants de convection dans le manteau, lui-même alimenté par la chaleur rayonnante du noyau terrestre. L'ultime chapitre de son ouvrage *Principles of Physical Geology* (1944) conclut sur une ébauche solide de la dérive des continents.

### 81 Quelles sont les preuves de la dérive de continents ?

Elles sont de plusieurs ordres et toutes convergent. Le premier argument est géométrique, avec la similitude des côtes sud-américaines et africaines, donnant l'impression qu'elles peuvent s'emboîter. Ce constat peut être réalisé pour d'autres littoraux distants et opposés. Le deuxième argument est géologique, et tient à la nature pétrographique des roches de part et d'autre de l'Atlantique. De très vieilles roches d'environ 2 milliards d'années (des cratons) constituent les cœurs des continents africain et sud-américain. En accolant les deux blocs continentaux, les deux cratons n'en forment plus qu'un. Cet argument géologique concorde également avec de vieilles chaînes de montagnes dont on retrouve les racines en Mauritanie, Amérique du Nord et en Europe avec le Massif central et qui, il y a 300 millions d'années, n'en formaient qu'une (la chaîne Hercynienne), courant sur les continents agrégés en un seul bloc. Le troisième type d'argument réside dans les fossiles, là aussi collectés sur les deux rivages de l'Atlantique. Les faunes et flores fossiles retrouvées en Amérique du Nord et en Europe, en Afrique et en Amérique du Sud et enfin en Australie, Afrique du Sud et Inde offrent des similarités confondantes que seul un rassemblement de ces masses continentales permet d'expliquer.

1 - Thomasson F., Cartigny P., Viljoen K. S., Harris J. W., « Methane-related diamond crystallization in the earth's mantle », *Earth and Planetary Science Letters* 257, 2007, pp. 362-371.  
R. T. Chamberlin, « Some of the objection to Wegener's Theory », in W. A. Van Waterschoot Van Der Gracht, *Theory of continental drift : a symposium*, Tulsa, American Association of the Petroleum Geologists, 1928, p. 87.



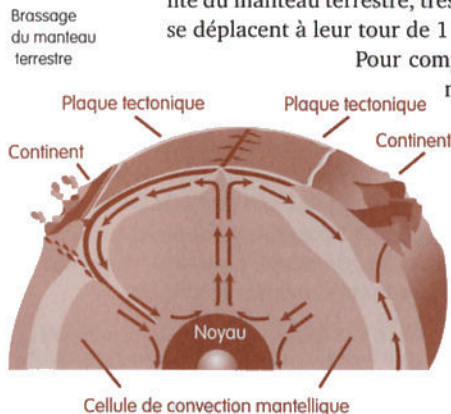
Dernier argument : la paléoclimatologie. Wegener était météorologue et, à ce titre, a mené plusieurs expéditions polaires au Groenland. Son expérience et son intuition l'ont amené à remarquer que de très vieux dépôts glaciaires de la même période carbonifère (300 millions d'années) recouvraient certaines régions méridionales en Amérique du Sud, Afrique et Australie. Cette concordance géologique a logiquement conduit Wegener à recoller les continents pour n'en faire plus qu'une masse unique.

## Le moteur de la dérive des continents

### 82 Quel est le moteur qui enclenche et entretient le déplacement des plaques lithosphériques\* ?

La source d'énergie qui initie et entretient le mouvement des plaques se trouve dans le noyau terrestre. Énorme usine produisant de la chaleur par désintégration des éléments radioactifs (dont de l'uranium), ce carburant naturel génère de l'énergie qui se dissipe à travers le manteau et le met en mouvement dans de grands courants de convection verticaux. Cette mobilité du manteau terrestre, très modérée, agit sur les plaques, qui se déplacent à leur tour de 1 à 15 cm par an.

Pour comprendre ce qui se produit dans le manteau, il suffit de prendre une casserole remplie d'eau teintée avec un colorant et posée sur une source d'énergie comme un feu. Immédiatement, des courants de convection ascendants et descendants apparaîtront dans la casserole. Cette petite reconstitution donne une idée générale de ce qui se passe dans le manteau terrestre brassé par des mouvements similaires.



### 83 À part la mobilité du manteau, quels phénomènes sont en jeu dans le mouvement des plaques ?

>>> 86, 17

Selon quelques scientifiques, les plaques lithosphériques\* pourraient entretenir leur propre translation grâce à la gravité au niveau des zones de subduction\*.

- ▷ En plongeant dans le manteau pour atteindre la limite avec le noyau, les plaques lithosphériques adopteraient une pente pouvant aller jusqu'à 40°. La plaque lithosphérique pourrait être entraînée par sa propre masse dans le manteau terrestre. Ainsi, selon une hypothèse, la pente de la section engloutie dans le manteau est plus forte ; la translation horizontale en surface de la section encore libre de la plaque lithosphérique est plus rapide.
- ▷ Une seconde hypothèse s'appuie sur des propositions numériques générées à partir de modèles informatiques et mathématiques obtenus en laboratoire et couplées à des images sismiques acquises sur le terrain. Le modèle alternatif qui en est issu avance qu'une convection dite « en dômes » se forme conjointement sous les océans Pacifique et Atlantique, où deux grands panaches de chaleur en forme de dôme engendreraient des courants convectifs ascendants. En revanche, de part et d'autre de ces dômes de chaleur, les plaques lithosphériques, grâce à leur mouvement plongeant, alimenteraient aussi leur propre déplacement en surface.

### 84 Comment constater le mouvement des plaques lithosphériques\* en surface ?

On mesure le mouvement des plaques lithosphériques\* grâce à des appareils électroniques dotés d'une précision millimétrique redoutable. Ces appareils reposent sur la technologie fiable du GPS (*Global Positioning System*). L'une des méthodes s'appuie sur le recours aux astres dont les radiotélescopes captent les ondes, notamment celles de sources d'énergie électromagnétique (quasars). Une fois reçus par plusieurs récepteurs terrestres, ces signaux sont comparés et corrigés. Dans un second temps, on déduit le mouvement des radiotélescopes les uns par rapport aux autres et par conséquent celui des plaques lithosphériques. Sur le terrain, on évalue instantanément le mouvement, parfois quotidiennement, grâce à des mesures réalisées avec des lasers sur des balises fixes. Une cible située sur un versant de montagne,

par exemple, est visée avec un laser. Cette technique est utilisée en Afrique de l'Est dans l'Afar, où une dorsale\* océanique émerge et écarte la croûte terrestre.

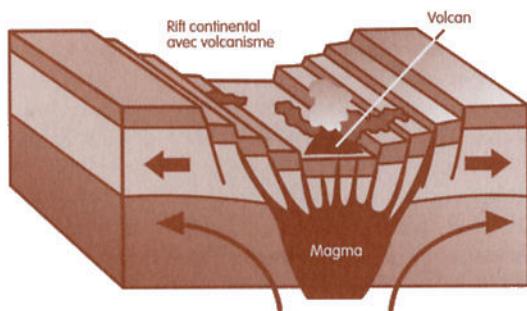
Des données géologiques permettent de reconstituer la célérité du déplacement des plaques grâce aux points chauds\* dont on connaît les âges des formations volcaniques, apparues successivement le long d'un même tracé. Ainsi, le point chaud à l'origine de la formation de l'archipel hawaïen a permis de préciser le sens de déplacement et la vitesse de la plaque pacifique. Cette méthode a montré que la plaque pacifique a fait l'objet d'une rotation de 41° dans le sens des aiguilles d'une montre.

## Formation et destruction des plaques tectoniques

### 85 Comment naissent les plaques lithosphériques\*?

C'est un processus volcanique qui est à l'origine de la création des plaques lithosphériques au niveau des dorsales\* océaniques, où l'on estime que la quantité de basaltes émis est d'environ 20 km<sup>3</sup>/an. Ces dorsales sont des chaînes volcaniques qui ceignent la Terre et sillonnent l'ensemble des fonds océaniques sur 60 000 km, et à partir desquelles les plaques lithosphériques naissent et divergent.

Un rift océanique vu en coupe



La croûte océanique, de nature surtout basaltique, dense et donc lourde, est fabriquée au niveau de ces dorsales. Elles peuvent être considérées comme les sources des plaques lithosphériques et indiquent un mouvement divergent. Le meilleur exemple est

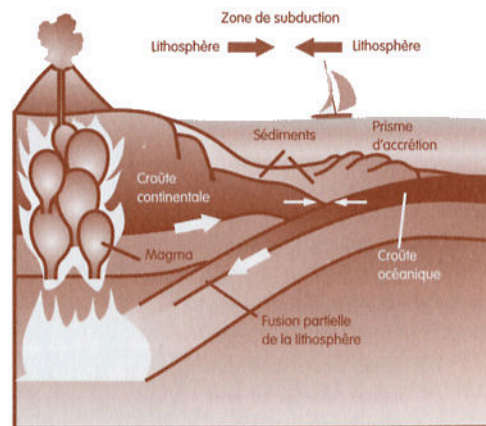
la dorsale médio-atlantique, qui émerge au niveau de l'Islande sur quelques dizaines de kilomètres avant de replonger dans l'Atlantique au nord et au sud.

### 86 Comment disparaissent les plaques lithosphériques\*?

>>> 50

Puisque les plaques lithosphériques sont en extension permanente, qu'elles se déplacent et que la Terre ne croît pas en volume, il faut bien envisager qu'elles soient détruites pour obtenir un bilan nul. Ce phénomène se déroule le long des frontières où les plaques convergent et a lieu plus précisément dans ce que l'on nomme une zone de subduction\*. En général, les zones de subduction coïncident avec des fosses océaniques, telle celle des Mariannes, dont la profondeur oscille aux alentours de 11 000 m. Schématiquement, la croûte océanique lourde plonge sous une croûte plus légère, souvent de nature continentale.

En raison de leur densité plus forte, les plaques lithosphériques composées de croûte océanique se fauillent dans le manteau selon une pente variant entre 20° et 45°. La croûte océanique est alors consommée, fondue dans le manteau, et les roches qui la constituaient sont recyclées. Notons que les plans de subduction peuvent atteindre la limite noyau-manteau. À l'aplomb



Destruction d'une plaque lithosphérique

de la subduction, une chaîne de montagnes (Andes) ou un arc insulaire (archipel japonais) ponctués de volcans peuvent apparaître.

### LES ZONES DE SUBDUCTION OU COMMENT ÉLIMINER NOS DÉCHETS RADIOACTIFS !

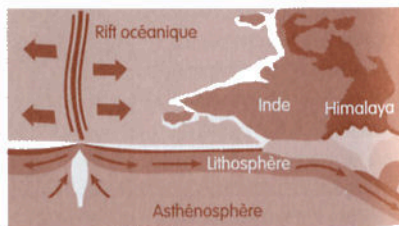
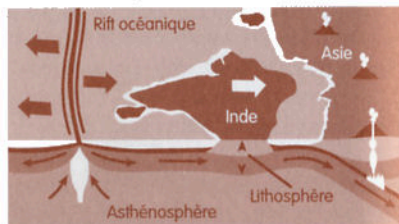
Le 6 avril 2000, lors d'une séance de débat au Sénat consacrée au stockage des déchets radioactifs, Michel Moreigne, sénateur de la Creuse, en prenant appui sur les recherches effectuées par le CNRS, proposa l'idée d'enfouir les déchets radioactifs ultimes dans les zones de subduction. Bien que l'intervention de ce sénateur ait été applaudie par la travée socialiste de la commission, le ministre de la Recherche Roger-Gérard Schwartzberg ne tint pas à reprendre cette idée dans ses conclusions. Le sénateur a tout de même tenu à lui transmettre la photocopie d'un article étayant l'idée qu'il avait soumise. Le ministre répondit fermement et indirectement au sénateur que la loi Bataille le forçait à envisager plutôt des stockages profonds en domaines argileux et granitiques.

Depuis 2000, des conventions internationales interdisent l'enfouissement des déchets dans les zones de subduction, en raison des recherches trop faiblement étoffées dans ce domaine, mais aussi et surtout en raison des dangers que représenterait un retour de ces déchets en surface s'ils n'étaient pas enfouis et désintégrés dans le manteau terrestre.

## 87 Qu'advient-il quand deux plaques lithosphériques\* s'affrontent sans qu'aucune ne prenne le dessus ?

>>> 86

Même si la théorie distingue les frontières convergentes de celles qui divergent, il arrive que la confrontation entre plaques ne soit pas aussi simple. Ainsi, lorsque deux plaques constituées de croûte continentale s'affrontent, il n'est pas possible, en raison de leur légèreté, que l'une des deux plonge et soit consommée dans



Collision entre l'Inde et l'Asie

une subduction\*. On parle alors de collision\*. L'une en vient à chevaucher l'autre, qui ne s'enfonce pas dans le manteau pour y fondre : les deux croûtes continentales s'affrontent et, à l'endroit du contact, peut se former une chaîne de montagnes (Alpes, Himalaya).

D'autre part, il arrive que de la croûte océanique ne s'enfonce pas sous de la croûte continentale après la survenue d'un blocage dans cette mécanique géologique. On parle alors d'obduction\*, lorsqu'une section de croûte océanique finit par en chevaucher une autre de nature continentale.

## Mobilité et vitesse de déplacement des continents

## 88 Peut-on reconstituer le visage de la Terre grâce au déplacement des continents ?

>>> 81, 85

Bien que cela ne soit pas simple, il est tout à fait possible de proposer des schémas globaux de déplacement des plaques lithosphériques\* sur plusieurs centaines de millions d'années. À cette fin, le docteur Christopher R. Scotese, de l'université d'Arlington (Texas), a produit un site Internet riche reprenant la paléogéographie de la Terre depuis 1,1 milliard d'années ([www.scotese.com](http://www.scotese.com)). Il n'est pas le seul à accomplir cet exercice, puisque le premier qui s'y prêta fut le professeur Xavier Le Pichon (actuellement au Collège de France), dès 1968.

La Terre a présenté des visages très variés durant son existence, révélant ainsi que la disposition actuelle des continents est, à l'échelle géologique, éphémère.

Ainsi, il y a 1,1 milliard d'années, les continents étaient soudés entre eux dans l'hémisphère Sud et bordés par un seul océan, nommé la Panthalassa. Ce premier supercontinent a été appelé Rodinia. Des géologues pensent avoir identifié des fragments de ce supercontinent en Amérique du Nord. Il y a environ 750 millions



Les continents il y a 250 millions d'années

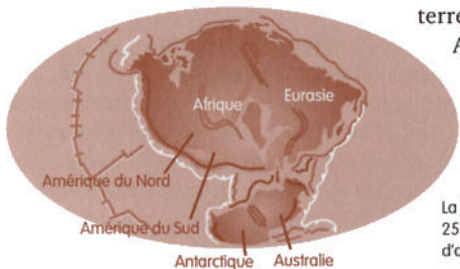
d'années, Rodinia a commencé à se fracturer en de multiples blocs continentaux qui ont divergé et se sont éloignés. Il y a 300 millions d'années, un nouvel épisode de rassemblement des continents a eu lieu. Les géologues l'ont appelé la Pangée et le connaissent mieux. Là aussi, la dérive des continents étant toujours active, ce supercontinent centré sur l'équateur, à cheval sur les deux hémisphères, s'est morcelé il y a 200 millions d'années. Les continents se sont éloignés, séparés par des dorsales\* océaniques, jusqu'à adopter les positions géographiques que nous leur connaissons.

## 89 Les continents se rassembleront-ils à nouveau un jour ?

>>> 88

Oui, très certainement : tant que la dérive des continents sera alimentée par la chaleur rayonnante du noyau terrestre et diffusée au travers du manteau, la croûte terrestre restera agitée et mobile.

Ainsi, le modèle de Christopher R. Scotese conjecture un nouveau rassemblement des continents dans environ 250 millions d'années.



La Terre dans 250 millions d'années

## 90 À quoi pourrait ressembler la Terre dans 50 millions d'années ?

La Méditerranée aura disparu car l'Europe aura été percutée par l'Afrique qui, dans son mouvement, pourrait provoquer une rotation dans le sens horaire de la péninsule Ibérique. À la place de la Méditerranée devrait exister une chaîne de montagnes remaniant en partie les Alpes en les prolongeant. Paris (s'il existe encore !) se trouverait sur la position géographique de

l'actuelle ville de Moscou. L'Australie aura fusionné avec la Nouvelle-Guinée. L'Antarctique pourrait entamer sa remontée vers le nord, se séparant d'une partie de ses glaces si l'inlandsis parvient à résister d'ici là. L'Atlantique se sera élargi.

## 91 Quel sera le visage de la Terre dans 100 millions d'années ?

>>> 88, 90

Le modèle de Christopher R. Scotese table sur l'apparition de zones de subduction\* le long de la côte est du continent nord-américain, provoquant ainsi un début de rétraction et de fermeture de l'océan Atlantique. L'Afrique aura continué son chemin vers le nord et la chaîne des monts méditerranéens aura poursuivi sa croissance verticale. La mer Rouge sera fermée et l'équateur passera sur les zones correspondant à l'Afrique du Sud. Bizarrement, l'Amérique du Sud aura peu bougé ; les seules modifications l'affectant pourraient être, là aussi, l'apparition de zones de subduction le long de ses côtes orientales. L'Antarctique aura rejoint l'Australie, dont la suture avec la Nouvelle-Guinée pourrait avoir fait émerger une nouvelle chaîne de montagnes. Enfin, l'équivalent du territoire français naviguerait du côté du cercle polaire, pendant que la péninsule Ibérique boulinguerait au large de la Bretagne. Mais n'oublions pas que ce modèle de Scotese est une interprétation scientifique et non une prédiction !

## 92 Peut-on voir à l'air libre des limites de plaques tectoniques\* ?

Elles sont rares. Les deux endroits les plus fameux sont l'Islande, où la dorsale\* médio-atlantique émerge, et le triangle des Afars, entre Djibouti et Éthiopie.

En Islande, la dorsale médio-atlantique émerge sur 26 000 km<sup>2</sup>, soit un quart de la surface totale de l'île. Cette ride médio-atlantique se dévoile et offre le spectacle récurrent d'un volcanisme basaltique peu explosif mais spectaculaire. Environ tous les cinq ans se produit une éruption volcanique (130 éruptions recensées depuis l'an 900). La plus spectaculaire fut celle qui, en 1996, provoqua la fonte d'une partie du soubassement du glacier Vatnajökull, et dans la foulée des inondations catastrophiques.



Géologue  
enjambant  
une faille de rift

La dernière manifestation volcanique majeure fut celle du Laki en 1783, avec l'ouverture d'une fissure longue de 25 km et l'émission de 12 km<sup>3</sup> de laves. Ainsi, l'Islande s'élargit latéralement de 2 cm par an selon le taux d'ouverture moyen de l'océan Atlantique.

Le triangle des Afars est aussi un endroit où l'on peut observer directement le processus d'océanisation\*.

Cette région est considérée comme le point de départ de la grande vallée du Rift\* africain, qui se prolonge sur 3 500 km dans la partie méridionale de l'Afrique, et qui abrite notamment la région des Grands Lacs (Malawi, Tanganyika). Le triangle des Afars est une déchirure géologique où la croûte terrestre est effondrée et se situe au-dessous du niveau de la mer, toute proche. Cette vallée tectonique est bordée par des grands volcans (Erta-Ale et Kilimandjaro) et pourrait préfigurer l'ouverture d'un futur océan, provoquant ainsi la séparation puis l'éloignement de la partie orientale de l'Afrique (Madagascar, Éthiopie, Djibouti, Érythrée, Somalie, Kenya et Tanzanie) du reste du continent.

En Europe, un tel processus d'océanisation (aussi appelé « *rifting* ») pourrait avoir vu le jour et s'être bloqué il y a quelques millions d'années. Les géologues ont reconnu des bassins effondrés dans la croûte terrestre : bassins de la Ruhr, de Bohême, d'Alsace, de Bresse et des Limagnes auvergnates. Tous ces bassins (ou « *grabens* ») sont regroupés sous l'expression Rift ouest-européen et ont été accompagnés d'une activité volcanique (chaîne des Puys, Vogelsberg, Cantal, Devès, Velay). Si ce processus avait persisté, nous aurions pu avoir une véritable mer reliant la Méditerranée à la mer du Nord.

### 93 La dérive des continents s'arrêtera-t-elle un jour?

>>> 188

Oui, à mesure que le noyau dépense son potentiel énergétique par épuisement du combustible naturel, le manteau devrait gagner en viscosité, ralentissant de fait les courants convectifs et, par conséquent, la dérive des continents. Ce ralentissement, voire l'arrêt de la tectonique des plaques\*, figerait la planète

définitivement et aurait un impact irréparable sur la vie géologique et biologique en surface. Ainsi, le volcanisme disparaîtrait tandis que la température de l'atmosphère, en partie conditionnée à l'ajout de particules volcaniques qui refroidissent le climat terrestre, augmenterait, mettant en péril de très nombreux écosystèmes. De plus, la vie géologique de surface, cadencée par le changement des paysages et l'érosion, ralentirait fortement. Ainsi, des paysages se figeraient jusqu'à être gommés en douceur par les agents de l'érosion.

### 94 Existe-t-il une alternative à la théorie de la dérive des continents?

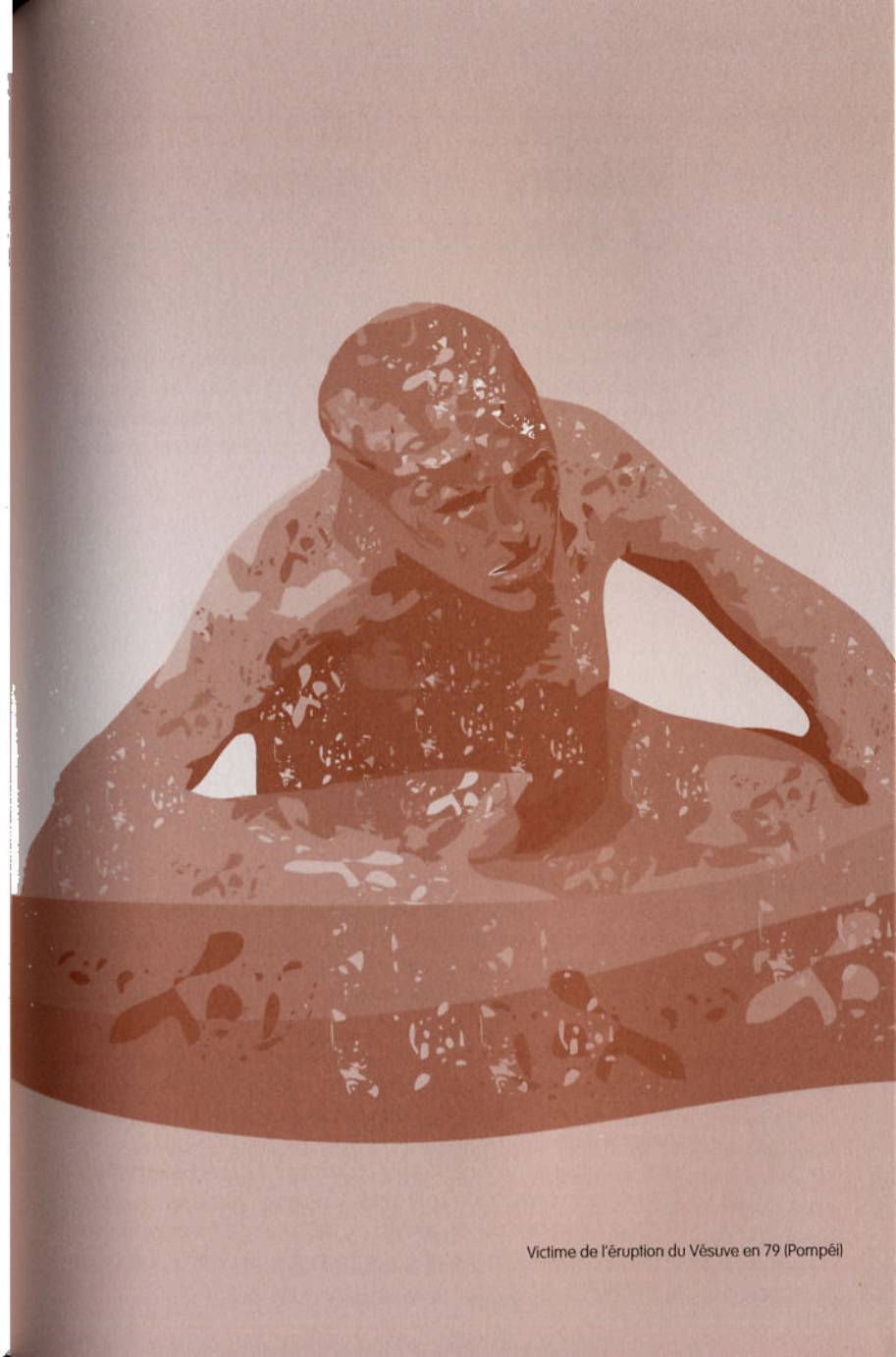
Comme toutes les théories séduisantes auxquelles le taux d'adhésion des scientifiques est élevé, le danger réside dans une éventuelle transformation en dogme contre lequel la critique deviendrait illusoire. En dépit de cette précaution, il n'existe pas aujourd'hui d'alternative à cette théorie, dont l'avantage majeur est de proposer une explication globale et cohérente du fonctionnement de la planète, étayée par des éléments de preuves indéniables. Quelques scientifiques tentent d'évoquer une théorie, complémentaire par certains aspects et concurrente par d'autres, et qui repose sur l'idée d'expansion du globe terrestre. Cette théorie, dont les bases ont été posées en 1938, envisage que la Terre a augmenté de volume depuis sa formation, et que ce processus se poursuit encore. Les continents auraient divergé dès leur prime apparition. Depuis, grâce à l'expansion du manteau et du noyau, les continents s'éloigneraient, à l'image de polygones dessinés sur la surface d'un ballon de baudruche que l'on gonflerait. Les tenants de cette théorie n'ont pas encore pu présenter les preuves de leur proposition scientifique.

# Le volcanisme

---

Lorsque l'on évoque la géologie en public, il arrive qu'elle soit rapidement réduite à la vision d'un volcan, de préférence en éruption. Cette conception très dynamique de la géologie est flatteuse et nous avons souhaité consacrer un chapitre à la volcanologie, bien que celle-ci soit une discipline à part entière.

Les volcans sont des paradoxes. Ils donnent la vie, l'entretiennent grâce à la fertilité de leurs sols, mais peuvent aussi y mettre fin violemment par de brutales et cataclysmiques éruptions. Ces édifications géologiques sont également une évidence de la vie de la planète et de ses remous internes. Aussi, les volcans font l'objet de vénération religieuses. Les mythologies grecque, avec Héphestos, et romaine, avec Vulcain, ont fait du volcan le lieu de la forge divine. Depuis le <sup>xiv</sup><sup>e</sup> siècle, le mont Fuji-Yama (Japon) est gravi chaque année par des centaines de milliers de pèlerins. En Indonésie, les fidèles arpentent le volcan Bromo, toujours actif, dans le but de remercier la divinité qui y vit et garantit trois récoltes de riz par an.



## Volcan, volcanisme et volcanologie

### 95 Qu'est-ce que le volcanisme ?

Ce terme désigne l'ensemble des phénomènes géologiques manifestant à l'air libre l'activité interne de la Terre liée à la présence d'un magma captif ou ascendant dans la croûte terrestre. Il est étudié par une branche des sciences de la Terre, la volcanologie.

### 96 Faut-il dire « volcanologie » ou « vulcanologie » ?

Les volcanologues étudient les volcans, et non le dieu Vulcain ni la vulcanisation, un procédé permettant de rendre le caoutchouc des pneus plus élastique que plastique ! En conséquence, on parle de volcanologues et non de vulcanologues.



Vulcain forgeant

### 97 Qu'est-ce qu'un volcan ?

>>> 99, 172

Cette construction géologique ne se limite pas au relief postiche généralement conique posé sur la surface terrestre et désigné par le terme « volcan ». Au lieu de volcan, nous préférons l'expression « système volcanique », qui prend en compte la totalité et la complexité du phénomène, dont le cône terminal n'est que la partie visible et l'ultime témoignage d'un appareil dont les racines cheminent jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de profondeur au départ de l'émulsion magmatique.

Ainsi, un volcan se définit avec davantage de précision lorsque l'on considère ses racines profondes, où naît l'émulsion magmatique qui empruntera un réseau de failles et de fractures avant de parvenir en surface et d'y construire, peut-être, un cône volcanique.



Anatomie d'un volcan

En outre, il faut bien distinguer les volcans des montagnes. Un volcan n'est pas une montagne, et vice versa. Un volcan est construit par accumulation de matière (retombées cendreuse ou granuleuses, laves) en un point. C'est un phénomène géologique de taille modeste et relativement éphémère si on le considère au regard de l'histoire de la Terre. Le volcan ne se manifeste que lors de phases d'activité successives, sur une durée excédant rarement quelques millions d'années. À l'opposé, les montagnes sont le résultat de plissements dus aux affrontements de plaques lithosphériques\* sur leurs bordures, pouvant engendrer des déformations sur plusieurs millions de km<sup>2</sup>. De plus, une montagne n'est jamais ou très rarement isolée, alors qu'un volcan peut l'être bien plus fréquemment. Le seul point commun à l'origine de ces deux phénomènes géologiques, parfois géographiquement voisins, est la tectonique des plaques\*.

### LE PARICUTÍN OU L'HISTOIRE D'UN VOLCAN DANS UN CHAMP DE MAÏS !

En août 1942, au Mexique, un trou large de 5 m et profond de 1,5 m était apparu au milieu du champ de maïs du paysan Dioniso Pulido. Celui-ci avait décidé de le remplir de déchets, mais s'était vite questionné sur la voracité de ce trou qui ne saturait jamais.

Un jour de février 1943, vers midi, alors que Dioniso Pulido labourait son champ, il ressentit un phénomène inhabituel au milieu de ses sillons. La terre s'échauffait et exhalait des volutes blanches. À 16 heures, alors que Dioniso continuait à travailler, une fissure de 30 m de long déchira la terre et un souffle assourdissant s'en échappa. Le lendemain, un volcan de 30 m de haut trônait au milieu du champ. Pour raconter sa mésaventure, Dioniso déclara : « *Le sol retourné par la charrue chauffait la plante de mes pieds nus, puis d'entre les sillons je vis s'élever et onduler une colonne de fumée blanche... Des failles commencèrent à apparaître dans le sol et d'en bas venait un bruit horrible comme si l'on débouchait quelque bouteille géante.* »

Peu à peu, le volcan, d'abord haut de quelques mètres, grandit rapidement pour atteindre des hauteurs plus importantes, dépassant les maisons puis le clocher de l'église du village. La maison de Dioniso fut enfouie sous les scories du volcan qui continuait à cracher ses poussières et à propulser des bombes chaudes alentour.

Au mois d'août 1943, le volcan atteignait 400 m de hauteur pour 1 km de diamètre. Une coulée de lave épaisse de plusieurs mètres se répandit et engloba le village. Aujourd'hui, seul le clocher à moitié épargné pointe encore vers le ciel. Cette éruption dura une année et ne fit aucune victime. Dès la naissance du volcan, le docteur mexicain All, peintre amateur, s'installa dans une cabane au pied du volcan, où il peignit son modèle durant sept ans.

## 98 Y a-t-il différents types de volcanisme ?

Les volcanologues distinguent deux grands types de volcanisme : l'un qui est dit « rouge » est non dangereux pour l'homme, et un second dit « gris », de nature explosive, qui représente un danger très fort pour les sociétés humaines. À titre d'exemple, le Mona Kea (Hawaï) et le piton de la Fournaise (île de la Réunion) sont des volcans rouges, alors que la montagne Pelée (Martinique) et la Soufrière (Guadeloupe) sont de type explosif.

Cette distinction comporte des subtilités, car un volcan rouge peut évoluer et adopter un comportement explosif, et vice versa.

## Le magma, carburant des volcans

### 99 Qu'est-ce que le magma ?

>>> 50

Il s'agit d'un mélange associant roche en fusion (la lave) visqueuse, voire liquide, et gaz très chauds (800 à 1 200 °C). Le magma se forme à plusieurs dizaines de kilomètres sous la surface et entame son ascension grâce aux gaz qu'il contient, de la même façon que le champagne est entraîné vers le goulot de la bouteille par le gaz qu'il renferme.

### 100 Existe-t-il plusieurs types de magmas ?

>>> 102, 103

Il existe des magmas visqueux, ou acides (> 60 % de silice), qui seront à l'origine du caractère explosif du volcan, et d'autres bien moins visqueux, dits basiques (< 50% de silice), voire liquides, qui n'entraîneront que des épanchements de lave en surface. Le premier type de magma est la source de l'explosion du volcan Pinatubo (Philippines, 1991), du Saint-Helens (États-Unis, 1980), de la montagne Pelée (Martinique, 1902) et du mont Unzen (Japon, 1991), sur les flancs duquel les volcanologues Maurice et Katia Kraft perdirent la vie. Le second type de magma, souvent de nature basaltique, est à l'origine de volcans tels le Mona Loa (Hawaï) et le piton de la Fournaise (île de la Réunion).

### 101 Comment et où se forme le magma ?

>>> 85, 86, 108

Le magma correspond à la fusion partielle d'une section de la croûte terrestre profonde. La croûte ou le manteau terrestre sont soumis à de fortes pressions qui maintiennent la roche dans un état solide en dépit des températures qui y règnent. Une baisse de pression et un maintien de la température au sein de la croûte ou du manteau terrestre entraînent une diminution de la température de fusion de la roche et par conséquent la fusion partielle (environ 1 %) de l'encaissant rocheux. Notons que l'apport d'eau et l'augmentation de la température peuvent également faciliter la fusion partielle de la roche.



Ce phénomène de fusion partielle se matérialise sous l'aspect d'un fluide dispersé au sein de la roche solide dans la croûte ou le manteau terrestre. À mesure que débute l'ascension du fluide, un réseau de minces filaments magmatiques va apparaître, se densifier et constituer un parcours que le liquide en fusion va emprunter pour atteindre la surface à travers les roches du manteau.

Il existe trois domaines géologiques où le magma se forme de manière privilégiée, tous en lien avec la tectonique des plaques\* :

- › les dorsales\* médio-océaniques sont des chaînes volcaniques longues de 60 000 km, desquelles émanent principalement des basaltes et d'autres laves basiques. Ces dorsales forment donc les limites de plaques ;
- › les zones de subduction\*, limites de plaques lithosphériques\* où s'opère la destruction de l'une d'elles, correspondent à l'apparition de magmas acides, explosifs ;
- › enfin, il existe un volcanisme intraplaque dont le magmatisme alterne de l'explosif à l'effusif.

## 102 Un magma évolue-t-il ?

>>> 100

Oui, la composition chimique d'un magma évolue durant son ascension vers la surface. Ainsi, un magma basique, donc pauvre en silice, peut devenir acide et acquérir une nature de plus en plus visqueuse. Cette évolution se produit quand un magma stagne dans une chambre magmatique ou un réservoir (qui est de taille plus réduite) et que s'y amorce une séparation des éléments chimiques. Ce phénomène peut s'apparenter à une décantation entre les éléments lourds qui vont migrer dans la moitié inférieure de la chambre magmatique, et les plus légers, dont la silice, qui se concentreront dans la moitié supérieure. Cette évolution se produit aussi quand plusieurs magmas se mélangent ou encore par contamination de l'encaissant (en se frottant contre la paroi rocheuse saine, le magma prélève des roches qui altèrent sa composition chimique).

# Les éruptions volcaniques : dynamismes et scories

103

>>> 100

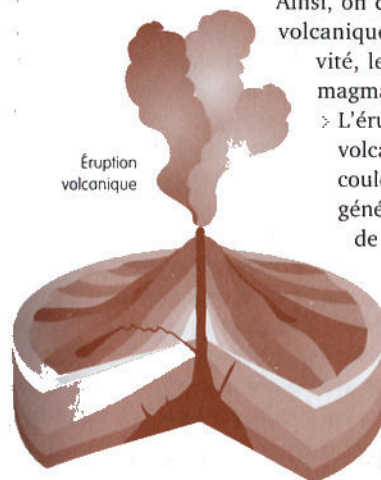
## Y a-t-il plusieurs types d'éruption volcanique ?

La nature de l'éruption volcanique dépend de la composition chimique du magma qui en est à l'origine.

Ainsi, on dénombre cinq grands types d'éruption volcanique qui se singularisent par leur explosivité, leur dynamisme éruptif et la chimie des magmas.

› L'éruption hawaïenne se caractérise par un volcanisme basaltique effusif, marqué par des coulées et fontaines de lave importantes. En général, ce volcanisme aboutit à la formation de volcans-boucliers, des édifices gigantesques dont les îles d'Hawaï et de la Réunion sont les plus beaux exemples. Il peut aussi se manifester par de simples fissures n'aboutissant pas forcément à la construction d'un cône, mais simplement à l'épanchement de coulées de lave. Ce volcanisme ne représente pas un danger immédiat pour l'homme.

- › L'éruption strombolienne alterne des phases effusives et explosives, avec émission de laves moyennement fluides. Les explosions peuvent être violentes et accompagnées d'un panache émanant du cratère.
- › L'éruption vulcanienne est marquée par un volcanisme plus explosif que la précédente en raison de la formation d'un bouchon de magma visqueux. Les coulées y sont rares. En revanche, les explosions projettent des nuages composés de cendres et blocs hauts de plusieurs kilomètres.
- › Les éruptions surtseyennes se produisent lors de la confrontation d'un magma visqueux avec de l'eau. En général, ce sont



des éruptions sous-marines ou sous-lacustres, capables de projeter aux alentours de grandes quantités de dépôts cendreux, dont l'accumulation aboutit à la formation d'une île. On parle de phréato-magmatisme\*.

- Les éruptions pliniennes, très explosives, sont les plus dangereuses pour l'homme. La lave visqueuse s'accumule sur le cône, généralement au sommet, et parfois sur les flancs en prenant l'aspect de dômes. Ceux-ci explosent lorsque la pression interne due aux gaz devient trop forte et que la lave ne les contient plus. Les cônes sont appelés strato-volcans. Le mont Saint Helens (États-Unis) en est un bel exemple, comme son voisin le mont Rainier, ou encore l'Etna (Sicile) et le Cantal (France). Les éruptions pliniennes sont la source de colonnes de cendres capables de se développer jusqu'à des altitudes de 40 km ! Les écoulements pyroclastiques (anciennement appelés « nuées ardentes »), mélange de cendres, de blocs et de gaz à haute température, dévalant les pentes à environ 100 km/h, sont une expression typique du volcanisme plinien.

## 104 L'activité d'un volcan peut-elle changer de nature ?

>>> 85, 86,  
100, 102

De la même façon que le magma évolue par différenciation magmatique dans la chambre, le volcan peut avoir une activité effusive basaltique puis, plusieurs milliers d'années plus tard, frémir d'une activité explosive. Le changement de dynamisme éruptif, conforme à l'évolution chimique du magma, est retracé par les séries magmatiques.

- La série tholéitique : le rapport Na-K/SiO<sub>2</sub> (sodium + potassium/silice) est faible et le magma est saturé. Le magma de départ est un basalte tholéitique (très pauvre en silice) que l'on rencontre généralement au niveau des dorsales\* océaniques, des arcs insulaires et dans le volcanisme continental (trapps). Le basalte tholéitique se forme à faible pression (donc en faible profondeur) à partir du manteau. Ensuite, par enrichissement progressif (contamination, cristallisation fractionnée) du magma, il y a formation d'andésites puis de rhyolites. Le stade basalte est le plus courant.
- La série calco-alkaline : le rapport Na-K/SiO<sub>2</sub> est plus fort. Cette série se rencontre dans les zones de subduction\* (cordillères) et les arcs insulaires évolués. Elle va des basaltes

aux rhyolites. Le stade intermédiaire andésitique est le plus courant.

- La série alcaline : le rapport Na-K/SiO<sub>2</sub> est fort et donne un magma sous-saturé. Cette série se rencontre dans le volcanisme des domaines continentaux stables. Elle va des basaltes aux trachytes. Le stade basalte est dominant.

## 105 Un volcan a-t-il inévitablement un cratère ?

Un cratère n'affuble pas toujours le sommet d'un cône volcanique, même si cette représentation est populaire. Ainsi, il existe des éruptions fissurales ; la lave s'épanche à partir de fractures ou de failles qui lézardent la croûte terrestre. Ce type d'éruption ne produit pas forcément de cône volcanique.

L'édification d'un cône accompagne souvent une éruption volcanique lorsque son dynamisme est strombolien ou vulcanien. En revanche, quand un volcan arbore une dynamique plinienne, donc explosive à très explosive, la lave est si visqueuse qu'elle ne fait que s'entasser sous forme de dômes aux points de sortie. En France, le puy de Dôme (chaîne des Puys) répond à ce profil.

Enfin, il existe des volcans avec un cratère mais sans cône. Ce sont les maars, de vastes dépressions de diamètre souvent de l'ordre du kilomètre et profondes de plusieurs dizaines de mètres. Les maars (ou cratères d'explosion) sont le produit d'une activité phréato-magmatique\* engendrée par la rencontre d'une eau stagnante (telle une poche souterraine) avec un magma ascendant. La confrontation entre ces deux éléments est explosive et dégage une énergie équivalente à plusieurs bombes atomiques. Ainsi, le Massif central est constellé de maars occupés par des lacs aux eaux troubles et noires (Tazenat, Pavin, Issarlès), d'autres sont vierges, seulement occupés par de la végétation ou une tourbière (narse d'Espinasse, Beaunit). Le plus grand maar de France se trouve en Ardèche : la Vestide du Pal est sans doute l'un des plus beaux volcans de France, son diamètre est de 1,7 km et son âge de 50 000 ans.

## 106 Que crache un volcan ?

Les produits que crache un volcan se distinguent par leur taille (leur granulométrie). Cela va de la cendre, de taille millimétrique,



Bombe volcanique fuselée

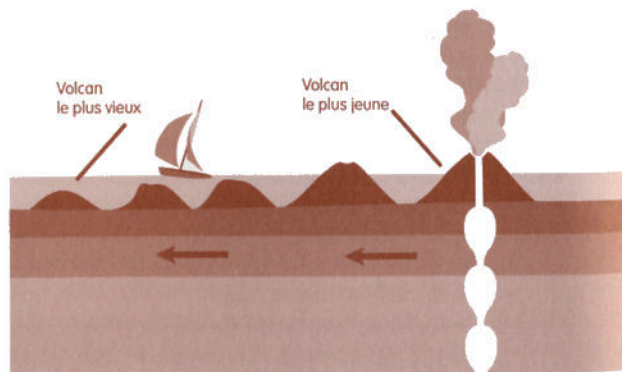
qui peut parcourir des centaines de kilomètres à la faveur des courants aériens, en passant par les lapilli (entre 2 et 64 mm) et les fameuses bombes. Au-delà de 64 mm, les plus grosses retombées sont les bombes volcaniques dont la taille et la masse dépassent parfois celles d'un camion. Pour projeter de tels blocs, l'explosion doit être très forte.

## 107 Combien de temps dure une éruption ?

En 1978, le volcan hawaïen Kilauea se manifesta durant... 6 petites minutes. En revanche, le Stromboli est en éruption permanente depuis... 2 500 ans. De 1991 à 1993, l'Etna entra en éruption pendant 473 jours. L'activité engendrée par une éruption n'est pas régulière, avec des baisses en intensité. Ainsi, une éruption peut s'étaler sur plusieurs mois, voire plusieurs années.

## 108 Qu'est-ce qu'un point chaud\* ?

Cette expression associe fortement tectonique des plaques\* et volcanisme. Au cours de leur mouvement, les plaques sont percées par des remontées de magma fixes. À mesure qu'elles progressent, les colonnes de magma fixes, tels des chalumeaux,



Fonctionnement d'un point chaud

perforent ces plaques mobiles et engendrent la formation d'alignements de volcans. Souvent de nature basaltique, ces volcans sont généralement des édifices gigantesques. En outre, les perforations successives exercées par la colonne de magma produisent un chapelet d'îles. La plus ancienne est la plus éloignée ; par voie de conséquence, la plus récente se trouve être celle où l'activité volcanique est visible. L'exemple d'école du point chaud est l'archipel hawaïen. Le volcan le plus ancien correspond à l'île Niihau, localisée à 400 km au nord-ouest d'Hawaï et vieille de 4,9 millions d'années. Aujourd'hui, l'activité est concentrée sur l'île principale Hawaï avec le Mona Loa. Toutefois, un nouveau volcan pointe déjà dans l'océan et n'en a pas encore atteint la surface.

Les îles de la Société et les îles Marquises sont également le résultat de points chauds.

## Vie et mort d'un volcan

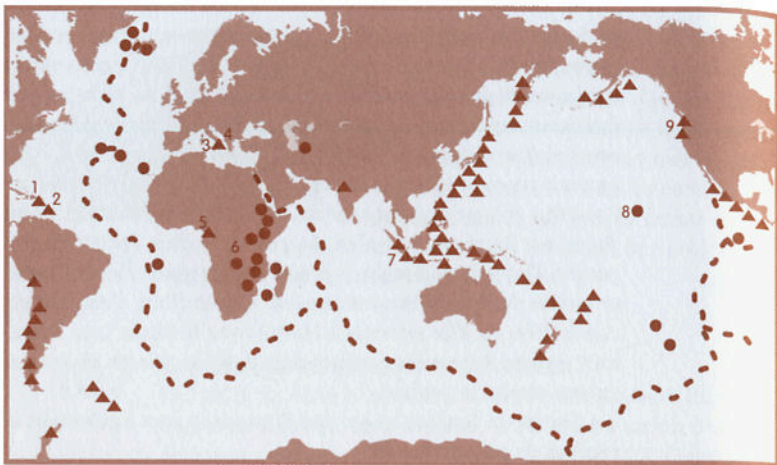
### 109 Depuis quand y a-t-il des volcans sur Terre ?

&gt;&gt;&gt; 30

Il est très difficile de répondre à cette question car le volcanisme est lié à la fabrication de la croûte terrestre. Or, la tectonique des plaques\* élimine et recycle les roches de la croûte depuis au moins 4 milliards d'années. De plus, les roches volcaniques ont été perturbées et changées par le métamorphisme\* qui les a affectées. Il semble donc plus judicieux d'identifier des roches métamorphiques qui ont été volcaniques. C'est ce que des géologues canadiens ont fait, en dénichant des roches vieilles de 3,8 milliards d'années dont la nature volcanique semble avérée.

### 110 Combien y a-t-il de volcans actifs aujourd'hui ?

Chaque année, ce sont en moyenne entre 50 et 70 volcans continentaux qui sont en éruption, sur environ 1 500 réputés actifs. Cependant, il existe une quantité importante de volcans sous-marins que l'on ne connaît pas encore.



Répartition du volcanisme sur Terre

- Volcanisme effusif
- ▲ Volcanisme explosif
- Volcanisme effusif sous-marin

- |                             |                   |               |
|-----------------------------|-------------------|---------------|
| 1 - Montagne Pelée          | 4 - Vésuve        | 7 - Krakatoa  |
| 2 - Soufrière de St-Vincent | 5 - Mont Cameroun | 8 - Hawaï     |
| 3 - Etna                    | 6 - Niragongo     | 9 - St-Helens |

## 111 Quand un volcan est-il considéré comme éteint?

Répondre à cette question est délicat, car il est difficile de dire à quelle date précise est signé l'acte de décès du volcan. Une règle indique que lorsque l'équivalent du double de laps de temps séparant les deux dernières éruptions est révolu, il est raisonnable d'acter la mort du volcan. Cependant, beaucoup de volcans que l'on présumait « morts » se sont réveillés, et nombre d'entre eux furent parmi les plus meurtriers (Vésuve en 79, Tambora en 1815, montagne Pelée en 1902, Pinatubo en 1991).

## 112 Comment reconnaître un volcan dans le paysage?

>>> 278

Le volcanisme donne des reliefs uniques par leur morphologie et souvent insolites par leur beauté. Il existe des reliefs volcaniques issus de la construction d'édifices. C'est le cas de la chaîne des

Puys, qui domine Clermont-Ferrand, et dont les cônes et dômes, généralement de taille modeste, à de rares exceptions, sont en enfilade sur environ 35 km de longueur selon une direction nord-sud. Ce type de relief mamelonné est également visible dans le Velay. D'autres reliefs sont le résultat d'une érosion des appareils volcaniques. Dans ce cas, il ne reste que le squelette du volcan en voie de démantèlement complet. Le mont Dore (France) présente cette morphologie, avec des arêtes saillantes aiguës par d'anciennes laves acides. Ce strato-volcan est sillonné de murs de lave ayant cristallisé dans des fractures ouvertes (*dykes*), telle la Dent de la Rancune qui impose ses 100 m de hauteur à l'amont de la vallée de Chaudefour. Autre exemple de volcan complètement érodé dont il ne reste qu'un moignon : le pic du Midi d'Ossau (Pyrénées). Enfin, la Bretagne et ses littoraux granitiques sont découpés par des intrusions de lave fossile, notamment sous forme de dykes, montrant que les lieux étaient occupés par des volcans il y a 600 millions d'années.

## 113 Quelle est la longévité d'un volcan sur Terre?

>>> 103

Tout dépend de la nature de son activité, de sa situation géologique et donc de son alimentation en magma. Ainsi, les plus petits volcans peuvent ne faire éruption qu'une fois. C'est le cas de ceux de la chaîne des Puys, dont la construction ne correspond qu'à une seule éruption. Ces volcans sont dits monogéniques et leur longévité ne dépasse guère quelques années, voire le plus souvent quelques mois ou même quelques semaines. Après une seule éruption, ces volcans s'éteignent.

À l'opposé, il existe des volcans dits polygéniques qui connaissent plusieurs éruptions, et parfois se détruisent par de vastes effondrements pour mieux se reconstruire. Ces appareils se distinguent souvent par leurs dimensions considérables, et leur longévité s'étale sur plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années. L'édification du Kilimandjaro, un strato-volcan, qui est un massif volcanique composite, semble avoir débuté il y a 2 millions d'années. En revanche, le Mona Loa, un volcan-bouclier, a commencé son édification il y a 500 000 ans.

## Geysers, sources chaudes et volcans de boue

### 114 Qu'est-ce qu'un geyser ?

Chacun a vu, au moins par la télévision, le Vieux Fidèle (Old Faithful), ce fameux geyser du parc de Yellowstone (400 geysers recensés), faire jaillir (de l'islandais *gjósa*) ses eaux chaudes jusqu'à 50 m de hauteur toutes les 10 minutes environ. Bien que ce phénomène soit étroitement associé à l'activité volcanique, il faut mitiger cette représentation. En s'infiltrant dans le sol, l'eau s'enfonce, descend jusqu'à rencontrer une poche de chaleur (un magma stagnant et actif par exemple). Mise sous pression, elle est alors chauffée et entame sa remontée soudaine sous l'aspect d'une gerbe d'eau chaude pouvant atteindre 100 °C. Le conduit par lequel l'eau jaillit est souvent étroit.

Cependant, les geysers ne sont pas tous liés aux volcans. Ceux-là doivent leur vivacité au gradient géothermique. En effet, il est convenu que, sous terre, la température augmente de 1 °C tous les 30 m en moyenne en zone continentale stable (1 °C/10 m en zone montagneuse). Le mécanisme activant le jaillissement de l'eau est identique à celui jouant dans les zones volcaniques.

#### L'APPARITION D'UN GEYSER EN AUVERGNE...

Un habitant de Saint-Nectaire (Puy-de-Dôme) témoigne : « *Je me souviens, il y a une bonne trentaine d'années, un geyser avait surgi, et un beau, de plus de dix mètres de haut ! Quand on a appris ça aux infos, on a juste eu le temps d'aller le voir en vrai, parce qu'il n'a duré que quelques jours.* » Plutôt qualifiable d'accident industriel, ce geyser avait été provoqué artificiellement par un forage... ce qui mit fin aux rumeurs attachées au réveil prochain des volcans auvergnats !

### 115 Les sources chaudes sont-elles liées au volcanisme ?

>>> 114

À l'instar des geysers, les sources d'eaux chaudes ne sont pas toutes liées mécaniquement à une activité volcanique. Là aussi, le gradient géothermique entre en jeu selon des mécanismes similaires. Le plus bel exemple est en Auvergne, de quoi alimenter la confusion avec la nature volcanique de cette région. À Chaudes-



La source du Par (Chaudes-Aigues, Cantal)

Aigues (Cantal), lieu déjà connu des Romains, les eaux les plus chaudes sortent à 82 °C à la source du Par (250 l/min) en plein centre du village, niché dans une vallée granitique très encaissée. Ces eaux sont réchauffées en profondeur (jusqu'à -2 200 m au moins) par l'action conjointe du gradient thermique et la présence possible d'un granite en voie de refroidissement. Le temps que la circulation de l'eau soit complète et que celle-ci accomplisse un aller-retour vers la surface, il se passe quelques millénaires. Ainsi, l'eau jaillissant aujourd'hui est supposée s'être infiltrée dans le sol il y a 10 000 ans et être issue de la fonte des derniers grands glaciers auvergnats ! Cette eau chaude est répandue dans tout le village grâce à de vieilles canalisations régulièrement curées. Les habitants bénéficient de l'eau chaude gratuitement et, durant les nuits hivernales, surprennent des volutes blanches fantasmagoriques qui sortent des canalisations et flottent dans les rues silencieuses.

### 116 Qu'est-ce qu'un « volcan de boue » ?

Le 28 mai 2006 à Java (Indonésie), l'éruption d'un volcan de boue, en lien direct avec un forage de gaz naturel voisin, noya une surface de 10 km<sup>2</sup> et tua 13 personnes, à cause d'une rupture de canalisation de gaz, rendant la zone inhabitable durant plusieurs années. Les images impressionnantes de l'exode de 11 000 personnes ont interpellé le monde sur un phénomène inconnu nommé « volcan de boue ».

En général, les volcans de boue dépassent rarement 1 à 2 m en hauteur. Incapables d'édifier un cône volcanique, les sédiments argileux qui en sont expulsés se répandent alentour grâce à l'eau contenue dans le mélange chaud. Les argiles sont le produit de la destruction de coulées de lave solidifiées et enfouies, alors que l'eau est extrêmement présente dans les domaines volcaniques. Comme pour le magma, ce sont les gaz (méthane, CO<sub>2</sub>, vapeur d'eau) qui acheminent cette boue vers la surface en imitant, de manière moins spectaculaire, un geyser.

Les volcans de boue sont associés à la présence en sous-sol de pétrole et de gaz naturel. Du reste, l'Azerbaïdjan en compte de nombreux sur son territoire, parfois hauts de 200 m. Environ 300 y ont été recensés sur les 700 dénombrés sur la surface terrestre.

## 117 Quel est le plus grand volcan sur Terre ?

Ce superlatif est trompeur, car il ne faut pas se méprendre entre la hauteur d'un édifice et son altitude. L'altitude est le point topographique le plus haut, alors que la hauteur se réfère à la grandeur totale de l'édifice volcanique. Ainsi, l'altitude du Mona Loa (Hawaï), énorme volcan-bouclier posé sur le fond du Pacifique à - 5 000 m, est de 4 170 m (pour un volume total de 42 000 km<sup>3</sup>) ; sa hauteur atteint donc près de 9 200 m et lui permet de surpasser l'Everest par ses dimensions !

## Vie, climats et volcans

### 118 Y a-t-il un lien entre le climat et le volcanisme ?

Lorsqu'une éruption volcanique est déclenchée, dans le cas d'une activité explosive, un panache de cendres plinien est injecté dans l'atmosphère, enveloppe partiellement la terre, réduit l'énergie solaire arrivant au sol avec, pour corollaire, la baisse possible des températures, parfois à une échelle mondiale. Ainsi, l'éruption du Laki en 1783 (Islande) engendra une baisse moyenne de la température atmosphérique de 1 °C

dans l'hémisphère Nord. L'éruption du Krakatau (Indonésie) en 1883, dont l'explosion, entendue jusqu'en Australie, volatilisa une île, fut la source d'un nuage de cendres qui fit plusieurs fois le tour de la Terre. À Londres, les crépuscules enveloppaient la ville d'une couleur sanguine pendant que la température moyenne du climat terrestre diminuait de 0,25 °C.

L'éruption cataclysmale du Tambora (1815) eut pour effet en Europe un été froid et pluvieux. Les conséquences furent des récoltes désastreuses à l'origine de famines. En France, le mois de juillet présenta un déficit de température moyenne mensuelle de 3 °C et la pluviosité y égala 2 à 3 fois la norme mensuelle.

### 119 Les volcans influencent-ils la vie ?

>>> 120

La Terre est le lieu où les interactions entre différents phénomènes agissent. Ainsi, on sait que la vie est influencée par le climat, qui lui-même est en partie régenté par le volcanisme.

Le géophysicien Vincent Courtillot a mis en évidence des corrélations chronologiques entre des événements volcaniques exceptionnels et de grandes extinctions biologiques (périodes durant lesquelles de nombreuses espèces animales et végétales disparaissent). Ainsi, la grande extinction du Permien, il y a 250 millions d'années, durant laquelle près de 90 % des espèces invertébrées marines disparurent, est corrélée dans le temps avec la grande éruption des trapps de Sibérie (les trapps, qui résultent d'une activité volcanique exceptionnelle en intensité, sont des accumulations de lave souvent basaltique sur des centaines, voire des milliers de mètres d'épaisseur et des surfaces de plusieurs centaines de milliers de km<sup>2</sup>). Bien qu'il n'y ait pas de corrélation directe mise en évidence entre ces mégaséruptions volcaniques et les grandes extinctions biologiques (cinq majeures sont dénombrées depuis 600 millions d'années), la question doit être posée.

### 120 Quelle est la cause de l'extinction des dinosaures ?

La fascination exercée par les dinosaures est due aux dimensions souvent énormes de ces animaux à l'allure légendaire, mais aussi à leur disparition mystérieuse. Quel a pu être l'événement qui a conduit à leur disparition totale ? En raison de la taille de



Il y a 65 millions d'années, les dinosaures s'éteignent

ces animaux, seul un cataclysme inimaginable était suspecté.

Dans les années 1980, des pétroliers et géophysiciens américains identifient un cratère d'impact d'environ 180 km de diamètre, à cheval sur la péninsule du Yucatán et le golfe du Mexique. Or, l'impact météoritique à l'origine de ce cratère, daté à 65 millions d'années, correspond, au moins chronologiquement, à la disparition des dinosaures. On

identifiait ainsi le coupable idéal pour éclairer la fin des dinosaures, dont le règne s'était étalé sur 150 millions d'années (à titre de comparaison, *Homo sapiens* n'est là que depuis 195 000 ans !). En 1995, le géophysicien Vincent Courtillot propose de corréler l'extinction des dinosaures avec la méga-éruption volcanique des trapps du Deccan, en Inde, survenue elle aussi il y a 65 millions d'années. Cette nouvelle hypothèse apporte une explication satisfaisante, voire convaincante si on la couple avec l'impact du Yucatán. De fait, les effets conjoints des deux événements synchrones ont pu agir de la façon suivante : dans un premier temps, la méga-éruption du Deccan fragilise les écosystèmes et le climat mondial, jusqu'à déstabiliser les chaînes alimentaires, puis survient le coup de grâce avec la météorite.

## Prévision et prévention du risque volcanique

### 121 Combien y a-t-il de personnes sous la menace de volcans actifs ?

>>> 122 Environ 500 millions de personnes sont potentiellement menacées par un volcan actif. Ce nombre augmentera en raison de la démographie et de la nécessité de laisser à cette population la possibilité de trouver des ressources. Or, les sols volcaniques se révèlent suffisamment fertiles pour permettre deux récoltes de riz.

### 122 Quels sont les volcans les plus menaçants ?

Bien entendu, le Vésuve, au pied duquel s'étend l'agglomération napolitaine, surgit instantanément dans nos esprits, par sa proximité à la fois géographique et historique, l'éruption de l'an 79 qui détruisit Pompéi, Herculanium, Oplontis et Stabies étant légendaire.

Aux États-Unis, Seattle, ville où sont installés notamment Microsoft et Boeing, est sous la menace du mont Rainier. Une éruption de ce gigantesque volcan, très fragilisé en son intérieur par l'agressivité des gaz qui rongent les roches volcaniques et rendent tout l'édifice instable, provoquerait une crise économique d'ampleur nationale puis mondiale.

En Amérique du Sud, les volcans Galéras (Colombie) et Misti (Pérou) menacent respectivement les villes de Pasto et d'Arequipa, soit au total près de 700 000 personnes. Au Mexique, le Popocatepetl peut mettre Mexico en danger, puisque la ville n'en est éloignée que de 60 km.

L'Asie compte de nombreux volcans, dont le Merapi (Java) est à la fois le représentant le plus impressionnant et le plus dangereux. Régulièrement en éruption, le Merapi génère des écoulements pyroclastiques qui dévalent les pentes et ensevelissent les personnes prises au piège. La ville de Yogyakarta (environ 1 million d'habitants) est directement menacée par le Merapi et les phénomènes secondaires qui lui sont associés, comme des coulées de boue chaude appelées lahars.

L'Afrique n'est pas épargnée. Le type d'activité à l'origine de catastrophes humaines n'est paradoxalement pas explosive, à l'inverse des volcans déjà cités. Le volcan africain de nature explosive le plus fameux est le Kilimandjaro, et aucune éruption significative ne lui est attribuable de mémoire humaine. En revanche, en République démocratique du Congo, le volcan basaltique Nyiragongo est l'un des rares édifices volcaniques à renfermer en son sommet un lac de lave. Celui-ci se gorge de lave jusqu'à ce que les parois rompent, le 10 janvier 1977. Dans la plaine, 600 habitants de la ville de Goma furent rattrapés par l'inondation de lave qui dévala les pentes du volcan à 100 km/h. Autre danger volcanique auquel l'homme peut être exposé : les éruptions gazeuses. En 1986, le Cameroun fut frappé par un phénomène de ce type, qui provoqua la mort de 1 800 personnes. Une éruption gazeuse survient alors qu'une poche de gaz

carbonique (ou dioxyde de carbone) s'accumule au fond d'un lac volcanique, jusqu'à ce qu'une instabilité induise le renversement de la poche de gaz. Le CO<sub>2</sub>, gaz inodore et incolore plus lourd que l'air, coule dans la vallée et asphyxie les êtres sur son passage. Le lac volcanique Nyos est toujours sous surveillance, et purgé grâce à des conduites d'évacuation.

## 123 Quelle a été la plus grave catastrophe volcanique de mémoire humaine ?

La plus violente fut sans conteste l'éruption de la montagne Pelée en 1902, qui ébranla la Martinique et provoqua la mort de 30 000 habitants de Saint-Pierre en quelques minutes.

Cependant, certaines éruptions ont, par leurs effets indirects (tsunamis, famines) fait davantage de victimes. C'est le cas de l'explosion du Krakatau en Indonésie en 1883, qui induisit une famine, cause principale de la mort de 92 000 personnes.

## 124 Qu'est-ce qu'un « super-volcan » ?

Lorsque la télévision s'intéresse aux sciences, les scientifiques perçoivent que leurs résultats pourront être volontairement scénarisés et travestis, car l'industrie médiatique déteste que les sujets manquent de relief. Les « super-volcans » présentés lors d'une émission spectaculaire qui fit beaucoup d'audience ne sont pas inconnus des volcanologues qui, jamais, ne nomment ces structures en utilisant des adjectifs menteurs.

Comme synonyme de « super-volcans », les volcanologues utilisent le terme « caldeira » (chaudron en portugais) pour décrire un phénomène rare et violent. Alors que la chambre magmatique est saturée de magma, une éruption peut se déclencher et en causer la vidange totale ou partielle. Une partie du toit de la chambre magmatique s'effondre en adoptant une forme grossièrement circulaire de chaudron (ou caldeira). Parfois, les caldeiras sont larges de plusieurs dizaines de kilomètres et profondes de plusieurs centaines de mètres. Le parc de Yellowstone fait partie de ces structures effondrées et, à l'instar d'autres caldeiras où existe toujours une activité volcanique, des séismes importants et des mouvements de soulèvement et d'affaissement du sol en rythment la vie géologique.

La plus grande caldeira est celle de Toba (Sumatra, Indonésie) qui fut le lieu de la plus importante éruption volcanique recensée ces deux derniers millions d'années. La caldeira mesure 100 km sur 30. Il y a 74 000 ans, Sumatra fut secouée par une éruption très explosive qui a rejeté dans l'atmosphère un volume de cendres et de pierres ponce estimé à 2 800 km<sup>3</sup> (à peine 10 km<sup>3</sup> pour le Pinatubo en 1991). Cette caldeira a dû se former au moins en trois étapes, étalées sur 800 000 ans. L'intrusion d'une telle quantité de cendres dans l'atmosphère provoqua certainement un refroidissement global dont certains écosystèmes ne se rétablirent pas.

Aujourd'hui, les volcanologues ne s'alarment pas du danger pour l'humanité qui pourrait être attaché à une telle éruption. Bien que cela doive survenir un jour ou l'autre, le territoire affecté subira une activité sismique qui s'amplifiera en intensité pendant que le sol se déformera. Cet accroissement de l'activité sismique ne se fera pas sur quelques jours, mais bien sur plusieurs années, voire décennies, laissant aux scientifiques le temps d'avertir les autorités. En revanche, l'impact sur le climat terrestre et l'économie, si l'on ne s'y est pas préparé, sera considérable.

## 125 Peut-on prévoir les éruptions ?

Cette question revient systématiquement aux oreilles des volcanologues, eux que l'on traite aisément d'incompétents lorsqu'une catastrophe survient, en oubliant que la chaîne des décisions est commandée par des élus et responsables administratifs.

Depuis l'an mil, il a été estimé que 300 000 personnes ont été tuées par l'activité volcanique et ses effets indirects. Il est bien entendu difficile de prévoir la date précise d'une éruption, même si cette demande est légitime. Cependant, les volcanologues ont développé des méthodes pour ausculter les volcans et retranscrire leur histoire géologique.

- › La reconstitution géologique : c'est un travail de terrain fondamental et préalable. L'objectif de ce type d'étude géologique est de déterminer les âges, nature et ampleur des éruptions passées en étudiant les dépôts volcaniques.
- › La sismologie volcanique : un volcan est le lieu de séismes dus aux mouvements du sol et ruptures provoqués par l'ascension du magma. En cas d'éruption pressentie, les volcanologues



épient les tremors, ces séquences de vibrations sismiques régulières qui trahissent l'arrivée du magma.

- › La tomographie sismique scrute l'anatomie du volcan pour détecter d'éventuels réservoirs magmatiques emplis ou non de roche en fusion.
- › Les déformations du sol sont aussi surveillées. Lorsqu'un magma arrive à proximité de la surface, la topographie peut être affectée de gonflements locaux qui déforment, voire déstabilisent le cône volcanique.
- › La mesure du champ magnétique local (ou gravimétrie\*) constitue une méthode fiable, qui a pour but de déterminer les variations du champ de pesanteur dues aux changements de répartition des masses dans le volcan.
- › La chimie et physique des gaz : un magma est entraîné par des gaz qui s'en échappent lorsque la roche en fusion dépressurise. La volatilité de ces gaz permet aux volcanologues, depuis un avion ou un hélicoptère, de les reconnaître et de les mesurer. Ainsi, en phase prééruptive, un volcan pourra émettre du dioxyde de soufre.

#### UN RISQUE VOLCANIQUE AUSSI MÉCONNU QUE DANGEREUX : L'AVALANCHE DE DÉBRIS

En 1792, le volcan Unzen (Japon) s'effondra subitement. Près de 10 000 personnes périrent, emportées et ensevelies. Dans un second temps, les survivants affrontèrent un tsunami provoqué par la plongée de la masse rocheuse dans l'océan, après avoir induit une vague de retour sur le littoral (5 000 morts supplémentaires). Une partie du cône volcanique, déstabilisée par un séisme, s'en trouva fragilisée et fut emportée dans un immense mouvement de terrain. Ce type de phénomène prend en charge des volumes gigantesques de plusieurs km<sup>3</sup>, voire plusieurs dizaines pour les plus gros appareils, et n'a été aperçu qu'à distance (mont Saint Helens, 1980) ou reconstitué (Cantal).

Pour comprendre ce phénomène, il faut se remémorer le tas de sable que chacun d'entre nous, alors qu'il était enfant, a dû modeler en pâtes sur la plage ! Irrémédiablement, on constatait que le tas de sable s'effondrait sur lui-même. Un cône volcanique peut se comparer à un tas de sable, car il renferme des quantités d'eau importantes, faisant dire aux volcanologues qu'ils ont affaire à de vraies éponges géantes. D'autre part, un cône volcanique est un relief postiche, simplement posé sur une topographie préexistante, ce qui peut le rendre instable.

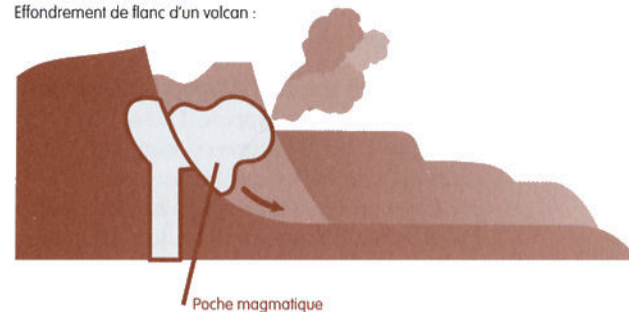
Une avalanche de débris peut amputer un cône volcanique de plusieurs km<sup>3</sup> de matériaux en quelques secondes à quelques minutes. Le cône peut être déstabilisé par un séisme, l'intrusion d'une poche de magma, son état avancé de dégradation interne, ou encore l'accumulation de coulées et de dépôts (cendres

et bombes) lors d'une éruption. En outre, ce risque volcanique a la particularité, à l'instar des lahars, de ne pas survenir uniquement au moment des phases éruptives. Une avalanche de débris peut être déclenchée alors que le volcan est au repos, la rendant d'autant plus dangereuse.

Une fois le cône déstabilisé, l'avalanche de débris mobilise parfois plusieurs km<sup>3</sup> de roches et de matériaux tendres qui comblent en quelques minutes des reliefs et modifient profondément la topographie sur plusieurs km<sup>2</sup>. La vitesse d'un tel phénomène dépasse aisément 100 km/h selon la topographie. En outre, les volcanologues ont pu reconstituer le parcours d'une avalanche de débris et conclure que cet écoulement, inconcevable pour un esprit humain, est capable de franchir des collines hautes de plusieurs centaines de mètres ! Bien sûr, aucun homme n'a pu témoigner sur ce phénomène.

Le risque d'avalanche de débris est surveillé de près pour certains volcans qui montrent des signes précurseurs d'un futur effondrement (La Palma, Canaries) ou qui sont fortement suspectés de pouvoir en être la source (mont Rainier, É-U).

Effondrement de flanc d'un volcan :



Vue en coupe d'un volcan dans lequel une poche de magma est injectée et déstabilise le cône. Une avalanche de débris se forme et emporte une partie du volcan dans un vaste effondrement de flanc, en quelques minutes.



Avalanche de débris (vue de 3/4). Éventré, le cône volcanique porte alors une cicatrice béante en forme de fer à cheval, que l'on nomme caldeira.

## 126 Quels sont les risques volcaniques majeurs ?

>>> 103

Il faut discerner les risques volcaniques directs et ceux induits par l'éruption. Les premiers sont partagés entre les écoulements pyroclastiques (anciennement appelés de façon générique «nuées ardentes»), les projections et retombées de cendres et bombes, les écroulements de dômes, les émissions de gaz toxiques et les coulées de lave. Ces dernières sont le risque le moins dangereux pour les personnes et biens, en dépit de l'image terrible que l'on en a. Les risques volcaniques induits peuvent être plus meurtriers que ceux directement liés à l'éruption. Il s'agit des lahars (ou coulées de boue en indonésien) et des tsunamis. Les lahars et les écoulements pyroclastiques sont les risques principaux auxquels une population peut être confrontée lorsque l'activité éruptive est de nature explosive.

## 127 Existe-t-il un risque d'éruption en France ?

>>> 98

Oui, mais pas en métropole. La Soufrière (Guadeloupe) et la montagne Pelée (Martinique) sont les deux volcans les plus à craindre. Considérés comme étant en activité, ils font l'objet d'une très grande attention et possèdent leurs propres observatoires de surveillance. Le piton de la Fournaise, quant à lui, est un volcan-bouclier dont la nature ne représente pas une menace pour les populations. Ses éruptions, bien que spectaculaires, ne deviennent inquiétantes que lorsqu'elles jaillissent de ses flancs et, à l'occasion, détruisent des équipements civils. En métropole, le patrimoine volcanique est varié, plus qu'on ne le croit, mais surtout centré sur l'Auvergne et l'Ardèche. La chaîne des Puy (Puy-de-Dôme) et le Vivarais (Ardèche) sont les provinces volcaniques les plus récentes où les naissances de certains volcans (Pariou, Chambon) ont pu dévoiler des âges d'environ 10 000 ans. Des hommes ont donc assisté à ce spectacle ! En revanche, dans l'immédiat, rien à craindre du côté de Clermont-Ferrand. Si la prochaine éruption survient rapidement, elle sera plus spectaculaire que risquée pour les Clermontois.

### POURQUOI DIT-ON « PUY » POUR DÉSIGNER UN RELIEF EN AUVERGNE ?

Dans le Massif central, mais aussi dans le Dauphiné, en Catalogne et dans le sud-ouest français, les populations désignent les collines par des termes issus de la culture régionale. Ainsi, sur les territoires coïncidant avec l'occitan, une colline est appelée *pog*, *pueg*, *pech*, *peuch* ou plus communément *puech* ; en Dauphiné, cette même colline est appelée *poët* et *puig* en Catalogne. En Auvergne et sur ses marges, les puy sont très communs et interpellent souvent les touristes qui trouvent le contresens absurde : comment peut-on utiliser le terme *puy* pour signaler une colline ? *Puy*, comme *puech*, *poët* ou *puig*, ont une racine latine commune issue du terme *podium*. Voici comment le puy de Dôme est devenu une éminence topographique en plus de présenter l'avantage d'être le plus grand volcan de la chaîne des Puy. Voici également comment Le Puy-en-Velay, préfecture de Haute-Loire installée dans un bassin topographique dominé par des reliefs proéminents, a trouvé son origine...

# Les séismes

La croûte terrestre est mobile. Les plaques lithosphériques\* se déplacent et se déforment. Ces mouvements sont notamment ressentis lors de tremblements de terre parfois catastrophiques, bien que la grande majorité des mouvements telluriques ne soit pas perceptible par l'homme.

Le séisme est comme un ennemi lâche, à la fois invisible et impalpable, et sa survenance sans signes précurseurs discernables par l'homme en amplifie l'horreur. Impuissant devant ces violentes libérations d'énergie, l'homme a tenté d'en comprendre les mécanismes, après avoir attribué ces manifestations telluriques à des colères de divinités cachées. À l'instar du volcanisme, la tectonique des plaques\* a soufflé aux géologues quelques idées qui leur ont permis de comprendre ces événements.

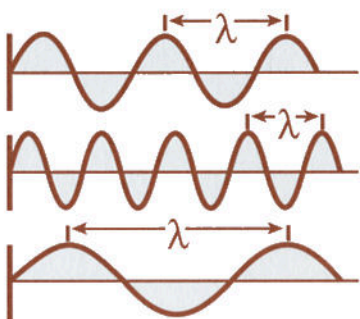


## Pourquoi la Terre tremble-t-elle?

### 128 Qu'est-ce qu'un séisme?

C'est une libération d'énergie soudaine au sein de la croûte terrestre, due à la fracturation des roches. Celles-ci se déforment peu, insuffisamment pour supporter les efforts et l'accumulation d'énergie à la frontière de plaques lithosphériques\*. Ainsi, la tension générée au contact des deux plaques atteint le point de rupture des roches qui se fracturent et produisent un séisme. Notons que le terme « séisme » est synonyme de l'expression « tremblement de terre ».

Ondes sismiques



Pour emprunter une image familière, prenons une règle d'écolier et appliquons lui un effort (une contrainte) qui la fait légèrement ployer. Au bout d'un moment assez court, la règle se brise car les contraintes accumulées deviennent trop importantes. Il en va de même avec les roches de la croûte terrestre qui, ne pouvant plus absorber les contraintes, cassent. Plus les contraintes accumulées sont importantes, plus fort sera le séisme au moment de la rupture.

### 129 Combien de temps dure un séisme?

Cette durée est très variable. En général, les séismes ne durent que quelques secondes à plusieurs dizaines de secondes, rarement plusieurs minutes. Le séisme du 26 décembre 2004 survenu au large de Sumatra (Indonésie) a coïncidé avec la rupture d'une faille longue de 1 000 km pendant environ 10 minutes, faisant de ce tremblement de terre le plus long jamais enregistré.

### 130 Existe-t-il des signes annonciateurs d'un séisme?

Oui, ils sont de plusieurs ordres, encore faut-il que la zone soit appareillée, surveillée et que les signaux soient correctement

interprétés. Ainsi, avant la survenance d'un séisme, le sol peut laisser s'échapper un gaz radioactif appelé radon, dont la quantité et la présence dépendent de la nature du sol. Les géologues peuvent également observer des élévations de nappes phréatiques (l'eau piégée dans des roches poreuses), ou encore constater l'arrêt de fonctionnement de fontaines, pendant qu'à la surface la topographie est retouchée par de légers mouvements de terrain. À plus long terme, les séismes importants peuvent être précédés par des tremblements plus légers, imperceptibles, de la même façon que des répliques surviennent à la suite du choc principal. Cependant, les séismes pourraient être anticipés depuis la très haute atmosphère. En juin 2004, le Centre national d'études spatiales (CNES) a envoyé un petit satellite nommé Déméter (*Detection of Electro-Magnetic Emissions from Earthquake Regions*) chargé notamment de surveiller les perturbations électromagnétiques dans l'atmosphère dont on suspecte l'existence avant et après un séisme. S'il était établi une corrélation entre ces perturbations du champ magnétique\* et la survenance d'un séisme, la prévision et la prévention feraient un pas majeur pour sauver des vies humaines, à condition que ces signaux surviennent plusieurs heures à plusieurs jours avant le choc sismique. Toutefois, il existe une règle en sismologie : toute région qui a déjà tremblé a de fortes chances d'être de nouveau secouée. Par conséquent, l'étude sur le terrain reste indispensable, et toutes les méthodes citées précédemment doivent être mises en pratique afin de prévoir un futur tremblement de terre.

#### CHINE : UNE SCIENCE INSTRUMENTALISÉE POUR LA GLOIRE DU PARTI

La Chine ressent les conséquences telluriques de la poussée himalayenne. Pour cette raison, et aussi au nom du Parti, unique et officiel, elle doit protéger sa population encore très pauvre et en partie exposée aux séismes. Ainsi, durant les années 1960, les sismologues chinois développèrent une méthode de reconnaissance des signes avant-coureurs d'un séisme, qu'ils inculquèrent au peuple. Fut-ce de la chance ou bien le mérite de la « méthode », un puissant séisme (magnitude 7,3) put être prédit quelques heures avant qu'il ne survienne, le 4 février 1975, à Haicheng. Des dizaines de milliers de vies furent épargnées. Aussitôt, les autorités chinoises clamèrent le succès de cette « méthode » de prédiction et le Parti put s'enorgueillir, devant le monde entier, d'avoir été à l'écoute du peuple en mettant en avant cette réussite pseudo-scientifique, impulsée sous Mao. La supériorité indiscutable du régime chinois était bel et bien établie, même face aux forces telluriques. Le 28 juillet 1976, la Chine subit un séisme destructeur

(magnitude 7,8) à Tangshan, une ville industrielle. La « méthode » fut inefficace, et le régime dut admettre officiellement la mort de 240 000 personnes. Une estimation plus juste, à usage non politique, admet au moins 600 000 décès, faisant de ce séisme la plus grave catastrophe naturelle du  $xx^e$  siècle. Pourtant, le peuple chinois ne put protester devant ce drame et l'échec du régime, la Chine restait une dictature.

### 131 Qu'est-ce que le « Big One » ?

>>> 50

En américain, cette expression désigne, avec une dimension biblique catastrophiste, voire apocalyptique, à peine masquée, le séisme qui engendrera la destruction d'une partie de la Californie. Proches de la fameuse faille de San Andreas, Los Angeles et San Francisco reposent sur des bombes sismiques à retardement qui pourraient exploser à tout moment. Ce scénario s'est déjà produit en 1906, lorsque San Francisco fut détruite par un incendie à la suite d'un tremblement de terre destructeur (magnitude 7,8) au cours duquel 3 000 personnes moururent. Aujourd'hui, si un tel séisme avait lieu, ce sont 18 000 personnes qui périraient et 300 000 autres qui seraient alors sans abri. L'économie des États-Unis se retrouverait bloquée, engendrant par là même un effet domino sur toutes les économies qui en dépendent. Le cataclysme naturel pourrait se transformer en catastrophe économique et sociale dans d'autres pays, dont les économies sont imbriquées avec celle des États-Unis. Cet aspect comptable, mais humain, doit aussi être dorénavant anticipé pour jauger les conséquences d'une telle catastrophe lorsqu'un séisme majeur surviendra (magnitude > 8).

## Mobilité des fractures terrestres

### 132 Un séisme peut-il déplacer le sol terrestre ?

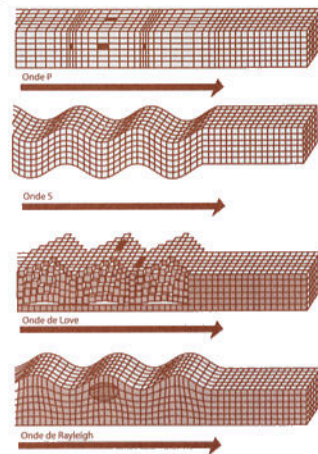
>>> 128, 131

Un séisme correspond à une fracturation et à un déplacement des roches au sein de la croûte terrestre. Cette mobilité est perceptible en surface. Dans le cas de séismes violents ou bien répétés, on constate régulièrement des déplacements verticaux

ou horizontaux de plusieurs mètres de portions entières du sol. Ainsi, au Chili, en 1960, le plus important séisme enregistré a provoqué un déplacement du sol sur une distance de 20 m en à peine 3 minutes. Ce déplacement horizontal est exceptionnel et n'a pourtant rien à voir avec les images aussi spectaculaires qu'inexactes produites pour illustrer un film catastrophe hollywoodien, dans lequel un territoire est déchiré en quelques secondes par une faille béante profonde de plusieurs centaines de mètres et large de plusieurs kilomètres dans laquelle l'océan s'engouffre (*Le Grand Tremblement de terre de Los Angeles*, 1990). Ces films s'appuient sur le mythe biblique de l'apocalypse et du fameux Big One.

### 133 Un séisme peut-il se propager ?

Un séisme est une libération d'énergie soudaine accumulée au point de fracturation des roches, appelé hypocentre, au sein de la croûte terrestre. L'énergie produite par le séisme génère des vibrations qui se diffusent sous forme d'ondes. Ce sont elles qui font trembler le sol et s'effondrer les bâtiments. Il en existe quatre sortes. Les ondes P, ou Premières, se propagent avant les autres et provoquent des mouvements de contraction/distension du sol, à la façon d'un élastique ou d'un ressort que l'on étirerait et détendrait. Les



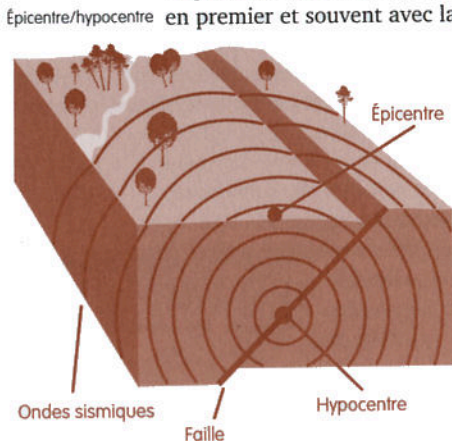
Progression des ondes sismiques selon leur nature

ondes S, ou Secondes, suivent les ondes P ; elles provoquent des rebonds du sol à l'image de vagues. Il existe deux autres types d'ondes qui ne se diffusent qu'à la surface du sol : les ondes de Love (L) et celles de Raleigh (R) ; les ondes L déplacent le sol d'un côté vers l'autre, perpendiculairement à la direction de propagation. Les ondes R suivent un mouvement elliptique similaire à celui d'un grain de sable pris dans une vague.

## 134 Quelle est la différence entre un épicentre et un hypocentre ?

>>> 86, 133

L'hypocentre est le point où se produit la fracturation des roches dans la croûte terrestre. L'épicentre est le point projeté à la verticale et en surface de l'hypocentre. Pour synonyme d'hypocentre, les sismologues emploient parfois le terme « foyer ». L'épicentre est l'endroit où généralement le séisme est ressenti en premier et souvent avec la plus grande violence. La profondeur de l'hypocentre, donc du point de génération du séisme, varie de quelques kilomètres à près de 700 km. Cependant, les hypocentres profonds, qui sont très rares, correspondent à des plaques lithosphériques\* plongeantes pas encore digérées dans le manteau terrestre et qui ont donc conservé leur rigidité. La plupart des séismes ont des hypocentres localisés dans les 70 premiers kilomètres de la croûte terrestre.



## 135 Un séisme peut-il en provoquer un autre ?

Il est souvent suspecté un lien, voire une causalité, entre plusieurs séismes produits dans un laps de temps réduit. Ce phénomène est assimilable à l'effet domino : la chute du premier entraîne celle des suivants en cascade. Jusqu'à maintenant, aucun scientifique n'a pu démontrer des effets de ce genre. Cependant, des géologues soupçonnent que le grand séisme de Sumatra du 26 décembre 2004 a pu se produire en deux épisodes distincts mais dépendants. L'hypothèse consiste à imaginer qu'un premier séisme survient et déplace la croûte terrestre. Ce mouvement latéral tamponne une portion de croûte indépendante qui se met en mouvement immédiatement et génère un second séisme dans la foulée du premier. Cette hypothèse doit être vérifiée sur le terrain et lors de séismes futurs.

## 136 La Terre gronde-t-elle durant un séisme ?

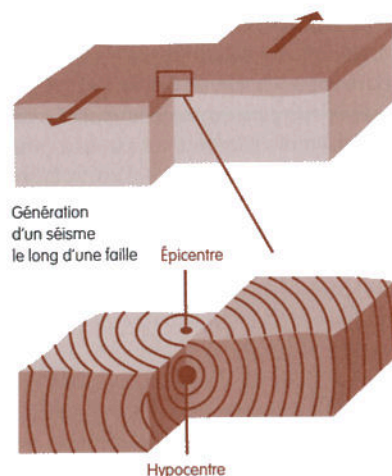
Les témoins d'un séisme décrivent souvent un bruit ressemblant à une explosion, suivie d'un grondement analogue à celui que ferait un camion fou dévalant une pente à toute vitesse. Ce cas de figure est souvent parfaitement exploité au cinéma pour aggraver l'intensité de la scène dramatique lors d'un tremblement de terre (qui d'ailleurs affecte, au choix mais systématiquement, New York ou Los Angeles !). Ce grondement a bien lieu et semble dû au passage des ondes sismiques générées par la secousse. Ces ondes progressent à la vitesse de 6 km/s pour les plus rapides, ébranlent les roches et provoquent un grondement sourd. Ainsi, le 30 septembre 2002, la Bretagne et les Pays de la Loire furent secoués par un séisme de puissance moyenne qui n'a provoqué que peu de dégâts et surtout pas de victimes. En se propageant, les ondes ont parcouru plus de 200 km et ont généré ce fameux grondement sourd qui fut entendu par au moins trois millions de Français, d'Angers jusqu'à Vannes en passant par Nantes et La Roche-sur-Yon.

## Causes et moteur des tremblements de terre

### 137 Quelle est la cause majeure des séismes ?

>>> 72

La tectonique des plaques\*, ou dérive des continents, est la cause des tremblements de terre. À l'échelle du globe, la croûte terrestre est partitionnée en grandes plaques continentales, ou lithosphériques\*, en perpétuel mouvement. Ces plaques se percutent les unes contre les autres à des vitesses pouvant aller jusqu'à 10 cm par an. Certains de ces chocs provoquent des tremblements de terre. À une échelle plus fine, dans le but de mieux visualiser le mécanisme de génération d'un séisme, imaginons deux blocs rocheux coulissant l'un contre l'autre mais en des sens opposés. Ce mouvement contraire accumule de l'énergie



à l'endroit où ont lieu les frottements. Alors que jusque-là les deux blocs immobilisés l'un contre l'autre parvenaient à absorber la déformation, advient le point de rupture au-delà duquel l'énergie ne peut plus être stockée et doit être libérée pour que le coulisage des plaques puisse se faire. Ce mouvement des deux blocs rocheux l'un contre l'autre génère un séisme et libère une énergie qui va se propager sous forme d'ondes, de la même façon qu'un caillou, en pénétrant dans l'eau, engendre de petites vagues concentriques.

### 138 Où se produisent les séismes ?

>>> 85, 86

Ils sont liés à la tectonique des plaques\*. À l'instar des volcans, les séismes sont les signaux de la libération et de l'évacuation de l'énergie produite au sein du noyau terrestre, diffusée au travers du manteau puis évacuée après avoir traversé la croûte. Par conséquent, les séismes se produisent principalement le long des frontières entre les plaques lithosphériques\*. Ainsi, lorsqu'une plaque lithosphérique en rencontre une autre, il se produit une friction qui aboutit à un séisme. Cependant, des continents supposés stables car distants de toutes frontières de plaques peuvent être ébranlés. C'est le cas du Massif central, de la Manche ou encore du centre des États-Unis. Ces régions sont presque sans relief marqué ; en dépit de cette caractéristique morphologique, des séismes parfois violents surviennent. Ce phénomène a deux origines majeures : la première est une conséquence directe de l'existence d'une chaîne de montagnes distante et active (centre des États-Unis) ; la seconde a trait à la conservation au sein de la croûte terrestre d'une énergie résiduelle, stockée depuis plusieurs centaines de millions d'années et libérée lors de séismes souvent modérés (Massif central).

### 139

>>> 86, 134

#### Existe-t-il des séismes dans le centre de la Terre ?

Non. La majorité des séismes sont dits « superficiels » car ils ont lieu au sein de la croûte, soit entre 0 et 100 km de profondeur. En deçà de cette profondeur, le manteau terrestre devient plastique, se déforme en absorbant les contraintes, alors que la croûte casse. La fracturation de la croûte terrestre est la source des séismes. Quelques séismes profonds (700 km) surviennent et correspondent à des morceaux de plaques lithosphériques\* restés intacts, donc rigides et encore non digérés dans le manteau.

### 140

>>> 86

#### Séismes et volcanisme sont-ils liés ?

Ces deux phénomènes sont souvent associés, à tort ou à raison. Cette affiliation est établie à raison pour des causes géologiques. En effet, les séismes surviennent, pour 90 % des cas, aux frontières des plaques lithosphériques\*, à l'instar du volcanisme qui, très souvent, naît à l'endroit où une plaque plonge sous une autre pour être recyclée dans le manteau terrestre. En plongeant, la plaque coulisse sous l'autre et provoque quelques séismes. Le volcanisme n'arrive que dans un second temps, une fois que la plaque engloutie est digérée et rendue partiellement sous forme de magma. Par conséquent, séismes et volcans sont géographiquement et géologiquement réunis, sans que les uns soient la conséquence des autres. En revanche, il existe des séismes dits volcaniques. Durant son ascension, le magma heurte les parois de la cheminée volcanique. Ce sont ces chocs qui sont la cause des séismes volcaniques, dont la puissance reste largement inférieure à celle des séismes tectoniques.

### 141

#### Quelle est la puissance de l'énergie libérée pendant un séisme ?

On considère qu'un séisme moyen (magnitude 5), perceptible par l'homme sans que cela ne provoque de dégâts majeurs, équivaut à l'énergie produite par la bombe d'Hiroshima. À titre de comparaison, le séisme de Sumatra du 26 décembre 2004 a dégagé l'équivalent de 23 000 bombes d'Hiroshima en moins de 10 minutes. Ce séisme extrêmement puissant et très rare n'a pas seulement coïncidé avec le tsunami, qui fut ressenti même en Arctique ; il a été à l'origine d'un changement régional de la topographie marine.

## 142 L'homme peut-il provoquer des séismes?

L'homme influence le climat, c'est un fait. Moins réputé, son impact sur la géologie est aussi réel et devrait être perceptible pendant des dizaines, voire des centaines de milliers d'années. Certaines activités humaines peuvent déclencher des séismes plus ou moins forts. Parmi elles, la construction et la mise en eau d'un barrage et de son lac créent une perturbation locale, qui oblige la croûte à des réajustements mécaniques perceptibles sous forme de séismes. La plupart de ces séismes particuliers ne sont pas assez puissants pour causer des dégâts majeurs. En revanche, les essais nucléaires souterrains ont pu être à l'origine de séismes importants. Parmi les autres interventions humaines capables d'engendrer des séismes, les activités minières (tirs de mines, effondrement) et d'extraction de gaz et de pétrole sont également des causes possibles de séismes induits par l'homme.

## La répétition des séismes

### 143 Les séismes se répètent-ils?

>>> 85, 86,  
87, 131

L'actualité donne l'impression que les séismes se répètent aux mêmes endroits et affectent toujours les mêmes populations vulnérables. Cette perception est bien une réalité géologique, car les séismes sont principalement localisés le long des frontières des plaques lithosphériques\* marquées par de grandes failles actives. Ces fractures de la croûte terrestre sont des zones de stockage de l'énergie tellurique, libérée ponctuellement lors des tremblements de terre. Néanmoins, les contraintes entre les plaques lithosphériques jouent toujours et le stock d'énergie accumulée est renouvelé régulièrement; les sismologues disent que la faille est « en charge ». Ainsi, une faille est en charge lorsque les contraintes s'y accumulent, et se décharge à la faveur d'un séisme, une fois atteinte sa limite de résistance.

### LA FAILLE NORD-ANATOLIENNE OU LA PEUR DU « BIG ONE » TURC À ISTANBUL

La Turquie est un territoire sismique tailladé par une faille est-ouest lacérant sa péninsule dans sa moitié septentrionale sur plus de 1 000 km. Cette déchirure est nommée faille nord-anatolienne par les géologues, qui la surveillent de très près. Le dernier grand séisme qui lui est attaché a frappé la ville d'Izmit dans la nuit du 17 août 1999 et a induit la mort d'environ 20 000 personnes. Cette faille est la marque du coulissage de la péninsule turque vers l'ouest le long de la plaque eurasiatique, à la vitesse de 2 cm/an. Cette célérité est toute relative et peut paraître modeste. Cependant, elle est suffisante pour que la faille nord-anatolienne se charge et se décharge régulièrement le long de son tronçon. Les géologues ont repéré les lieux traversés par la faille qui ont été frappés par des séismes, et dont les décharges successives semblent progresser vers l'ouest. À l'heure actuelle, un des segments occidentaux apparemment vierge de la faille ne paraît pas avoir connu de mouvements récents. Or, la règle sismologique veut que plus longtemps une faille active reste inerte, plus violent sera le séisme qui l'animera. La section de la faille nord-anatolienne qui n'a pas encore été secouée correspond à la ville d'Istanbul, où vivent 10 millions de personnes.

### 144 Peut-on voir un séisme?

>>> 130

Ce phénomène naturel, rarement d'origine humaine (sauf explosions nucléaires souterraines perceptibles par l'homme ou mise en eau d'une retenue), est terrifiant, car il survient sans réel signe annonciateur et reste invisible. Pourtant, il existe une méthode qui permet d'observer un séisme *a posteriori*. Embarqué dans un satellite, un radar mesure les déformations instantanées qui affectent la surface de la Terre après un séisme. Le principe est simple : en survolant une région, le satellite fabrique une image qu'il compare à une seconde prise après le choc tellurique. La précision des images est stupéfiante, puisqu'il est possible de mesurer des déformations du sol de l'ordre de 4 cm sur une surface de 1 000 km<sup>2</sup>. Cette méthode n'est valable que pour les déplacements postsismiques. En l'affinant aux microdéplacements, les sismologues pourraient mieux prévoir les grands tremblements de terre, souvent précédés par de plus petits.

### 145 La Terre s'arrêtera-t-elle de trembler un jour?

>>> 93

L'activité sismique étant intimement liée à la tectonique des plaques\* et à la production de chaleur dans le noyau terrestre, on peut effectivement s'attendre à une réduction du nombre de



tremblements de terre et de leur puissance à mesure que vieillira la Terre. Une fois que les plaques lithosphériques\* seront figées, leurs frontières ne seront plus les lieux de leur affrontement et l'énergie qui s'y accumule aujourd'hui décroîtra inéluctablement. Les rares séismes, sans doute puissants mais rares pour la plupart, correspondront à des réajustements au sein de la croûte terrestre.

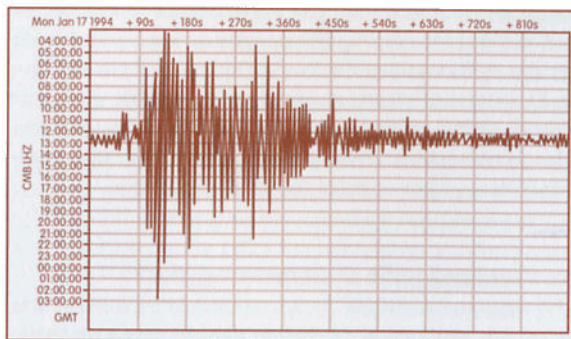
## Magnitude et intensité

### 146 Qu'est-ce qu'un sismomètre ?

En tremblant, la Terre libère une énergie que les sismologues quantifient. Plus fort est le tremblement de terre, plus grande est la quantité d'énergie dégagée. Pour cela, le territoire sismique est équipé d'appareils appelés sismomètres, capables d'enregistrer très précisément les plus infimes mouvements du sol grâce aux ondes sismiques qui le traversent. Un sismomètre est composé d'un aimant rattaché au module par des ressorts et entouré d'une bobine. Une fois que les ondes sismiques atteignent le sismomètre, la bobine se met à vibrer plus rapidement que l'aimant. Ce différentiel génère un courant électrique dont le signal est immédiatement transmis au laboratoire, aujourd'hui de plus

en plus par wifi lorsque le territoire est équipé. La traduction de ce signal électrique est graphique et zèbre de longues langues de papier avec un fil d'encre.

Les sismomètres sont des appareils onéreux et sensibles qu'il faut pou-



Enregistrement d'un trémor sismique

voir isoler des perturbations locales (passages de camions, de randonneurs, etc.), ou bien soustraire aux convoitises d'escamoteurs opportunistes qui n'ont de toute façon ni l'usage ni la possibilité de revendre ce genre d'appareils.

### 147 Quelle est la différence entre intensité et magnitude ?

>>> 148

Ces termes font référence à deux échelles de mesure distinctes de l'énergie dégagée lors d'un séisme. La magnitude mesure l'énergie libérée pendant le séisme au point de rupture des roches, sans que cette puissance ne varie avec l'éloignement par rapport au foyer. C'est l'échelle de Richter qui mesure la magnitude.

L'intensité est une mesure indirecte réalisée à partir des dégâts constatés sur l'homme et ses équipements. Elle décroît à mesure que l'on s'éloigne du foyer. La plus fameuse échelle de mesure de l'intensité est celle de MSK (mise au point par les Soviétiques Medvedev, Sponheuer et Kamik en 1964). La mesure de l'intensité est utilisée au cas où le territoire touché par un séisme n'est pas équipé de sismomètres. De plus, selon les régions sismiques, la vulnérabilité des populations diffère. Ainsi, un séisme modéré pourra raser une ville à cause de normes de construction non respectées ou de la pauvreté d'une population incapable de faire face à ce risque. En revanche, un puissant séisme affectera un territoire équipé et apprêté sans engendrer de dégâts majeurs grâce à la rigueur des normes parasismiques. L'échelle de mesure de l'intensité est donc subjective, alors que l'échelle de mesure de la magnitude est objective.

### 148 Qu'est-ce que l'échelle de Richter ?

Régulièrement, afin de donner une idée précise de l'importance du séisme qui vient de ravager une région, les journalistes expriment cette énergie en utilisant la fameuse échelle de Richter. Cette échelle de mesure quantifie la magnitude du séisme, c'est-à-dire la quantité d'énergie dégagée au foyer.

Charles Francis Richter était un sismologue californien dont la mort, en 1985, fut relayée dans le monde entier, tant son nom était devenu familier à des centaines de millions de personnes. La mesure de la magnitude selon la méthode de C. F. Richter, perfectionnée depuis, est logarithmique. Cette subtilité mathématique

indique qu'un séisme de magnitude 5 est 10 fois plus fort qu'un séisme de magnitude 4, ou encore qu'un séisme de magnitude 9 est 10 000 fois plus puissant et potentiellement destructeur qu'un autre de magnitude 5. L'échelle de Richter est graduée de 0 à 9 mais reste ouverte, car des séismes très puissants, 10 à 100 fois plus puissants que celui du 26 décembre 2004, peuvent survenir.

Classification des séismes selon l'échelle de Richter :

- > au-dessous de 2 : microséisme, non ressenti ;
- > de 2,0 à 2,9 : séisme très mineur, non ressenti mais enregistré par les sismomètres ;
- > de 3,0 à 3,9 : séisme mineur, ressenti sans engendrer de dommages ;
- > de 4,0 à 4,9 : séisme léger, quelques dommages très légers ; les objets de la maison peuvent tomber ;
- > de 5,0 à 5,9 : séisme modéré, pouvant causer des dommages majeurs à des édifices mal conçus et de légers dégâts aux édifices régulièrement bâtis ;
- > de 6,0 à 6,9 : séisme fort, pouvant être destructeur dans un périmètre de 200 km ;
- > de 7,0 à 7,9 : séisme majeur, pouvant être destructeur dans des zones plus vastes ;
- > de 8,0 à 8,9 : séisme important, pouvant causer des dommages sérieux dans des zones se trouvant à des centaines de kilomètres alentour ;
- > à partir de 9 : séisme exceptionnel dont la fréquence est généralement de deux par siècle, correspondant à une perturbation, voire un changement de relief.

Les séismes dont la magnitude excède 9 surviennent une fois tous les vingt ans en moyenne, alors que les sismomètres enregistrent quotidiennement 8 000 secousses inférieures à la magnitude 2 dans le monde.

## 149 Quel a été le plus fort séisme enregistré ?

>>> 141

La référence récente est le tremblement de terre du 26 décembre 2004 (Sumatra). Pourtant, le 22 septembre 1960, au large du Chili, un séisme de magnitude 9,5 a secoué l'ensemble du pays et une partie de l'Amérique du Sud. Son épicerne était à peine à 700 km de Santiago. Ce séisme est à l'origine d'un tsu-

nami qui a traversé le Pacifique et a atteint les littoraux asiatiques 24 heures plus tard. Ce fut un miracle, mais ce séisme ne provoqua la disparition « que » de 3 000 personnes. La différence avec celui de Sumatra en 2004 réside dans la puissance dégagée qui fut au moins deux fois plus importante au Chili ; il existe également une différence majeure entre les deux époques, car l'urbanisation et la concentration urbaine et démographique le long des côtes a rendu ces populations, souvent pauvres, très vulnérables aux tsunamis. Notons que ces derniers ne sont pas systématiquement générés par un séisme marin.

## Prévision et prévention

### 150 Les séismes sont-ils directement mortels ?

Un séisme n'a jamais tué un seul homme, ou très occasionnellement par crise cardiaque ! En revanche, ce sont les effets induits qui sont destructeurs. Canalisations de gaz rompues et susceptibles d'exploser, effondrements d'immeubles et de ponts, famines, épidémies, isolement des populations affectées, tsunamis et mouvements de terrain sont les premières causes de mortalité



résultant d'un tremblement de terre. Un séisme ne tue donc pas directement, mais engendre des effets qui, eux, sont extrêmement destructeurs pour les populations sensibles. Imaginez que vous vous promenez dans une plaine : le plus gros séisme jamais enregistré peut survenir, tout ce que vous risquez est de tomber et de ne pas réussir à tenir debout ! Tout au plus une torsion de la cheville vous laissera-t-elle un souvenir de cet événement !

## 151 Peut-on utiliser les animaux pour prévoir un séisme ?

Peut-être est-ce à cause de son impuissance face aux séismes que l'homme recherche des signaux à décrypter pour prévoir les convulsions telluriques. La nature est l'une des sources préférées, car en observant certains animaux, il est commun d'entendre que ceux-ci sont extrêmement sensibles aux signes avant-coureurs d'un tremblement de terre. Ainsi, en 1805 à Naples, il a été décrit des sauterelles en train de quitter la ville pour gagner la mer ; en Alaska (1960), les ours Kodiak auraient été arrachés à leur hibernation deux semaines avant un choc sismique de magnitude 9 ; enfin, en Chine, il a été conté que les serpents, en plein hiver, sortaient de leurs terriers, préférant mourir gelés plutôt qu'écrasés ! Ce sixième sens animal, qui rendrait nos congénères sensibles aux signaux précurseurs des séismes, n'est pas scientifiquement établi. Il existe des millions d'espèces animales, toutes vivant dans une nature plus ou moins soumise aux séismes. C'est un désir humain bien compréhensible de vouloir deviner quelques messages avertisseurs en observant les animaux, dont les comportements diffèrent énormément d'une espèce à une autre.

## 152 Comment se protéger d'un séisme ?

La meilleure solution serait encore la fuite à l'écart de toutes constructions, canalisations et versants instables. Mais la prévention est la meilleure protection contre les séismes. Elle consiste d'abord en la désignation et l'application de normes parasismiques pour les bâtiments et, ensuite, en l'apprentissage d'une culture du risque. Sans détailler les normes parasismiques, les architectes préconisent des constructions à la géométrie

variable rendant les habitations moins vulnérables, ou encore l'installation des bâtiments sur ressorts ! Ces derniers absorbent les vibrations du sol au moment du passage des ondes sismiques et se déforment en conséquence.

La culture et l'apprentissage du risque sont également un moyen efficace, car il faut vivre avec le risque et en accepter une part. Ainsi, au Japon, les habitants savent que lors d'une secousse, s'il n'est pas possible de fuir, il est préférable de se réfugier sous une table (après avoir mis un casque), éloignée de meubles et objets susceptibles de chuter, et de prendre au moins une bouteille d'eau avec soi au cas où le séjour dans les décombres durerait.

## 153 Quel est le séisme à l'origine du plus grand désastre humain ?

En 1556, la province du Shaanxi, en Chine centrale, fut secouée par un tremblement de terre violent (magnitude inconnue) qui entraîna la mort de plus de 800 000 personnes. Les victimes moururent enfouies sous les décombres de leurs habitations troglodytiques creusées dans des roches très meubles et sensibles aux vibrations du sol.

### EN 1995, LE JAPON PREND CONSCIENCE DE LA CORRUPTION

Les Japonais vivent avec le risque sismique depuis des siècles, à l'inverse des Européens et Américains. Ils savent faire preuve d'humilité devant les colères de la nature, et appliquent des normes de conduite strictes en cas de séisme. L'édiction de ces normes et leur application peuvent être perçues comme un prolongement de la culture japonaise, façonnée par l'honneur et la probité. Le matin du 17 janvier 1995, la sixième ville du Japon, Kobé, est touchée par un séisme d'une magnitude 6,9 sur l'échelle de Richter. Le foyer du séisme est superficiel, 13 km de profondeur, et le tremblement dure 20 secondes, ce qui, sur le moment, semble une éternité. Ce séisme entraîne la mort de 6 300 personnes et 300 000 autres se retrouvèrent sans-abri.

Les Japonais eurent un réveil très douloureux au moment du séisme de Kobé. Des constructions prétendues parasismiques n'avaient pas résisté au choc principal et à ses répliques. Le déshonneur et la honte, en plus du malheur, avaient atteint les Japonais, qui découvrèrent alors que les immeubles supposés résister avaient été des objets de passations de pots-de-vin entre les constructeurs et les collectivités publiques. Le déshonneur fut aussi humiliant que l'ampleur du drame. Le Japon prenait conscience de la corruption, lui qui s'en croyait préservé.

## Les séismes dans le monde

### 154 Quelle est la région la plus sismique sur Terre ?

&gt;&gt;&gt; 50

Le Japon est considéré comme le territoire le plus exposé au risque sismique. Les affrontements entre les plaques lithosphériques\* sont les causes des séismes. Or, sous le Japon, trois plaques lithosphériques se percutent continuellement. En 1923, la plaine du Kanto fut secouée par un séisme qui détruisit les villes de Yokohama et de Tokyo. Environ 124 000 personnes moururent à cause des effets induits par le séisme, notamment un feu urbain qui dévasta la capitale. Deux millions de personnes devinrent des sans-abri. Un paquebot français participa activement au sauvetage des survivants, puis servit de siège à l'ambassade française et à son représentant Paul Claudel.

L'Indonésie est également très exposée, ainsi que la côte sud-américaine occidentale. En 1908, en Europe, le séisme de Messine (Sicile) induisit la mort d'environ 100 000 personnes.

&gt;&gt;&gt; 87,

150, 167

### CHINE, PROVINCE DU SICHUAN, LE 12 MAI 2008

L'année 2008 devait être celle de la consécration pour la Chine, convaincue de sa puissance, de sa grandeur, voire de sa supériorité renouvelée grâce à l'économie conquérante. Les jeux Olympiques n'en seraient que la démonstration, et même l'évidence de la force de cet ancien empire. La flamme olympique avait terminé de parcourir la planète, avait été élevée indignement jusqu'au sommet de l'Everest pour dominer le Tibet, après avoir bravé et snobé les manifestations le long d'un parcours trop long. Les Chinois et le régime dictatorial étaient sûrs que rien ne pouvait survenir. Malgré cette confiance, le 12 mai, dans la province du Sichuan, un tremblement de terre (magnitude 7,9 à 8) engendra la dévastation d'une zone estimée à environ 100 000 km<sup>2</sup> (soit l'équivalent d'un quart de la France), et la disparition officielle de près de 65 000 personnes (25 000 autres restant recherchées).

Ce séisme illustre bien la fugacité de la mémoire humaine, car ce territoire chinois est régulièrement affecté par des tremblements de terre, à l'instar du pourtour du plateau tibétain dont le bassin du Sichuan n'est que la prolongation géographique orientale. Le dernier événement sismique ne remonte qu'à 1933 : à l'époque, environ 9 300 personnes avaient été tuées. En outre, la Chine n'est que l'arrière-pays de la collision Inde-Asie, dont la chaîne himalayenne et le plateau tibétain sont les conséquences. Depuis plus de 50 millions d'années, l'Inde tamponne la plaque tectonique\* eurasiatique à la vitesse moyenne de

5 cm par an. Le séisme du Sichuan n'est donc qu'un contrecoup de cet affrontement qui n'a lieu qu'à 1 000 km au sud-ouest. Bien que les répliques à ce séisme soient déjà ressenties et puissantes, elles s'atténueront avec le temps, pendant encore plusieurs années.

Le séisme n'a pas été meurtrier par lui-même, à l'instar des autres tremblements de terre. En revanche, les constructions peu solides, l'oubli (volontaire ?) d'application de normes parasismiques dans une contrée à la population majoritairement agricole et pauvre, ont été des facteurs déterminants et aggravants. Les mouvements de terrain, ainsi que les pluies qui se sont déclenchées dès le lendemain de la catastrophe, ont amplifié les dégâts et retardé l'arrivée des secours, laissant orphelines d'aide matérielle de nombreuses vallées et leurs habitants. Pour la première fois, la Chine, politiquement malmenée, notamment sur les sujets des droits de l'homme et de l'occupation de la province tibétaine, accepta l'aide d'autres pays, non sans avoir parié sur un calcul politique subtil qui lui permettrait de gagner la compassion de ceux qui l'accusaient la veille.

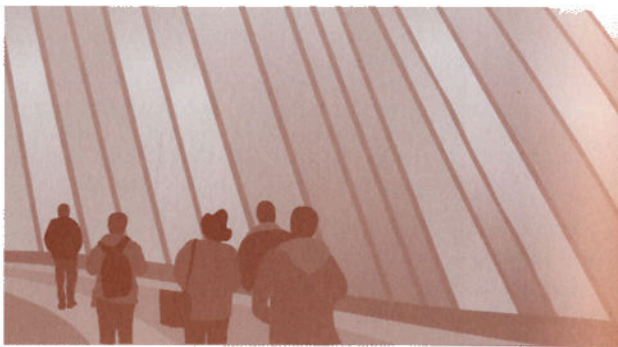
Ainsi, bien opportunément, le régime chinois utilisa cette catastrophe pour lisser son image et en arrondir les angles trop aigus. D'autre part, l'industrialisation des provinces centrales et occidentales du pays étant la priorité du régime, le Sichuan pourrait rapidement bénéficier d'un effort de reconstruction qui permettra à la Chine de rester la première manufacture dans l'économie mondiale.

Malgré tout, les Chinois doutent et ne suivent pas dans leur majorité la position du régime. L'année 2008 devait être celle de la prospérité et de la consécration. Au lieu de cela, beaucoup prédisent une année terrible pour l'ancien empire du Milieu, préférant s'en remettre à des présages païens et à leur interprétation divinatoire, plutôt qu'aux prédicateurs politiques.

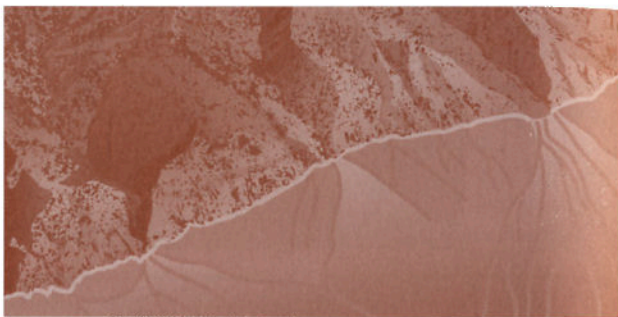
### 155 Peut-on savoir si un territoire est soumis aux séismes en observant les paysages ?

Pour cela, il faut faire appel à la géomorphologie, la discipline qui étudie les formes du relief terrestre. Les cours d'eau sont de très bons marqueurs pour détecter d'anciens séismes. Ainsi, en Himalaya, lorsqu'un séisme survient le long d'une faille coupée perpendiculairement par une rivière, le lit du cours d'eau subit des décalages parfois longs de plusieurs dizaines de mètres et qui peuvent entraîner d'importantes perturbations dans l'écoulement de l'eau, jusqu'à en arrêter la circulation. Ce cas survient lorsque la faille se relève, forme un mur devant la rivière et qu'une petite retenue d'eau s'accumule en amont.

Un autre critère géomorphologique est la reconnaissance de versants de montagnes présentant des facettes pyramidales. Là encore, l'eau joue un rôle capital lorsqu'une faille est chevauchée par une série de rivières parallèles qui en coupent le tracé. La faille sépare deux blocs rocheux indépendants, et les séismes



Miroir de faille, un mur levé dans le paysage



Escarpement de faille, une muraille dans le paysage (vue aérienne)

peuvent entraîner la remontée de l'un des compartiments par rapport à l'autre. À mesure qu'il se lève, le compartiment est découpé par les rivières qui s'y enfoncent et, peu à peu, sculptent dans ce nouveau versant une succession de facettes pyramidales plus ou moins similaires. Ces modelés du relief peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres de hauteur et être diséqués par des chutes d'eau parfois très hautes.

Enfin, un troisième critère géomorphologique est la détection de miroirs de faille. Une faille sépare donc deux compartiments indépendants glissant l'un contre l'autre. Dans sa remontée, l'un des deux frotte contre l'autre et polit sa surface, parfois striée de cannelures plus ou moins profondes et toutes orientées dans la direction du glissement. Ces miroirs de faille ont quelquefois des dimensions gigantesques, proches de 1 000 m de hauteur, et peuvent découper un paysage en quelques siècles.

### LE JOUR OÙ MEXICO FAILLIT ÊTRE ENGLOUTI !

Le 19 septembre 1985, la ville de Mexico, alors la plus grande agglomération au monde, où étaient concentrées près de 30 millions de personnes, fut partiellement ravagée par un puissant séisme de magnitude 8,1 qui provoqua la mort de 9 000 personnes. Ce tremblement de terre était pourtant situé à 350 km de Mexico sur la côte pacifique et, en dépit de sa puissance, n'aurait pas dû affecter aussi fortement la capitale mexicaine.

Mexico occupe une plaine alluviale au sol caillouteux et humide qui, avant l'empire aztèque, était inondée par un lac, dont il reste une couche d'argiles dans laquelle les fondations des bâtiments ont été plantées. Lorsque le séisme est survenu, il s'est produit sous la ville un phénomène particulier appelé thixotropie. Les ondes sismiques ont été piégées dans le bassin lacustre puis ont été amplifiées par les argiles. De ce fait, les constructions ont été soumises à des oscillations plus fortes. Ce phénomène peut être apprécié en déposant une gelée sur une table : faites bouger la table, la gelée oscillera plus énergiquement ; elle entre en résonance. Ainsi, les bâtiments de Mexico les plus affectés par les destructions furent ceux construits récemment et qui ne dépassaient pas 6 à 8 étages. D'autres se sont enfoncés de plusieurs mètres comme s'ils flottaient sur des sables mouvants. Ce séisme a retenu l'attention des élus et experts, durant un temps seulement, sur des populations dont la vulnérabilité égale la pauvreté, et qui peuvent être durement touchées par des catastrophes naturelles même lointaines, telles les victimes qui n'eurent pas à subir directement le séisme de Sumatra du 26 décembre 2004, mais qui se retrouvèrent face à un tsunami qui les emporta et les noya.

## 156

>>> 148

### Combien y a-t-il de séismes par an sur Terre ?

La grande majorité des séismes, plusieurs millions, n'est pas perceptible car leur puissance reste faible ; de plus, les territoires affectés ne sont pas systématiquement appareillés en sismomètres. En 2007, il a été enregistré environ 26 000 séismes dont la magnitude était supérieure à 2 (échelle de Richter). Quatre d'entre eux ont connu des magnitudes supérieures à 8, alors que la majorité (12 300) n'était que de puissance modérée (magnitude 4 à 5) et n'ont pas occasionné de dégâts importants.

## 157

### Y a-t-il une recrudescence des séismes au fil des ans ?

Régulièrement, lorsque surviennent plusieurs séismes éparpillés dans le monde et dans un laps de temps réduit, il est suggéré par les médias que le nombre de tremblements de terre s'accroît, faisant planer l'ombre d'un chaos prochain. Les sismologues et géologues n'ont pas assez de recul pour tracer une tendance,

qui n'aurait de valeur que sur plusieurs centaines de milliers à millions d'années. Or, les enregistrements systématiques n'existent que depuis le XX<sup>e</sup> siècle et l'échelle de Richter n'est entrée en vigueur qu'en 1935. Par conséquent, il est impossible de délivrer un avis arrêté sur une éventuelle augmentation du nombre annuel de séismes dans le monde.

En fait, cette impression résulte de l'augmentation du nombre de victimes exposées aux risques naturels majeurs, bien que, d'une année sur l'autre, ce nombre varie énormément. Cependant, cet accroissement n'est pas le fruit du hasard car il découle de la croissance démographique qui affecte les pays les plus pauvres, et de la concentration de ces habitants dans des zones urbaines à risque. Ainsi, le séisme du 26 décembre 2004 (Sumatra) est une catastrophe naturelle dont les effets ont été amplifiés par les conditions de vie et le manque de politique de prévention et de protection à l'égard des populations pauvres.

## 158 Quelles sont les régions françaises les plus exposées au risque sismique ?

>>> 136,  
138, 148

La France, à l'exception des territoires et départements d'outre-mer, très exposés et vulnérables (Guadeloupe et Martinique), n'est pas franchement soumise aux tremblements de terre. Sa position éloignée des limites de plaques lithosphériques\* l'épargne et la protège grandement des séismes. Néanmoins, en métropole, certaines régions sont déjà réputées pour avoir fait l'objet d'annonces vouant les populations au plus grand péril. Il s'agit en priorité de la Côte d'Azur, des Alpes et des Pyrénées. Ces régions sont remarquables par l'activité tectonique, qui y siège en raison de la poussée et de l'affrontement de la plaque africaine contre l'Europe. Le plus grave séisme enregistré en France ou à proximité fit s'effondrer en 1356 l'actuelle ville suisse de Bâle et les villages voisins. Toute l'Europe de l'Ouest fut ébranlée par les deux secousses principales ressenties jusqu'à Paris. Au moins 80 châteaux s'écroulèrent et plusieurs centaines de victimes périrent dans cette catastrophe, dont la magnitude est estimée entre 6 et 6,5 points sur l'échelle de Richter.

Moins connue est la sismicité qui fait vibrer une grande région ouest de la France, de la Bretagne jusqu'à la Charente. Régulièrement, de petits séismes affectent l'île d'Oléron, l'île de Ré, la

Charente-Maritime ou la Vendée. Malgré l'éloignement d'une frontière de plaque lithosphérique, cette sismicité régulière et faible correspond à une frontière de plaque lithosphérique fossile de plus de 300 millions d'années, enfouie à plusieurs dizaines de kilomètres dans la croûte terrestre et en voie de solidification. Les quelques séismes qui font vibrer Vendéens, Bretons et Charentais sont l'effet de la libération d'une énergie très résiduelle encore contenue. Impossible d'affirmer catégoriquement que cette vaste région ne pourrait pas être un jour frappée par un séisme plus grave. Cependant, le déstockage régulier de cette énergie tellurique ancienne tend à montrer le contraire.

## 159 A-t-on trouvé la trace de séismes destructeurs en France ?

>>> 148

Pour identifier de tels séismes, on recourt à la paléosismicité, une discipline aux méthodes géologiques, afin de retrouver dans les roches et les dépôts sédimentaires les marques et cicatrices laissées par de puissants séismes. Ces études sont difficiles et onéreuses, car elles exigent du temps et des moyens logistiques et humains importants. En général, il s'agit de creuser une tranchée longue et profonde dans le sol et de prendre du temps pour décrire roches et dépôts afin d'y discerner des perturbations. Ainsi, le long de la vallée de la Durance et dans la région de Manosque, cette méthode a permis d'identifier dans les derniers 100 000 ans plusieurs séismes, dont la puissance est présumée avoir franchi 6 points sur l'échelle de Richter.

## 160 Quel est le dernier séisme à avoir causé de graves dégâts en France ?

>>> 148, 159

Le 11 juin 1909, la Provence et la région environnant le village de Lambesc (Bouches-du-Rhône) furent fortement secouées par un séisme d'une magnitude estimée à 6,2 points sur l'échelle de



Vue d'une maison détruite de Lambesc

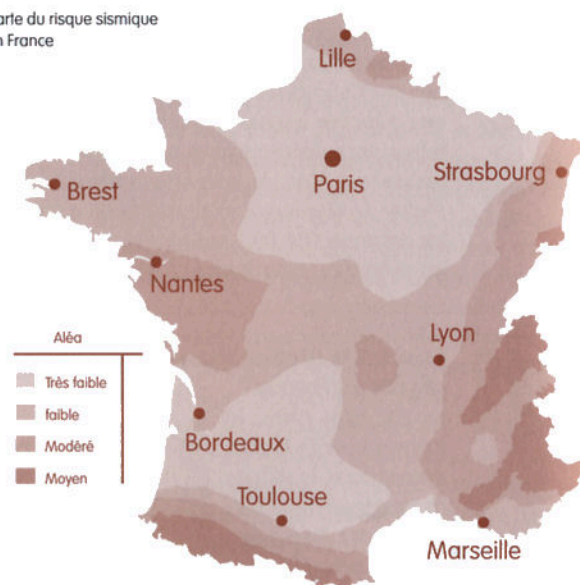
Richter. Cette secousse fut également ressentie en Espagne et en Italie. Parmi les 300 victimes recensées, 46 trouvèrent la mort. Lambesc se trouve en bordure de la vallée de la Durance au sud du Lubéron, cette région dont on suppose qu'elle fut frappée par des séismes de puissance équivalente, voire bien plus importante durant les derniers 100 000 ans.

## 161 Combien y a-t-il de séismes en France chaque année ?

>>> 156, 160

Le territoire français métropolitain est quadrillé par un réseau d'environ 170 sismomètres fixés dans les régions à la sismicité avérée : Massif central (région de Clermont-Ferrand et Limagnes), Alpes, Pyrénées, Côte d'Azur, Corse, Provence, bassin rhénan, Charente, et deux stations isolées en Nord-Pas-de-Calais).

Carte du risque sismique en France



Le nombre de séismes varie beaucoup d'une année sur l'autre. En dix siècles, on recense environ 6 000 séismes, dont 1 vraiment destructeur par siècle et 4 responsables de dommages sévères sans entraîner systématiquement de décès.

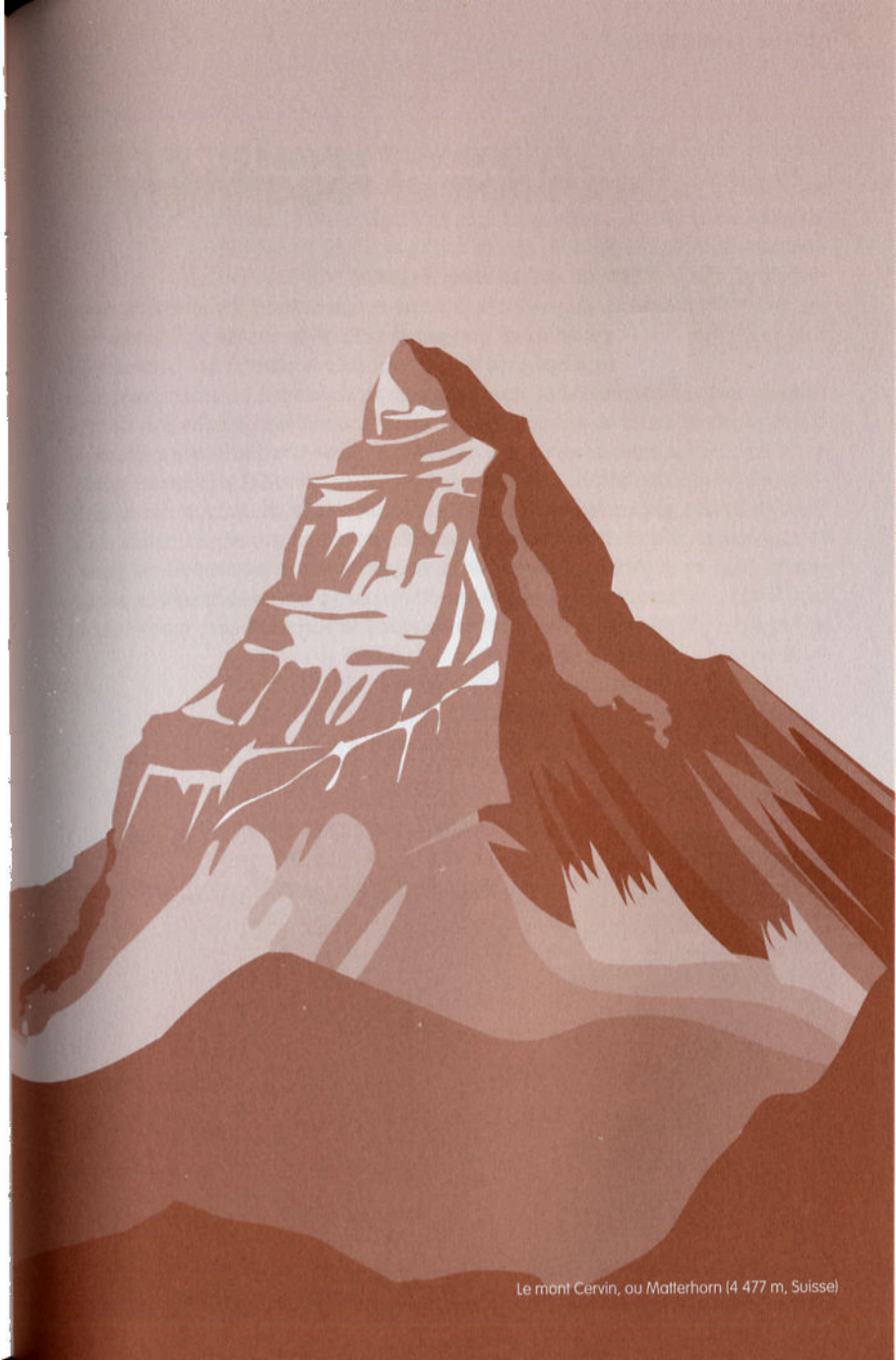
En 2005, le ministre de l'Environnement a proposé la mise en place d'un plan de prévention antisismique doté de 33 millions d'euros dans les 6 années suivantes, notamment avec des contrôles en matière de construction parasismique réellement rigoureux car, selon le Ministre, «de nombreux rapports d'inspection font état de graves négligences dans ce domaine. Certains bâtiments, dans la région de Colmar, ont même dû être démolis sur décision de justice».

# Les montagnes :

## conséquences de la dérive des continents

---

Les montagnes sont des objets géologiques éphémères et changeants que l'on pense à tort inamovibles et éternels. Pourtant, l'existence de la plupart des montagnes est récente. Avant celles-ci en existaient de plus anciennes dont on retrouve quelques vestiges dans les paysages actuels. Les montagnes doivent être interprétées comme des preuves de la vie interne de la planète, avec une naissance souvent tumultueuse, une adolescence marquée par la vigueur, une phase adulte faite de plénitude et une fin de vie empreinte d'un déclin physique et d'un arasement général.





## Définition et répartition

### 162 Qu'est-ce qu'une montagne ?

>>> 87

Une montagne n'est pas une construction grossièrement pyramidale et solitaire. Avant tout, elle n'est jamais seule mais toujours accompagnée de dizaines de congénères qui bâtissent un ensemble plus vaste et complexe : la chaîne de montagnes, souvent haute de plusieurs centaines à milliers de mètres et dont la longueur excède régulièrement plusieurs centaines à milliers de kilomètres. Les montagnes forment donc des ensembles géologiques étendus et attestent surtout de la vitalité intérieure de la Terre. La seconde caractéristique d'une montagne réside dans son anatomie très tourmentée. Les roches qui arment ces gigantesques charpentes sont déformées, plissées et charriées par les affrontements entre les plaques lithosphériques\* morcelant la croûte terrestre.

Chaîne de montagnes



### 163 Où trouve-t-on des montagnes sur Terre ?

>>> 168, 169

Il en existe sur tous les continents, mais leurs ampleur et dimension respectives sont nuancées. La situation géographique et géologique des montagnes dépend de la tectonique des plaques\* (ou dérive des continents). Cette théorie unificatrice des sciences de la Terre trouve, là encore, une application pour expliquer la formation des chaînes de montagnes et leur répartition.

Les chaînes de montagnes sont intimement liées aux plaques lithosphériques\*, à leur déplacement et aux télescopages qui existent sur leurs bordures. Ainsi, les montagnes actives ne se rencontrent qu'à la marge des plaques lithosphériques. De vieilles chaînes de montagnes érodées (Appalaches, Massif central) peuvent subsister à l'intérieur des plaques lithosphériques et manifestent une activité tectonique modérée et rare. Néanmoins, il existe quelques chaînes de montagnes actives qui déforment l'intérieur des continents ; elles sont la prolongation continentale d'une activité tectonique existante directement au contact de deux plaques. C'est le cas de la chaîne du Tian Shan (Chine), contrecoup de la poussée himalayenne, pourtant localisée à 1 500 km au nord-ouest de sa grande sœur.

### 164 Les montagnes ont-elles toujours existé ?

>>> 177

Il semble que cela ait été le cas, bien qu'il faille parfaire ce propos. Avant les montagnes qui éraflent la surface de la Terre que nous connaissons, de plus anciennes existaient mais ont été érodées. Il se pourrait qu'elles n'aient pas été semblables à celles d'aujourd'hui.

Récemment, les géologues ont montré que des continents avaient pu déjà exister il y a 4 milliards d'années (durant une période appelée Archéen), associés à une tectonique des plaques\* précoce. Cependant, la croûte terrestre et le manteau, tous deux encore très chauds, auraient eu un comportement mécanique moins rigide qu'actuellement. De ce fait, les montagnes archéennes, s'il en a existé, ne devaient pas être de très haute altitude. En revanche, elles pouvaient s'étaler sur de plus grandes surfaces. Aujourd'hui, les montagnes occupent des superficies importantes, mais le comportement rigide de la croûte terrestre leur permet d'atteindre des altitudes allant jusqu'à 9 000 m.

## 165 Quelle est la longévité d'une chaîne de montagnes ?

&gt;&gt;&gt; 178

Il faut distinguer le temps nécessaire pour former une chaîne de montagnes de celui requis pour l'éroder. Une chaîne de montagnes peut apparaître en quelques millions d'années. Ainsi, la chaîne du Tian Shan croît à la vitesse de 3 mm par an, soit de quoi lever une montagne de 3 000 m en à peine un million d'années ! À titre de comparaison, les Alpes européennes ont commencé à se former il y a déjà 100 millions d'années. Une fois que les chaînes de montagnes sont inactives et désolidarisées de la dérive des continents, leur relief s'atténue mais reste inscrit dans le paysage et subsiste, de plusieurs centaines de millions d'années à quelques milliards d'années, sous l'aspect de reliefs mamelonnés. Ainsi, le Massif central n'est là que depuis 300 millions d'années, alors que la chaîne montagneuse grenvillienne (Amérique du Nord), totalement érodée, dont l'âge dépasse 1 milliard d'années, a égrainé quelques collines dans le paysage québécois.

## 166 Quelle est la plus grande chaîne de montagnes sur Terre ?

Communément, il est répondu que l'Himalaya est la plus grande chaîne de montagnes sur Terre. Il s'agit de la plus haute, sans aucun doute, puisque tous les sommets de plus de 8 000 m d'altitude y sont localisés (dont l'Everest, à 8 848 m). Cependant, l'Himalaya fait partie d'un ensemble beaucoup plus vaste qui prend naissance avec l'Atlas (Maroc) et se prolonge jusqu'en Indonésie. Cet ensemble montagneux très étendu est composé de plusieurs massifs d'âges différents, tous étant le fruit de la dérive des continents et de la poussée, à l'ouest, de l'Afrique contre l'Europe et, à l'est, de l'Arabie et de l'Inde contre l'Asie. Sur les deux continents américains, une chaîne de montagnes presque aussi longue et aussi complexe plisse les roches sur plus de 10 000 km, de la Terre de Feu jusqu'en Alaska. Les Andes en Amérique du Sud et les Rocheuses en Amérique du Nord sont reliées par une chaîne de montagnes à l'ampleur plus réduite en Amérique centrale.

&gt;&gt;&gt; 85

### DES CHAÎNES DE MONTAGNES VRAIMENT PARTOUT ?

Oui, vraiment partout ou presque. Ainsi, les glaces antarctiques masquent partiellement une chaîne de montagnes, la chaîne Transantarctique, longue de 3 500 km et culminant à 4 897 m d'altitude (mont Vinson). Certains sommets émergent à peine des glaces de quelques dizaines à centaines de mètres de haut pour former des nunataks. D'autres montagnes restent captives des glaces et n'apparaîtront qu'une fois la calotte glaciaire fondue. Ces montagnes englacées tranchent avec celles que l'on décrit dans les abysses océaniques. Régulièrement, il est répété que la plus grande chaîne de montagnes est la dorsale\* médio-océanique qui enlace la Terre sur 60 000 km. Or, bien que haute, cette boursoufflure du fond des océans est d'origine volcanique et ne peut donc être considérée comme une montagne.

## La formation des montagnes

167

&gt;&gt;&gt; 86, 87

### Comment se forment les montagnes ?

Très fréquemment, les montagnes sont à la jonction de deux plaques lithosphériques\* en train de s'affronter. Lorsque deux de ces plaques se rapprochent, l'une plonge au-dessous de l'autre en raison de sa masse plus importante et finit par être engloutie dans une fosse (zone de subduction\*). En convergeant, les deux plaques se raccourcissent et se compriment. Peu à peu, ce mouvement de compression engendre la formation de reliefs plissés, les montagnes.

Prenons un exemple avec l'Himalaya. Il y a 70 millions d'années, l'Inde, plantée dans une plaque lithosphérique (la



Les roches se plissent

plaque indo-australienne), était une île perdue au milieu d'un océan disparu appelé Téthys. La plaque indo-australienne, dans son mouvement, a entraîné l'Inde dans un voyage vers le nord. En s'approchant de l'Asie, la plaque indo-australienne a plongé sous la plaque asiatique. C'est alors qu'ont débuté les premiers plissements himalayens, pendant que l'océan Téthys se refermait. La plaque indo-australienne a donc été engagée dans une subduction qui l'a entraînée vers le manteau terrestre pour y être recyclée. Cependant, l'Inde continentale et ses terres émergées n'ont pas suivi le mouvement descendant, et ont été partiellement décrochées de leur plaque sous-jacente puis rabotées par l'Asie inamovible. Quelques morceaux du continent indien, écaillé par la bordure décapante de la plaque asiatique, ont été repoussés vers le sud pour chevaucher l'Inde. Ainsi, peu à peu, ce mouvement d'écaillage a guidé la formation des premières montagnes himalayennes, jusqu'à ce que le mécanisme de subduction se bloque et que la montée du massif himalayen, puis du plateau tibétain, dans une compression tectonique colossale de deux blocs continentaux, se concrétise.

Une chaîne de montagnes est donc, dans un premier temps, le fruit de la fermeture d'un océan et, dans un second temps, de la convergence et de la compression, voire de la collision\*, de deux plaques lithosphériques avec, sous la croûte terrestre, une subduction continentale.

#### QUE TROUVE-T-ON AU SOMMET DE L'EVEREST ?

Il n'y a pas que le yéti que les himalayistes peuvent croiser sur leur chemin le long des versants de l'Everest ! La plus haute montagne au monde (8 848 m) regorge de fossiles marins, notamment à proximité de son sommet. Ces restes d'animaux minéralisés témoignent bien que l'Himalaya est le fond d'un océan plissé et porté en altitude par la compression de la plaque indienne contre la plaque asiatique.

## 168 Dans quel contexte géologique les montagnes se forment-elles ?

50

Les montagnes résultent de la convergence de deux plaques lithosphériques\* et du plissement de leurs bordures respectives. Ainsi, elles certifient l'existence de limites de plaques lithosphériques à proximité. Ce contexte géologique de convergence et d'affrontement de deux plaques est accompagné de séismes souvent violents et, parfois, de volcanisme. L'activité volcanique n'est pas systématiquement présente dans les montagnes. Ainsi, les Alpes et l'Himalaya résultent de la collision\* de plusieurs plaques lithosphériques. Cette collision entre plusieurs plaques continentales lithosphériques ne permet pas la plongée d'une plaque sous une autre. Elles sont donc bloquées, comprimées, et cette déformation générale de leurs bordures aboutit à une élévation puis à une extension des plissements. Aucune plaque ne prenant le dessus sur l'autre, la matière ne plonge pas dans le manteau, n'y est pas digérée ni recyclée pour être rendue sous forme de magma et de volcans. Les chaînes de montagnes ne sont pas systématiquement des pépinières pour volcans, à l'instar des Alpes et de l'Himalaya, alors que les Andes et les Rocheuses en sont couvertes.

## 169 Existe-t-il des montagnes en formation aujourd'hui ?

168

Les bordures des continents et des plaques lithosphériques\* se plissent constamment par le jeu de la dérive des continents. De ce fait, pendant que des montagnes sont érodées, grignotées par les agents atmosphériques, surtout par l'eau, d'autres sont en gestation et pointent déjà leurs petits sommets naissants. L'Asie, depuis la plaine alluviale du Gange, en Inde, jusqu'en Sibérie, est une pépinière de montagnes. Trois futures chaînes de montagnes forment de longs colliers de collines encore timides. Ainsi, à titre d'exemple, la chaîne de Qilian Shan (800 km de long), qui domine son environnement à 5 547 m d'altitude maximale, est sortie de terre il y a peine 10 millions d'années. Ce chaînon montagneux, comme d'autres (Tian Shan, Muztagh-Ata), qui enserrent le plateau tibétain, sont les conséquences de la collision\* de l'Inde et de l'Asie. Ainsi, les plissements ont débuté dans la chaîne de l'Himalaya, puis migrent vers le nord jusqu'en Sibérie, après avoir sillonné la Chine.

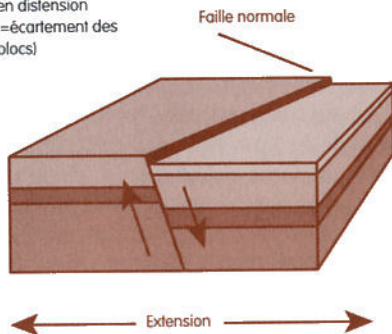
## 170 À quelle vitesse se forme une montagne ?

&gt;&gt;&gt; 165

La croissance d'une montagne dépend de la vitesse de déplacement des plaques lithosphériques\*, qui reste néanmoins supérieure. Les Alpes grandissent à peine de 1 à 2 mm par an selon les endroits, alors que l'Himalaya croît de plus de 10 mm par an. Cette élévation est contrariée et compensée par l'érosion défiant les reliefs. La poussée des montagnes n'est pas linéaire, et se fait souvent par saccades à la faveur de tremblements de terre. Régulièrement, les chaînes de montagnes sont lézardées par des failles, dont les soubresauts verticaux conduisent en surface à l'apparition de rejets plurimétriques. Ces accidents tectoniques s'étendent

et peuvent trahir la localisation de collines qui deviendront, dans plusieurs millions d'années, de véritables montagnes aiguës. Ainsi, si la croissance d'une montagne semble lente à nos yeux humains, elle est à l'échelle géologique relativement rapide.

Exemple de faille en distension (=écartement des blocs)



### « À L'ÉCOLE, SURTOUT, ÉVITEZ D'EN FAIRE UNE MONTAGNE ! »

La formation des montagnes telle qu'elle était enseignée il y a peine plus de vingt ans prouve la difficulté que la théorie de la tectonique des plaques\* a eu pour s'imposer dans le système scolaire, notamment en France. L'auteur de cet ouvrage (dont l'âge est loin d'atteindre une ampleur géologique) a connu des professeurs qui persistaient à enseigner la formation des montagnes selon l'ancien modèle, qui relatait une Terre malingre, dont le refroidissement avait pour traduction en surface la contraction de la croûte terrestre et l'apparition de montagnes. En France, l'enseignement secondaire évoque la dérive des continents sérieusement et de façon détaillée depuis moins de vingt ans... Toutefois, la part des sciences de la Terre y reste volontairement réduite.

## Les types de montagnes

### 171 Existe-t-il plusieurs types de montagnes ?

&gt;&gt;&gt; 168

En apparence, toutes les montagnes se ressemblent. Cette similitude de façade masque des différences dans les modes de formation des massifs montagneux.

Au départ, c'est un peu toujours la même chose : une plaque lithosphérique\* océanique, donc lourde, ripe contre une plaque lithosphérique continentale légère et se faufile dessous. Sous son propre poids, la plaque océanique sonde dans le manteau terrestre, pendant que les sédiments meubles qui tapissent le toit de cette plaque sont rabotés par la bordure de la plaque continentale restée en surface. Ce mouvement aboutit à l'apparition d'une subduction\* et à la formation d'un arc océanique, dans lequel les morceaux de croûte océanique et continentale sont mêlés à des paquets de sédiments marins. La chaîne des Cascades (montagnes Rocheuses) en est un bon exemple.

Un deuxième mode de genèse des montagnes reste en lien avec la convergence de plaques lithosphériques, mais toutes deux de nature continentale.

Enfin, un dernier type de convergence entre plaques concerne deux plaques lithosphériques océaniques dont l'affrontement conduit à la formation d'un arc insulaire. Les deux plaques de poids identique s'opposent, sans que l'une prenne immédiatement le pas sur l'autre. Ce heurt tectonique progresse peu, jusqu'à ce que l'une des plaques flanche sous son propre poids. Ainsi, dans cet affrontement, une section de plaque océanique plus froide, donc plus dense, est affectée par un mouvement descendant qui entraîne la plaque vaincue dans une subduction. La digestion de la plaque débute dans le manteau et est rendue partiellement sous forme de magma et de volcans. Les sédiments de la plaque subduquée sont rabotés par la plaque restée en surface et forment un arc insulaire, un long chapelet d'îles, dans lequel sédiments et roches volcaniques sont enchevêtrés. Le meilleur exemple d'arc insulaire est l'archipel japonais.

Il existe un quatrième type de montagne, plutôt rare, à la formation singulière. Une fois de plus, deux plaques lithosphériques convergent. L'une est de nature continentale, l'autre de

nature océanique. Pourtant, et c'est inaccoutumé, la plaque la plus lourde est bloquée et chevauche la plus légère qui ne plonge pas dans le manteau. Il se forme alors une chaîne d'obduction\*, constituée par un train de roches arrachées et charriées depuis le plancher océanique de la plaque chevauchante. L'Oman est un territoire recouvert par une chaîne de montagnes née d'une obduction.

## 172 Peut-on comparer un volcan et une montagne ?

&gt;&gt;&gt; 97

Non. Un volcan n'est pas une montagne et inversement. Un volcan est un relief postiche posé sur la surface terrestre et dont la formation est liée à des éruptions qui dispersent des produits s'accumulant autour du point d'émission. Une montagne est une portion de continent plissé sous l'effort des plaques lithosphériques\*. Par conséquent, les modes de formation et la longévité de ces objets géologiques diffèrent largement. La plus haute montagne du monde est l'Everest, avec ses 8 848 m d'altitude. Cependant, le Mona Loa, énorme volcan hawaïen, est bien plus grand, puisque sa hauteur totale est de 9 200 m !

## 173 Quel est le rôle d'une chaîne de montagnes ?

&gt;&gt;&gt; 85

La surface de la Terre est garnie d'objets géologiques qui tiennent un rôle singulier. Par exemple, les volcans sont des soupapes d'évacuation de l'énergie produite dans le noyau terrestre, ou encore les séismes peuvent être comparés à des purges de l'énergie accumulée entre des plaques lithosphériques\* en mouvement. L'apparition d'une chaîne de montagnes est assimilable à la fois à un raccourcissement et à un épaississement de la croûte terrestre. Cette réduction de l'espace occupé en surface par les roches continentales permet la fabrication de croûte terrestre à la source de la plaque lithosphérique signalée par des dorsales\* océaniques. En vieillissant, à mesure que l'érosion porte ses coups de boutoir, les montagnes terminent leur existence sous la forme de moignons de roches très dures. Ces cœurs de montagnes, très indurés et relativement épargnés par l'érosion, constituent les fondations de futurs continents qui pourront grandir par l'adjonction et le dépôt ultérieurs de nouvelles roches.

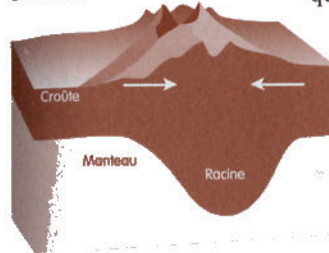
# Les montagnes sont enracinées

## 174 Les montagnes ont-elles des racines ?

À l'instar des icebergs dont on ne voit émerger qu'une portion, les montagnes sont plantées dans la croûte terrestre grâce à des racines. Ainsi, une montagne a un développement vertical visible et une extension en profondeur qui n'est observable que lorsque l'ensemble du massif montagneux est érodé et apparaît en surface. Plus la montagne est haute, plus imposantes sont les racines. Lors d'une collision\* entre deux plaques lithosphériques\*, la croûte terrestre emboutie subit une

extension verticale symétrique en hauteur et en profondeur. Ces racines rocheuses sont enfoncées dans la partie supérieure du manteau, aussi appelée « asthénosphère ». Précisons que, comme les plaques lithosphériques, les montagnes ne flottent pas sur un océan de magma bouillonnant mais sur des roches aussi solides que chaudes.

Les montagnes ont aussi des racines



### OÙ PEUT-ON OBSERVER DES RACINES DE MONTAGNES ?

Les montagnes alpines actuelles ne sont pas les premières ayant existé sur Terre. Avant ces massifs très jeunes, des montagnes aussi hautes et étendues avaient déjà torturé la surface de la planète. En Europe, il y a un peu plus de 300 millions d'années, alors que le futur territoire européen faisait partie d'un unique continent appelé Pangée, une chaîne de montagnes baptisée hercynienne prenait en écharpe cette supermasse continentale en son équateur. Les altitudes estimées atteintes étaient similaires à celles des Andes que nous connaissons, soit environ 7 000 m. Cette chaîne de montagnes a disparu, démantelée par l'érosion, et nous a laissé des vestiges : ses racines. Celles-ci sont apparentes et palpables dans le Massif central. La section aveyronnaise de la vallée du Lot, constellée de remarquables villages, est bardée de schistes, de granites et de gneiss qui formaient une partie du soubassement de la chaîne hercynienne. Dans le Lézou, toujours en Aveyron, des portions plus profondes de ces racines montagneuses surgissent. En se baladant dans ces pâtures aveyronnaises, il est fréquent de tomber sur des minéraux appelés *grenats*. Ces cristaux souvent rougeâtres, parfois transparents, ont été forgés à environ 50 km de profondeur dans des conditions de pression et de températures extrêmes !

## 175 Que se passe-t-il lorsque la montagne est érodée ?

L'érosion attaque sans cesse les montagnes. Mais comment expliquer que, dans le cas de montagnes ne s'élevant plus, certains reliefs, telles les collines des Highlands écossais, gardent une altitude évoquant d'anciennes montagnes vigoureuses, abruptes et hautes ? À mesure que le volume de roche apparent est détruit, un phénomène de compensation agit en profondeur, rehaussant l'ensemble. Ce mécanisme, appelé isostasie\*, est perceptible en observant les lignes de flottaison des bateaux que l'on charge ou décharge. Ainsi, un bateau porte-conteneurs chargé de sa cargaison s'enfonce dans l'eau jusqu'à un certain point. À mesure que progresse le déchargement, la ligne de flottaison s'abaisse et le bateau se rehausse car sa masse totale décroît. Ce phénomène de compensation agit également pour les montagnes plantées dans le manteau terrestre. À mesure que l'érosion attaque les reliefs, la masse du massif montagneux pesant sur le manteau terrestre se réduit et permet à l'ensemble des montagnes de rebondir lentement. Cependant, ce phénomène d'isostasie n'intervient que faiblement et ne permet pas la conservation en l'état de la montagne *ad vitam aeternam*. Lorsque les Alpes auront été érodées, il en restera un paysage mou aux reliefs discrets et très émoussés, similaire au paysage breton, que l'isostasie aura rehaussé faiblement. L'isostasie ne permet donc pas la conservation de reliefs de plusieurs milliers de mètres d'altitude.

## 176 Quelle est la plus vieille chaîne de montagnes en France ?

&gt;&gt;&gt; 88

Les paysages contemporains sont parsemés de collines paisibles qui, il y a plusieurs centaines de millions d'années, ont pu faire partie de titans montagneux aussi hauts que l'Everest. Le relief de ces collines très affaiblies et rabougries témoigne encore de l'existence d'anciennes chaînes de montagnes. En Europe, avant la chaîne alpine, il y a 300 millions d'années, existait la chaîne hercynienne qui, elle-même, fut précédée par la chaîne calédonienne plus de 100 millions d'années auparavant. La vie avait à peine commencé à conquérir les continents et restait surtout marine. Ainsi, rien que sur le territoire français, il est possible de comptabiliser quatre orogènes (ou chaînes de montagnes), fruits de quatre phases de compression orogéniques. La Bretagne

renferme des roches témoins de l'orogène pentévrien d'il y a plus de 1 milliard d'années. Vers 650 millions d'années, l'orogène cadomien redéforme le territoire breton, avant que l'orogène calédonien ne fasse de même il y a 550 millions d'années. Une phase d'accalmie épargne le futur paysage breton, qui sera de nouveau broyé par une nouvelle chaîne de montagnes, l'orogène hercynien, il y a 300 millions d'années. Les Alpes sont donc très récentes à côté de leurs grands-parents bretons !

## 177 Quelle est la plus vieille chaîne de montagnes sur Terre ?

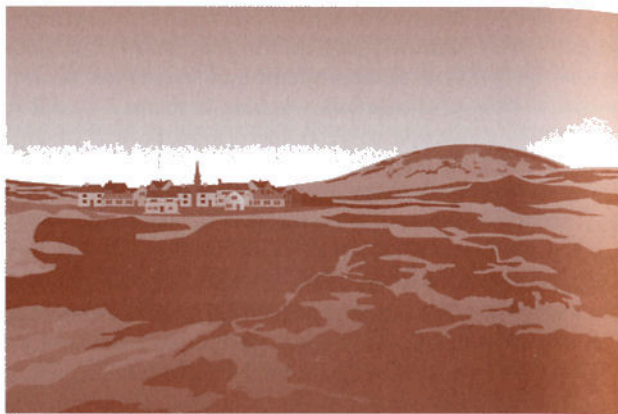
&gt;&gt;&gt; 167

La réponse à cette question n'est pas aisée car les roches sont continuellement remaniées. Ainsi, certaines d'entre elles qui formaient l'ossature d'une montagne érodée peuvent avoir été reprises lors de la formation d'une nouvelle chaîne de montagnes. En Australie, des roches déformées il y a près de 1,8 milliard d'années pourraient avoir été témoins d'une chaîne de montagnes que les géologues ont appelé l'orogène du Capricorne. Toutefois, en Afrique du Sud, la chaîne de Barbeton, encore bien inscrite dans le paysage, a une origine volcanique, dont les dépôts et coulées de laves ont été remaniés par la tectonique des plaques\* dans un mouvement compressif similaire à ce qui est actuellement visible lorsque deux plaques lithosphériques\* convergent et s'affrontent. La chaîne de Barbeton est âgée d'environ 3,5 milliards d'années. Il n'est pas évident que cet héritage géologique ait fait partie d'une vaste chaîne de montagnes telle qu'on en connaît aujourd'hui.

## 178 Que deviennent les montagnes érodées ?

&gt;&gt;&gt; 88, 91, 175

En géologie, il existe une règle élémentaire : tout ce qui est haut sera un jour bas ! Il en va ainsi des montagnes dont les roches, après avoir été portées en altitude, sont assaillies irrésistiblement par l'érosion. Les coups de bélier de l'érosion réduisent ces roches en dépôts sédimentaires qui dévalent les pentes sous l'effet de la gravité conjugué au transport dans les cours d'eau. Ces roches sont rabotées, morcelées et parfois réduites à l'état de sable. Les restes de la fameuse chaîne hercynienne peuvent être observés dans les bassins sédimentaires qui s'égrainent en périphérie du Massif central. Ce sont les bassins de Lodève,



Paysage de montagnes érodées

Marcillac, Espalion, Camarès, Brive, Autun, dont le remplissage de grès rouge, parfois sur plus de 1 500 m d'épaisseur, correspond au démantèlement de la chaîne hercynienne. Par ailleurs, les Pyrénées, chaîne à peine plus ancienne que les Alpes, sont aussi attaquées par l'érosion. Le cône de Lannemezan, parcouru par des dizaines de rivières, dont la Garonne, disposées en éventail et prenant toutes naissance dans les Hautes-Pyrénées, est l'expression de la destruction et de l'effacement lents de ces montagnes. Cependant, les Pyrénées pourraient connaître une nouvelle jeunesse grâce à la remontée de la plaque africaine qui déformera les fonds marins méditerranéens avant de les transformer en une nouvelle chaîne de montagnes. Cela se produira dans environ 100 millions d'années !

## L'altitude des montagnes

**179**

**Les montagnes ont-elles une altitude limitée ?**

>>> 72, 174

Le point d'altitude le plus haut est le sommet de l'Everest, avec 8 848 m. À peine quatorze sommets dépassent 8 000 m sur Terre. Cet ordre de grandeur doit être relativisé : si on ramenait la Terre à la taille d'une balle de golf, on s'apercevrait que la sur-

face de la balle est plus tourmentée et moins lisse que celle de notre planète. Cette comparaison, un peu tirée par les cheveux, nous l'admettons, montre pourtant bien que la topographie terrestre n'est pas si accidentée. Il semble bien que l'altitude de 9 000 m soit une limite supérieure que les montagnes ne pourraient pas dépasser, à cause de trois facteurs déterminants :

- > l'érosion attaque continuellement les reliefs. Ce travail est lent, discret, mais permanent. Or, plus un relief est saillant, plus vigoureuse est l'attaque de l'érosion ;
- > les montagnes sont des excroissances de la croûte terrestre. À l'instar d'un iceberg, il existe une partie invisible enterrée qui repose sur le manteau terrestre. Plus la masse de la montagne est importante, plus elle s'enfoncé et pèse sur le manteau qui se déforme en conséquence ;
- > enfin, la gravité intervient en étant l'ennemie des montagnes. Comme pour une fusée qui a besoin d'une poussée très importante, donc d'une énergie suffisante pour s'extirper de son pas de tir et prendre de l'altitude, une montagne a besoin elle aussi d'une forte poussée pour grandir. Or, cette force de poussée dépend grandement de la dérive des continents et de la vitesse de déplacement des plaques lithosphériques\*.

L'Everest, avec son altitude de près de 9 000 m, pourrait marquer une limite supérieure indépassable.

### 180 Quelle est la plus grande montagne du monde ?

L'Everest atteint 8 848 m d'altitude. Le second sommet est le K2 (8 611 m), toujours en Himalaya, pyramide naturelle gigantesque gravie dix fois moins souvent que son grand frère. En Europe occidentale, le mont Blanc domine les plaines alpines et le Léman de ses 4 810 m, mais reste une montagne modeste au regard des monstres andins et himalayens.

### 181 Quelle est la plus petite montagne du monde ?

Cette question est un peu absurde ! Pourtant, il existe une réponse. « Officiellement » instituée par les autorités locales, la plus petite chaîne de montagnes au monde est celle attenant au mont Wychproof dont le point culminant est à... 43 m d'altitude (soit 7 m de moins que l'Arc de triomphe) ! Cette institution

australienne tient plus de la curiosité touristique que de la géologie, dans un paysage où l'offre culturelle et sociale est très réduite pour les éventuels visiteurs...

## Déformations tectoniques et incidences climatiques

### 182 À quoi ressemble l'anatomie d'une montagne ?

>>> 67, 265

La physionomie externe accidentée d'une montagne se retrouve en son sein, totalement chamboulée. Les roches sont rarement organisées et disposées de manière ordonnée et reconnaissable. Autant les roches peuvent être empilées et former des strates dans un milieu calme de plaine, autant celles composant une montagne sont chahutées et reflètent le jeu tectonique de l'affrontement des plaques lithosphériques\*.

Une montagne est lacérée de failles qui traversent et découpent la masse rocheuse de part en part. Ces failles respectent la même orientation, souvent perpendiculaire au sens de la poussée tectonique. Les roches peuvent être pliées de la même manière qu'une feuille tenue par les extrémités et à laquelle on imposerait une contrainte horizontale ; ces plis sont appelés anticlinaux ou synclinaux. Ils peuvent également être déportés et tractés sur plusieurs kilomètres, passant lentement au-dessus du substratum rocheux en place ; ce sont les charriages et des chevauchements lorsque le déplacement est moindre. Les Alpes

Anatomie d'une montagne



ont été formées grâce à une succession de nappes de charriage qui ont parcouru des distances de 100 km. Ainsi, on peut voir des roches très vieilles surmonter de plus jeunes, signe que la croûte terrestre a été retournée sur elle-même et traînée sur de longues distances. Le Matterhorn, ou mont Cervin (4477 m), est un morceau d'une nappe de charriage posée sur un soubassement plus jeune et venue de plus de 100 km de distance depuis le sud.

### 183 Pourquoi une chaîne de montagnes forme-t-elle un arc ?

>>> 67

Les géologues ont constaté que les chaînes de montagnes adoptaient grossièrement, dans beaucoup de cas, une forme arquée. Cette convexité pourrait être la meilleure réponse mécanique pour faciliter le passage d'une plaque lithosphérique\* sous une autre et amorcer la formation d'une chaîne de montagnes. Ainsi, une chaîne de montagnes est large d'à peine quelques centaines de kilomètres. Les Alpes, grossièrement arquées, ne dépassent pas 200 km de large, en intégrant les petites collines périphériques dont le caractère montagneux peut être discuté. *Idem* pour le Haut Himalaya, qui regroupe les plus hauts sommets du monde. Bien qu'étendue sur 2 400 km de long, la largeur de la plus haute chaîne montagneuse est en moyenne de 200 km, soit à peine la distance entre Paris et Bourges ! Cette largeur dépend grandement des déformations, et notamment des charriages qui affectent la chaîne montagneuse.

#### DES MORCEAUX DE PYRÉNÉES DANS LES ALPES !

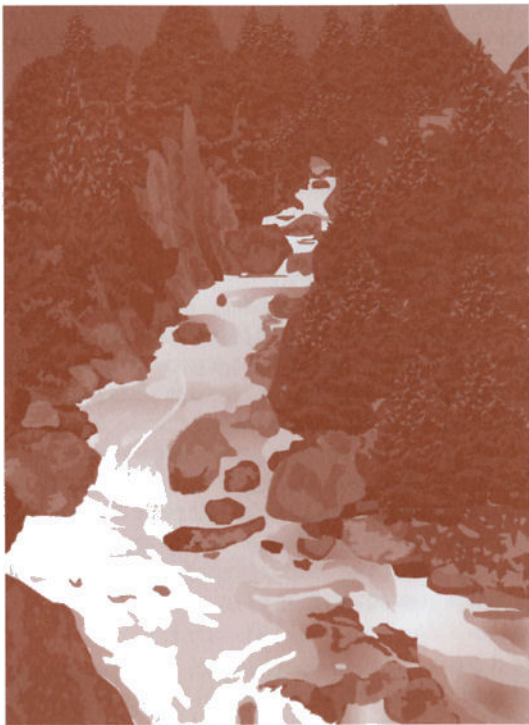
Il y a environ 100 millions d'années, la péninsule Ibérique, à la dérive sur une microplaque tectonique autonome, pivote et emboutit la partie européenne de la plaque eurasiatique. Cette collision accouche des Pyrénées. La plaque eurasiatique est déformée sur ses marges et les plissements migrent vers son intérieur. La montagne Noire, au nord de Carcassonne, fut rehaussée par la montée des Pyrénées dont quelques morceaux se sont éparpillés jusqu'en Provence. Ainsi, les Alpilles, la montagne Sainte-Baume du Lubéron et le mont Ventoux sont des appareils éloignés des Pyrénées, auxquelles ils doivent pourtant être rattachés. La montagne Sainte-Victoire a également été ébauchée par la phase pyrénéenne. Les Pyrénées et leurs conséquences s'étendent donc bien au-delà du cadre franco-espagnol auquel les géographes les contraignent. Les frontières des géologues sont souvent très différentes de leurs géo-homologues.



## 184 Comment les montagnes disparaissent-elles ?

>>> 178

Le travail est accompli en extérieur par l'érosion, dont le soldat le plus efficace est l'eau sous toutes ses formes : pluies, gel temporaire ou glace permanente (glaciers). L'érosion agit sur tout relief offrant une prise. Immédiatement, la prééminence topographique est prise d'assaut par les agents érosifs, dont l'efficacité et l'agressivité croîtront d'autant que le relief est aigu et imposant. Un second mécanisme, invisible à l'œil nu, sauf par l'existence de grandes failles subhorizontales cisailant le massif montagneux de part en part, agit de concert avec l'érosion. Ce mécanisme interne, appelé effondrement gravitaire, décrit l'affaissement général de la chaîne de montagnes entraînée par sa propre masse. Lorsque les montagnes se forment, elles sont toujours le fruit d'une collision\* entre deux plaques lithosphériques\* dont le mouvement compressif aboutit à un épaississement de la croûte terrestre et à l'apparition de reliefs montagneux. Une fois que la compression n'est plus aussi âpre qu'à ses débuts, la chaîne de montagnes est moins soumise aux efforts compressifs et peut respirer en s'affaisant sur elle-même. L'effondrement gravitaire entraîne un abaissement général du relief. En quelque sorte, la montagne conduit son effacement de la surface terrestre.



Érosion par les cours d'eau

graphique est prise d'assaut par les agents érosifs, dont l'efficacité et l'agressivité croîtront d'autant que le relief est aigu et imposant. Un second mécanisme, invisible à l'œil nu, sauf par l'existence de grandes failles subhorizontales cisailant le massif montagneux de part en part, agit de concert avec l'érosion. Ce mécanisme interne, appelé effondrement gravitaire, décrit l'affaissement général de la chaîne de montagnes entraînée par sa propre masse. Lorsque les montagnes se forment, elles sont toujours le fruit d'une collision\* entre deux plaques lithosphériques\* dont le mouvement compressif aboutit à un épaississement

de la croûte terrestre et à l'apparition de reliefs montagneux. Une fois que la compression n'est plus aussi âpre qu'à ses débuts, la chaîne de montagnes est moins soumise aux efforts compressifs et peut respirer en s'affaisant sur elle-même. L'effondrement gravitaire entraîne un abaissement général du relief. En quelque sorte, la montagne conduit son effacement de la surface terrestre.

### L'USURE DES RELIEFS SE PRODUIT SOUS NOS YEUX !

L'érosion agit en permanence mais le plus souvent lentement et furtivement. Elle est donc clandestine. D'autres épisodes sont plus violents et donc plus... évidents à l'échelle d'une vie humaine. Les mouvements de terrain brutaux font partie des processus érosifs affairés à user les reliefs. En 1248, le mont Granier, près de Chambéry (Savoie), s'effondra. Environ 500 millions de m<sup>3</sup> de roches glissèrent jusqu'à une distance de 8 km, recouvrant une superficie totale de 23 km<sup>2</sup>. On estime qu'environ 2 000 personnes purent apprécier de près les effets de l'érosion avant d'en mourir.

## 185 Les montagnes influencent-elles les climats ?

L'atmosphère peut être perçue comme un stock d'énergie constamment redistribué à la surface terrestre par les courants marins et aériens. La formation d'une montagne perturbe forcément ces circulations, au moins à une échelle régionale. Ainsi, la mousson asiatique est un vent chaud et chargé d'humidité qui, en remontant de l'équateur, son point de départ, pénètre le sous-continent indien avant de se heurter à la barrière himalayenne. La mousson, pour passer ce relief, n'a pas d'autre choix que d'en tenter l'ascension. Demi-succès car en s'élevant en altitude, ce vent chaud se refroidit. Cette perte d'énergie est traduite par de très fortes précipitations au pied des montagnes himalayennes, avec un cumul annuel de 12 m de hauteur d'eau. À titre de comparaison, la hauteur des précipitations annuelles cumulées à Paris, bon an mal an, est d'environ 80 cm !

Relief et érosion



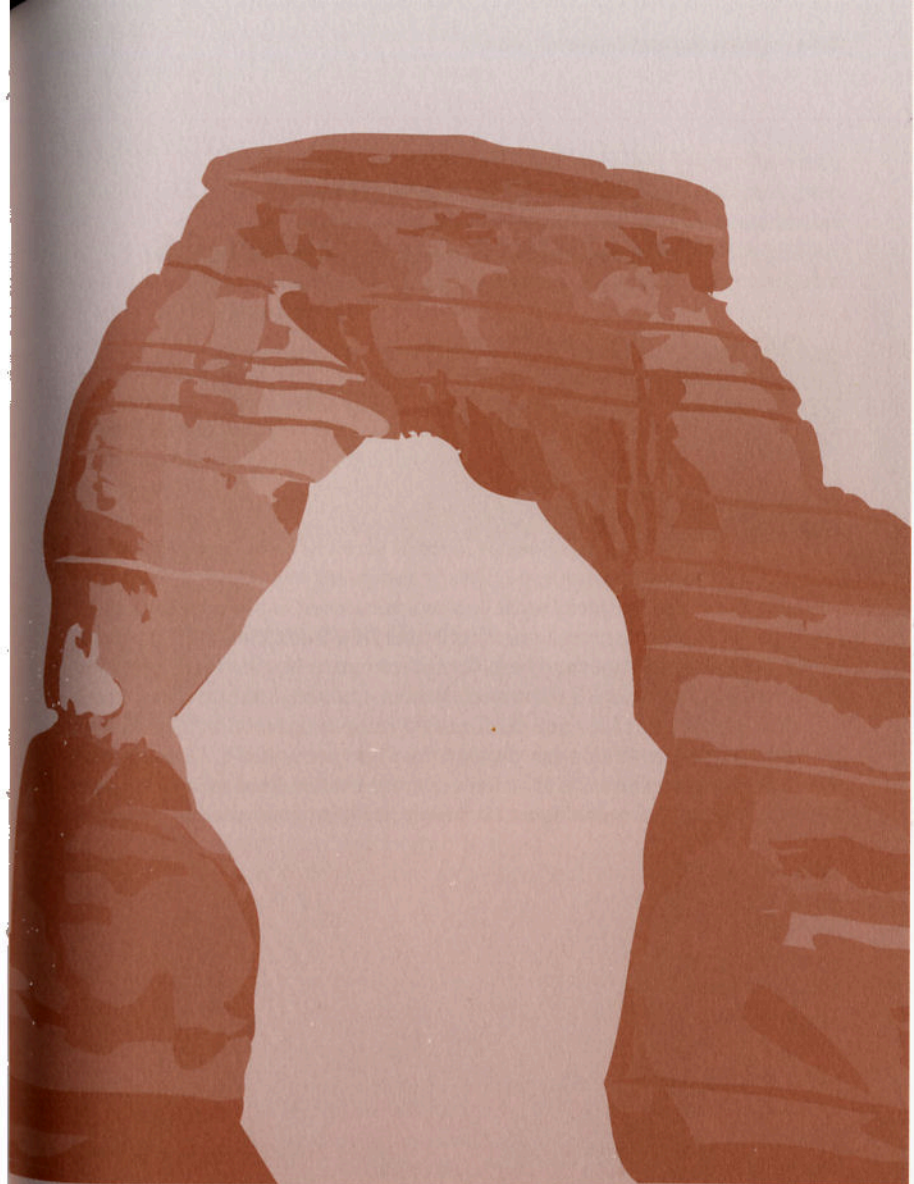
La mousson, pour passer ce relief, n'a pas d'autre choix que d'en tenter l'ascension. Demi-succès car en s'élevant en altitude, ce vent chaud se refroidit. Cette perte d'énergie est traduite par de très fortes précipitations au pied des montagnes himalayennes, avec un cumul annuel de 12 m de hauteur d'eau. À titre de comparaison, la hauteur des précipitations annuelles cumulées à Paris, bon an mal an, est d'environ 80 cm !

chapitre 8

# La vie géologique à l'air libre

---

La géologie n'est pas seulement à l'affût de phénomènes obscurs enracinés dans les profondeurs de la Terre comme les séismes, les volcans et les montagnes. La géologie étudie également des mécanismes extérieurs à la croûte terrestre qui sculptent, aménagent et retouchent les paysages en permanence depuis plus de 4 milliards d'années.

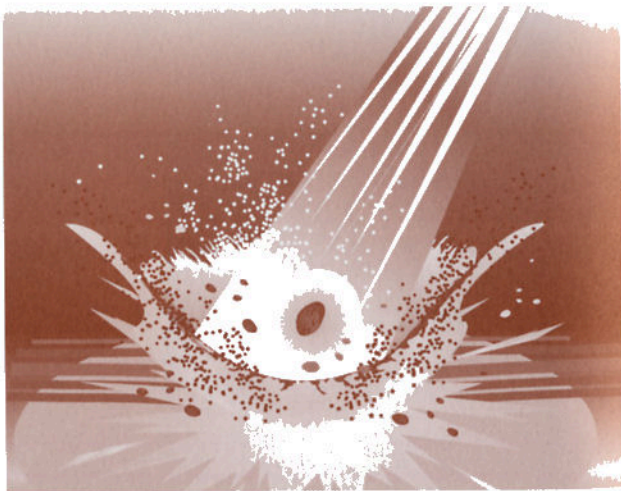


## L'érosion, premier sculpteur de paysages

### 186 Qu'est-ce que l'érosion?

>>> 50

Il est d'usage de résumer ce phénomène aussi ordinaire que méconnu par la définition réductrice suivante : l'érosion, c'est l'usure des reliefs. Ce raccourci décrit le résultat et reste insuffisant, car l'érosion englobe une chaîne de phénomènes qui interagissent les uns avec les autres et dont les effets aboutissent à un changement de relief et donc de paysage. Ainsi, l'érosion incorpore des phénomènes naturels parmi lesquels l'eau joue un rôle très important, puisqu'elle intervient très souvent. Parmi ces phénomènes érosifs, le plus ordinaire est la pluie, dont les gouttes et le ruissellement agissent irrémédiablement par petites touches imperceptibles. Comptons également sur les glaciers, les vagues sur les littoraux lacustres et marins, les cours d'eau, le gel, ou sur l'attaque chimique de l'eau chargée en dioxyde de carbone (altération chimique\*). Plus spectaculaire, l'érosion peut être soudaine et violente ; c'est le cas lors d'une explosion volcanique qui défigure les paysages voisins et les modifie partielle-



Cratère d'impact météoritique

ment, ou bien lors de l'impact d'une météorite géante. En outre, l'érosion n'est pas seulement limitée à la surface des continents. On la voit agir dans les fonds marins jusqu'à en ressentir les effets sur les continents, comme lorsqu'une partie d'un plateau continental s'effondre, transforme le paysage marin et engendre un tsunami sur les littoraux.

#### DE L'UTILISATION DU LANGAGE SCIENTIFIQUE À BON ESCIENT

Érosion est un terme passé dans le langage commun et qui fait partie de cette terminologie scientifique que la population s'est appropriée, au même titre que la relativité restreinte édictée par Einstein, souvent résumée par l'expression familière : « Tout est relatif ». La géologie a sa part car, depuis peu, l'érosion est cuisinée à toutes les sauces par les médias : « érosion du pouvoir d'achat », « érosion de la cote de popularité », etc.

### 187 Comment agit l'érosion?

>>> 44,  
195, 198

Son action est multiforme et s'étend sur des durées très variables. Selon les processus concernés, l'érosion est soit insensible à l'œil et inappréciable à l'échelle d'une vie humaine, soit instantanée et stigmatise le paysage durant plusieurs millions d'années alors que son action n'a duré qu'une seconde. L'érosion peut également moduler son action selon le climat, la topographie et l'importance du relief.

Pour se faire une idée plus précise de l'action de l'érosion, confrontons deux territoires aux caractéristiques physiques opposées. Le centre de l'Australie est un territoire stable, non soumis aux séismes, qui ne bénéficie pas d'apports d'eau importants, et dont le relief n'est pas accidenté. Bien que difficilement supportable pour l'homme, le climat n'est pas un facteur aggravant qui renforce l'action d'une érosion déjà molle. À l'opposé, les flancs méridionaux du Haut Himalaya, notamment la vallée du Gange, rassemblent des conditions physiques qui stimulent des changements rapides. Dans ce paysage se mêlent l'action récurrente des séismes, des fortes précipitations, des cours d'eau abondants et un climat changeant selon les saisons. Le paysage de la vallée du Gange est donc susceptible d'évoluer beaucoup plus rapidement sous les coups de boutoir de l'érosion que celui de l'Australie centrale, où l'action érosive reste bien moins agressive. De ce fait, certains paysages aux caractéristiques

physiques similaires à celles de l'Australie centrale n'ont pas ou très peu évolué depuis des millions d'années, alors que, dans le même temps, dans d'autres paysages, des montagnes ont pu être érigées et découpées par de profondes vallées.

## 188 Quel est le rôle joué par l'érosion dans l'évolution du relief?

>>> 55, 59,  
62, 178

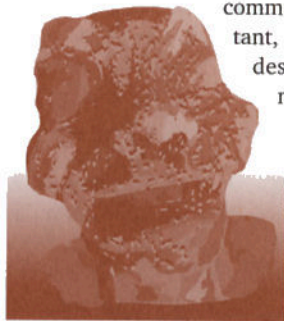
L'érosion est une réponse mécanique aux bouleversements du relief et du climat. Elle n'est pas l'initiatrice, mais bien une conséquence des bouleversements engendrés par la dérive des continents et l'évolution du climat. Par conséquent, le rôle de l'érosion est, dans un premier temps, de redistribuer les masses rocheuses à la surface de la Terre. Dans un second temps, l'érosion est une actrice fondamentale et un chaînon vital du recyclage des roches, et donc du bon fonctionnement interne de la Terre. Sans érosion, les roches ne seraient pas recyclées à la surface de la planète et les sédiments n'existeraient pas. Ainsi, la tectonique des plaques\* n'agirait pas de la même façon. La Terre ne serait constituée que de roches volcaniques et magmatiques (basaltes, granites) ceinturées de roches métamorphiques\*. De plus, si les sédiments n'avaient pas existé, nous n'aurions pas connu, par exemple, l'existence des dinosaures dont on retrouve les fossiles dans des roches sédimentaires.

## 189 L'érosion est-elle identique partout sur Terre?

>>> 187, 214

Non. Dans les domaines montagneux, lorsqu'ils existent, les glaciers burinent les roches et écaillent lentement les reliefs comme des rabots. Le gel est aussi un acteur important, car il retouche continuellement les versants des montagnes et peut encourager quelques mouvements de terrain plus ou moins volumineux, selon la structure géologique des roches.

Les plaines sont moins affectées, encore que cela dépende du climat et de la pluviosité, des cours d'eau qui les traversent et, surtout, des activités humaines qui y sont pratiquées. Les rivières, selon la viru-



Attaque chimique des roches par l'eau sur une gargouille

lence des climats, drainent les plaines qu'elles dissèquent. Plus au sud, le long de l'équateur, les précipitations pluviales sont intenses et volumineuses. Malgré ce trait climatique, la végétation forme un tapis qui ronge la roche en place et la digère, grâce à l'eau infiltrée chargée de dioxyde de carbone. L'eau chargée en gaz est transformée en un fluide agressif qui désagrège la roche en particules millimétriques. Les versants sont déstabilisés et peuvent être emportés dans de vastes mouvements de terrain. L'érosion, ses agents et sa vigueur ne sont pas analogues selon les milieux climatiques et la topographie.

## 190 Existe-t-il un cycle de l'érosion?

>>> 55, 56

Au même titre qu'il existe un cycle de l'eau et un autre qui concerne le carbone, l'érosion est modélisée dans un cycle décomposé en trois phases. Dans un premier temps, l'érosion agresse le relief et l'effrite. Les morceaux de roches désagrégés sont pris en charge par un cours d'eau; cette deuxième phase est appelée le transport. Dans un dernier temps, le cours d'eau ne parvient plus à transporter son chargement de roches arrachées en amont et les dépose. C'est le dépôt. Le cycle de l'érosion est ainsi scindé en trois phases distinctes : l'érosion, le transport et la sédimentation. Notons que le cycle de l'érosion produit les sédiments, qui sont la matière première de l'une des trois familles de roches sur Terre : les roches sédimentaires.

# L'évolution du relief et des paysages

## 191 Qu'est-ce qu'un paysage?

En géologie, un paysage est réduit à son expression topographique. Un géologue évoquera le relief et ses roches, peut-être le réseau hydrographique. En revanche, il mettra de côté involontairement la faune, la flore, le climat et, donnée capitale

aujourd'hui, l'existence de l'homme. Le géographe prendra en compte toutes ces données pour en faire un assemblage plus complet. Un paysage peut donc être considéré comme le résultat d'une addition de sphères emboîtées : la lithosphère\* (croûte terrestre et roches), l'atmosphère, la biosphère (faune et flore) et la noosphère (l'homme), qui interagissent constamment.

## 192 Les paysages changent-ils ?

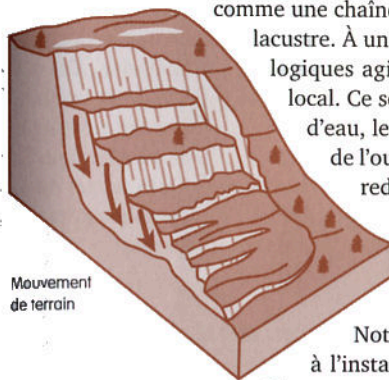
>>> 59

Sans aller trop en avant dans la comparaison avec des êtres vivants qui naissent, vivent et meurent, les paysages changent, évoluent, se transforment constamment. Ce qui est une plage aujourd'hui pouvait être une chaîne de montagnes écorchées par les glaciers il y a plusieurs dizaines de millions d'années, ou bien sera une plaine tranquille parsemée de volcans endormis dans une poignée de millions d'années. Cette mémoire des paysages est particulièrement enregistrée dans les roches qui les constituent. Sans avoir besoin de trop étirer le temps, les paysages n'offrent pas le même visage sur des périodes plus resserrées. L'Île-de-France, urbanisée en son centre et constellée d'un réseau de villes moyennes bordées par de vastes espaces agricoles comme la Brie, était parcourue par des troupeaux de mammoths, de rhinocéros laineux et de tigres à dents de sabre il y a à peine plus de 20 000 ans. La végétation était rase, steppique, similaire à celle que l'on trouve dans les plaines ouvertes de Sibérie. Le climat périglaciaire était balayé par les vents qui dévalaient les pentes d'une énorme calotte glaciaire qui recouvrait l'Europe du Nord. Dix mille ans plus tard, le climat est doux, de plus en plus chaud. La flore et la faune qui existaient durant la période glaciaire ont en grande partie disparu. Les paysages se transforment naturellement mais deviennent, depuis l'avènement de l'agriculture et de l'industrialisation, des objets sur lesquels l'humanité agit en freinant ou en accélérant l'érosion par des aménagements. De fait, les paysages sont des objets autant naturels que culturels.

## 193 Comment évolue le relief terrestre ?

>>> 187

Le relief évolue sous l'effet conjoint de mécanismes géologiques et climatiques. Les mécanismes géologiques tiennent à la dérive des continents, au déplacement des plaques lithosphériques\*, capables d'avoir une incidence sur une portion de continent en mettant en place les grandes lignes d'un paysage comme une chaîne de montagnes, une vallée ou un bassin lacustre. À une échelle plus grande, les processus géologiques agissent également et retouchent le relief local. Ce sont les mouvements de terrain, les cours d'eau, les glaciers qui sculptent les détails fins de l'ouvrage. L'influence du climat participe en redistribuant la chaleur et l'humidité. Ainsi, un relief plan dans un climat aride évolue peu, alors qu'un relief montagneux baigné par un climat humide est davantage soumis au changement. Notons, et c'est très important, que le relief, à l'instar du climat, est soumis à l'influence de l'homme, qui se doit d'y être attentif.



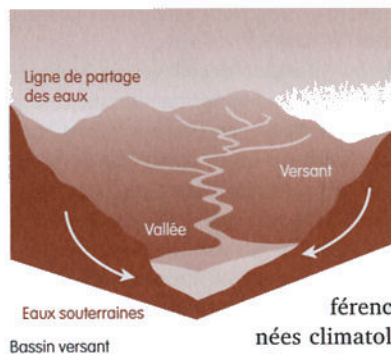
Mouvement de terrain

## 194 Pourquoi les roches tombent-elles ?

Les versants, quelle que soit leur inclinaison, peuvent être remodelés par des mouvements de terrain dont la matière rocheuse s'effondre soudainement ou coule lentement. Ces mouvements de terrain sont animés par la gravité qui est l'un des moteurs de l'érosion.

## 195 À quelle vitesse change le relief ?

Il n'existe pas de règle établie ni de moyenne. L'évolution du relief dépend grandement de l'action et de la vitalité des processus géologiques et climatiques. La vélocité de l'évolution du relief peut être résumée par une mesure, le taux d'ablation (ou d'érosion), qui indique la quantité de matière amputée sur un territoire sur une période donnée. Une étude menée par une équipe du CNRS (Centre national de la recherche scientifique) a permis de quantifier les matières érodées dans trois bassins versants\* aux caractéristiques géologiques distinctes et réparties



dans trois régions : le Jura, le Massif central (massif du Mont-Dore) et le Bassin parisien. Il a été mis en évidence que l'érosion est 40 fois plus faible dans le bassin versant des plaines franciliennes que dans celui du massif jurassien. En revanche, cette érosion dévore dix fois plus de matériaux dans le bassin versant mont-dorien. Ces dif-

férences sont imputées au relief, car les données climatologiques ne diffèrent pas énormément.

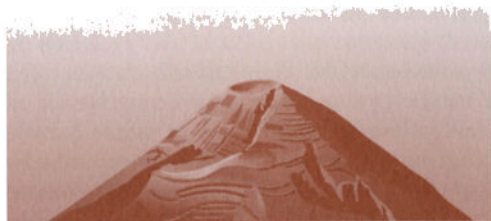
Si on compare le taux d'érosion de la région étudiée dans le Massif central à celui du Haut Himalaya, on estime que l'érosion est environ 12 fois plus agressive sur les pentes himalayennes, notamment à cause des précipitations (la mousson).

## 196 L'homme influence-t-il l'évolution du relief?

>>> 212

De la même façon que l'homme a dorénavant un ascendant établi sur le climat global qu'il bouleverse, il a également un impact de plus en plus important sur la géologie, le cycle de l'érosion, donc de l'évolution du relief. Cette emprise humaine est perceptible en prenant un exemple : les grottes. Ces cavités naturelles découlent de l'attaque d'une eau acide (chargée en dioxyde de carbone) sur des roches calcaires. Les grottes requièrent donc tout bonnement de l'eau. Or, avec le changement climatique, certaines régions seront moins approvisionnées en eau et, de ce fait, les grottes qui y sont cachées verront leur croissance et leur développement être freinés, voire arrêtés. Un autre exemple concerne l'urbanisation dans les domaines montagneux. Afin de pallier des soucis de logement et de

L'homme aggrave l'érosion



manque d'espace, les collectivités publiques acceptent que les versants des montagnes, parfois escarpés, soient aménagés. Ces dispositions peuvent aller à l'encontre de mécanismes érosifs et perturber le cycle de l'érosion.

## Le rôle de l'eau

197

>>> 194

### L'eau joue-t-elle un rôle dans l'évolution des reliefs?



L'eau, sculpteur du relief

Oui, sans conteste. L'eau, avec la force gravitaire, agit sur les reliefs. Toutes deux sont les meilleures actrices du théâtre géologique, puisqu'elles tiennent systématiquement les premiers rôles. Presque tous les processus érosifs font intervenir l'eau et sont mobilisés par la gravité qui attire la matière rocheuse vers les bas de pente. Ainsi, l'eau agit comme un carburant alimentant un moteur automobile dont la clef est la gravité.

## 198 Quel est le volume d'eau sur Terre?

Le volume d'eau sur Terre ne varie pas. Il est de 1 386 000 000 km<sup>3</sup>, à comparer au volume de la planète 1 083 320 000 000 km<sup>3</sup>. Ainsi, l'eau représente à peine 0,12 % du volume du globe. Cette confrontation permet de prendre conscience que, bien qu'abondante en apparence, l'eau est une ressource rare qui, actuellement, n'a été mise en évidence sous sa forme liquide que sur Terre. La masse d'eau se trouve majoritairement dans les océans, qui en rassemblent 97 %, le reste étant réparti entre les cours d'eau, les glaciers et les lacs. La vapeur d'eau renfermée dans l'atmosphère ne représente que 0,0001 % du volume d'eau total. L'eau est maintenue à la surface de la croûte terrestre et tient un rôle dans la formation des magmas dans la croûte, lorsqu'elle imprègne les plaques lithosphériques\* subsidantes. L'eau n'est pas seulement affairée à éroder les reliefs en surface, elle contribue également à la destruction et au recyclage des plaques lithosphériques en profondeur, et donc à la bonne marche de la dérive des continents.

## 199 Quel est le rôle d'une rivière dans un paysage ?

&gt;&gt;&gt; 190

Il existe plusieurs types de rivières. Certaines ont un comportement torrentiel (torrent de montagne, oueds), d'autres sont plus calmes en apparence (Seine, Amazone), pendant que d'autres encore coulent par intermittence. Le point commun de ces cours d'eau est leur rôle : tous ressemblent à des gouttières naturelles évacuant vers l'aval les roches érodées (les sédiments) en amont. Les cours d'eau interprètent donc un rôle capital dans l'évolution des reliefs et des paysages, puisqu'ils entrent dans le cycle de l'érosion décomposé en trois phases – érosion-transport-sédimentation. Sans cours d'eau, l'évolution des reliefs serait bloquée.

## 200 Dans quel sens coule une rivière ?

&gt;&gt;&gt; 197

Une rivière emprunte toujours le sens de la pente pour s'écouler et évacuer ses eaux. Par conséquent, elle prend naissance sur un continent et se jette dans un point bas (un lac, un océan, une mer), et ne fait jamais le trajet inverse de la mer vers le continent !

## 201 Quelles sont les différences entre un torrent, une rivière et un fleuve ?

&gt;&gt;&gt; 190

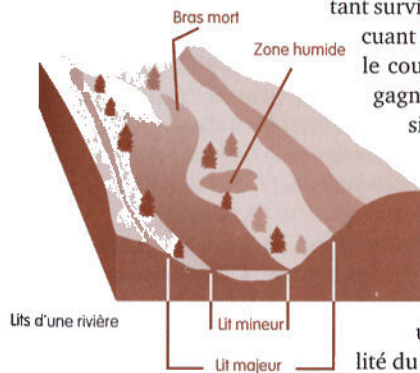
C'est avant tout une différence de taille et de hiérarchie des cours d'eau dans un bassin versant\*. Un torrent implique l'existence de reliefs escarpés qu'il érode. Le bassin versant est drainé par une rivière, qui collecte les eaux et sédiments des petits cours d'eau contributeurs comme les torrents. Bien plus bas dans la plaine, les rivières convergent toutes vers un seul drain, le fleuve, qui rassemble toutes les eaux évacuées d'un bassin versant. À titre d'exemple, l'Oise, la Marne et l'Yonne sont des rivières qui convergent et contribuent à grossir la Seine. Cette hiérarchie n'est pas figée. Durant la dernière ère glaciaire, le département de la Manche était une vaste plaine occupée par une faune adaptée au froid (mammouths, rhinocéros laineux, *Homo neandertalensis* et *Homo sapiens*), et parcourue du nord-est vers le sud-ouest par le Rhin. Celui-ci recevait donc les eaux de la Seine, de la Meuse et de la Tamise, reléguées au rang d'affluents.

## 202 Comment se forme une vallée ?

Nos paysages sont parcourus par des cours d'eau encaissés dans des vallées, parfois escarpées et profondes (vallée de l'Isère), ou ouvertes et larges (vallée de la Seine). La formation des vallées dépend du relief et de sa pente, car plus la topographie est abrupte et plus les cours d'eau couleront rapidement et pourront entailler la roche profondément. C'est la vitesse et le débit des cours d'eau qui conditionnent la rapidité du creusement de la vallée. Un second facteur agit, bien qu'il puisse être situé à des centaines de kilomètres de là : la mer détermine une partie des règles du jeu géologique. Lorsque le niveau marin est élevé, les cours d'eau connectés à l'océan sont moins agressifs sur le relief, qu'ils creusent moins aisément. En revanche, lorsque le niveau marin baisse, les cours d'eau cherchent absolument à rester en contact avec l'océan. De ce fait, leur creusement se fait plus vigoureux.

## 203 Les rivières coulent-elles toujours au même endroit ?

Un cours d'eau vit au rythme des saisons, des apports d'eau et de la géologie locale. Ainsi, lorsqu'un épisode pluvieux important survient, les cours d'eau répondent en évacuant le maximum d'eau pendant une crue ; le cours d'eau sort de son lit mineur pour gagner son lit majeur, parfois large de plusieurs kilomètres. Cependant, les cours d'eau peuvent défluer, c'est-à-dire changer de lit et en emprunter un nouveau, parfois situé à plusieurs kilomètres de l'ancien. Ce phénomène, qui peut être catastrophique pour les habitants, est dû à une crue importante et à l'impossibilité du cours d'eau de continuer à évacuer le surplus de débit dans un lit fluvial au gabarit et/ou à la pente trop réduite. Ainsi, en 1360, l'Adour, lors d'une tempête nocturne, déflua vers le nord et retrouva son ancien lit pour se jeter à 32 km de son exutoire bayonnais, près d'un hameau encore appelé Vieux-Boucau. Ce n'est qu'en 1759 que l'Adour regagna son premier lit, à la force des bras humains, sur décision du roi.

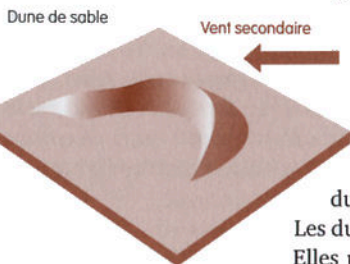


## Le rôle du vent

### 204 Le vent peut-il éroder les reliefs ?

&gt;&gt;&gt; 257

À l'instar de l'eau, le vent joue un rôle et parfois, bien que ce soit rare, la supplante. Les géologues parlent alors d'érosion éolienne. Pour que cette érosion bien particulière soit efficace, le milieu doit être... venteux ! En outre, l'absence de couverture végétale facilite grandement l'action du vent. Ajoutons à cette recette un air sec, et toutes les conditions sont alors réunies pour permettre au vent d'éroder le relief, parfois très énergiquement. La forme la plus connue est celle des dunes sableuses, visibles dans certains déserts. Les dunes sont modelées et mobilisées par le vent. Elles peuvent atteindre des dimensions gigantesques – jusqu'à 500 m de hauteur. Grain par grain, le vent déplace ces dunes.



Transformation de la Barkhane

### 205 L'érosion éolienne est-elle dangereuse ?

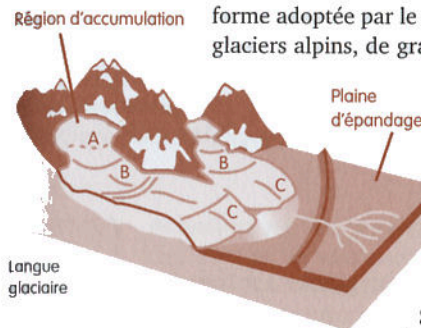
On semble le découvrir, mais l'érosion éolienne a un impact majeur dans les régions agricoles américaines et européennes. L'action du vent prend même de l'ampleur, jusqu'à poser de sérieux problèmes pour l'avenir des cultures. La Beauce, la Brie, le plateau picard, les Limagnes, le Sud-Ouest, sont de vastes régions agricoles céréalières dont les terres sont nues une partie de l'année et balayées par les vents. Cette érosion éolienne ampute les sols de leur matière, de leurs nutriments, et conduit à un appauvrissement dont les conséquences économiques sont inéluctables. Constatant les effets de l'érosion éolienne, les agriculteurs sont poussés à amender davantage les sols, les polluent plus et épuisent cet épiderme déjà très fragile. Un changement des modes culturales et des mentalités est une étape obligatoire pour les agriculteurs réellement responsables. Aujourd'hui, l'érosion éolienne menace gravement près de 6 millions de km<sup>2</sup> de surfaces agricoles dans le monde, soit environ 11 fois la superficie de la France !

## L'érosion par les glaciers

### 206 Qu'est-ce qu'un glacier ?

&gt;&gt;&gt; 208

C'est une accumulation de neige en amont d'un relief, transformée en glace sous son propre poids et mise en mouvement dans le sens de la pente. Cette définition ne concerne pas la forme adoptée par le glacier. Les plus nombreux sont les glaciers alpins, de grandes langues de glace se faufilant entre les montagnes aiguës (glaciers de vallées). Il en existe sous forme de grands nappages lobés, recouvrant des piémonts (glaciers de piémont) sur des vastes surfaces. D'autres sont suspendus et plaqués sur des versants pentus. Enfin, les plus grands glaciers sont les calottes glaciaires recouvrant le Groenland et l'Antarctique.



A : Limite des neiges persistantes  
B : Zone d'écoulement de la glace  
C : Fonte et évaporation

### 207 Comment reconnaître un relief glaciaire ?

&gt;&gt;&gt; 274

Les indices sont de trois sortes. Tout d'abord, la forme du relief est caractéristique. La distinction apprise aux écoliers insiste sur le profil de la vallée en «U» (dite «en auge») d'origine glaciaire, alors qu'une vallée fluviale forme grossièrement un «V» plus ou moins ample. Yosemite Valley (Californie) est un très bel exemple glaciaire. Ce profil est une indication géomorphologique de valeur, bien que l'on puisse y adjoindre d'autres signes de même nature, tels un cirque en amont ou encore le découpage de montagnes prenant l'aspect de pyramides. Chacun connaît Gavarnie, vaste cirque glaciaire pyrénéen sculpté en forme de fauteuil et large de 4 km, ou encore le puy Mary (Cantal, 1787 m), taillé en pyramide («horn») par quatre glaciers qui prenaient appui contre lui. Le deuxième indice est la moraine glaciaire, dépôt hétérogène de roches dans lequel des argiles, des limons, du sable (regroupés





- Ci : Cirque  
- Au : Vallée en auge  
- C : Horn  
- V : Verrou

sous le terme de « farine ») emballent des blocs de roches anguleux parfois aussi grands qu'une maison. Ces dépôts glaciaires soit reposent sur le toit du glacier, soit sont poussés sur ses marges. Une fois le glacier fondu, les moraines restent et trahissent les limites maximales atteintes par le glacier.

Le dernier indice est le polissage de la roche au passage du glacier. Telle une lustreuse, l'action du glacier frotte contre la roche en place, la rabote et confère un aspect de surface poli. Les géologues disent de ces roches qu'elles sont moutonnées.

## 208 Quel est le plus grand glacier sur Terre ?

>>> 50

Indubitablement, l'Antarctique est recouvert par le plus grand glacier du monde. Ce sont 14 millions de km<sup>2</sup> de glaces, sur des épaisseurs maximales d'environ 3 000 m, qui masquent un continent entier. Hormis la calotte glaciaire antarctique, le plus long glacier de type alpin se trouve encore en Antarctique. Il s'agit du glacier Beardmore, long de 160 km. À côté de lui, la mer de Glace, plus grand glacier en France métropolitaine, deuxième des Alpes après celui d'Aletsch (24 km), en Suisse, fait figure de nain avec ses 9 km de longueur.

## 209 À quelle vitesse progresse un glacier ?

>>> 210

La vitesse d'un glacier varie d'autant que la pente du relief englacé est forte et que l'alimentation en amont est constante. Il n'existe pas de règle moyenne concernant la progression d'un glacier, trop lente pour être visible à l'œil nu – mais pas à l'oreille cependant, puisque les chutes de séracs, bruyantes, attestent de l'avancée des glaces. Cette vitesse de progression n'est généralement que de quelques centimètres par heure, bien que des exceptions se rencontrent. Le glacier Columbia, situé près d'Anchorage (Alaska), dont la longueur est de 50 km, progresse à la vitesse subsonique de 24 m par jour. Cependant,

cette vitesse ne permet pas de compenser la perte de volume dû au recul du front. Ce glacier géant a ainsi reculé de 14 km depuis 1982, malgré l'avancée des glaces.

## 210 Un glacier peut-il avancer et reculer en même temps ?

C'est peut-être curieux, mais un glacier peut fondre et pourtant avancer. Tant qu'il existe une alimentation en amont du glacier, celui-ci progresse. Cependant, la limite supérieure de la zone d'ablation (secteur aval où la fonte de glace est plus importante que l'accumulation) remonte en altitude. Ainsi, bien que les glaces continuent à descendre depuis l'amont, la perte de glace à l'aval compense et même dépasse l'apport de volume en altitude.

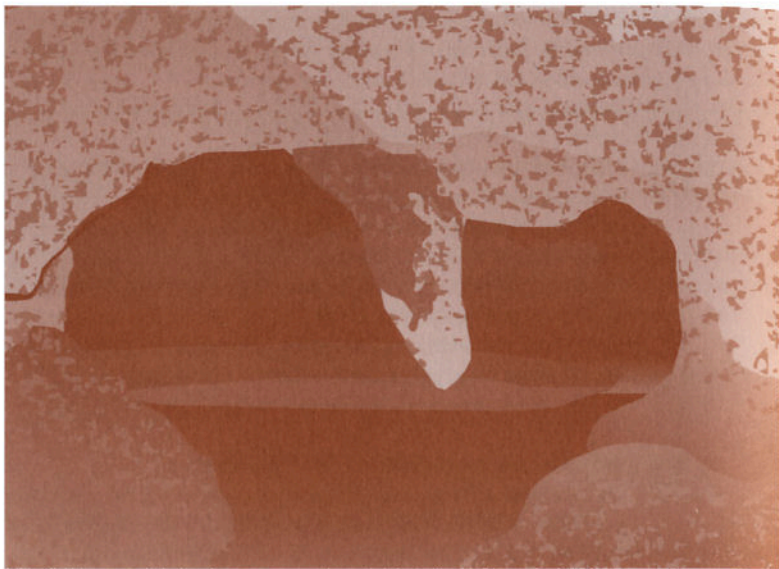
## 211 Actuellement, les glaciers fondent-ils tous ?

Oui. Cela est dû au réchauffement climatique global, qui est le problème écologique le plus grave. Ce phénomène met en péril la Terre, qui perd ses masses de glaces stockées dans les montagnes ou sur les pôles. Même l'Antarctique semble affecté, alors qu'on le croyait épargné. La fonte des glaces donne des signes d'accélération très inquiétants. Ainsi, le XXI<sup>e</sup> siècle sera celui durant lequel les derniers glaciers pyrénéens disparaîtront.

## L'érosion souterraine

### 212 Comment se forment les grottes ?

Les grottes résultent de la dissolution des roches calcaires par une eau acide chargée en dioxyde de carbone. L'eau s'infiltré en surface dans des diaclases (fissures sans déplacement de l'en-tourage rocheux) parfois millimétriques, formant un réseau qui découpe et quadrille la masse rocheuse. Durant sa descente dans la roche, l'eau reste en contact avec les parois qu'elle dissout lentement. Au bout de quelques dizaines à centaines de milliers d'années, un réseau de vastes grottes drainées peut se



Karst et grottes

former et se développer sur des distances kilométriques. Par conséquent, l'érosion agit même au sein de la roche, et peut former des modelés de relief souterrains. Ce phénomène érosif de dissolution de la roche par l'eau est appelé altération chimique\* et affecte d'autres roches comme les granites, sans toutefois y creuser de grottes.

## 213 Qu'est-ce qu'un karst?

>>> 212

Le karst est l'ensemble des grottes formées dans un massif calcaire. Les paysages karstiques se reconnaissent facilement aux modelés visibles en surface, comme les causses des grands plateaux calcaires aveyronnais, lozériens, quercynois et héraultais. La surface du plateau peut présenter un aspect craquelé nommé «lapiaz». C'est notamment par les fissures des lapiaz que l'eau s'infiltré et percole au travers du calcaire. En sus d'être crevascée, la surface calcaire peut être déformée par des cuvettes topographiques, ou dolines, dont le fond peut abriter de la terre rouge (*terra rossa*). Il arrive que le sol de ces dolines soit perforé et se transforme en avens, puits profonds de parfois plu-

sieurs centaines de mètres. Enfin, les grottes sont des cavités dans le calcaire dont les parois sont parcourues de concrétions connues de tous : stalagmites («elles montent») et stalactites («elles tombent»). Ce modelé de relief dû à la dissolution des roches par l'eau et à une érosion en surface et en profondeur est extrêmement commun dans le monde. Il se rencontre du cercle polaire jusqu'à l'équateur, où les karsts sont les plus aboutis.

## 214 Dans quelle roche les grottes se forment-elles?



Stalagmite et stalactite

Il n'existe pas de grottes dans les granites, les basaltes ou tout autre type de roches également sensibles à l'altération chimique\* par l'eau. Ce sont les calcaires qui sont les plus vulnérables à ce type d'érosion. L'eau chargée en dioxyde de carbone attaque le calcaire composé de carbonate de calcium et en disperse les éléments chimiques et minéraux. D'un côté part le calcium qui va former de la calcite,

et de l'autre s'échappe le dioxyde de carbone rendu à l'atmosphère. La vitesse de formation des grottes dépend de la qualité du calcaire, du climat, de la couverture végétale et de la quantité d'eau disponible. On estime que les calcaires de Nouvelle-Guinée sont amputés d'une épaisseur de roche supérieure à 50 cm en à peine mille ans. Pendant ce temps, dans la Meuse, sur la même période, l'épaisseur de calcaire dissoute atteint à peine 1,8 cm.

## 215 Quelle est la plus grande grotte au monde ?

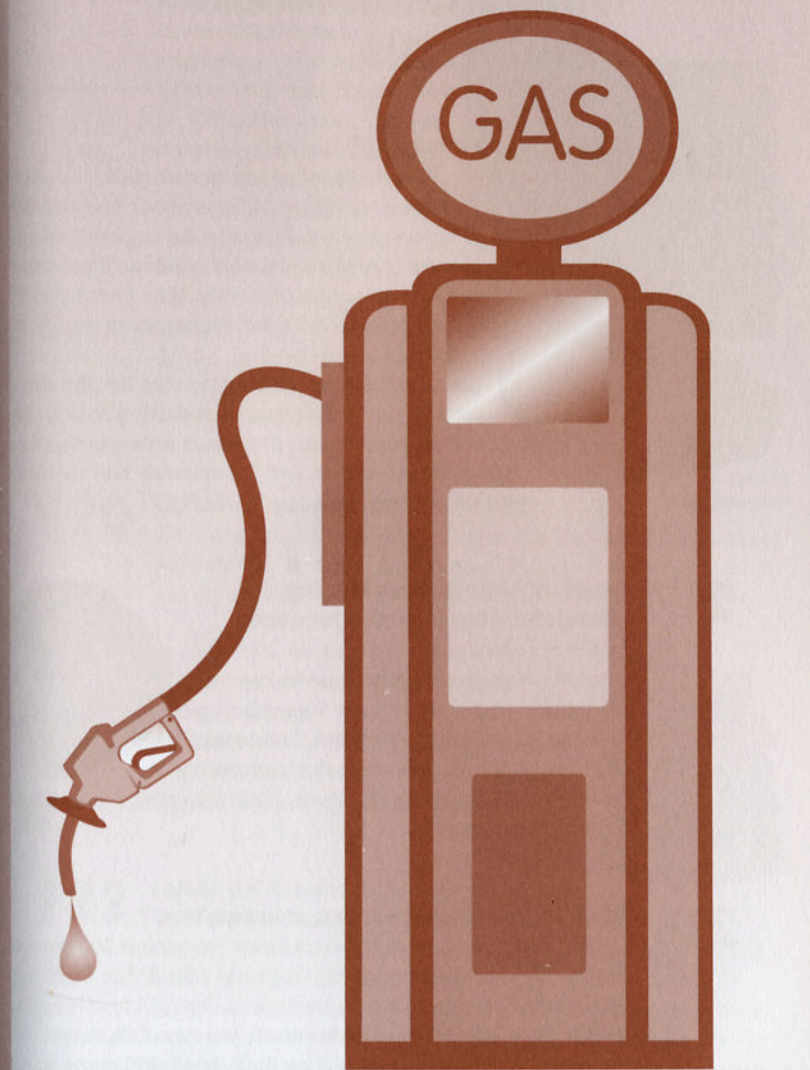
Il faut distinguer la grotte et le réseau karstique. Aux États-Unis, Mammoth Cave est un ensemble de galeries reliées en un vaste réseau karstique de 563 km de long. Ce réseau, dont l'exploration reste incomplète, pourrait avoir moins de 4 millions d'années. La plus grande grotte, ou salle (nommée Sarawak), se trouve sur l'île de Bornéo et fait partie d'un karst énorme développé sur une distance de 320 km. Les dimensions de cette salle sont gigantesques : 700 m de long, 300 m de largeur et un plafond voûté de 100 m de hauteur. Pour aboutir dans cette salle, les spéléologues parcourent une galerie dont les dimensions sont à l'avenant de celles de la salle Sarawak : 1 km de long pour 100 m de haut et de large. Pour se rendre compte de ces dimensions, on peut imaginer glisser sans peine plusieurs cathédrales dans ces salles souterraines.

### HISTOIRE D'UNE BELLE DUPERIE SPÉLÉOLOGIQUE !

Les grottes sont souvent des objets à fort potentiel touristique, et la réputation de l'aven Armand et du gouffre de Padirac égale celle de la tour Eiffel. Cependant, en Aveyron, sur la commune de Bozouls, un personnage curieux découvrit à l'abri de quelques chênes, un peu à l'écart de la route, une cavité inconnue qu'il nomma le gouffre de Barriac. Décidé à en vivre et à en faire une attraction touristique, cet homme lança une campagne de publicité et de promotion pour annoncer sa découverte comme étant « la plus formidable entreprise spéléologique de tous les temps ! ». Les documents touristiques vantaient les concrétions rarissimes, le musée du site et le parking gratuit, pendant qu'un homme préhistorique au profil d'*Homo habilis* souhaitait la bienvenue aux futurs visiteurs. Ce personnage promettait la balade spéléologique par le « conservateur » en personne, c'est-à-dire lui-même. Ainsi, pour 40 francs (à peine 25 pour les scolaires), les visiteurs étaient pris en main depuis le parking, un terrain herbeux en bord de route, jusqu'au gouffre où les attendait une mise en scène à suspense. Le « conservateur » emmenait ses hôtes sous la chénaie où il leur demandait de former un cercle autour du gouffre. Mais avant cet épisode, les convives passaient par le musée, un cabanon en parpaings dont les murs bruts portaient des étagères sur lesquelles étaient exposés des ossements délogés du gouffre. Impressionnants, ces restes de carcasses blanchis par le temps étaient des reliques d'animaux préhistoriques tombés dans le gouffre, peut-être même après avoir été chassés par les hommes de Cro-Magnon. La tension parcourait alors le public. Le « conservateur », dans un silence de cathédrale, amenait ses visiteurs au bord du gouffre. Après une introduction prometteuse, il allumait une ampoule (220 volts) qui donnait une impression de profondeur sur un abysse d'approximativement... un mètre. Après quelques paroles, une seconde ampoule située à peine plus profondément que la première illuminait le gouffre, sans en atteindre le fond que personne ne voyait ni n'atteignait, puisque aucun n'y descendait. Au bout d'une heure, la visite statique était terminée. Aujourd'hui, cette cavité mystérieuse est abandonnée et sa réputation n'a pas dépassé les limites de l'Aveyron. Seuls ceux qui n'ont pas vu cette majesté géologique en parlent. Les autres se taisent ! Pourtant, parmi les anciens visiteurs, se trouvait un cartographe de l'Institut géographique national, qui a reporté sur ces cartes l'existence de ce petit trou quelconque, dans lequel les paysans jetaient les cadavres de leur brebis mortes et qui servait de dépotoir avant d'être promu, avec la conviction sincère de son « conservateur », au rang de caverne.

# La géologie au service de l'homme

Les mines! Encore une application de la géologie. Extraits pendant des centaines de milliers d'années, les silex et autres roches coupantes, telle l'obsidienne, étaient recherchés par nos ancêtres paléolithiques pour fabriquer outils et armes. Aujourd'hui, pour nos besoins quotidiens, nous dépendons toujours de ces ressources minérales. Le plomb, le zinc, le manganèse, mais aussi l'argent, l'or, sont des minerais très convoités pour les industries. La joaillerie n'est pas en reste puisque le diamant, l'émeraude et le rubis sont les cibles favorites des chercheurs de minerais. L'uranium, utilisé à des fins industrielles ou militaires, est emblématique de la prospection géologique. Une fois encore, on mesure le poids de la géologie dans notre vie quotidienne. Bien plus grave encore est la question économique des énergies fossiles, sur lesquelles la spéculation agit jusqu'à en provoquer la hausse délirante du prix. Le pétrole, omniprésent dans notre quotidien et dont les sociétés occidentales ou émergentes sont dépendantes, est au centre des discussions familières. Dorénavant, le coût de la vie est fortement impacté, voire conditionné par la hausse du prix de vente de cette ressource géologique, à la fois source de confort et de conflits entre pays, mais aussi au sein des mêmes sociétés humaines où s'accroissent les écarts de revenus et de qualité de vie entre les hommes.



## Gîtes métallifères et minerais

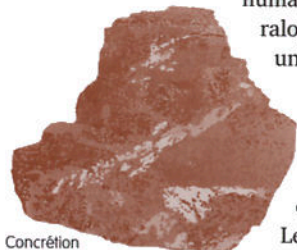
### 216 Qu'est-ce qu'un minerai ?

&gt;&gt;&gt; 47

C'est un composé minéralogique qui contient un métal, ou plus généralement un élément chimique utilisable pour une activité humaine artisanale ou industrielle. Ce composé minéralogique est appelé « minerai » dès lors qu'il présente un intérêt économique rentable. Il se forme par la concentration d'éléments chimiques au sein de la masse rocheuse.

Les minerais non métalliques sont les plus courants et sont utilisés pour la fabrication de briques, ciments, céramiques, matériaux isolants, engrais.

Les sables et argiles sont les minerais non métalliques les plus exploités.



Concrétion d'argent (Igalène)

### 217 Quels sont les minerais les plus abondants dans la croûte terrestre ?

&gt;&gt;&gt; 47

Le fer et l'aluminium. À partir de 30 % de concentration dans une roche, le fer montre un intérêt économique pour une mise en exploitation. L'aluminium, que l'on trouve dans les bauxites, doit avoir des concentrations d'au moins 30 %, là encore, pour présenter un intérêt économique.



Concrétion de fer

### 218 Quel est le métal le plus rare et le plus cher ?

&gt;&gt;&gt; 294

Ce n'est pas l'or mais le platine, dont il n'est produit que 200 tonnes par an. Sa valeur est deux fois plus forte que celle de l'or. Ce minerai est utilisé, entre autres, en joaillerie et dans l'industrie automobile (pots catalytiques, embouts de bougies d'allumage...). En mars 2008, la valeur du platine était de 43 000 euros pour 1 kg de métal ! Sa valeur explosera d'autant avec l'accroissement du parc automobile asiatique.

### 219 Quelle est la différence entre la métallogénie, la recherche minière et la minéralogie ?

La métallogénie est la discipline scientifique aux applications industrielles, dont l'objectif est de définir les caractéristiques des sites géologiques susceptibles de contenir des minerais sources de métaux. Quant à la recherche minière, elle traque les gisements exploitables. Enfin, la minéralogie est une discipline à part entière, qui étudie les minéraux constitutifs des roches. En dépit de son étymologie, elle n'est pas focalisée sur les mines !



Un forçat de la Terre

### 220 Qu'est-ce que le carat ?

C'est une unité de mesure qui quantifie le poids d'un minerai. Aujourd'hui, sa valeur est d'environ 0,20 g. À l'origine, le carat correspondait au poids d'une graine de caroubier (ou robinier).

### 221 Quelle est la masse d'or produite chaque année ?

À peine 2 300 tonnes ! La concentration de l'or dans les gisements excède rarement 2 g par tonne de roches extraites.



L'or : 2 g par tonne de roches extraites

### 222 Quelle est la mine supposée être la plus ancienne au monde ?

Pour les gisements métalliques, il s'agit des mines d'or de Nubie, exploitées par les Égyptiens probablement à partir de la IV<sup>e</sup> dynastie, voire avant. Cependant, des archéologues pensent avoir découvert la plus ancienne trace d'exploitation minière au Swaziland, dans des terres que des populations paléolithiques semblaient exploiter il y a 30 000 ans.

## 223 Qu'est-ce que le Potosí?

Endroit mythique classé au Patrimoine mondial de l'humanité, la « Cerro Rico de Potosí » est une montagne dont les flancs et le cœur ont livré avec certitude et depuis l'époque préincasique des métaux qui ont fait, un temps, la richesse et la notoriété des habitants de la ville bolivienne de Potosí, située à 4 000 m d'altitude. Dans cette ville minière, une partie de la population, environ 60 000 personnes, continue de vivre de l'extraction des minerais dans des conditions misérables. Cette montagne argentifère montre chaque jour des signes alarmants d'une instabilité dangereuse en raison des galeries qui la perforent.

### « C'EST PAS L'PÉROU ! » OU LE MYTHE DE L'ELDORADO

Cette expression ne provient pas du Pérou, mais bien de Bolivie où les conquistadors avaient découvert la région de Potosí et la quantité phénoménale d'argent qui constellait la montagne. En espagnol, cette expression se dit : « Valé un Potosí ».

## 224 Où trouve-t-on de l'or?

Vaste question... Actuellement, l'or est trouvé principalement dans des gisements à très basse teneur (entre 0,2 et 2 g d'or par tonne de roche). L'image du chercheur d'or avec sa batée est à ranger dans les collections, tant les dépôts fluviaux où l'or était prospecté ont été épuisés. Ces dépôts alluviaux (appelés aussi *placers*) ne comptent plus que pour 22 % de la production mondiale d'or, le reste étant extrait de gisements en roche. La Chine, avec 276 tonnes extraites en 2007, a ravi la place de premier producteur d'or, détenue jusqu'ici par l'Afrique du Sud.



Or sur une gangue rocheuse

## 225 Comment se forment les diamants?

>>> 17

Les diamants sont des minerais composés de carbone porté à de très hautes températures et pressions au sein de la croûte terrestre. Par conséquent, les diamants se trouvent dans des structures de volcans très anciens, enracinées dans le manteau terrestre à plus de 150 à 700 km de profondeur. Les conditions de formation des diamants sont connues théoriquement (3 000 °C). En revanche, une étude récente prouve que la présence de méthane semble indispensable. Cette implication du

méthane dans le mécanisme de production naturelle des diamants complique la compréhension de l'origine chimique et physique de ces bijoux.



Diamant après préparation

## 226 Où trouve-t-on des diamants?

>>> 50

En 2005, le Botswana, l'Afrique du Sud, la Russie, l'Angola, la Namibie et l'Australie sont les premiers producteurs de diamants au monde. La géologie de leurs territoires respectifs, composée de terrains très anciens, a gardé en mémoire de très vieux impacts météoritiques où abondent les diamants aux degrés de pureté variables. La production mondiale de diamants reste difficile à estimer, en raison d'une économie parallèle alimentée par un trafic très important. L'estimation officielle porte sur 110 millions de carats, soit environ 22 tonnes de diamants par an.

## 227 Quelle est la plus grande mine à ciel ouvert au monde?

>>> 50

En termes de dimensions, la plus grande mine au monde est Chuquicamata au Chili, dans le désert d'Atacama. Longue de 4,5 km, large de 2,5 km et profonde de plus de 700 m, cette mine de cuivre fournit 13 % de la production mondiale. La mine de Bingham (États-Unis) éventre une montagne sur près de 900 m de profondeur et a des dimensions à peine inférieures à celle de Chuquicamata.

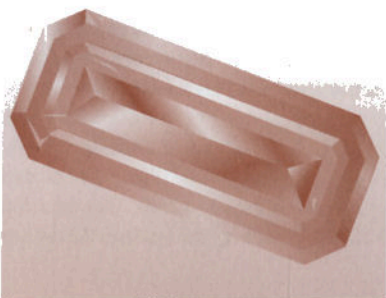


Mine de cuivre de Chuquicamata (Chili)

## 228 Quels sont les pays les mieux dotés en minerais ?

&gt;&gt;&gt; 81

Cela dépend bien évidemment de la nature des minerais. Mais l'Australie, le Canada, les États-Unis, l'Afrique du Sud, le Brésil et la Russie sont les mieux dotés. Ces territoires possèdent de vastes ensembles de vieilles roches, souvent de plus de 1 milliard d'années, rassemblées au sein de cratons où les concentrations de minerais ont permis la formation de grands gisements.



Émeraude préparée



Rubis après extraction

## L'énergie : pétrole, gaz naturel, charbon

### 229 Qu'est-ce que le pétrole ?

&gt;&gt;&gt; 81

Le pétrole est une roche liquide et visqueuse carbonée, due à la décomposition d'organismes animaux et végétaux essentiellement marins, morts il y a plusieurs millions d'années. Il existe des variétés différentes de pétrole, selon la nature des organismes marins fossiles qui en sont à l'origine. En général, le pétrole s'accumule dans des poches de sédiments gréseux ou sableux poreuses où il envahit les interstices millimétriques.

Le pétrole : espèce en voie de disparition



### 230 Où sont les réserves de pétrole ?

&gt;&gt;&gt; 231

L'Arabie Saoudite détient le quart des réserves planétaires, et l'Irak 10 %. L'Amérique du Nord a encore environ 12 années de production devant elle et l'Europe, à peine 9. À court terme, le monde dépendra en grande partie du Moyen-Orient et de l'Amérique du Sud. La production mondiale annuelle est évaluée à environ 25 milliards de barils (environ 70 millions de barils/jour). L'Arabie Saoudite a déjà annoncé qu'elle plafonnera sa production en 2010 à 12 millions de barils/jour, ce qui consolidera le prix du baril largement au-delà de 100 \$ US.



Trépan de forage

### 231 Qu'est-ce qu'un baril de pétrole ?

Les boursiers utilisent le très médiatique « baril » comme unité de mesure pour donner le prix de l'or noir. Un baril contient 160 litres de pétrole. L'Arabie Saoudite, premier producteur mondial de pétrole, extrayait en 2007 environ 9 millions de barils par jour.



Gaz  
Pétrole  
Eau salée

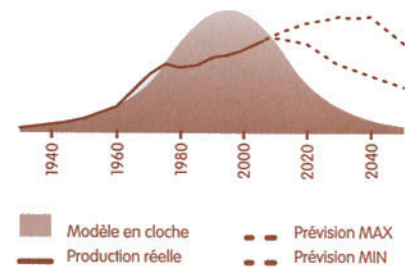
Dôme imperméable (argile)

Gisement de pétrole dans des sédiments

### 232 Quelles sont les réserves de pétrole actuelles ?

&gt;&gt;&gt; 230

Les prédictions varient, mais la majorité des experts pétroliers indépendants ou employés par des compagnies estiment que l'humanité possède moins de 40 ans de réserves devant elle. Les réserves sont les volumes extractibles en exploitation. Il existe aussi une autre notion, celle de « ressources », c'est-à-dire des réserves restant à découvrir partiellement ou totalement, et qui ne pourraient jamais être mises en exploitation en raison d'un risque technique et économique trop important. Aujourd'hui,



Réserves de pétrole théoriques

les gisements découverts sont de plus en plus petits et moins nombreux (excepté la zone de la mer Caspienne). Aucun gisement important, appelé « monstre » dans le milieu, n'a plus été découvert depuis 1980. À court terme, la demande en pétrole se découplera de l'offre, engendrant une augmentation irrémédiable du prix du baril, faisant du pétrole un produit dont la consommation sera de moins en moins courante et réservée à ceux qui pourront se l'offrir.

## 233 Par quelle énergie remplacer le pétrole ?

>>> 235

Le pétrole se renouvelle environ 10 000 fois moins vite que nous ne le consommons. Donc, à court terme, puisqu'aucun pays n'a su ou voulu préparer l'après-pétrole, les plus gros consommateurs seront tentés de reprendre la production de charbon, une énergie fossile dont les réserves sont estimées à deux siècles. Le charbon est beaucoup plus polluant que le pétrole, et aggravera le réchauffement climatique. Les bioénergies (éolienne, hydroélectricité, solaire, biomasse) sont renouvelables et moins destructives pour l'environnement et le climat mondial. Elles sont donc une alternative efficace, mais leur rendement reste insuffisant pour satisfaire les besoins en électricité d'un pays comme la France. L'énergie nucléaire est la seule source d'électri-



Old Faithful de Yellowstone



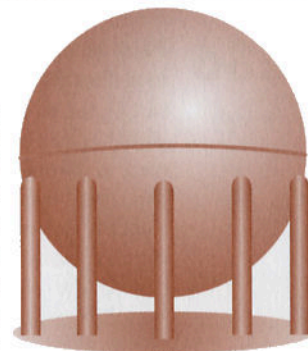
Tas de billes de charbon

citée envisageable actuellement, car elle seule peut produire suffisamment d'électricité rapidement. Cependant, on pourrait en dépendre moins, et donc en amenuiser le risque, si nous changeons notre mode de vie trop énergivore.

## 234 Qu'est-ce que le gaz naturel ?

>>> 229, 232

Incolore et inodore, le gaz naturel est composé à 90 % de méthane. Il est le fruit de la décomposition de la matière organique enfouie et transformée en huile qui, dans un second temps, sous l'effet de la chaleur et de la pression, se change en éléments volatils. Dans les réservoirs au sein des sédiments, le gaz naturel est donc souvent associé au pétrole et le surplombe. Tout comme le pétrole qui permet de produire de l'électricité, le gaz naturel est extrêmement polluant. Ainsi, pour produire 1 kw/h d'électricité, le gaz naturel génère 400 g de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), pendant que le charbon en génère 1 000 g. À titre de comparaison, l'énergie éolienne ne rejette que 20 g de CO<sub>2</sub> au maximum pour 1 kw/h d'électricité, 4 g pour l'énergie hydraulique et 6 g pour l'énergie nucléaire (source : [www.manicore.com](http://www.manicore.com), Jean-Marc Jancovici). Les réserves de gaz naturel sont estimées à 60 ans, pas davantage, soit à peine 20 de plus que le pétrole !



Le gaz naturel s'épuise aussi !

## 235 Qu'est-ce que le charbon ?

Le charbon résulte de l'accumulation de végétaux dans de vastes marécages. Enfouis, ces dépôts organiques morts se transforment en tourbe, en lignite, en bitume, puis finalement en charbon, une roche composée presque uniquement de carbone (à 93 %). Le charbon est l'une des énergies les plus polluantes, qui aggravera fortement le réchauffement climatique si des pays industriels ou en fort développement (Chine, Inde, Brésil) cèdent à la tentation de l'utiliser face au manque de pétrole.



## Le stockage des polluants

### 236 Peut-on stocker le CO<sub>2</sub> dans le sol et amoindrir le réchauffement climatique ?

Le CO<sub>2</sub> est un gaz à effet de serre puissant qui agit sur le climat global et son réchauffement. Afin de contenir ce bouleversement climatique mondial, l'idée est de capter le CO<sub>2</sub> à la source d'émission industrielle et de le stocker dans des réservoirs souterrains. En ce moment, un test a lieu en Norvège sur un site d'extraction de gaz naturel. Le CO<sub>2</sub> est intercepté et injecté dans une couche géologique contenant de l'eau salée où il est dissout. Ainsi, d'anciennes poches évidées et maintenant inexploitées de pétrole et de gaz naturel pourraient être remplies par du CO<sub>2</sub> liquéfié. Cette expérimentation a été lancée sur l'ancien puits d'extraction de gaz naturel à Lacq, où il va être tenté de stocker du CO<sub>2</sub>. Toutefois, ce genre d'initiative restera freiné tant qu'il n'existera pas un marché économique rentable ou une incitation légale obligeant les pollueurs à purifier les hydrocarbures de leurs gaz à effet de serre.

### 237 Le stockage des déchets nucléaires en profondeur est-il une solution ?

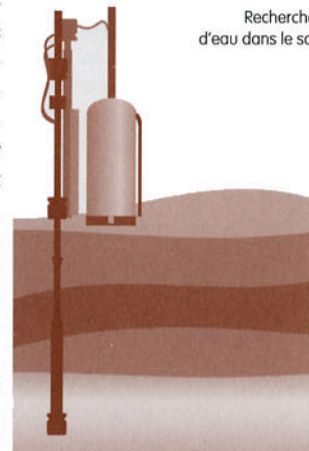
Les déchets nucléaires, pour les plus virulents, peuvent rester radioactifs durant des millions d'années. D'ici là, l'espèce humaine aura disparu ou, tout simplement, perdu la mémoire. C'est un fait, l'homme a la mémoire très fugace et se souvient peu des catastrophes naturelles et industrielles qui l'ont affecté. Aussi, le stockage dans des chambres profondes, situées à plusieurs centaines de mètres de profondeur, au sein de roches argileuses imperméables, est la solution la plus envisagée actuellement, principalement pour des raisons politiques liées aux réactions citoyennes. Pourtant, le stockage à l'air libre dans des cuves étanches serait tout aussi profitable, car l'homme aurait ses déchets chaque jour sous les yeux sans être tenté de les oublier !

## Les ressources en eau sur Terre

### 238 Y a-t-il assez d'eau pour tous sur Terre ?

>>> 198

L'organisme humain est constitué d'eau à 62 % et tous les organismes vivants en dépendent. Les hydrogéologues estiment qu'il pleut sur Terre l'équivalent de 40 000 km<sup>3</sup> d'eau par an (autant s'évaporent), soit l'équivalent de 445 lacs Léman. L'agriculture reste la plus grande consommatrice et dilapidatrice d'eau, avec près de 60 % de la consommation totale, notamment à cause de l'irrigation, une pratique agricole qui frôle la déraison. En 2025, l'humanité consommera 10 000 km<sup>3</sup>



Recherche d'eau dans le sol

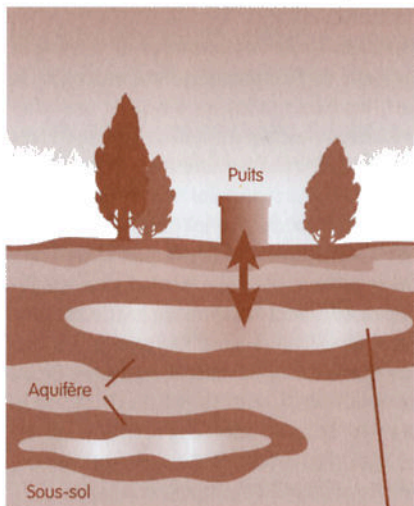
d'eau. Une majorité des pays de l'hémisphère Sud ainsi que la Chine, le Moyen-Orient, les péninsules indienne et indochinoise, le Maghreb et le Mexique seront en déficit hydrique très grave et auront besoin de recourir massivement à l'importation pour répondre aux besoins de leurs populations et économies respectives. La majorité de l'eau est de plus en plus difficilement accessible et inégalement répartie. La majeure partie de l'eau consommée provient de la surface (fleuves, lacs) et des aquifères (nappes d'eau souterraines). Seule une petite partie est produite par le dessalement de l'eau de mer. Certaines régions dépendent des aquifères, qui ont l'inconvénient immense de ne pas se renouveler rapidement. Ainsi, dans le sud de l'Inde, où la population s'accroît très vite, l'exploitation des aquifères incite les Indiens à rechercher l'eau plus profondément chaque année, engendrant par là même des coûts de pompage énormes.

## 239 Est-il possible d'utiliser les glaciers pour assouvir nos besoins impérieux en eau ?

Les glaciers sont inexploitable d'un point de vue économique ; trop maigres, ils fondent aussi rapidement à cause du réchauffement climatique global. Seules les calottes arctique et antarctique représentent de véritables réservoirs immenses (75 % de l'eau douce de la planète à elles deux). Quelques pays de l'hémisphère Nord ont tenté de tracter des icebergs depuis l'inlandsis arctique pour satisfaire leur consommation d'eau. Cependant, la dépense d'énergie serait telle que l'eau d'inlandsis coûterait très cher et deviendrait une marchandise de luxe. De rares firmes ont senti le filon et font de l'embouteillage d'eau de glacier, vendue à des prix faramineux.

## 240 La radiesthésie peut-elle aider à trouver de l'eau ?

La baguette de sourcier pour trouver de l'eau est aussi efficace que la brouette pour découvrir du pétrole. Aucun fait scientifique, c'est-à-dire factuel et quantifié, n'a pu mettre en évidence le talent présumé des sourciers équipés d'une baguette ou d'un pendule. Cette tradition repose sur la détection subtile d'un courant



Nappe d'eau phréatique

Captage d'eau dans un aquifère

magnétique, auquel seuls les sourciers seraient sensibles, généré par le passage de l'eau dans la roche. Or, ce champ magnétique n'a jamais été mesuré. Cela n'empêche pas les sourciers, lors d'expériences auxquelles ils se sont prêtés, de réagir positivement à un courant électrique inexistant dans des canaux artificiels où de l'eau devrait couler ! À l'instar des sourciers, il faut également être critique à l'égard des géobiologues qui sont spécialisés, contre rémunération, dans la recherche d'ondes négatives et positives dans l'habitat. L'équipe d'Henri Broch, professeur de physique à l'université de Nice, démonte une à une les mystifications sur le site Web [www.unice.fr/zetetique](http://www.unice.fr/zetetique).

## Le génie géologique et civil (aménagement, risques naturels)

### 241 Quel est le rôle de la géologie dans la construction de grands ouvrages d'art ?

Sans connaissance du sous-sol et de la surface, il est impossible et illégal de construire un bâtiment ou un grand ouvrage d'art comme un pont ou un aéroport. Ainsi, la construction du viaduc de Millau a réclamé près de dix années d'études, notamment géologiques et géotechniques, pour la faisabilité du pont et sa réalisation.



La géologie à la rescousse de l'ingénierie

### 242 À quoi servent les barrages ?

L'eau, à l'inverse du feu, ne peut être stoppée dans son élan. Les barrages forment à leur amont des retenues d'eau souvent de plusieurs dizaines à centaines de millions de m<sup>3</sup>. Cette eau stockée soutient l'activité touristique, l'agriculture et l'irrigation, permet de conserver une rivière en étiage et en évite l'assèchement estival. Cependant, les barrages servent aussi à stocker l'eau dévalant les lits des rivières lors des crues. Encore faut-il que ces barrages ne soient pas pleins avant la crue, auquel cas l'eau doit être évacuée absolument pour éviter la rupture du barrage !

## 243 La crue de 1910 à Paris peut-elle se reproduire ?

>>> 244

À partir du 28 janvier 1910, Paris a connu l'une des pires crues qui ait engendré une inondation de la capitale (avec celle oubliée de 1658). La Seine a débordé de son lit et inondé une partie de l'agglomération. Au pied de Notre-Dame, la Seine avait grossi jusqu'à atteindre plus de 8 m de hauteur d'eau. Le débit était de 2 400 m<sup>3</sup>/s, alors qu'il dépasse rarement 450 m<sup>3</sup>/s, plus souvent 250 m<sup>3</sup>/s. Dans Paris, 20 000 immeubles furent inondés. Le niveau de l'eau n'a cessé de monter pendant 12 jours; la Seine ne retrouva son lit et son niveau habituel que le 16 mars. Si un tel événement se reproduisait en 2008, le montant des dégâts attendus est estimé à 12 milliards d'euros. Cependant, à la suite de l'épisode de 1910, il fut décidé de créer des barrages-réservoirs en amont de la Seine, sur le cours de ses affluents, afin de capter l'eau et de la retenir en cas de crue sur l'un des drains ou plusieurs consécutivement, comme en 1910. Les berges parisiennes de la Seine furent rehaussées, certains ponts qui entravaient l'écoulement de l'eau et formaient des embâcles d'objets emportés par les eaux furent détruits et reconstruits. Une crue comme celle de 1910 peut donc se reproduire, mais il faudra un enchaînement de circonstances défavorables et synchrones pour que cela survienne de nouveau.

## 244 Qu'est-ce qu'une crue centennale ?

Il s'agit d'un calcul très théorique qui accorde 1 chance sur 100 pour qu'une grande crue se produise chaque année sur un cours d'eau. Cette définition probabiliste n'implique pas la survenue systématique d'une crue de grande ampleur chaque année, du type de celle de Paris en 1910. La logique est identique avec les crues décennales, qui ont 1 chance sur 10 de se produire annuellement, quelle que soit la rivière.

## 245 Quel est le risque naturel majeur à Paris ?

Bien que l'inondation nécessite d'être considérée avec gravité, le sous-sol parisien présente une dangerosité due au creusement de 300 km de galeries et cavités depuis plus de deux mille ans. Le sous-sol parisien est un véritable gruyère sur 40 % de la superficie de la capitale, construite sur des calcaires, des craies et des

gypses, matériaux longtemps utilisés pour la construction de la ville. L'Inspection générale des carrières recense chaque année 35 accidents, allant de la formation de trous, généralement inférieurs à 2 m de diamètre pour la majorité, à l'apparition de cavités d'un diamètre bien supérieur. Les galeries et anciennes carrières menaçantes doivent être consolidées, notamment par injection d'un mélange cimenteux qui les comblera.

## 246 Quelle est la meilleure protection contre les risques naturels ?

>>> 152

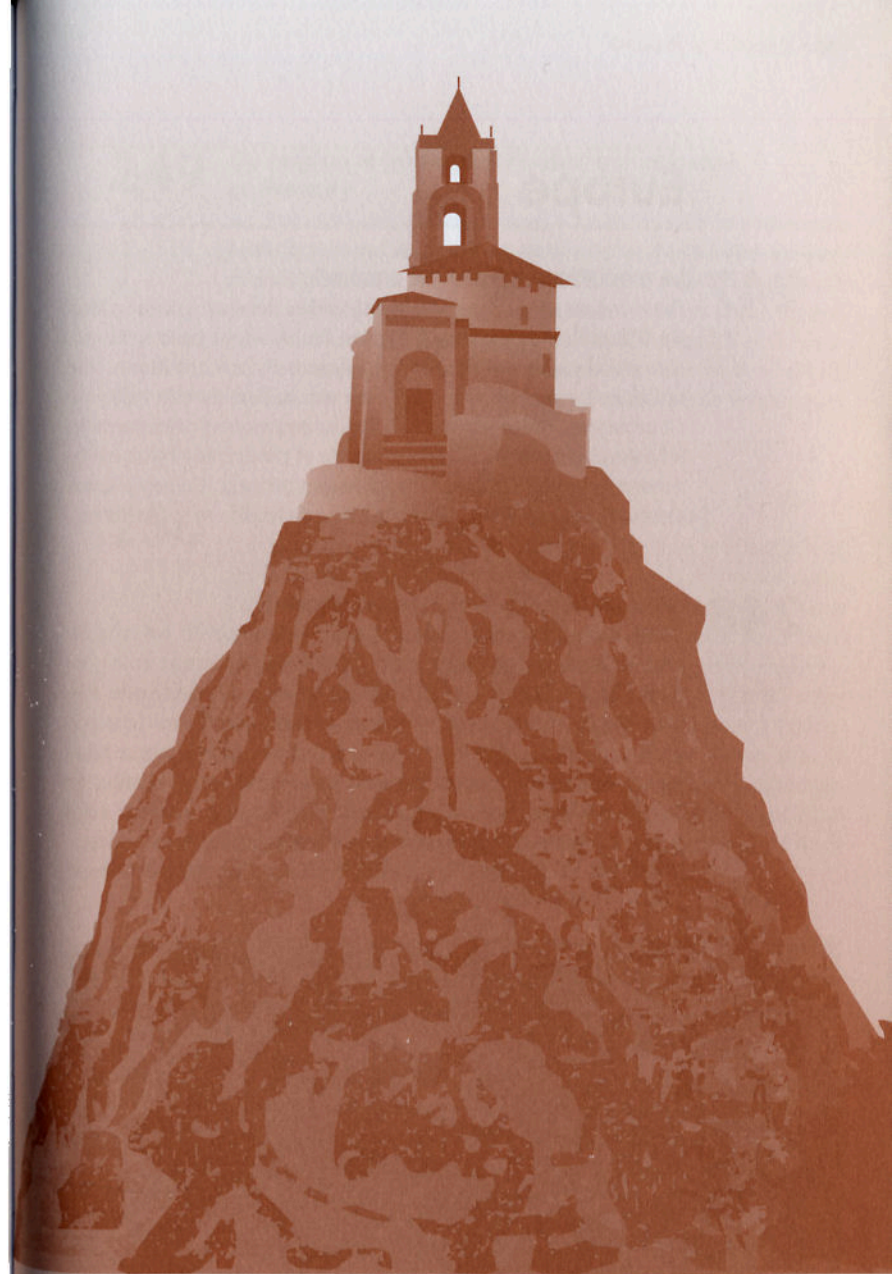
En termes d'efficacité, l'information et le développement d'une culture du risque sont les meilleurs outils pour se prémunir contre les effets d'un phénomène naturel destructeur. Ainsi, l'éducation des enfants japonais prend en considération la connaissance et l'acceptation du risque sismique et volcanique. En effet, s'il est exposé, l'homme n'a pas d'autre choix que d'être conscient de la dangerosité du phénomène et des dégâts éventuels que sa survenance pourrait engendrer. Il faut donc accepter de vivre avec le risque pour être moins vulnérable, car la compréhension du phénomène naturel constitue déjà un bouclier.

chapitre 10

# Merveilles géologiques

---

La géologie est une science mêlant la contemplation et l'étonnement à la raison. Grâce à ces atouts, notre curiosité est concentrée sur des merveilles et phénomènes géologiques beaux, gigantesques ou baroques qui parsèment la surface de la Terre, mais aussi celles d'autres planètes du Système solaire.



Rocher Saint-Michel (Puy-en-Velay)

## Europe

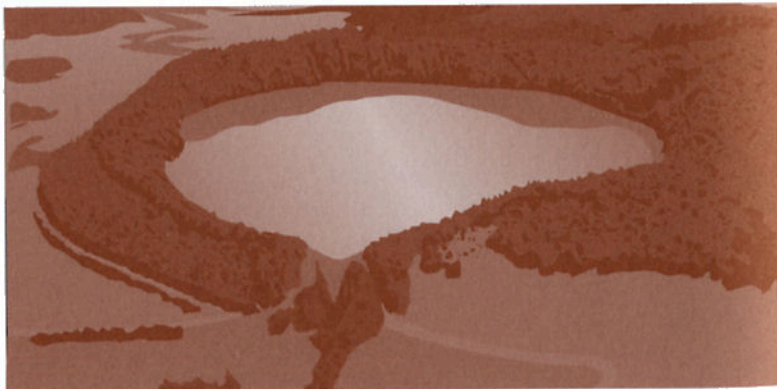
### 247 Le mont Blanc s'élève-t-il encore ?

Cette montagne est partiellement taillée dans un granite vieux de 300 millions d'années. La vallée de l'Arve est parcourue par une grande faille qui court le long du massif du Mont-Blanc. Une faille similaire existe aussi sur le versant italien, dans la vallée de Courmayeur. Ces deux grandes failles convergent pratiquement à l'aplomb du sommet du mont Blanc et participent à son exhumation grâce à la poussée du continent africain. Ce mécanisme existerait depuis 12 millions d'années et semble se poursuivre.

### 248 Combien y a-t-il de volcans en France ?

>>> 127

Difficile de dénombrer exactement le nombre de volcans en France, mais entre le plus grand d'entre eux, le Cantal, et le plus petit épanchement basaltique, il existe avec certitude des dizaines de pointements volcaniques résiduels francs (comme ceux de la chaîne des Puys) et des centaines de fragments hérités de volcans en grande partie érodés. Comme l'Italie, la France est un pays volcanique, même si l'activité actuelle y est nulle. Le volcan le plus jeune de France est le Pavin (Mont-Dore) qui fit éruption il y a 6000 ans. Des hommes ont donc assisté à ses explosions volcaniques !



Lac Pavin (Puy-de-Dôme)

### 249 Où religion et géologie font-elles bon ménage en France ?

Au Puy-en-Velay (Haute-Loire) ! Au milieu de la préfecture haut-ligurienne se dresse un rocher vertical et sombre au sommet duquel a été élevée, il y a mille ans, une chapelle pour prier saint Michel. Ce pinacle, témoin résiduel d'une cheminée volcanique, domine le Puy-en-Velay de ses 83 m de hauteur et rappelle le passé tumultueux du bassin du Puy, qui fut occupé par un lac puis secoué par des éruptions volcaniques explosives.

### 250 Pourquoi la Scandinavie se rehausse-t-elle ?

>>> 175

Il y a encore 10000 ans, une calotte glaciaire reposait sur la Scandinavie. Cette masse de glace a pesé sur la croûte terrestre, l'a déformée jusqu'à s'y enfoncer. Ainsi, toute la matière chaude et solide du manteau terrestre a flué vers l'extérieur, principalement vers l'Europe plus méridionale, non englacée. Aujourd'hui, alors que le glacier scandinave a fondu, cette matière mantellique reflue sous la Scandinavie pour y retrouver sa place. Cet afflux de matière chaude et solide sous la croûte terrestre scandinave provoque peu à peu le rehaussement de la Finlande, de la Norvège et de la Suède, jusqu'à 1 m par siècle en certains endroits les plus septentrionaux de la péninsule.

### 251 Quel est le point culminant des Pays-Bas ?

Il s'agit de la colline de Vaalsberg, qui culmine à 321 m d'altitude, située sur la commune de Vaals au sud-est du pays.

### 252 La mer Méditerranée va-t-elle disparaître ?

>>> 90

Oui, assurément. Cette mer intérieure est en sursis et devrait ne plus exister dans moins de 50 millions d'années. Gibraltar sera totalement fermé dans 500 000 ans, puisque l'Afrique coulisse vers le nord à la vitesse de 3 cm par an. Les roches marines qui parsèment le fond de cette mer seront portées en altitude et intégrées dans une chaîne de montagnes.

## 253 Pourquoi la Corse est-elle à la dérive ?

La géologie de la Corse présente des similarités avec celle de la Provence puisqu'on y retrouve des roches du massif de l'Esterel. Cette coïncidence montre que la Corse était rattachée au continent il y a encore environ 100 millions d'années, époque où gambadaient toujours quelques dinosaures. La Corse et la Sardaigne forment une microplaque prise en étau par les mouvements des deux grandes plaques africaine et eurasiatique, ainsi que celle, plus maigre, de la péninsule Ibérique. Les ajustements et déplacements constants de ces plaques et microplaques ont provoqué une rotation de la Corse et de la Sardaigne selon un mouvement inverse à celui des aiguilles d'une montre. Par conséquent, depuis plus de 30 millions d'années, la Corse prend ses distances avec le continent !

## 254 Quelle est la plus jeune île de Méditerranée ?

Ne songez ni à la Corse, à la Sardaigne, à la Sicile ou à Chypre, car l'île la plus jeune ne pointe son sommet hors de l'eau que très rarement. Il s'agit d'un petit volcan situé à 30 km au sud de la Sicile, un sujet de discussion parfois rude entre l'Italie, la France, la Grande-Bretagne et l'Espagne, qui en revendiquent la possession. En fait, Ferdinandea est le sommet d'un volcan marin aussi imposant que l'Etna et dont la cime n'est qu'à quelques mètres de la surface marine. La dernière apparition de Ferdinandea date de 1831. L'île avait alors atteint 65 m d'altitude pour une superficie de 4 km<sup>2</sup>. L'érosion marine et l'arrêt de l'activité volcanique ont eu raison de cet îlot qui fut détruit en à peine six mois. En 2002, l'île n'était qu'à 5 m de la surface marine et l'on pensait à une émergence prochaine. L'Italie et le Royaume-Uni échangèrent alors des mots peu diplomatiques, ce qui amena les Italiens à plonger et à déposer une plaque et un drapeau pour établir définitivement la possession italienne.

## 255 La Seine coule-t-elle réellement jusqu'à Paris ?

La Seine ? Pas si évident ! À Montereau, où l'Yonne conflue avec la Seine, le débit de la première (93 m<sup>3</sup>/s) est supérieur à celui de la seconde (80 m<sup>3</sup>/s) pour des bassins versants\* de tailles quasi similaires (10 800 km<sup>2</sup> pour l'Yonne, 10 300 km<sup>2</sup> pour la

Seine). Par conséquent, selon le débit de l'Yonne et de la Seine, deux rivières identiques, Paris est parcourue par l'Yonne ou la Seine.



La Seine, ou l'Yonne (?), sous le pont des Arts

## 256 Strasbourg et Mulhouse sont-elles menacées d'effondrement ?

>>> 92

Ces deux villes alsaciennes sont posées au fond d'un bassin d'effondrement (graben) de la croûte terrestre. Le bassin rhénan fait partie d'une série d'autres bassins orientés nord-sud, avec celui de la Bresse, des Limagnes auvergnates et du bassin rhodanien. Ces bassins d'effondrement sont des zones de fragilité de la croûte terrestre en extension selon un mouvement est-ouest. Les géologues s'accordent pour dire que l'effondrement (subsidence) de la partie méridionale du bassin rhénan a cessé, voire s'est inversé, alors qu'il se poursuit faiblement au nord. Bien que le mouvement d'extension de la croûte ne semble plus agir, le bassin rhénan persiste dans sa « chute », avérée par quelques tremblements de terre.

## 257 Quelle est l'origine de la dune du Pilat ?

>>> 204

Plus grand massif dunaire d'Europe, la dune du Pilat impressionne et fait front face à l'Atlantique. Ses dimensions sont impressionnantes : 2,7 km de long, 500 m de large à la base et 100 m de hauteur. Ses 60 millions de m<sup>3</sup> de sable engloutissent

la pinède qui la longe en arrière au rythme de 4 m par an. La dune du Pilat n'est pas unitaire, mais bien un ensemble de dunes accumulées, emboîtées depuis près de 8000 ans. À marée basse, les vents assèchent les bancs sableux atlantiques et en emportent les grains, qu'ils accumulent sur la côte à l'emplacement du massif du Pilat. Plus la dune est haute et plus les vents peinent à transporter leurs grains de sable. Ainsi, le sable provenant du plateau continental est déposé plus rapidement et ne peut plus surpasser cet obstacle gigantesque du Pilat.

## 258 D'où provient le sable formant les plages ?

Il résulte principalement de l'érosion de roches situées en amont des cours d'eau. Ainsi, les plages atlantiques sont surtout le fruit de la destruction des roches du Massif central, dont les sables qui en sont issus sont entraînés dans les cours d'eau comme l'Allier ou le Lot, puis sont charriés par la Loire et la Garonne. Les sables de ces plages sont principalement siliceux (des quartz), car les particules de nature différente, comme les grains calcaires, sont moins résistantes et se dissolvent dans l'eau plus facilement que le quartz, moins sensible à l'altération chimique\*. Cependant, les plages du cap d'Agde sont de nature basaltique, car l'assise de cette ville est plantée dans des terrains volcaniques.

Les plages ne sont pas exclusivement composées de grains de sable. Le littoral normand crayeux offre des plages consécutives à l'accumulation de blocs et de graviers issus de la destruction des falaises. Là encore, ce sont surtout les morceaux de silex qui résistent, aux dépens des galets crayeux qui se dissolvent très rapidement dans la mer.

## 259 Où trouve-t-on de l'or en France ?

Avant tout, ne surtout pas songer à faire fortune avec l'orpailage en France... Quelques rivières fournissent des paillettes, beaucoup plus rarement des pépites. Le Massif central, principalement le versant cévenol, le massif armoricain et les Pyrénées façonnent un or de qualité moyenne, insuffisant pour produire un revenu honorable. En France, l'orpailage est une activité de loisirs.

## 260 Venise va-t-elle disparaître sous les eaux ?

Les eaux de l'Adriatique montent de 6 mm par an pendant que le sous-sol vénitien, principalement composé d'argiles et de limons, se tasse. L'enfoncement du sous-sol est aggravé par le pompage des nappes phréatiques. Afin de contrecarrer le naufrage promis des 62000 Vénitiens et de leur cité, bâtie dans une lagune sur une centaine d'îlots reliés par des canaux, les autorités ont choisi d'agir contre les avancées marines en élaborant le projet Moïse, qui doit sauver Venise des inondations. Le coût global est estimé à 3,5 milliards d'euros et devrait aboutir en 2010-2011 à l'édification de digues mobiles qui mureront les passes de la lagune lors des grandes marées et tempêtes.

## 261 Quelle est l'origine du marbre de Carrare ?

>>> 61

Situées à une centaine de kilomètres de Florence sur le littoral, les carrières de marbre de Carrare étaient déjà réputées à la Renaissance et utilisées par Léonard de Vinci et Michel-Ange. Ce dernier sculpta son David dans cette roche blanche, pure, qui se travaille sans difficulté. À l'origine, les marbres de Carrare étaient des calcaires qui furent soumis à une légère transformation chimique et mécanique. Ces marbres ont donc été des roches marines avant d'être exploités plusieurs dizaines de millions d'années plus tard dans une montagne.

## 262 Naples peut-elle connaître le même destin que Pompéi ?

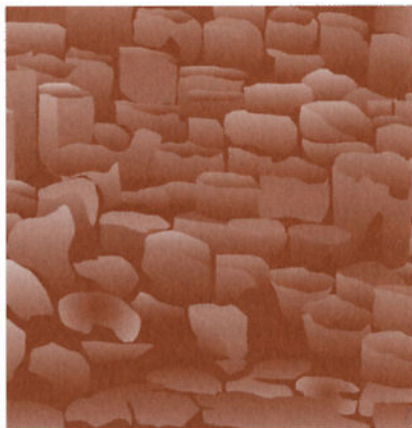
La dernière éruption du Vésuve date de 1944. Aujourd'hui, 1,2 million de Napolitains vivent au pied du volcan, parfois sur des terrains non autorisés à la construction. Bien que toutes les éruptions ne présentent pas le même danger, celles de nature explosive sont à craindre, à cause des écoulements de nuées ardentes mêlant roches et gaz portés à 700 °C et dévalant les pentes à 250 km/h. Les volcanologues devront identifier les signes précurseurs d'une éruption explosive au moins une semaine à l'avance pour évacuer les 700000 personnes les plus exposées. Il faudra aussi compter sur l'influence de San Gennaro, protecteur auquel les Napolitains adressent leurs prières et leur confiance...

## 263 Comment s'est creusé le Lac Léman ?

Le lac Léman est le plus grand lac alpin actuel. Son origine est donc métissée avec l'histoire des Alpes qui le toisent. Les plissements alpins, qui ont débuté il y a 100 millions d'années, ont très lentement formé une cuvette topographique que les glaciers alpins, notamment celui dit du Rhône, ont surcreusée et excavée il y a peine 15 000 ans. Aujourd'hui, le lac Léman est profond de 309 m au point le plus bas. Le fond du lac est tapissé de dépôts laissés par les glaciers lors de leur retrait, et qui ont ensuite été recouverts par un delta sous-lacustre de 10 km de long pour 600 m d'épaisseur, édifié par le Rhône à son entrée dans le Léman.

## 264 Qu'est-ce que la Chaussée des Géants ?

La fameuse Chaussée irlandaise est une coulée de lave basaltique modeste, voire ordinaire au regard d'autres bien plus majestueuses. Sa notoriété provient de ses colonnades polygonales estimées au nombre de 40 000. L'expression de Chaussée est due au toit de cette coulée de lave donnant l'impression au marcheur de se promener sur une voie pavée qu'un géant mythique aurait construite. Cette coulée de lave est une conséquence de l'activité volcanique qui régnait en Irlande pendant l'ouverture de l'Atlantique nord.



La Chaussée des Géants (Irlande)

## Afrique

### 265 Trouve-t-on des morceaux d'Afrique en Europe ?

Lorsque l'Europe et l'Afrique se sont carambolées il y a environ 100 millions d'années, collision encore active aujourd'hui, des sections du continent africain ont été propulsées par-dessus l'Europe puis charriées loin de leur racine. C'est le cas d'une montagne comme le mont Cervin (Matterhorn, 4 478 m) dont les roches sont africaines et qui en chevauchent d'autres, locales, d'origine européenne.

### 266 Le lac Tchad va-t-il disparaître complètement ?

Au temps de sa splendeur, il y a plus de 5 000 ans, le lac Tchad recouvrait une superficie de 340 000 km<sup>2</sup> (à titre de comparaison, la France en fait 550 000), pour une profondeur maximale de 160 m et un volume estimé à 13 500 km<sup>3</sup>. Aujourd'hui, la sécheresse du Sahel provoque l'assèchement de ce lac depuis au moins trente ans. Il est profond de 10 m au maximum, et sa superficie varie énormément, de 10 000 à 25 000 km<sup>2</sup> selon les précipitations. Il était le quatrième lac africain en 1970. Ses eaux subissent la sécheresse et sont pompées pour les besoins de l'irrigation. Sans politique environnementale ni prise en compte des besoins de la population, le lac Tchad devrait disparaître.

### 267 Depuis quand le Sahara est-il un désert ?

Le plus vaste des déserts, le Sahara, est aussi grand que les États-Unis (soit 9 millions de km<sup>2</sup>, 16 fois la France). Il présente son visage actuel depuis au moins 7 millions d'années, âge avéré par la découverte de dunes fossiles dans le bassin du Tchad. Cependant, il a aussi existé des épisodes humides par intermittences, qui ont redonné une végétation arborée au milieu de laquelle se sont étalés des lacs éphémères durant les périodes glaciaires. Ces conditions plus hospitalières pour la vie ont supporté l'installation d'une faune de savane (girafes, hippopotames, lions) parmi laquelle a pu demeurer l'ancêtre possible de l'homme, Toumaï.



## 268 D'où vient le sable du Sahara ?

Un désert n'est pas qu'une étendue de sable (ou erg). Au contraire, celui-ci ne recouvre que 20 % de la superficie du Sahara, qui est donc formée pour le reste d'étendues de roches (reg). Les dunes du Sahara peuvent atteindre jusqu'à 300 m d'épaisseur et sont organisées en cordons mobilisés par le vent. L'étendue de sable, ou erg, résulte de l'altération\* des roches en place par des processus chimiques et mécaniques. Le sable du Sahara est le fruit du burinage subi par les roches, aujourd'hui fossilisées sous leurs propres produits d'érosion. Ce sable a pu être déplacé par des rivières temporaires ou permanentes alors que le Sahara connaissait des époques luxuriantes.

## 269 Le désert du Sahara avance-t-il encore ?

Non seulement le Sahara avance avec ses dunes, mais il s'étend, surtout en raison de la désertification qui affecte sa bordure méridionale, que l'on nomme Sahel. Cette bande, large de 500 km, le long de la bordure méridionale du Sahara, subit une aridification depuis plusieurs milliers d'années. Il y a 5 000 ans à peine, le Sahel était une steppe arborée et lacustre avec une faune riche. Depuis, le Sahel s'assèche. Cette avancée du Sahara vers le sud est une conséquence de l'évolution naturelle de cette région, largement renforcée par l'action humaine sur le climat, les sols et l'assèchement des nappes phréatiques.



Progression du désert du Sahara

## 270 L'Afrique manque-t-elle vraiment d'eau ?

L'Afrique ne souffre pas d'un déficit d'eau, mais cette ressource est mal répartie et très peu partagée. Ainsi, la République démocratique du Congo concentre 25 % des réserves d'eau douce africaines à elle seule, pendant que la Mauritanie n'en possède que 0,001 %. En outre, il faut ajouter le manque d'infrastructures, souvent trop onéreuses, que des investisseurs étrangers rechignent à réaliser face au défaut de liquidités des Africains. Seulement 65 % des Africains ont accès à un service d'approvisionnement en eau potable. À titre de comparaison, un Nord-Américain consomme plus de 300 litres d'eau par jour en moyenne, alors qu'un Africain ne peut en avoir que 15.

## 271 Quelle est la plus grosse météorite au monde ?

Elle est en Namibie et pèse 60 tonnes. Il s'agit d'une météorite ferreuse nommée Hoba, autour de laquelle a été aménagée une estrade pour touristes car il fut impossible de la déplacer. En dépit de sa masse imposante équivalente à 20 éléphants, elle ne mesure que 3 m sur 2,5 m pour 50 cm d'épaisseur.

## 272 L'Afrique est-elle en train d'accoucher d'un nouveau continent ?

>>> 92

Depuis Djibouti jusqu'à l'exutoire du fleuve Zambèze, l'Afrique orientale est sectionnée par une large (50 km) et longue (6000 km) vallée d'origine tectonique incurvée, en voie d'ouverture et d'écartement. Le long de cette vallée, en raison de l'étirement de la croûte terrestre, l'Afrique se déchire en deux pendant que des volcans parsèment les bordures et le fond de cette vallée. D'ici à 20 millions d'années, la divergence aura séparé une large part de l'Afrique (composée de l'Érythrée, de l'Éthiopie, du Kenya, de la Somalie, de la Tanzanie, du Mozambique et de Madagascar) du reste du continent. Un nouvel océan apparaîtra entre la partie amputée de l'Afrique et son continent d'origine, à l'image de la mer Rouge dont il ne sera que le prolongement.

## 273 Les diamants sont-ils toujours source de guerres civiles en Afrique ?

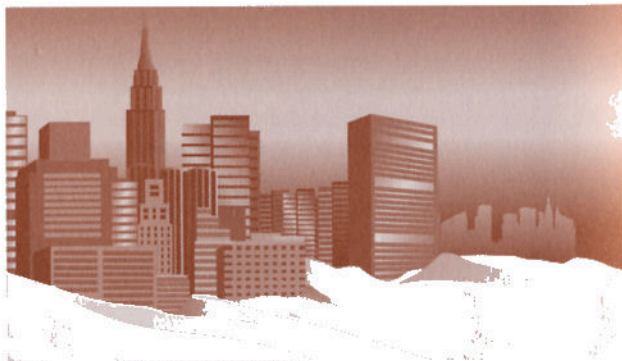
>>> 266

L'Afrique fournit plus de 70 % de la production mondiale de diamants. Une partie difficilement quantifiable provient de l'échange d'armes de guerre contre les pierres précieuses. En dépit des accords internationaux de Kimberley, signés le 1<sup>er</sup> janvier 2003 par les États-Unis, l'Europe, le Canada ainsi que trente autres pays, les diamants de conflits inondent toujours les marchés. Les seigneurs de guerre africains continuent à récolter des armes contre des diamants bruts. Ainsi, selon un rapport d'Amnesty International, les rebelles des Forces Nouvelles contrôlant le nord de la Côte d'Ivoire ont pu exfiltrer, par l'entremise du Ghana et du Mali, l'équivalent de 23 millions de dollars en diamants bruts, bien que le pays ait ratifié les accords de Kimberley. Les diamants peuvent donc être source de guerres civiles en Afrique.

## Amériques

### 274 Quelle est la particularité géologique de New York ?

Bien que couvrant une surface d'où n'émergent que quelques rares rochers, la ville de New York présente des vestiges de son passé glaciaire. Dans Central Park, le promeneur peut observer des roches polies par l'avancée de la calotte glaciaire arctique



New York sous les glaces dans 10 000 ans ?

il y a 21 000 ans. L'épaisseur de cette chape de glace atteignait au moins 100 m. Si nous entrions dans une nouvelle phase glaciaire, il existerait une probabilité importante pour que la mégalopole soit atteinte et broyée par les glaces.

### 275 Comment s'est formé le Grand Canyon ?

Majestueuse cicatrice terrestre, le Grand Canyon a été ciselé par l'action conjointe du creusement du fleuve Colorado, de ses nombreux affluents et du soulèvement de la croûte terrestre au pied des montagnes Rocheuses. De ce fait, pendant que le Colorado et ses affluents taillaient les roches et s'y installaient, un mouvement de soulèvement général du sol amplifiait le creusement de la roche par le réseau hydrographique. Ce canyon est profond de 1 200 m en moyenne, long de 446 km et large de 6 à 23 km. Sa formation semble débuter il y a 55 millions d'années dans la section occidentale, avant que le creusement ne se fasse vers l'amont. Autre hypothèse : ce monument terrestre pourrait également résulter du rassemblement de nombreux canyons autonomes qui, en se rejoignant, ont formé le Grand Canyon. Aujourd'hui, le Colorado est l'un des fleuves dont le débit est le plus dompté au monde grâce aux barrages. Ainsi, avec le Grand Canyon et le Colorado, nous avons un exemple supplémentaire de l'influence que l'homme peut exercer sur la géologie et le modelage des paysages. Malgré cela, la période humaine n'est qu'un intermède très bref dans l'histoire du Colorado, qui retrouvera son caractère naturel si l'homme disparaît.

### 276 Qu'est-ce que la Vallée de la Mort ?

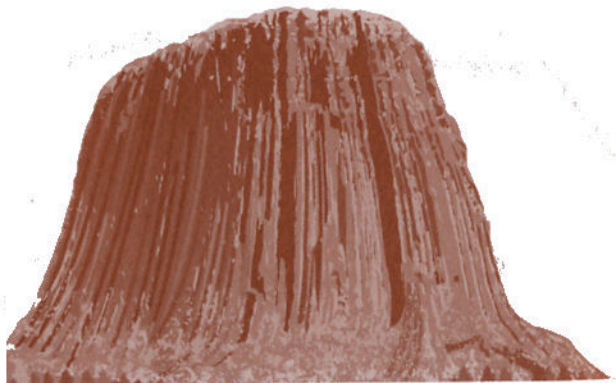
Outre ses caractéristiques climatiques qui en font l'endroit le plus inhospitalier des États-Unis (57 °C en 1913), la Vallée de la Mort est bordée au nord-ouest par la sierra Nevada, une chaîne de montagnes qui bloque les nuages arrivant du Pacifique. Certaines années, la Vallée de la Mort n'est donc pas arrosée. D'autre part, c'est la région la plus basse de l'Amérique du Nord (86 m au-dessous du niveau de la mer). Formée après une phase d'extension de la croûte terrestre, la Vallée de la Mort est le résultat d'un effondrement lent du sol, attesté par les failles qui délimitent les bordures est et ouest et qui produisent toujours quelques séismes.

## 277 Pourquoi la Californie deviendra-t-elle une île ?

La fameuse faille de San Andreas n'a pas seulement pour effet d'être le lieu de séismes parfois destructeurs, elle provoque aussi le coulissage vers le nord-ouest de la Californie contre le reste des États-Unis. Cette faille démarque deux plaques tectoniques : à l'est, la plaque américaine, et à l'ouest, la plaque Pacifique sur laquelle se trouve la Californie. Le mouvement de la plaque Pacifique entraîne la Californie dans son élan, à la vitesse moyenne de 3,5 cm par an. À ce rythme, Los Angeles, située sur la plaque Pacifique, fera face à San Francisco, bâtie sur la plaque américaine, dans approximativement 14 millions d'années, pendant que la Californie deviendra une île qui sera encore atteignable à la nage.

## 278 Quel est le lien entre un ours géant, un volcan et une Indienne cheyenne ?

Dans l'État peu peuplé du Wyoming se tapit l'une des merveilles de la géologie mondiale : la Tour du Diable (ou Devil's Tower). Au milieu d'un relief sans accident topographique majeur se dresse une tour naturelle, en fait une cheminée volcanique fossile parfaitement circulaire, haute de 264 m et large de 300 m à la base. Vieille de 40 millions d'années, cette cheminée volcanique est l'ultime vestige d'un volcan. Le plus extraordinaire à observer, ce sont les orgues épaisses et remarquablement conservées qui griffent cette tour naturelle sur toute sa



Devil's Tower (Wyoming)

hauteur. Les Indiens pensaient qu'un ours géant avait écorché cette roche pour y ravir une des leurs qui s'y était réfugiée, après que l'animal l'eut prise en chasse. Désespérée, l'Indienne s'arrêta pour prier et sentit la terre s'élever jusqu'au ciel. L'ours, très en colère, s'agrippa aux parois de la montagne grandissante et en stria verticalement les flancs de ses griffes.

## 279 Les chutes du Niagara se déplacent-elles ?

Hautes de 52 m, les chutes du Niagara rognent la bordure de la corniche du haut de laquelle la rivière se précipite. Cette érosion est continue et agit en fonction de la pente du cours d'eau et du volume d'eau écoulé. Aujourd'hui, le Niagara a un débit contrôlé. Si la rivière retrouvait son débit naturel deux fois supérieur à l'actuel, les chutes migreraient plus rapidement vers l'amont, comme elles l'ont toujours fait. Elles sont nées il y a 12 000 ans d'un accident topographique le long du cours d'eau et ont parcouru vers l'amont une distance d'environ 20 km. Avant d'être domptées, les chutes remontaient le Niagara à la vitesse moyenne de 1,5 m par an.

## 280 Faut-il détruire et reconstruire La Nouvelle-Orléans ?

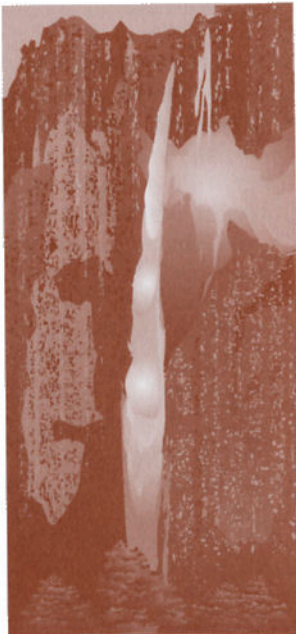
Le delta du Mississippi sur lequel est bâtie La Nouvelle-Orléans est une accumulation de sédiments, épaisse de 19 000 m et entassée depuis 23 millions d'années. Ses dimensions et sa masse entraînent ce monument naturel dans un affaissement, que l'homme amplifie avec les pompages dans la nappe phréatique et l'exploitation des formations d'hydrocarbures dans le golfe du Mexique. L'extraction du pétrole et du gaz naturel laisse des poches vides qui accélèrent l'affaissement du delta. Jusqu'à présent, le Mississippi parvenait à compenser cet affaissement grâce aux sédiments amenés et déposés. Mais, depuis la grande crue de 1927, le fleuve a été aménagé et une série de barrages en contrôle le débit et la charge sédimentaire. Le delta est donc moins alimenté en sédiments et perd des terres au profit de l'océan. En conséquence, le niveau marin tend à monter (+ 60 cm au XX<sup>e</sup> siècle), alors qu'environ 40 km<sup>2</sup> de terres sont érodées chaque année. Cette submersion du delta met en danger des villes comme La Nouvelle-Orléans. Il faudrait non seulement reconstruire la ville, mais aussi la déplacer.

## 281 Sur quelle épaisseur les sols canadiens sont-ils gelés en permanence ?

Dans le nord du Canada, à l'instar de l'Alaska, de la Sibérie et de la Scandinavie, les sols sont gelés en permanence. Ce phénomène est nommé permafrost ou pergélisol. Seule une section très superficielle peut dégeler pendant la saison douce alors que, en deçà de 1 m de profondeur, les sols et la roche restent gelés continuellement, sur une épaisseur pouvant atteindre 100 m. Le réchauffement climatique entraîne un dégel superficiel puis profond de ces pergélisols, qui dégagent alors une quantité de méthane très importante. Or, le méthane est un gaz à effet de serre vingt fois plus redoutable que le CO<sub>2</sub>, qui agit sur le dérèglement du climat mondial. En outre, au bout de dix ans, le méthane se transforme en CO<sub>2</sub>. La libération de ce méthane aggrave donc le réchauffement climatique.

## 282 Quelles sont les plus hautes chutes d'eau au monde ?

Il s'agit des chutes Angel (Venezuela) hautes de 979 m et découvertes en 1933 par l'aviateur américain Jimmie Angel. Lorsque le débit de la rivière qui les alimente se tarit, les chutes se précipitent du sommet d'un ressaut vertical sans toucher terre et finissent par former un nuage semblant flotter au-dessus du sol.



Les plus hautes chutes d'eau sur Terre



## Arctique-Antarctique

### 283 L'Antarctique est-il un désert ?

Sans contestation possible, l'Antarctique est le plus grand désert sur Terre (14 millions de km<sup>2</sup>). Selon les paléoclimatologues, certaines vallées antarctiques non englacées n'ont pas reçu de précipitations depuis 2 millions d'années, alors que le Sahara (9 millions de km<sup>2</sup>) est arrosé, selon les endroits, par 20 à 400 mm d'eau par an.

### 284 Qu'y a-t-il sous le pôle Nord et le pôle Sud ?

Le pôle Nord géographique est positionné en plein océan Arctique, à plus de 700 km des premières terres groenlandaises. Une expédition russe semble avoir touché le fond de l'océan à 4 261 m de profondeur, juste à l'aplomb du pôle Nord. Cette action de prestige pourrait annoncer une prochaine revendication territoriale de la part de la Russie, qui estime que 25 % des ressources d'hydrocarbures se trouvent au-delà du cercle arctique. Quant au pôle Sud géographique, il est planté à 2 830 m d'altitude sur le continent antarctique, au sommet de la calotte glaciaire qui recouvre ce continent.

### 285 Quel est le plus grand iceberg jamais vu ?

Le plus grand iceberg au monde jamais vu s'est brisé en neuf morceaux à la suite d'une tempête en octobre 2005. Ce géant mesurait près de 300 km de long, 37 km de large, pour une surface de 11 000 km<sup>2</sup> (la Corse fait 8 680 km<sup>2</sup>). Baptisé B15, cet iceberg est apparu en raison du morcellement que subit la mer de Ross, une plate-forme de glace aussi grande que la France et gelée en permanence. Cependant, là encore, le réchauffement climatique pourrait engendrer une fracturation plus intense des bordures de cette étendue glacée.

### 286 Que masquent les glaces de l'Antarctique ?

Un continent ! Sous les 30 millions de km<sup>3</sup> de glace s'étendent des paysages rocheux déformés par la masse de cette calotte glaciaire

(inlandsis), s'affaissant parfois jusqu'à 900 m au-dessous le niveau de la mer. Ces paysages de roches enfouies n'affleurent que sur 2 % de la superficie de l'Antarctique. La découverte la plus surprenante concerne l'existence d'environ 150 lacs remplis d'eau liquide sous plusieurs centaines à milliers de mètres d'épaisseur de glace. Le plus grand d'entre eux, le lac Vostok, mesure 250 km de long pour 50 km de large. Ces lacs pourraient former un réseau complexe possiblement relié par des cours d'eau, et favoriser le déplacement de la glace en profondeur en lubrifiant le continent rocheux. Enfin, ces lacs, isolés de l'atmosphère terrestre depuis plusieurs millions d'années, pourraient contenir des organismes inconnus.

## 287 Que se passerait-il si l'inlandsis antarctique fondait totalement ?

L'Antarctique contient plus de 70 % des réserves d'eau douce. Si l'ensemble des glaces venait à fondre, le niveau marin s'élèverait de 60 m, noyant des villes comme Le Havre, New York, Venise, Marseille, Barcelone, ainsi qu'une grande partie des Pays-Bas et du Bangladesh. Ce scénario est peu plausible, bien que les glaces arctiques fondent plus rapidement que les scientifiques ne l'avaient prédit. Comparé à l'Arctique, l'Antarctique reste modérément affecté par le réchauffement climatique global, sans que l'on ne puisse affirmer jusqu'à quand. Cependant, l'effet du réchauffement le plus alarmant concerne la banquise, cette couronne de glaces hivernales autour de l'Antarctique, qui livre des signes précurseurs d'un amaigrissement inquiétant et d'une disparition de plus en plus précoce chaque année.

## Asie

## 288 Que s'est-il passé en Sibérie le 30 juin 1908 ?

Un des grands mystères entoure ce qui s'est produit dans la province sibérienne très peu peuplée de Tunguska en 1908. Les habitants évoquent une boule de feu et une explosion dont l'énergie dégagée fut estimée entre 10 et 20 mégatonnes d'ex-

plosif (soit environ 800 fois la bombe d'Hiroshima). Immédiatement après l'explosion, des phénomènes lumineux furent observés en Europe. La région ne fut visitée pour la première fois qu'en 1927 en raison de son éloignement. Les explorateurs découvrirent que toutes les forêts avaient été couchées comme par un souffle gigantesque, sans pour autant trouver de cratère. Récemment, une équipe scientifique affirme avoir identifié une cuvette topographique qui pourrait ressembler à un cratère. L'objet céleste (une météorite, une comète ?) pourrait avoir explosé dans l'atmosphère à une altitude de 5 à 10 km, et son onde de choc aurait alors déformé la topographie et couché les arbres sur environ 2 200 km<sup>2</sup>. En outre, un lac de 400 m de diamètre et de 40 m de profondeur, situé à 8 km au nord-ouest du point d'impact présumé, pourrait être un cratère météoritique signalant que le bolide se serait morcelé en explosant.

## 289 Moïse et le peuple élu ont-ils été sauvés par un tsunami ?

Poursuivis par les Égyptiens lors de l'Exode, vers 1 640 avant notre ère, les Hébreux sont supposés avoir traversé la mer Rouge dont Moïse, avec l'aide de Dieu, aurait écarté les eaux pour laisser le passage au peuple élu. Les Égyptiens, moins chanceux, furent engloutis. Ce « miracle » est attribuable à l'éruption du volcan Santorin qui eut lieu à la même époque. Moïse est censé avoir ouvert les eaux de la mer Rouge. Or, il ne s'agit pas de celle que nous connaissons, mais d'une étendue marine située dans le prolongement du grand bras de mer qui sépare l'Afrique de la péninsule arabe. En fait, la « mer des Roseaux » (le nom de « mer Rouge » est dû à des erreurs de traduction de l'Ancien



Moïse, la Bible et la géologie

Testament) n'aurait pas formé un corridor maritime sous les injonctions de Moïse, mais aurait répondu mécaniquement à un retrait des eaux, présage très souvent annonciateur d'un tsunami. Réinterprété, ce phénomène divin décrit dans la Bible pourrait être un tsunami généré par l'explosion du Santorin et qui aurait englouti les Égyptiens lancés à la poursuite du peuple élu ! À la lecture de cette courte histoire biblique revue, on comprend qu'un cataclysme géologique majeur survenu en Méditerranée ait pu être rapporté dans l'Ancien Testament, a servi de socle fondateur au judaïsme et, plus tard, au christianisme, ait été reconnu par l'islam.

## 290 Qu'est-ce que la mer Morte ?

La mer Morte est un lac de 80 km de long pour 18 km de large, dont l'eau atteint une concentration en sel de 275 g/l (35 g/l dans l'eau de mer). Ce lac est à la commissure de deux plaques lithosphériques\* divergentes : la microplaque du Sinaï et la plaque arabique. Cette position géologique instable entre deux plaques mobiles entraîne un enfoncement de la mer Morte et en fait le point le plus bas de la croûte terrestre (- 400 m). Les eaux de ce lac s'évaporent très rapidement alors que le Jourdain, son principal apport d'eau douce, est surexploité pour l'irrigation. Afin de remplir la mer Morte, un projet international entrevoit de construire un chenal de 180 km de long depuis la mer Rouge et d'en pomper l'eau. Enfin, la mer Morte est réputée pour ses bains d'eau et de boue salées que Cléopâtre vantait déjà. En revanche, bien qu'on puisse y flotter, il est risqué d'y plonger la tête en raison de la concentration en sel. Le nom de mer Morte proviendrait de l'inexistence de vie dans ces eaux où aucun poisson ne peut survivre.

## 291 Le Déluge peut-il s'expliquer par la géologie ?

Le Déluge, épisode biblique qui a conduit Noé à construire une embarcation pour sauver l'humanité et les espèces vivantes, pourrait se référer à l'ouverture du détroit du Bosphore et au remplissage soudain de la mer Noire par les eaux de la Méditerranée. Cette dernière est située 100 m au-dessus de sa voisine. Des géologues ont montré, notamment grâce aux plages de

sable retrouvées sous son niveau marin actuel, qu'il y a 7 800 ans la mer Noire était un lac d'eau douce. Dans des dépôts voisins, des animaux marins fossiles datant de 7 300 ans côtoient une faune d'eau douce indiquant un changement très brutal de faune. La rupture du barrage naturel qui s'élevait entre la Méditerranée et le lac qu'était la mer Noire aurait permis le déversement quotidien de plusieurs milliers de mètres cubes d'eau méditerranéenne, poussant les habitants des rives de la mer Noire à fuir. Noé aurait alors construit son embarcation avant de s'échouer sur une montagne que l'on interprète comme étant le mont Ararat, un volcan de Turquie de 5 161 m d'altitude, localisé à 1 200 km du Bosphore. L'épisode du Déluge en mer Noire est un nouvel épisode biblique pouvant trouver une explication par la géologie. En revanche, pour ce qui est de l'échouage de Noé, l'aide de la géologie est pour le moment négligeable !

## 292 Pourquoi le fleuve Huang He est-il jaune ?

Ce fleuve de 5 464 km est le deuxième plus long de Chine, après le fameux Yangzi Jiang, et jette ses eaux brunes à jaunâtres dans la mer de Chine. Cette teinte est acquise lorsque le fleuve traverse des dépôts limoneux de couleur jaune appelés loess. Ces dépôts furent amenés et déposés par des vents catabatiques (qui soufflent sur une calotte glaciaire et en dévalent les pentes) lors d'une glaciation qui affecta la Chine il y a plus de 10 000 ans. La charge sédimentaire dans le Huang He est donc très forte et fertilise les sols lors des crues.

## 293 Pourquoi le Fuji-Yama est-il si beau ?

La beauté de ce volcan japonais provient de sa symétrie pyramidale parfaite et de sa couronne de neiges. À cette forme harmonieuse s'ajoute un sentiment de sérénité qu'inspire le Fuji-Yama. Cette pyramide naturelle de 3 776 m d'altitude doit sa forme à sa jeunesse. En effet, plus un volcan présente de pentes escarpées et symétriques, plus son âge est récent. De là à en conclure que la jeunesse est beauté...

## 294 Pourquoi l'Oural est-il un nouvel Eldorado ?

&gt;&gt;&gt; 218

Cette région montagneuse russe au relief fatigué contient dans son sol une richesse plus importante que l'or : le platine. Celui-ci est un minerai très rare et précieux, dont la valeur équivaut à deux fois celle de l'or. L'Oural offre au promeneur attentif, et un peu géologue, la chance de ramasser des pépites de platine dans les dépôts alluviaux. Bien qu'en apparence il puisse être confondu avec de l'argent, le platine est trois fois plus dense. La plus grosse pépite de platine fut trouvée en 1843 et avait une masse de 9,6 kg. Aujourd'hui, la valeur de cette pépite se monte à 1 230 € l'once (28,35 g), soit 420 000 € selon le cours du marché de mars 2008.

## Le Système solaire

## 295 Quel est le plus grand volcan du Système solaire ?

Il s'agit du mont Olympus sur Mars. Son diamètre est de 600 km à la base pour une altitude de 27 000 m. Son sommet, perforé d'une caldeira de 85 km de long, 60 km de large pour 3 km de profondeur, est capable de contenir un volume équivalent à 170 lacs Léman. En dépit de son altitude (trois fois l'Everest), les flancs de ce volcan sont si peu pentus qu'un homme pourrait atteindre le sommet en marchant sans effort !

Volcan Olympus  
comparé à la France



## 296 Y a-t-il des océans sur la Lune ?

&gt;&gt;&gt; 37

Les premiers astronomes pensaient que les grandes étendues lunaires sombres visibles depuis la Terre étaient des océans. Or, au lieu d'eau, ces « océans » sont de vastes épanchements de basaltes, témoins de la jeunesse turbulente de notre satellite lors de sa formation.

## 297 L'eau coule-t-elle sur Mars ?

La question reste ouverte, bien que des formes de relief d'apparence fraîche aient été modelées par un liquide. On observe régulièrement des lits de rivières, des chenaux d'inondation, des mouvements de terrain, ou encore des traces de liquéfaction au centre de cratères d'impact. Aujourd'hui, il semble qu'aucun liquide ne coule sur Mars. L'atmosphère martienne est si peu dense que l'eau s'évaporerait immédiatement. De plus, la température dépasse rarement 0 °C. L'hypothèse actuelle privilégie l'existence d'une eau gelée prise dans les sols martiens. En 2006, l'examen visuel d'images de la bordure d'un cratère, relevées par la sonde Mars Odyssey, a révélé des modifications de relief avec apparition de ravines entre 2001 et 2005. Les astronomes et géologues tiennent pour acquise la présence authentique mais fugace d'un liquide, possiblement de l'eau, pouvant couler très ponctuellement dans le sous-sol de Mars.

## 298 De quoi sont composées les calottes glaciaires polaires de Mars ?

Les pôles Nord et Sud de Mars sont recouverts par de grandes nappes blanches, respectivement de 1 000 et 400 km de diamètre, imitant les inlandsis polaires terrestres. L'interprétation qui en est faite favorise l'hypothèse de calottes glaciaires composées de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). En raison des températures très basses et de la pression atmosphérique très faible, seul le CO<sub>2</sub> (qui compose 95 % de l'atmosphère de Mars) est capable d'apparaître à l'état solide.

## 299 Existe-t-il des continents sur Mars?

&gt;&gt;&gt; 72

Aujourd'hui, il n'est pas possible d'en envisager l'existence, car Mars est présumée être une planète morte. Sur Terre, les continents sont associés à l'existence de la tectonique des plaques que l'on ressent par les séismes et l'activité des volcans. Sur Mars, bien qu'il existe des volcans, aucune trace d'activité récente ni aucune autre de nature géologique ne peuvent témoigner d'un découpage de la croûte martienne en plaques tectoniques, à l'instar de la Terre. Les géologues estiment qu'il n'y a pas actuellement de continents sur Mars.

## 300 De quoi sont composés les anneaux de Saturne?

Leur esthétique fascine, tout comme leur origine. La glace est présumée être le premier composant des anneaux, bien qu'elle puisse envelopper des blocs rocheux dont la plupart sont de diamètre métrique. Épais d'au maximum 1 km et large de 400 000 km, les anneaux, s'il était possible de les compacter, façonneraient un objet céleste d'à peine 100 km de diamètre. Or, selon la dernière hypothèse, les anneaux seraient les vestiges de l'explosion d'une comète ou d'un satellite à proximité de Saturne.

## 301 Peut-on faire de la géologie sur Jupiter?

Impossible de songer à fouiller la planète géante Jupiter. Celle-ci, à l'instar de ses voisines Saturne, Neptune et Uranus, est une planète gazeuse. Par conséquent, si un géologue voulait explorer Jupiter, il traverserait la planète jusqu'à ce que la pression atmosphérique devienne si forte qu'elle ne l'écrase. Au centre de Jupiter, les astronomes avancent l'existence d'un noyau solide composé de silicates et de métaux (comme le fer), émetteur de chaleur.



## Glossaire

**A Accrétion** Croissance d'un objet par apport extérieur de matière. La Terre s'est formée par adjonctions successives de matières amenées par des astéroïdes lors de collisions il y a plus de 4,5 milliards d'années. En géologie, l'accrétion évoque également le processus de fabrication des plaques lithosphériques le long des dorsales océaniques grâce à l'arrivée en surface de matières magmatiques.

**Altération chimique** Cette expression désigne la destruction et les modifications subies par les roches à la suite des attaques chimiques d'une eau acide. Chargée en dioxyde de carbone, cette eau est corrosive, dissout les roches, en sépare les minéraux et fragmente le tout en fines particules (de la taille des graviers, sables ou argiles).

**B Bassin versant** Aussi nommé bassin hydrographique, le bassin versant se réfère à un territoire géographique et hydrographique continental, délimité par une ligne de partage des eaux au sein de laquelle toutes les eaux tombantes ou ruisselantes se concentrent dans une rivière collective. Le bassin versant est drainé par des cours d'eau (torrents, rivières) qui se rassemblent et convergent vers un collecteur majeur, généralement un fleuve.

**C Champ magnétique** Il s'agit d'un champ de force résultant du déplacement de courants électriques. La Terre possède son propre champ magnétique qu'elle génère et entretient. Il nous protège des manifestations agressives du Soleil.

**Collision** Lorsque deux plaques lithosphériques continentales convergent, elles entrent en collision. Des plissements sont imprimés dans les deux plaques, aboutissant à la formation d'une chaîne de montagnes, rythmée par des séismes.

**D Dorsale** Les dorsales sont des déchirures de la croûte terrestre le long desquelles est fabriquée la croûte océanique. Le magma remonte, se transforme en coulées de lave qui s'accumulent et durcissent de part et d'autre de la dorsale. Cette ascension permanente de matière chaude et visqueuse le long des dorsales produit la divergence de deux plaques lithosphériques distinctes.

**G Géoïde** Le géoïde est la représentation précise de la surface terrestre, loin d'être la sphère parfaite imaginée. Le visage réel de la Terre est acquis en mesurant le champ de gravité terrestre. Grâce au géoïde, on voit que la surface des océans n'est pas plane, mais mollement déformée par des cuvettes et des reliefs, de la même façon que des collines et des bassins voûtent ou courbent la surface des continents.

**Gravimétrie** Discipline qui mesure le champ de gravité (ou pesanteur) à la surface du globe terrestre. À partir de cette mesure, les géophysiciens extrapolent la masse de la Terre, sa forme (le géoïde) et la répartition des masses rocheuses à l'intérieur du globe.

**I Isostasie** Théorie regroupant l'ensemble des hypothèses qui tentent d'interpréter la compensation en profondeur des reliefs terrestres. Ainsi, toute la péninsule scandinave, à l'instar de la baie d'Hudson (Canada), connaît une compensation profonde avec adjonction de matières sous la croûte terrestre. Ce retour de masses, expulsées lors de la dernière glaciation en raison du poids de la calotte glaciaire sur le continent, engendre une remontée de la Scandinavie d'environ 1 m par siècle selon les secteurs.

**L Lithosphère** Croûte terrestre (au maximum 100 km d'épaisseur) découpée en plaques lithosphériques de natures continentale et océanique.

**M** **Métamorphisme** Dans la croûte terrestre, les roches se transforment en fonction des conditions de températures et de pressions très importantes et selon la nature des fluides qui les traversent. Ainsi, les argiles enfouies dans la croûte terrestre peuvent se transformer en schistes.

**O** **Obduction** Ce mouvement tectonique fait référence à un morceau de croûte océanique (lourd et dense) qui chevauche une croûte continentale (dense et légère).

**Océanisation** Processus de fabrication de croûte océanique (de nature basaltique) le long des dorsales. Ce mécanisme entraîne la divergence de deux plaques lithosphériques.

**P** **Phréato-magmatisme** Se réfère à un type d'éruption volcanique provoquée lors de la traversée, par un magma ascendant, de terrains gorgés d'eau. Ces éruptions sont généralement explosives. Ainsi, le contact entre un magma en fusion et une eau froide stagnant dans une nappe phréatique vaporise brutalement cette dernière et induit de très fortes explosions.

**Plaque lithosphérique** Fragment mobile de la lithosphère délimité par des dorsales océaniques et des zones de subduction.

**Point chaud** Correspond en surface à des alignements de volcans (Hawaï) apparus successivement, grâce à la remontée continue et fixe de magma au sein du manteau terrestre qui finit par perforer à son aplomb la lithosphère, tel un chalumeau.

**R** **Riff** Désigne une grande vallée d'origine tectonique où, de part et d'autre, des plaques lithosphériques divergent et au fond de laquelle est fabriquée de la croûte océanique (processus d'océanisation).

**S** **Subduction** Désigne une fosse océanique où s'affrontent deux plaques lithosphériques convergentes dont l'une s'enfonce dans le manteau pour y être détruite en raison de sa densité plus importante.

**T** **Tectonique des plaques (dérive des continents)** Théorie qui explique le fonctionnement global de la Terre. Elle s'appuie sur un découpage de la croûte terrestre en plaques lithosphériques mobiles et entraînées par des grands courants convectifs dans le manteau terrestre, eux-mêmes générés par la chaleur rayonnante du noyau planétaire.

# Index général

Les nombres renvoient aux numéros des questions. En gras sont signalées les questions/réponses où le terme bénéficie spécifiquement d'une explication.

## A

Achondrites : 41  
Alfred Wegener : **78**, 80  
Atmosphère : 36

## B

Baril (cf. pétrole) : 231  
Big One : 131  
BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) : 7

## C

Carat : 220  
Carte géologique : 6, 7  
Cénozoïque : **10**, 11  
Charbon : 235  
Charriage : 182, 183,  
Chevauchement : 182  
Chondrites : 41  
Cirque glaciaire (cf. relief glaciaire) : 207  
Climat : 16, 118, 185, 187 à 189, 192, 193, 214  
Collision : 87, 167, 184  
Craton : 81, 228  
Cratère d'impact : 39, **44**, 45  
Cristal : **48**, 49, 50  
Croûte terrestre continentale : 17  
Croûte terrestre océanique : 17  
Crue : 243, 244  
Cycle de l'érosion : 190  
Cycle des roches : 62

## D

Dérive des continents : **77**, 80 à 83, **85**, 86  
Diamant : **225**, 226, 273  
Dorsale océanique : **85**, 101

## E

Eau : 197, **198**, 238 à 240, 270, 297  
Échelle de Richter : 148  
Écoulement pyroclastique : 103, 122  
Épicentre : 134  
Époques : **9**, 10, 11  
Ères : **9**, **10**, **11**, 12  
Érosion : **186**, 187 à 190  
Érosion éolienne : **204**, 205  
Éruption volcanique : **103**, 107, 125, 140  
Étages : **9**, 10, 11

## F

Fleuve : 201

## G

Gaz naturel : 234  
Géoïde : **26**, 27  
Géologie : 1  
Géologue : **2**, 4, 5  
Geyser : 114  
Glacier : **206**, 207 à 211  
Graine (cf. noyau interne) : **17**, 20, 22 à 25  
Grotte : **212**, 213 à 215

## H

Horn (cf. relief glaciaire) : 207  
Hutton, James : 2  
Hypocentre : 134

## I

Intensité : 147  
Isostasie : 175, 250

## J

James Hutton : 2

## K

Karst : 213, 215

## L

Lahars : 122  
Lune : **37**, 38

## M

Magma : **99**, 100 à 102  
Magnitude : **147**, 148  
Manteau inférieur : **17**, 20, 21, 23  
Manteau supérieur : **17**, 20, 21, 23  
Marbre : 261  
Mésozoïque : **10**, 11  
Métal : 218  
Métallogénie : 219  
Météores : 42  
Météorite : **40**, 41 à 43, 271  
Météorites ferreuses : 41  
Météorites mixtes : 41

Minerai : **216**, 217, 228  
Minéral : 47  
Montagne : **162**, 163, 166 à 171  
Moraine : 207

## N

Noyau externe : **17**, 20, 22 à 25  
Noyau interne (ou graine) : **17**, 20, 22 à 25  
Nuée ardente : 103

## O

Obduction : 87  
Or : 221, 224, 259

## P

Paléozoïque : **10**, 11  
Paysage : **191**, 192  
périodes : **9**, 10, 11  
Pétrole : **229**, 230 à 232  
Phréato-magmatisme : 103  
Plaque lithosphérique : **73**, 74 à 76, 82, 83, 85, 86, 92  
Plaque tectonique : **73**, 74 à 76, 82, 83, 85, 86, 92  
Point chaud : 108  
Précambrien : **10**, 11  
Primaire : 10

## Q

Quaternaire : **10**, 11

**R**

Relief glaciaire : 207  
 Richter (échelle de) : 148  
 Risque volcanique : 126  
 Risques naturels : 1, 3, 246,  
 Rivière : **199**, 200, 201, 203  
 Roche : **46**, 47, 51 à 54, 62 à 69  
 Roches magmatiques : 60  
 Roches métamorphiques : 61  
 Roches sédimentaires : **55**, 56, 59

**S**

Sable : 258, 268  
 Sciences de la Terre : 1  
 Secondaire : 10  
 Séisme : **128**, 129, 130, 133, 135 à  
 141, 143, 144, 149 à 157  
 Sismomètre : 146  
 Smith, William : 2  
 Stalactite : 213  
 Stalagmite : 213  
 Strate : **57**, 58  
 Stratification : 58  
 Strato-volcan : 103  
 Subduction : **86**, 101  
 Super-volcan (caldeira d'effon-  
 drement) : 124  
 systèmes : **9**, 10, 11

**T**

Tectonique des plaques : **72**, 77,  
 80, 81  
 Terre : **15**, 16, 17, 26, 28, 29, 32 à

35

Tertiaire : 10  
 Torrent : 201

**V**

Vallée : 202  
 Vent (cf. érosion éolienne) : **204**,  
 205  
 Volcan : **97**, 103, 105, 106, 109, 110  
 à 113, 117, 119, 122, 123, 248, 295  
 Volcan de boue : 116  
 Volcan-bouclier : 103  
 Volcanisme : **95**, 98, 118  
 Volcanologie : 96

**W**

Wegener, Alfred : **78**, 80  
 William Smith : 2

## Bibliographie et adresses utiles

Cette liste réduite d'ouvrages généralistes sur la géologie et la Terre permet au curieux d'approfondir ses connaissances sans peine. Pour aller plus loin, nous lui conseillons de consulter les bibliographies fournies de chacun de ces livres ou encore de consulter les dossiers Géomanips du CNRS ([www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)).

- › *Ce que disent les pierres*, M. Mattauer, Belin, 1998.
- › *Dictionnaire de géologie*, A. Foucault et J.-F. Raoult, Dunod, 2005.
- › *Les Fossiles, empreintes du vivant*, B. Riou, Delachaux et Niestlé, 1999.
- › *Guide de la géologie en France*, C. Sabouraud, Belin, 2004.
- › *Guide des volcans d'Europe et des Canaries*, M. Krafft et F.-D. de Larouzière, Delachaux et Niestlé, 1999.
- › *Invitation à la volcanologie*, P. De Wever, Vuibert, 2003.
- › *Les Métamorphoses de la Terre*, J.-C. Gall et M. Mattauer, Vuibert, 2002.
- › *Les Météorites de France : guide pratique*, P.-M. Pelé et A. Carion, Hermann, 2005.
- › *Montagnes*, P. Taponnier et K. Kling, Éditions de la Martinière, 2006.
- › *Planète Terre*, P. Douglas, R. Dinwiddie, D. Burnie et M. Walters, Gallimard, 2004.
- › *Roches et minéraux du monde*, R. L. Bonevitz, Delachaux et Niestlé, 2005.
- › *La Vie en catastrophes*, V. Courtillet, Fayard, 1995.
- › *Les Volcans*, J.-M. Bardintzeff, Liber-Minerva, 2004.

## Sites Internet cités

- › Paléographie de la Terre, Christopher Scotese :  
[www.scotese.com](http://www.scotese.com)
- › L'équipe d'Henri Broch démonte les mystifications sur  
[www.unice.fr/zetetique](http://www.unice.fr/zetetique)
- › Énergie et changement climatique, Jean-Marc Jancovici :  
[www.manicore.com](http://www.manicore.com)

## Sites à visiter en France

La France n'est pas démunie en sites et réserves géologiques à visiter. Impossible de les inscrire tous. Le mieux est de se référer au site [www.geopolis-fr.com](http://www.geopolis-fr.com) où est recensée la majorité des lieux d'intérêt pour chaque département.

**Terra Memoria (Aveyron)** Situé en bordure du canyon de Bozouls, ce centre d'interprétation entièrement dédié aux sciences de la Terre est tous publics et entraîne ses visiteurs dans un voyage temporel jusqu'à la formation de la planète. Chaque année au mois d'août y est organisé un festival des sciences de la Terre.  
[www.terramemoria.fr](http://www.terramemoria.fr)

**Aven Armand (Lozère)** Superbe aven où l'on prend conscience du travail érosif de l'eau dans les calcaires du causse Méjean.  
[www.aven-armand.com](http://www.aven-armand.com)

**Muséum national d'histoire naturelle (Paris)** Bien que dépassé et terné par sa scénographie délaissée, les collections restent magnifiques.  
[www.mnhn.fr](http://www.mnhn.fr)

**Vulcania (Puy-de-Dôme)** Centré sur le volcanisme, ce vaste centre d'interprétation ancré dans la chaîne des Puys est le meilleur outil pour appréhender les volcans, leur histoire et leur fonctionnement.  
[www.vulcania.fr](http://www.vulcania.fr)

**Espace Pierres Folles (Rhône)** Un musée, un sentier, un jardin botanique et une aire de jeu sont les atouts de ce petit centre d'interprétation planté dans le Beaujolais, pays des pierres dorées et de leur patrimoine géologique.  
[www.espace-pierres-folles.com](http://www.espace-pierres-folles.com)

## Associations

Se familiariser avec la géologie et mieux comprendre l'histoire de la Terre ou bien, plus humblement, celle de son territoire de vie : les associations offrent ce luxe à peu de frais et dans un cadre humain amical. Présentes dans toute la France, elles mélangent des amateurs et des professionnels pour atteindre des objectifs communs : diffuser les connaissances, vulgariser les sciences de la Terre et, pour une part de plus en plus importante, concentrer l'attention des participants sur les questions d'environnement en lien avec la géologie. À l'instar des sites muséaux culturels et scientifiques, il est conseillé de se rendre sur l'annuaire du site Géopolis pour connaître les associations proches de son domicile : [www.geopolis-fr.com/annu.html](http://www.geopolis-fr.com/annu.html)

Parmi les associations reconnues pour leur dynamisme, nous n'en citerons que quelques-unes, remarquables pour leurs activités, bien que cette liste ne se soit pas exhaustive. Impossible en effet de les inscrire toutes, tant elles sont diverses et incomparables par leurs nombres d'adhérents respectifs.

### Société géologique de France

77, rue Claude-Bernard – 75005 Paris

Téléphone : (33) (0) 1 43 31 77 35

Télécopie : (33) (0) 1 45 35 79 10

<http://sgfr.free.fr>

Fondée en 1830 et reconnue d'utilité publique par le Roi en 1832, la SGF reste une référence française dans le monde associatif des géosciences. Sa bibliothèque rassemble des milliers de références.

### Société amicale des géologues amateurs (SAGA)

61, rue Buffon – 75005 Paris

[www.saga-geol.asso.fr](http://www.saga-geol.asso.fr)

Créée en 1939, la SAGA est en relation avec le Muséum national d'histoire naturelle.

### Association des géologues du Sud-Ouest (AGSO)

24, avenue Léonard-de-Vinci,

Parc technologique Europarc – 33600 Pessac

<http://agso.brgm.fr>

Regroupe les professionnels et les praticiens des sciences de la Terre exerçant dans le Sud-Ouest ou y résidant, et établit entre eux des liens étroits, aussi bien scientifiques et techniques que culturels.

### Club dauphinois de minéralogie et paléontologie

2, rue François-Raoul – 38000 Grenoble

[www.chez.com/cdmp/](http://www.chez.com/cdmp/)

Nombreuses sorties proposées toute l'année. Grande diversité des thèmes envisagés.

### Société minéralogique et paléontologique de Dijon

Centre social des Gresilles, rue Jean-XXIII – 21000 Dijon

<http://smpd.fr/>

Propose des activités, mais joue aussi un rôle dans la conservation et la protection des sites minéralogiques et paléontologiques.

### Association des amis des sciences de la Terre

Centre Social – 12340 Bozouls

[www.geopole12.fr](http://www.geopole12.fr)

Jeune association, elle est maître d'ouvrage du Festival des sciences de la Terre, seule manifestation tous publics centrée sur les sciences de la Terre en France. A lieu chaque année en août à Bozouls en Aveyron (conférences, excursions et animations).

### Géolozère

Mirandol – 48250 Chasserades

[www.geolozere.com](http://www.geolozere.com)

A élaboré des circuits géologiques sur plusieurs jours et des circuits découverte à la journée dans son territoire d'action (Cévennes, Margeride, Grands Causses, vallée du Lot, Devès).

## Remerciements

L'écriture d'un livre surpasse la petite satisfaction éphémère d'un travail ordinaire, même bien mené. Cette chance m'a été donnée; je la dois à quelques personnes. Que celles que je ne peux citer m'absolvent. Je ne les oublie pas et aurai l'occasion de les remercier lorsque nous nous reverrons.

La première personne déterminante à laquelle je songe est Brigitte Lépine, directrice du Musée d'art et d'archéologie d'Aurillac, qui m'a mis le pied à l'étrier et m'a permis de faire connaissance avec le monde de l'édition. Mes pensées vont vers Brigitte à la fois pour ce livre mais aussi pour les moments professionnels et d'amitié partagés dans le Cantal. À la suite de la discussion avec Brigitte, Philippe J. Dubois, Charlotte Jacobsen et Audrey Bernard des Éditions Delachaux et Niestlé ont accepté de me faire confiance en me laissant toute liberté dans l'écriture de ce livre dont le thème me fut proposé. Enfin, Claire Dauvel a su déceler les défauts et perfectionner cet ouvrage qui, espérons-le, deviendra un objet dans lequel tout novice pourra piocher l'information qu'il convoite.

Surgit ensuite l'harmonie aveyronnaise, orchestre parfois cacophonique à l'accent occitan dans lequel je fus accueilli en novembre 2004. Spontanément, mes compagnons de travail, ceux du premier cercle, Virginie Granier, Céline Conquet (mon assistante...), Anne Cabrolier et Laurent Jacqueson, ont grandement facilité mon attachement à ce territoire et procuré un véritable cadre affectif humain et non exclusivement professionnel. Bien qu'ils puissent penser le contraire, tous ont aidé à la rédaction de ce livre. De la même façon, mes amis de l'Association des amis des sciences de la Terre tels Régine Simon-Coinçon, Richard Ciszak, Jean-Claude Azam, Annette Mignon, Daniel Bulois, Christian Martel, Michel et Scarlett Bonheure, et tous ceux qui font partie de ce groupe ont soutenu indirectement l'écriture de ce livre. En outre, Terra Memoria a été la plus belle aventure professionnelle de mon parcours. À ce titre, je

concède toute ma reconnaissance à ceux qui m'ont attribué leur foi sans jamais en douter (ou peu !) : Jean-Michel Lalle, Gérard Descrozaille, Pierre Gabriac, Henri Miramont et Jean Cabrolier.

Enfin, encore en Aveyron, toute mon amitié va à René Mignon, géologue et anarchiste («mais qui cependant traverse toujours dans les clous!», selon son dire). J'espère sincèrement continuer à crapahuter à ses côtés.

Si vous avez des questions, n'hésitez pas à contacter l'auteur : david\_huguet@hotmail.com

Parmi les milliards d'astres de l'univers, la Terre est le seul connu réunissant toutes les conditions nécessaires à la vie. De nombreuses autres particularités, moins évidentes, rendent la Terre singulière. Objet géologique et lieu de vie, notre planète est à la fois complexe et passionnante.

- **Comment a-t-on calculé l'âge de la Terre ?**
- **D'où viennent les météorites ?**
- **Les roches ont-elles un goût ?**
- **Les continents se rassembleront-ils à nouveau un jour ?**
- **Quand un volcan est-il considéré comme éteint ?**
- **L'homme peut-il provoquer un séisme ?**
- **À quelle vitesse se forme une montagne ?**
- **Qu'est-ce que le pétrole ?**
- **Le mont Blanc s'élève-t-il encore ?**
- **Depuis quand le Sahara est-il un désert ?**

Faire le tour de la Terre en 301 questions/réponses, tel est l'objectif de cet ouvrage illustré d'une centaine de dessins. Apprendre à connaître notre planète, c'est pouvoir mieux la protéger.

Docteur en géologie, **David Huguet** a été directeur du Muséum des volcans à Aurillac et de Terra Memoria, centre scientifique consacré à la géologie, situé en Aveyron. Auteur de nombreux articles de vulgarisation sur le thème des sciences de la Terre, il se consacre à la médiation scientifique et culturelle.

ISBN : 978-2-603-01580-3



9 782603 015803

22,00 € TTC (prix France)

[www.lamartinieregroupe.com](http://www.lamartinieregroupe.com)

Retrouvez toutes nos parutions sur le site internet  
[www.delachauxetniestle.com](http://www.delachauxetniestle.com)



delachaux  
et niestlé