

Exploration des Géosciences à Travers le Monde



Chris King

Approuvé par:

The International GeoScience Education Organisation

The International Union of Geological Science

The European Geosciences Union

Pour l'enseignement du programme international de Géosciences



International
GeoScience
Education
Organisation



Copyright : Chris King, de l'Organisation internationale d'éducation en géosciences.

•Les documents originaux publiés dans cette publication ne peuvent être reproduits qu'avec l'autorisation écrite préalable de l'auteur ou avec l'autorisation expresse d'un usage éducatif ou de recherche selon les termes convenus avec l'organisation de droits de reprographie appropriée.

•Si l'autorisation de reproduire le matériel original publié ici est accordée par l'auteur, une reconnaissance appropriée doit être donnée.

•Les droits d'auteur des documents reproduits ici avec l'autorisation d'autres publications appartiennent à l'éditeur original.

Première publication : 2019

ISBN : 978-1-9996264-0-2

Publié à : <http://www.igeoscienced.org/teaching-resources/geoscience-text-books/>

Copyright : Chris King au nom de l'Organisation internationale d'éducation en géosciences.



Ce document est une version traduite du document original en Anglais "Exploring Geosciences Accross the World" du Professeur Chris King.

Cette traduction est réalisée par:

Doh Koffi ADDOR

Géologue environnementaliste (medardkoffi48@gmail.com)

Avec la contribution des membres de:

l'ONG Science Géologique pour un Développement Durable-SG2D
(Togo, Afrique de l'Ouest)

Octobre 2022



Approuvé par: International Geoscience Education Organisation (IGEO) (Reste à confirmer)???

Table des matières

Objectif du livre	0
0 Pourquoi explorer les Géosciences ?.....	0
1 La Terre en tant que système en évolution.....	1
1.1 Les attributs.....	1
1.2 Les interactions.....	2
1.3 La retroaction.....	3
1.4 Les procédés et produits.....	5
1.4.1 Les cycles.....	5
1.4.2 Le cycle de l'eau.....	5
1.4.3 Flux, stockages et temps de séjour.....	7
1.4.4 Cycle de la roche.....	7
1.4.5 Cycle du carbon.....	8
1.5 Les sources d'énergie.....	10
2 La Terre est un système, au sein du système solaire, au sein de l'Univers.....	12
2.1 Les origines.....	12
2.2 Le soleil.....	17
2.3 Le soleil, la Terre et la Lune.....	17
2.3.1 Le jour et la nuit.....	17
2.3.2 Les saisons.....	19
2.3.3 Les phases de la Lune.....	19
2.3.4 Les éclipses.....	20
3 La Terre est un système qui a évolué au fil du temps.....	21
3.1 Période géologique.....	21
3.2 La datation relative.....	21
3.3 La datation absolue.....	28
3.4 Vitesse des processus.....	30
4 Le système terrestre est constitué de sphères en interation.....	33
4.1 La géosphère.....	33
4.1.1 Matériaux et propriétés de la Terre.....	33
4.1.1.1 Minéraux.....	33
4.1.1.2 Roches.....	35
4.1.1.3 Fossiles.....	37
4.1.1.4 Roches sédimentaires.....	40
4.1.1.5 Roches ignées.....	43
4.1.1.6 Roches métamorphiques.....	46
4.1.1.7 Sol.....	47
4.1.2 Processus de la Terre et les caractéristiques observées.....	48
4.1.2.1 Processus de surface.....	49
4.1.2.2 Processus sédimentaire.....	54
4.1.2.3 Processus ignées (Magmatique).....	56
4.1.2.4 Processus métamorphique.....	60
4.1.2.5 Processus de déformation.....	62
4.1.3 Structure de la Terre et preuves.....	65
4.1.3.1 Preuves.....	65

4.1.3.2	La croûte.....	66
4.1.3.3	Le manteau.....	68
4.1.3.4	Le noyau.....	69
4.1.3.5	La lithosphère.....	70
4.1.4	Tectonique des plaques et preuves.....	70
4.1.4.1	Théorie unificatrice.....	70
4.1.4.2	Construction de plaques et subduction.....	74
4.1.4.3	Caractéristiques des marges de plaque.....	74
4.1.4.4	Mécanisme et vitesse de déplacement.....	83
4.1.4.5	Preuves.....	84
4.2	Hydrosphère.....	89
4.2.1	L'eau continentale.....	89
4.2.1.1	Sources d'eau continentale.....	89
4.2.1.2	Approvisionnement d'eau.....	92
4.2.1.3	Contamination d'eau.....	94
4.2.2	L'eau océanique.....	94
4.2.2.1	Compositin de l'eau.....	95
4.2.2.2	Les marées.....	95
4.2.2.3	Les vagues.....	96
4.2.2.4	Circulation à grande échelle des fluides sur la Terre.....	98
4.3	Atmosphère.....	102
4.3.1	Composition atmosphérique.....	103
4.3.2	Flux atmosphérique.....	103
4.3.3	Changement atmosphérique.....	105
4.4	Biosphère.....	111
4.4.1	Evolution.....	111
4.4.2	Impact sur d'autres systèmes.....	116
5	Le système terrestre produit des ressources.....	119
5.1	Matières premières et combustibles fossiles.....	120
5.1.1	Matières premières en vrac pour la construction.....	120
5.1.2	Matières premières en vrac pour l'industrie.....	121
5.1.3	Minerais métalliques.....	123
5.1.4	Minéraux industriels.....	125
5.1.5	Combustibles fossiles.....	125
5.1.5.1	Tourbe et charbon.....	125
5.1.5.2	Pétrole et gaz naturel.....	126
5.1.6	Le prospection.....	130
5.1.7	Protection et assainissement de l'environnement.....	132
5.2	Alimentation en énergie.....	136
5.2.1	Energie provenant des combustibles fossiles.....	137
5.2.2	Les énergies renouvelables.....	137
6	Interation entre l'Homme et le système terrestre.....	141
6.1	Les risques naturels.....	141
6.1.1	Eruption.....	141
6.1.2	Tremblement de Terre.....	150

6.1.3	Tsunami.....	159
6.1.4	Glissement de terrain.....	165
6.2	Questions environnementales.....	171
6.2.1	Erosion.....	171
6.2.2	Modification du drainage.....	173
6.2.3	L'élimination des déchets.....	174
6.2.4	Pollution.....	177
6.2.5	Mines carrières.....	178
6.2.6	Combustion des combustibles fossiles et l'effet de serre.....	179
6.3	Impact sur l'histoire de l'humanité.....	180
6.3.1	Guerre pour les ressources.....	181
6.3.2	Migration due au changement climatique.....	182
7	Le système terrestre est exploré par le travail sur le terrain et les travaux pratiques.....	184
7.1	Observation, mesure et enregistrement.....	189
7.2	Synthèse des observations.....	193
7.3	Investigation et vérification des hypothèses.....	194
	Glossaire.....	197
	Annexe - Programme international des Géosciences.....	199
	Images et crédits d'images.....	205
	Figures.....	205
	Encadré.....	211
	Tableau.....	217

À la mémoire du professeur Chris King, 1949- 2022



Photo: Giuseppe Di Capua

"L'Exploration des géosciences à travers le monde".

Ce livre a été conçu et rédigé par le professeur Chris King et publié en ligne en 2019. Il est suivi d'un certain nombre de traductions et de versions "personnalisées". La dernière en date est "Exploring Geoscience across the Globe - England". Celle-ci a finalement été éditée et publiée quinze jours avant le triste décès de Chris, le 17 février 2022, et il était ravi de savoir que cela avait été réalisé.

L'IGEO, l'UISG et l'EGU, qui ont commandé les livres, souhaitent rendre hommage à l'incroyable travail de Chris et à son dévouement pour le mener à bien.

Ces livres doivent certainement être considérés comme le point culminant de la volumineuse production de publications de Chris, toutes destinées à améliorer la compréhension et l'appréciation par les jeunes de notre merveilleuse Terre et de son fonctionnement. Il n'y a pas de meilleur souvenir pour Chris que celui de voir ces livres bénéficier de la plus grande publicité possible et être mis entre les mains du plus grand nombre possible de jeunes et de leurs enseignants à travers le monde - et tout cela gratuitement !



Photos fournies par : R. Shankar et Peter Kennet

Avant-propos de Iain Stewart

Professeur de communication géoscientifique et directeur de l'Institut Terre Citoyenne, École de géographie, des sciences de la terre et de l'environnement de l'Université de Plymouth, Angleterre.



Les enquêtes internationales montrent que l'enseignement des géosciences dans les écoles du monde entier est très variable, que le soutien offert aux enseignants de géosciences est généralement faible et que les manuels disponibles dans de nombreux pays sont souvent déficients, voire inexistant dans certaines régions.

Ainsi, dans ce contexte plutôt gris, il est merveilleux de pouvoir accueillir la couleur et la vivacité du manuel "Exploration des géosciences". Il est issu d'une initiative développée pour étayer le programme international de géosciences et est soutenu par des organisations internationales, notamment l'Organisation internationale pour l'enseignement des géosciences, l'Union internationale des sciences géologiques et l'Union européenne des géosciences.

Cette "version internationale" du manuel est une source ouverte, une ressource à télécharger gratuitement, utilisable partout dans le monde par les enseignants, les étudiants et les rédacteurs de manuels. Elle a été rédigée de manière à être aussi accessible et attrayante que possible et à pouvoir être facilement traduite dans d'autres langues. Une fois que la "version internationale" aura été régionalisée pour d'autres parties du monde et traduite, si nécessaire, une nouvelle ressource, vérifiée par des experts, sera disponible pour soutenir l'enseignement et l'apprentissage des géosciences.

C'est un plaisir de pouvoir soutenir cette initiative bienvenue et opportune et d'encourager ceux qui s'intéressent à l'enseignement des géosciences à travers le monde à entreprendre la tâche de "régionaliser" et de traduire le manuel pour l'utiliser dans leurs propres régions, diffusant ainsi son contenu passionnant et son message important aussi largement que possible.

Iain Stewart.

Objectif du livre

Ce livre a été produit pour aider les enseignants du monde entier à enseigner le programme international de géosciences (reproduit en annexe). Ce programme couvre les géosciences que tous les élèves de 16 ans devraient connaître et comprendre, conformément aux recommandations de la communauté internationale de l'enseignement des géosciences.

La structure des titres de chapitre dans le livre reflète directement le syllabus. Le texte a été rédigé dans un langage aussi simple et sans jargon que possible, afin de le rendre largement accessible aux enseignants qui souhaitent l'utiliser dans leur enseignement. La plupart des exemples sont présentés sous forme de tableaux et illustrés par des photographies, afin que les exemples n'empiètent pas trop sur les blocs de texte.

Le matériel supplémentaire au programme est présenté dans des "boîtes d'intérêt", pour donner des dimensions supplémentaires d'intérêt et d'impact et pour fournir de courtes études de cas, mais il n'est pas prévu que les étudiants soient initiés à tout ce matériel supplémentaire.

Le texte original est rédigé sous la forme d'une "version internationale" intitulée "Exploration des géosciences - à travers le monde" et est illustré par des photographies sélectionnées dans le monde entier et des "encadrés" d'intérêt mondial. Il est publié sur le site Web de l'International Geoscience Education Organisation à l'adresse suivante : <http://www.igeosced.org/teachingresources/geoscience-text-books/>. Les éducateurs en géosciences du monde entier ont été invités à reprendre ce texte de base et à y ajouter des photographies et des "cases d'intérêt" pour leurs propres régions ; ils ont également été invités à traduire le texte, le cas échéant, afin de produire un manuel "Exploration des géosciences" pour leurs propres régions.

Le manuel est relié à un "supplément d'activité" publié séparément, qui fournit des détails sur un large éventail d'activités pédagogiques liées à chaque section et propose des questions pour tester les connaissances et la compréhension des élèves.

Le Syllabus international de géosciences est publié à l'adresse suivante : http://www.igeosced.org/?page_id=269.

Contributeurs et remerciements

Nous sommes reconnaissants à Gillian Drennen (gillian.drennen@wits.ac.za) d'avoir été la première à suggérer la rédaction d'un manuel pour aborder le syllabus international, et d'avoir proposé un atelier au Congrès géologique international, au Cap Town, en 2016, pour développer cette idée. Nous sommes reconnaissants à tous les contributeurs à cet atelier pour la manière dont ils ont orienté les premières idées sur le manuel.

Le texte original et de nombreux diagrammes ont été réalisés par Chris King (chris@earthlearningidea.com) ; certains diagrammes ont été redessinés à partir d'autres sources. D'autres diagrammes et photographies proviennent directement de zones de l'Internet dont le droit d'auteur a été suspendu. La plupart des diagrammes ont été redessinés par Tanja Reinhardt (reinhardt2@ukzn.ac.za) de l'Université de KwaZulu, Natal, Afrique du Sud, qui a aimablement conçu le livre et ses couvertures.

Nous sommes très reconnaissants à Wikimedia Commons (https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page), qui a fourni de nombreuses photographies et certains diagrammes dans des conditions de renonciation au droit d'auteur. Ils ont grandement contribué à l'illustration du livre. Nous sommes également reconnaissants à la Earth Science Education Unit (ESEU : <http://www.earthscienceeducation.com/index.html>) de nous avoir fourni des images.

Nous sommes très reconnaissants à Peter Craig, Elizabeth et Martin Devon, Sid Howells, Peter Kennett, Pete Loader, Giulia Realdon, Tanja Reinhardt (chapitre 1), Ashvin Wickramasooriya et Sebastian Wolf (chapitres 1 et 2) pour tout le travail qu'ils ont accompli en vérifiant l'exactitude du texte, en aidant à le rendre plus accessible et en le corrigeant. Nous sommes également très reconnaissants à Anthony Tibbs pour ses efforts de relecture formelle. Toutes les erreurs restantes sont de mon fait et du mien uniquement.

Le manuel a été approuvé par l'Organisation internationale pour l'enseignement des géosciences, l'Union internationale des sciences géologiques par le biais de sa Commission pour l'enseignement des géosciences et le transfert de technologie, et l'Union européenne des géosciences, pour l'enseignement du programme international de géosciences, et nous leur sommes très reconnaissants de leur soutien et de leurs encouragements.

Chris King.

Les géosciences sont l'étude scientifique de l'ensemble de notre planète. Aujourd'hui, c'est même plus que cela, car elles incluent également la géologie planétaire. Elles impliquent les nombreux éléments de la géologie, tels que la géochimie, la géophysique, la paléontologie, l'hydrogéologie et la géologie de l'ingénieur, mais sont plus vastes, car elles comprennent également la météorologie, l'océanographie, les sciences de l'environnement, les sciences du sol et l'étude du système solaire. Les géosciences utilisent des preuves du passé et du présent de la planète pour prédire l'avenir, mais aussi des preuves du présent pour "prédire" ce qui s'est passé dans le passé. Elles concentrent des éléments de biologie, de chimie, de physique, de mathématiques, de géographie et d'ingénierie dans une étude de la Terre et des planètes.

L'une des joies de l'étude des géosciences est que tout le monde peut y participer. Lorsque les enfants ramassent des cailloux intéressants sur une plage et commencent à se demander pourquoi ils sont intéressants, ils commencent à poser les questions que les géoscientifiques posent. Lorsqu'ils ramassent plusieurs cailloux intéressants, ou différentes couleurs de sable, ou différents fossiles, ils commencent à trier les choses, ou à classer les matériaux terrestres, comme le font les géoscientifiques.

Lorsqu'ils demandent pourquoi le sable forme des formes intéressantes, ils commencent à étudier les processus terrestres, tout comme les géoscientifiques.

Figure 0.1 : Formes intéressantes de cailloux et de sable



Si vous souhaitez approfondir les géosciences, vous pouvez le faire à l'école ou à l'université ou en passant un diplôme universitaire. De nombreuses personnes étudient la géologie simplement parce qu'elles aiment poser des questions sur le fonctionnement de la Terre et y répondre, ou parce qu'elles aiment collectionner des objets intéressants. Mais d'autres deviennent des géologues professionnels et passent toute leur vie à poser des questions sur les géosciences et à y répondre. Ils étudient la Terre, des tropiques aux pôles, des plus hautes montagnes aux mers les plus profondes, ou en recherchant de nouvelles ressources terrestres, de meilleures façons d'éliminer les déchets ou les meilleurs endroits pour construire de nouveaux bâtiments et vivre en sécurité.

Tel est l'objet de ce livre. Il commence par examiner l'ensemble du système terrestre, la Terre au sein du système solaire et la façon dont tout cela a évolué au fil du temps. Il rassemble des études sur la géosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère de la Terre et examine où se trouvent les ressources et les sources d'énergie dont nous avons besoin. Elle se concentre sur les dangers de la Terre et les problèmes environnementaux, ainsi que sur la façon dont ils modifient l'histoire de l'humanité.

Si tout cela vous intéresse, poursuivez votre lecture - vous commencerez déjà à penser comme un géoscientifique.

Un système est constitué d'une série de pièces différentes, reliées entre elles par un réseau qui assure le fonctionnement de l'ensemble du système. Les systèmes peuvent être simple, comme un lavabo ; l'eau entre dans le lavabo (entrée) par les robinets et en sort (sortie) par le drain. L'eau peut être chaude ou froide, l'énergie thermique de l'eau (sa température) est donc également l'une des entrées. La chaleur de l'eau chaude peut être perdue lorsque l'eau s'écoule dans l'égout, mais elle peut également être restituée lorsque l'eau du lavabo refroidit. Le système de lavabo a une limite qui est constituée par les côtés et la base du lavabo. Les entrées proviennent de l'environnement extérieur et les sorties de l'environnement environnant, au-delà de la limite.

Le lavabo est un exemple de **système ouvert**, avec des interactions avec l'environnement extérieur au niveau de la limite. Dans l'exemple du lavabo, l'eau et la chaleur sont des entrées et des sorties dans l'environnement. Un exemple de **système fermé** est une fiole à vide ; lorsque le couvercle de la fiole est en place, le liquide ne peut ni entrer ni sortir de la fiole et la chaleur ne peut pas non plus entrer ni sortir de la fiole. Aucun système ne peut être complètement fermé, de sorte que même la meilleure fiole à vide perdra au fil du temps la chaleur du liquide chaud qu'elle contient.

Figure 1.1. Un lavabo et une fiole à vide, exemples de systèmes ouverts et (presque) fermés.



Le système terrestre est non seulement extrêmement complexe, bien plus complexe que ces simples exemples, mais il comporte de nombreux sous-systèmes et a changé et continue de changer au fil du temps

1.1 Les attributs

La Terre est un système ouvert à l'énergie. La plupart de l'énergie qui alimente les sous-systèmes de la Terre est reçue sous forme de rayonnement du Soleil. Cette énergie est un apport pour la Terre pendant la journée, mais une partie est renvoyée dans l'espace sous forme de rayonnement pendant la journée et la nuit. Comme l'entrée et la sortie du rayonnement sont généralement en équilibre, la température globale de la Terre reste stable, du moins à court terme.

Cependant, la Terre est aujourd'hui un système presque fermé à la matière.

Il n'en a pas toujours été ainsi, puisque la Terre primitive était bombardée par des astéroïdes. Aujourd'hui, ce qui se trouve sur la Terre reste sur la Terre ; peu de matière, par rapport à la taille de la Terre, est ajoutée par les météorites et la poussière cosmique, et la seule matière dense perdue dans l'espace l'est par les sondes spatiales.

Le système terrestre a changé au fil du temps, non

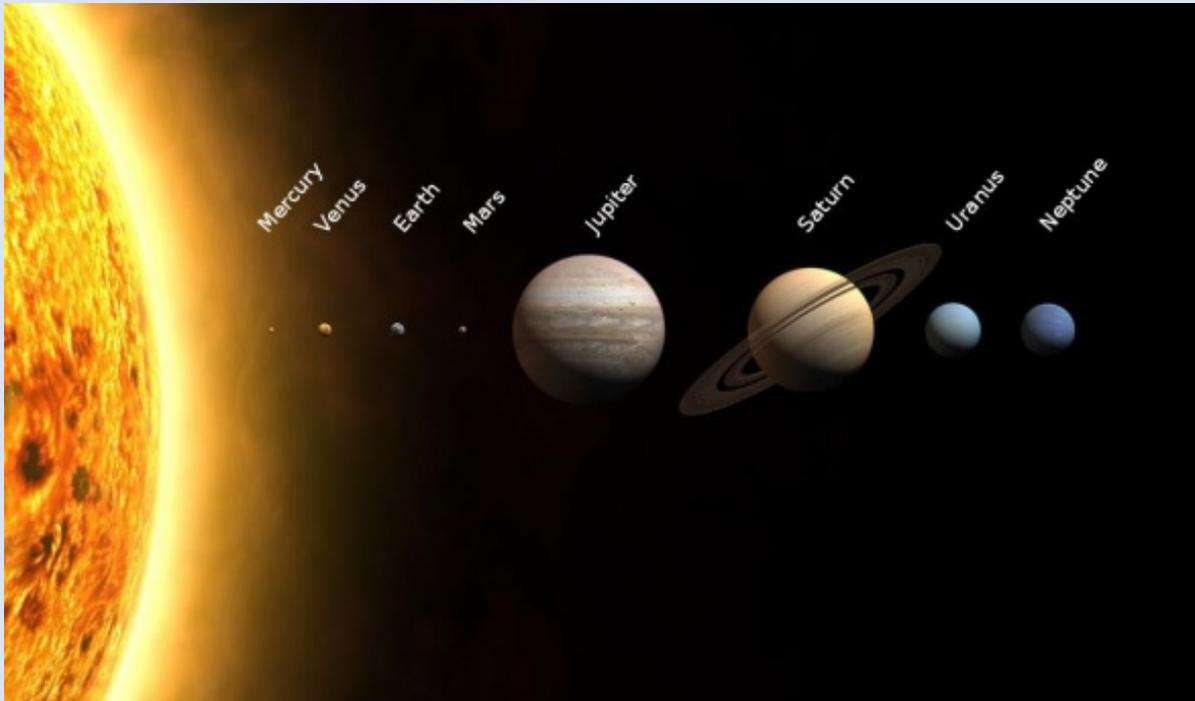
Figure 1.2. La Terre - un système très complexe



seulement parce que la quantité de bombardements a diminué, mais aussi en raison d'une série d'autres changements, tels que le refroidissement de la Terre, la formation des océans, l'évolution de l'atmosphère et de la vie, et les effets de la tectonique des plaques.

Le système terrestre fait partie du système solaire. Il s'agit également d'un système presque fermé, tant au niveau de l'énergie que de la matière, puisque très peu d'énergie est reçue de la lumière des étoiles et que très peu de matière est reçue également.

Encadré 1.1. La matière du système solaire, représentée à une échelle approximative de taille (mais pas de distance)



Ce "portrait" du système solaire montre le Soleil et les planètes. Les tailles sont représentées dans les bonnes proportions, mais pas les distances entre elles. Ce diagramme montre la plupart de la matière du système solaire. Ne sont pas inclus (parce qu'ils sont trop petits) les lunes, les planètes naines, les astéroïdes, les comètes et la poussière

Le système terrestre peut être divisé en quatre sous-systèmes principaux : la Terre solide (**la géosphère**), l'air autour de la Terre (**l'atmosphère**), l'eau sur la planète (**l'hydrosphère**) et la vie sur Terre (**la biosphère**).

La lithosphère, qui forme les plaques tectoniques de la Terre, est la partie extérieure de la géosphère.

1.2 Les interactions

La géosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère sont des systèmes très ouverts car ils interagissent tous, échangeant à la fois de l'énergie et de la matière. Les interactions entre ces quatre sous-systèmes se produisent partout, tout le temps, et sur des périodes de temps très courtes à extrêmement longues. Ce sont ces interactions qui rendent notre planète si dynamique. Où que vous alliez, quoi que vous fassiez, ces systèmes interagissent tout autour de vous à des vitesses différentes, de très rapide à extrêmement lente.

Les berges des rivières sont de bons endroits pour observer les interactions des systèmes terrestres. Le débit des rivières fait partie de l'hydrosphère, érodant les berges et transportant les sédiments de la géosphère. Les animaux et les plantes de la biosphère vivent sur les berges, réalisant la photosynthèse et respirant les gaz atmosphériques. L'eau monte dans l'atmosphère par l'évaporation de l'eau des rivières, la transpiration des plantes et la respiration des animaux. Cette vapeur d'eau peut retomber plus tard sous forme de pluie, redonnant ainsi de l'eau atmosphérique à la géosphère.

Encadré 1.2. Le cycle local de l'eau, un exemple d'interactions entre la géosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère

Les gouttes de pluie, lorsqu'elles se forment, ne contiennent ni acide ni alcali et sont donc neutres. Cependant, en tombant dans l'atmosphère, elles dissolvent du dioxyde de carbone et deviennent donc légèrement acides. Lorsque l'eau de pluie atterrit sur le sol, elle s'y enfonce. De nombreux animaux vivent dans le sol et respirent, absorbant de l'oxygène et rejetant du dioxyde de carbone. Ce dioxyde de carbone supplémentaire se dissout dans l'eau du sol, ce qui la rend encore plus acide. La matière végétale en décomposition ajoute également de l'acide humique à l'eau. L'eau acide réagit avec les fragments de roche dans le sol, dissolvant les particules de calcaire et décomposant les particules d'autres roches.

Grâce à ces réactions, l'eau redevient neutre, de sorte que, lorsque l'eau sort du sol dans les sources, elle est généralement neutre.



Pluie



Humidité du sol



Source d'eau souterraine

Cet exemple montre comment les différents systèmes terrestres interagissent. Les gouttes de pluie de l'hydrosphère dissolvent le dioxyde de carbone de l'atmosphère. Elles s'enfoncent dans le sol de la géosphère où elles dissolvent encore plus de dioxyde de carbone produit par les animaux de la biosphère. L'eau acide du sol réagit avec les fragments de roche de la géosphère, devenant neutre et s'écoulant des sources, où elle est à nouveau visible dans l'hydrosphère.

Dans cet exemple, la matière est échangée (y compris l'eau, le dioxyde de carbone atmosphérique, les entrées et sorties de la respiration et la réaction avec les fragments de roche), de même que l'énergie (y compris la pluie qui tombe, l'énergie de la respiration et l'énergie chimique impliquée dans les réactions eau/roche).

1.3 La rétroaction

La **rétroaction** est un élément essentiel des systèmes. Un exemple simple de rétroaction est une chaudière à eau avec un thermostat (un thermomètre avec un interrupteur). Lorsque l'eau devient froide, le thermomètre renvoie cette information à l'interrupteur et la chaudière se met en marche. Lorsque l'eau devient chaude, le thermomètre renvoie cette information à l'interrupteur et la chaudière s'éteint à nouveau. Notre corps possède des mécanismes de rétroaction similaires : lorsque nous avons trop chaud, nous transpirons pour nous rafraîchir, mais lorsque nous avons trop froid, nous frissonnons pour nous réchauffer.

Les systèmes de rétroaction peuvent être **positifs** ou **négatifs**, mais ces termes peuvent prêter à confusion. La rétroaction négative maintient les systèmes dans un état stable et est donc une bonne chose, tandis que la rétroaction positive peut rendre un système instable, avec des résultats dévastateurs.

Par exemple, la quantité de sel dans les océans est affectée par un système de rétroaction négative. Les rivières du monde entier dissolvent le sel (chlorure de sodium, NaCl, le minéral halite) des roches environnantes et le transportent jusqu'à la mer, mais la salinité des océans reste la même (environ 3,4 % de sel) alors que nous nous attendrions à ce qu'elle devienne de plus en plus salée au fil du temps. Le système de rétroaction négative qui élimine le sel se produit lorsque des zones d'eau de mer sont piégées dans les bassins côtiers. Lorsque l'eau de mer s'évapore, le sel se dépose et peut être enfoui sous forme de roche sédimentaire, ce qui le fait disparaître des océans.

Figure 1.3. Extraction du sel d'une lagune salée côtière en Tunisie

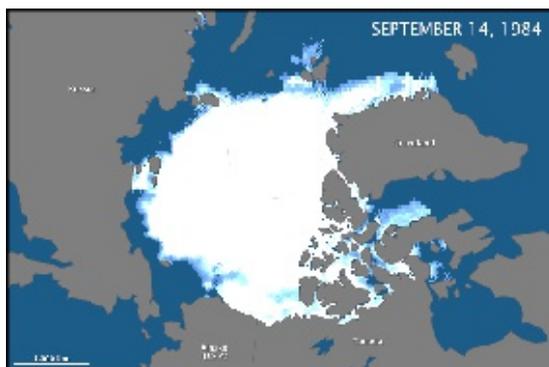


Les systèmes de rétroaction négative dans notre propre corps maintiennent tout en état de stabilité. Ces processus fonctionnant ensemble dans les êtres vivants sont appelés homéostasie

Lorsqu'il y a une rétroaction positive, le système peut devenir instable. Lorsque la lumière du soleil frappe les calottes glaciaires, elle est en grande partie réfléchi et l'effet de réchauffement de la Terre est donc minime. La réflexion de la lumière solaire par des surfaces de couleur pâle comme la glace est appelée **albédo**. Cette réflexion de la lumière solaire est l'un des facteurs qui maintiennent la température de la Terre stable. Cependant, la rétroaction positive peut avoir un effet dans deux directions différentes. Si la Terre se refroidit, les calottes glaciaires s'étendent, ce qui augmente l'effet albédo et rend la Terre encore plus froide, ce qui pourrait déclencher une ère glaciaire. Mais si la Terre se réchauffe, les calottes glaciaires fondront, ce qui réduira l'effet albédo et entraînera un réchauffement supplémentaire de la Terre. Finalement, la glace pourrait fondre complètement, faisant passer la Terre à un état beaucoup plus chaud.

Figure 1.4. La glace arctique en 1984 et 2012.

Dans le passé, la grande surface de glace flottante avait un effet albédo important. Au fur et à mesure que la Terre se réchauffe, la surface de glace se réduit, ce qui réduit l'albédo et contribue au réchauffement de la Terre, par le biais d'une rétroaction positive.



Lorsqu'il existe une rétroaction positive dans un système, ce phénomène peut se poursuivre jusqu'à ce qu'un **"point de basculement"** soit atteint et que le système bascule dans un nouvel état d'équilibre. Dans le passé, la Terre a connu un état d'équilibre froid, lorsque certaines parties de la Terre étaient recouvertes de glace (**"conditions de glacière"**) et un état d'équilibre chaud lorsqu'il n'y avait pas de couche de glace (**"conditions de serre"**).

1.4 Procédés et produits

1.4.1 Les cycles

Remplissez une tasse d'eau bouillante et laissez-la se réchauffer pendant une minute environ. Videz ensuite l'eau et ajoutez environ 1 cm d'eau bouillante dans la tasse, puis renversez un gobelet en verre sur le dessus (comme illustré à la figure 1.5) et observez ce qui se passe.

Vous verrez le gobelet en verre se troubler lorsque l'eau se condense sur la surface intérieure, puis des gouttes d'eau couler dans la tasse.

L'eau s'évapore de la surface de l'eau chaude pour se transformer en vapeur d'eau invisible dans l'air à l'intérieur du gobelet. Ensuite, la vapeur d'eau se condense sous forme de gouttelettes à l'intérieur du gobelet plus froid, ce qui le rend trouble, jusqu'à ce que les gouttes deviennent suffisamment grosses pour couler dans la tasse.

Ce que vous voyez est une combinaison de processus et de produits. Le processus d'évaporation produit de la vapeur d'eau gazeuse. Le processus de condensation produit de petites gouttelettes d'eau liquide à l'intérieur du gobelet. Le processus d'écoulement ramène ensuite l'eau dans le gobelet - ce nouveau produit s'ajoute alors à l'eau liquide dans le gobelet.

Les **processus** provoquent des événements, les **produits** en sont les résultats.

Il s'agit d'une version simple d'un cycle. Dans ce cas, l'eau commence dans le gobelet sous forme d'eau liquide, s'évapore en vapeur d'eau, puis se condense en gouttelettes d'eau qui s'unissent pour s'écouler à nouveau vers le gobelet. Il s'agit également d'un système simple, fermé pour l'eau (l'eau ne quitte ni ne rejoint le système).

Tous les matériaux de la Terre sont recyclés d'une manière ou d'une autre. Les cycles de l'eau, du carbone et des roches en sont des exemples importants.

1.4.2 Le cycle de l'eau

Le **cycle naturel de l'eau** est plus complexe que la démonstration de la tasse et du gobelet de la figure 1.5, et les processus et produits du cycle de l'eau nous entourent en permanence.

Lorsqu'il pleut, l'eau forme des flaques sur le sol. Ces flaques s'évaporent ensuite en vapeur d'eau invisible dans l'air. Lorsque l'air se refroidit, la vapeur d'eau se condense en gouttelettes d'eau sous forme de nuages. Lorsque les nuages continuent à se refroidir, les gouttelettes d'eau s'assemblent pour former des gouttes de pluie qui, lorsqu'elles sont suffisamment grosses, tombent sous forme de pluie. Même ce système extérieur simple est compliqué par de nombreux autres facteurs. La condensation de la vapeur d'eau produit non seulement des nuages, mais aussi de la brume et du brouillard. L'eau tombe des nuages sous forme de pluie, mais aussi de neige et de grêle. L'eau qui atteint le sol ne se contente pas de former des flaques d'eau, mais s'écoule souvent dans les gouttières, les ruisseaux, les rivières et finalement les lacs et la mer. L'eau s'évapore en permanence de tous ces produits du cycle de l'eau, tandis que les plantes **transpirent**, libérant l'eau absorbée par leurs racines dans l'air, sous forme de vapeur d'eau à travers leurs feuilles. La vapeur d'eau issue de l'évaporation et de la transpiration est transportée vers différentes zones par les courants d'air.

Figure 1.5. Une démonstration simple du cycle de l'eau

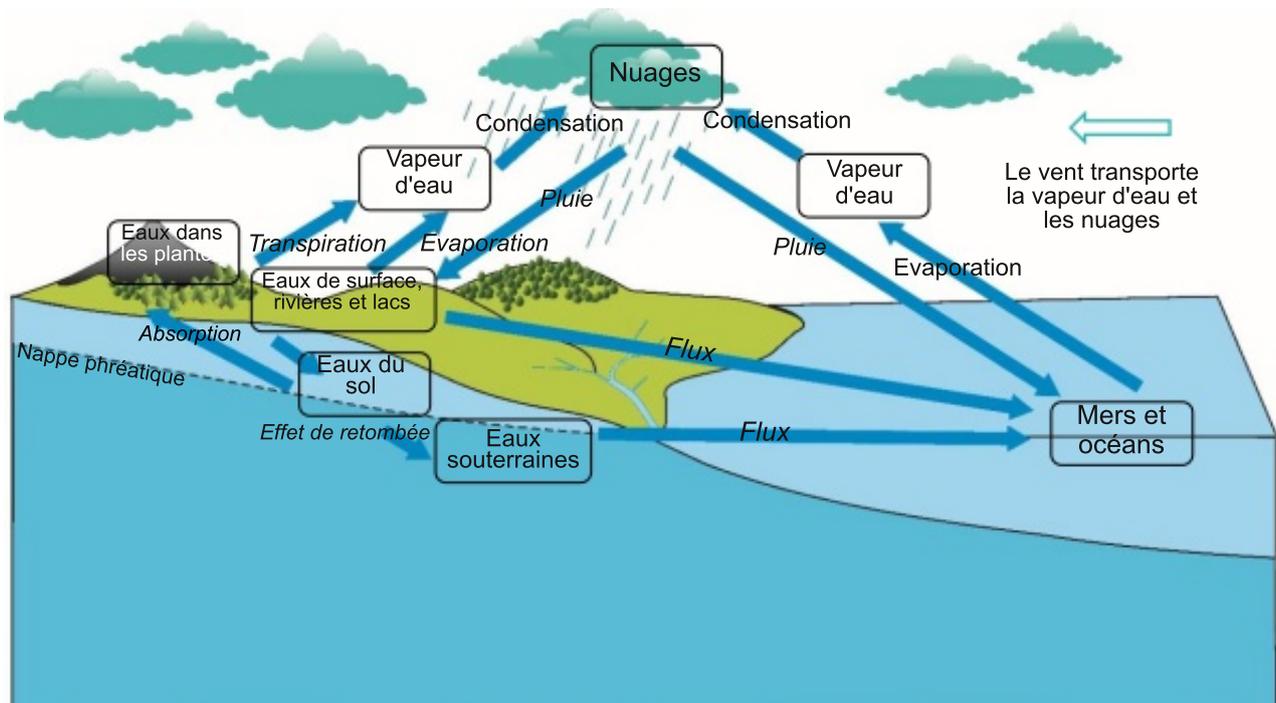


Une partie de l'eau de pluie et de l'eau des rivières s'infiltré dans le sol et les roches sous-jacentes et devient une partie des eaux souterraines dans les espaces interstitiels des roches poreuses. Cette eau s'écoule vers le bas à travers les roches perméables du sous-sol et finit par jaillir dans les sources.

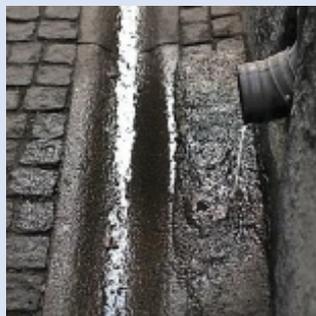
Dans les régions froides, l'eau tombant sous forme de neige peut s'accumuler dans la glace des glaciers et des calottes glaciaires, tandis que les eaux souterraines peuvent être gelées dans le **pergélisol** (sol gelé en permanence). La glace peut également s'écouler, ou fondre pour redevenir de l'eau liquide.

Les principaux processus du cycle de l'eau sont l'évaporation, la condensation, le mouvement latéral de l'air (vent), la chute (de la pluie, etc.) et l'écoulement sur ou sous le sol. Dans les régions froides, la congélation, la fonte et l'écoulement de la glace sont également importants. La figure 1.6 illustre un grand nombre de ces processus et produits.

Figure 1.6. Produits (en encadré) et processus (en italique) du cycle de l'eau.



Encadré 1.3 : Une partie du cycle de l'eau dans votre jardin



Vous pouvez voir une partie du cycle de l'eau en action dans votre propre jardin. Les gouttes de pluie des nuages tombent dans des flaques d'eau, l'eau s'écoule dans les gouttières et finit par atteindre les lacs. L'évaporation des lacs et autres plans d'eau produit de la vapeur d'eau invisible dans l'air. Lorsque celle-ci se refroidit, elle se condense pour former les nuages qui produisent la pluie.

1.4.3 Flux, réserves et temps de séjour

Les processus et les produits des cycles sont également appelés flux et stocks. **Les flux** sont les écoulements de matières à travers les processus, mesurés en tant que taux d'écoulement. Les flux du cycle de l'eau vont du très rapide (comme l'écoulement de l'eau dans les rivières en crue) au très lent (l'écoulement des couches de glace) et du très grand (taux d'évaporation global) au très petit (chute de neige sur les couches de glace). **Les stocks** sont les produits ; les produits du cycle de l'eau vont également du très grand (les océans) au plus petit (l'eau stockée dans votre propre corps). **Les temps de résidence** sont le temps qu'il faut pour qu'un stock soit remplacé. Certains temps de séjour sont courts, comme le temps de stockage de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, qui n'est que de quelques jours. D'autres temps de séjour sont très longs, comme les dizaines de milliers d'années de stockage de la glace dans les calottes polaires.

1.4.4 Cycle des roches

La partie superficielle du cycle des roches est étroitement liée au cycle de l'eau. L'eau qui coule enlève et transporte les sédiments. Dans les eaux stagnantes, les sédiments se déposent et peuvent s'accumuler en séquences sédimentaires épaisses. Les sédiments se lithifient en roches sédimentaires, généralement en profondeur. Si ces roches sont soulevées et que les matériaux qui les recouvrent sont enlevés, elles sont exposées à la surface de la Terre, prêtes à ce que le cycle recommence.

Encadré 1.4. Une partie du cycle des roches à proximité



Vous pouvez voir certaines parties du cycle des roches en action lorsque le vent souffle ou que l'eau coule sur la terre. Le vent soulève, transporte et dépose la poussière, les feuilles et les débris, tout comme l'eau courante. L'eau courante sur ce banc de sable a retiré le sable des petits canaux en haut de la photo, l'a transporté dans les plus grands canaux et l'a déposé dans de petits deltas en bas, le tout dans une petite zone de plage d'environ un mètre de large seulement.

Cette partie sédimentaire du cycle des roches devient plus complexe lorsque les roches sont impliquées dans des épisodes de construction de montagnes. Les énormes températures et pressions provoquent des plissements et des fractures (failles) et peuvent également transformer les roches en roches métamorphiques.

Les changements peuvent aller plus loin si l'augmentation de la température entraîne une fusion partielle des roches, formant une roche liquide, ou magma. Le magma étant moins dense que la roche environnante, il monte. Soit il se refroidit et se solidifie lentement sous terre, soit il fait éruption à la surface par l'activité volcanique. Toutes les roches formées à partir du magma sont des roches ignées. Toutes les roches enfouies peuvent être soulevées et exposées pour faire à nouveau partie du cycle des roches.

La figure 1.7 montre comment les produits (en encadré) et les processus (en italique) du cycle des roches sont liés entre eux.

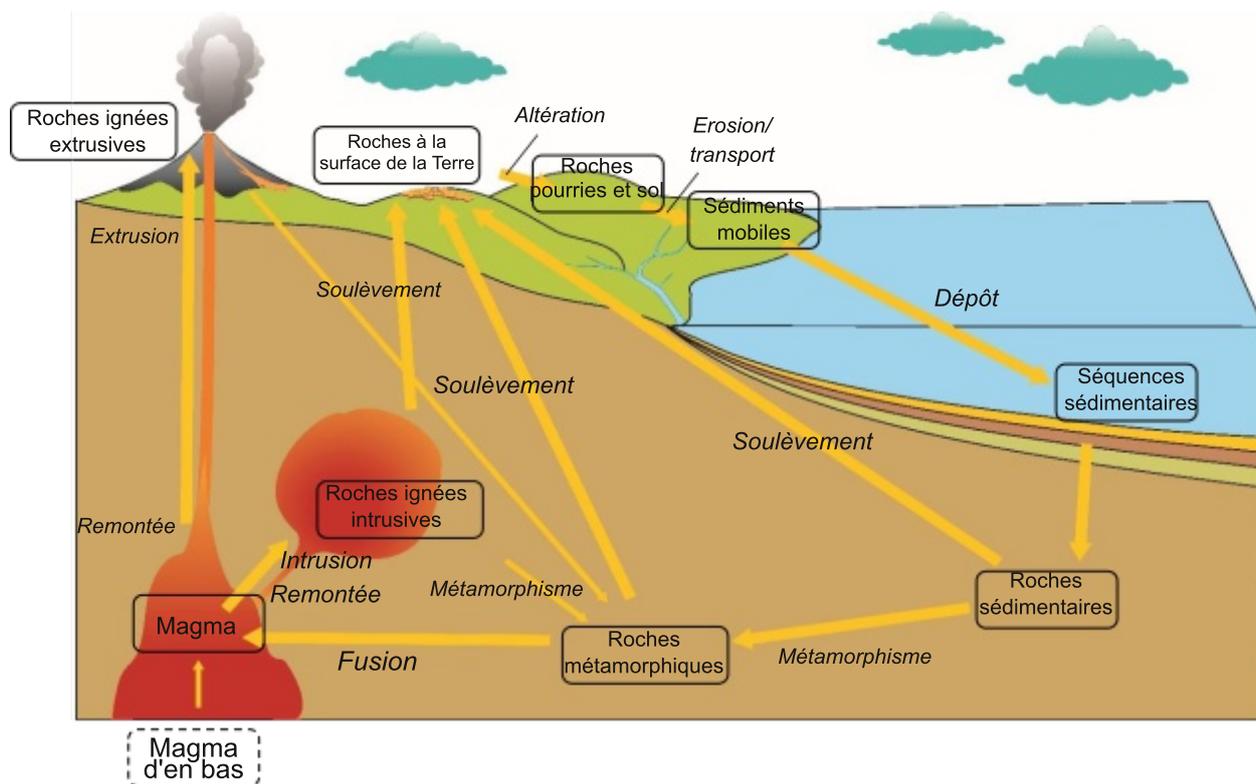
Les roches à la surface de la Terre sont transformées par les intempéries en roches pourries et en terre ; lorsque ce matériau est érodé et transporté, il devient des sédiments mobiles. Le dépôt de sédiments mobiles constitue des séquences sédimentaires. Celles-ci peuvent être transformées par compactage/cimentation en roches sédimentaires qui peuvent ensuite être soulevées pour redevenir des roches à la surface de la Terre. Cependant, elles peuvent également subir un métamorphisme pour devenir des roches métamorphiques, qui peuvent ensuite être soulevées pour devenir des roches à la surface de la Terre.

Les roches métamorphiques peuvent être fondues en magma liquide qui peut s'élever par intrusion pour former des roches ignées intrusives (qui peuvent ensuite être soulevées pour devenir des roches de surface) ou le magma peut être extrudé par voie volcanique pour former des roches ignées extrusives. Le magma peut également être ajouté à ce système par le bas, tandis que les roches ignées peuvent également subir un métamorphisme.

Dans le système du cycle des roches, les produits ou réserves sont les roches sédimentaires, métamorphiques et ignées. Les processus à l'origine des flux entre ces réserves sont le métamorphisme, la fusion, la solidification et tous les processus impliqués dans l'enlèvement, le mouvement, le dépôt et la **lithification** (transformation des sédiments en roches sédimentaires) des sédiments. Le temps de résidence des roches est généralement de plusieurs millions d'années.

Cette vision simple du cycle des roches est plus complexe dans le détail, comme expliqué à partir de la section 4.1.2.

Figure 1.7. Produits (en encadré) et processus (en italique) du cycle de la roche.



1.4.5 Cycle du carbone

Lorsque vous respirez, vous expirez plus de dioxyde de carbone que vous n'en inspirez. En effet, l'un des processus corporels est la respiration, au cours de laquelle l'oxygène réagit avec les composés carbonés dans les cellules de votre corps, libérant de l'énergie et produisant du dioxyde de carbone. Le processus de respiration libère un flux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, qui stocke en permanence une petite quantité de dioxyde de carbone (environ 0,04 %).

Tous les animaux libèrent du dioxyde de carbone par la respiration, et ils libèrent également des composés de carbone dans l'atmosphère par excrétion et lorsqu'ils meurent et se décomposent.

Le temps de séjour du dioxyde de carbone dans l'atmosphère est court car il est éliminé rapidement, principalement par la photosynthèse des plantes. Dans le processus de photosynthèse, l'énergie de la lumière solaire fait réagir le dioxyde de carbone avec l'eau pour former les composés de carbone qui composent les plantes. Les plantes de la Terre, en particulier les algues des océans, constituent donc une grande réserve de carbone. Ce carbone est libéré lorsqu'elles meurent (ou lorsqu'elles sont mangées par des animaux), ou lorsque les plantes terrestres sont brûlées, délibérément ou par des feux de forêt.

Encadré 1.5 : Le cycle du carbone en action



Pendant que ce randonneur se repose dans la toundra de l'Alaska, il respire et rejette du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Pendant ce temps, les plantes vertes font de la photosynthèse à la lumière du soleil, absorbant le dioxyde de carbone et le transformant en nouvelles cellules végétales. Si le randonneur mangeait les baies, cela ferait également partie du cycle du carbone. Ces flux du cycle du carbone se produisent partout sur Terre où il y a des animaux et des plantes, y compris devant votre fenêtre.

Il s'agit du **cycle court du carbone**, tel qu'étudié par de nombreux biologistes. Il implique la photosynthèse et la respiration, l'éjection et la décomposition. Il semble s'agir d'un cycle équilibré, dans lequel la quantité de carbone ajoutée à l'atmosphère est égale à la quantité de carbone éliminée. Cependant, le cycle du carbone comporte également des parties beaucoup plus longues ; par exemple, une partie du dioxyde de carbone de l'atmosphère peut se dissoudre dans l'océan, avec des temps de séjour de plusieurs milliers d'années.

Certains animaux et plantes contiennent des "parties dures" faites de carbonate de calcium. La formule chimique du carbonate de calcium est CaCO_3 et le deuxième "C" de la formule est le carbone, qui représente environ 12 % de la masse du carbonate de calcium. Vos os et les os de la plupart des animaux contiennent du carbonate de calcium. Les coquillages sont faits de carbonate de calcium et certaines plantes microscopiques en contiennent également. Lorsque ces animaux et ces plantes meurent, des parties d'entre eux sont déposées sous forme de sédiments et peuvent faire partie de roches sédimentaires, dont le temps de séjour est de plusieurs millions d'années. La roche riche en carbonate de calcium constituée principalement de restes d'animaux marins est appelée calcaire ; la roche constituée principalement de restes de plantes microscopiques contenant du carbonate de calcium est la craie.

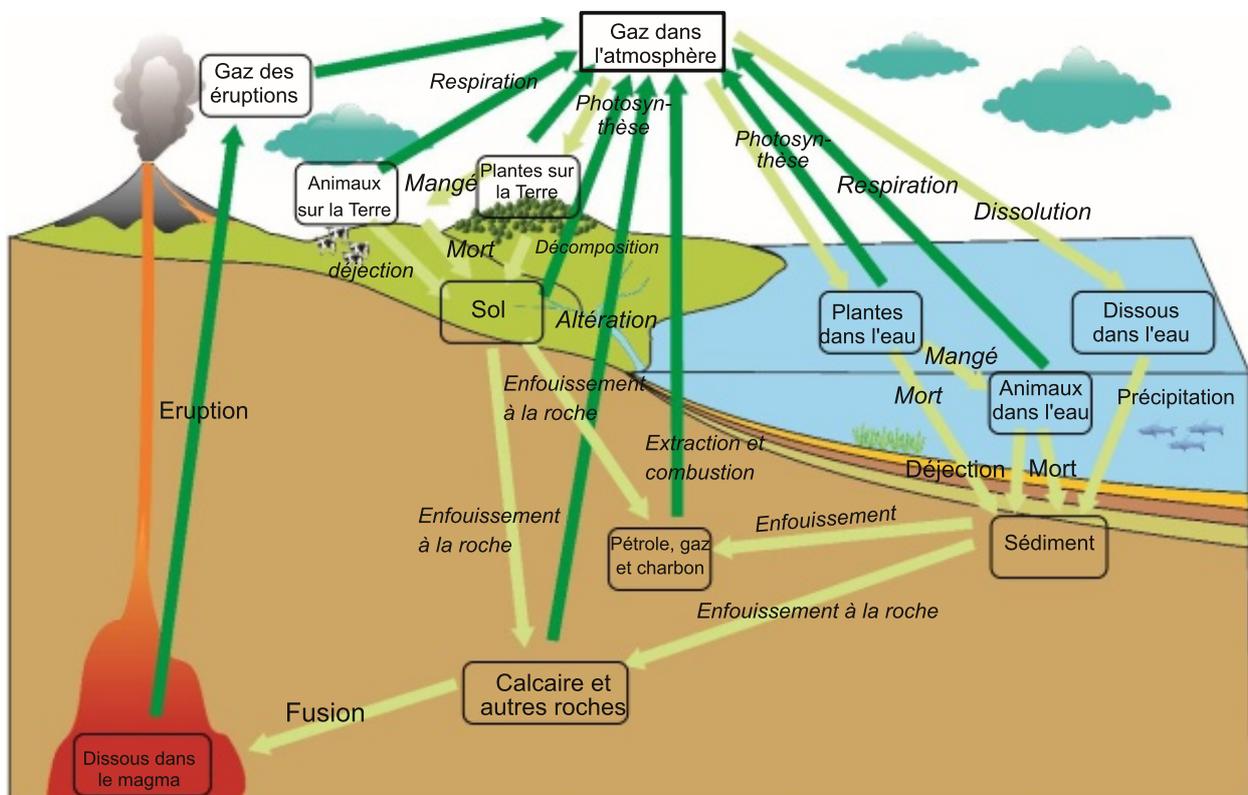
Lorsque les plantes meurent, elles se décomposent généralement, mais si elles sont enterrées par des sédiments et préservées, le carbone qu'elles contiennent est également préservé. Lorsque les plantes terrestres sont préservées, d'épaisses couches peuvent former du charbon, libérant du gaz naturel à mesure qu'il mûrit. Lorsque les animaux et les plantes microscopiques des océans meurent, ils peuvent également être préservés dans les sédiments et se transformer plus tard en pétrole et en gaz naturel. Les processus naturels libèrent ces réserves de carbone dans l'atmosphère sur des millions d'années ; le pétrole et le gaz peuvent s'échapper à la surface et le charbon peut être amené à la surface par le soulèvement et éliminé par les processus de surface.

Les roches sédimentaires contenant du calcaire, de la craie, du charbon, du pétrole et du gaz naturel peuvent être impliquées dans des épisodes de formation de montagnes et être métamorphosées, voire partiellement fondues. Le magma produit par la fusion partielle contient alors du carbone dissous, qui peut être ramené à la surface et libéré dans des éruptions volcaniques. De nombreuses éruptions libèrent d'énormes quantités de gaz carbonique dans l'atmosphère.

Ces parties à long terme du cycle du carbone semblent également être en équilibre. Cependant, les activités humaines peuvent modifier cet équilibre, en extrayant et en brûlant du charbon, du pétrole et du gaz naturel. Ce point est expliqué dans la section 4.3.3.

Les processus et les produits des cycles du carbone à court et à long terme sont illustrés à la figure 1.8.

Figure 1.8. Produits (encadrés) et processus (en italique) du cycle du carbone - les processus de "fixation" du carbone sont représentés par des flèches vert pâle, les processus de libération du carbone par des flèches vert foncé



1.5 Les sources d'énergie

La lumière du soleil fournit l'énergie nécessaire à la photosynthèse et constitue la source initiale de la plupart de l'énergie qui alimente le cycle de l'eau et les processus de surface du cycle de la roche.

Dans le cycle du carbone, une partie de l'énergie stockée dans les cellules végétales construites par photosynthèse peut être libérée lorsque les animaux mangent les plantes. Cela fournit de l'énergie à tous les animaux mangeurs de plantes sur Terre ; les prédateurs obtiennent alors leur énergie en mangeant d'autres animaux. Une partie de cette énergie peut être stockée dans les restes végétaux et animaux enfouis, pour être libérée plus tard par des processus naturels ou par l'activité humaine. Seuls les processus de soulèvement, de métamorphose et d'ignition du cycle du carbone sont alimentés par de l'énergie qui ne provient pas du Soleil ; ils sont alimentés par l'énergie interne de la Terre.

L'énergie du Soleil provoque l'évaporation dans le cadre du cycle de l'eau. La vapeur d'eau est également libérée dans l'atmosphère par la transpiration des plantes, qui ne pourraient exister sans la photosynthèse.

L'énergie du soleil provoque également le mouvement de l'air ; l'air s'élève dans les zones plus chaudes et descend dans les zones plus froides, produisant le mouvement horizontal de l'air que nous appelons le vent. La vapeur d'eau des zones de forte évaporation ou transpiration est transportée ailleurs par l'action du vent. Les principales parties du cycle de l'eau qui ne dépendent pas de l'énergie du Soleil sont le flux descendant d'air froid sous l'effet de la gravité de la Terre et le mouvement circulaire des courants dans l'atmosphère et l'océan résultant de la rotation de la Terre.

Dans le cycle des roches, l'énergie du Soleil est importante pour briser la roche et le sol à la surface de la Terre. Les parties du cycle de l'eau commandées par le Soleil qui déplacent et déposent les sédiments impliquent l'écoulement de l'eau et de la glace, tandis que le mouvement de l'air commandé par le Soleil transporte également des sédiments. Les mouvements de l'air induits par le soleil transportent également des sédiments. Les parties du mouvement des sédiments qui ne sont pas entraînées par le Soleil sont le déplacement vers le bas des roches, de l'eau, de la glace et des courants d'air sous l'effet de la gravité terrestre et le compactage des sédiments par les matériaux sus-jacents, là encore en raison des effets gravitationnels.

La contribution de l'intérieur de la Terre est très inférieure à l'énergie que la Terre reçoit du Soleil. Néanmoins, les sources d'énergie internes de la Terre ont des effets vitaux, en particulier lorsqu'elles agissent au cours des temps géologiques.

Une partie de l'énergie est restée dans le noyau lorsque la Terre était entièrement fondue, peu après sa formation initiale ; cette énergie primitive est encore libérée lentement. Une autre source importante d'énergie est la désintégration radioactive dans les parties solides de la Terre, profondément sous la surface. L'énergie interne de la Terre alimente les parties internes du cycle des roches, entraînant la lithification des sédiments, la formation de failles (à l'origine des tremblements de terre), le plissement, le métamorphisme, le soulèvement et la fusion partielle à l'origine de l'activité ignée.

Ainsi, la majeure partie de l'énergie qui affecte la Terre provient du Soleil. Les autres sources d'énergie sont l'énergie primitive et l'énergie provenant de la désintégration radioactive, décrites ci-dessus. À cela s'ajoutent l'énergie potentielle gravitationnelle et l'énergie cinétique de rotation. L'attraction gravitationnelle du Soleil, de la Terre et de la Lune, ainsi que la rotation de la Terre, l'orbite de la Lune autour de la Terre, et l'orbite de la Terre et de la Lune autour du Soleil, sont converties en énergie thermique, appelée "chauffage par marée".

2.1 Origine

Bien que la vitesse de la lumière soit énorme (près de $300\,000\text{ kmsec}^{-1}$, c'est-à-dire qu'elle parcourt $300\,000$ kilomètres par seconde), il faut encore 8 minutes à la lumière du Soleil pour nous parvenir et plusieurs années à la lumière des étoiles proches pour atteindre nos yeux. Regarder le ciel nocturne signifie donc que nous regardons en arrière dans le temps. Grâce à de puissants télescopes, nous pouvons voir des galaxies, ou des "îles" cosmiques composées de milliards ou de centaines de milliards d'étoiles, telles qu'elles étaient dans un passé lointain. Nos études ont montré que l'univers a commencé il y a environ 14 milliards d'années. À l'origine, il n'y avait ni étoiles ni galaxies, mais l'univers tout entier était rempli de rayonnements hautement énergétiques. Lors du "**big bang**", l'univers a commencé à s'étendre et le rayonnement s'est transformé en matière.

Le type de matière le plus courant est l'hydrogène, l'atome le plus simple. Cependant, presque tout ce qui se trouve sur Terre et au-delà, y compris notre propre corps, est constitué d'autres types d'atomes qui se sont d'abord formés dans les noyaux des étoiles. Lorsque la matière de l'univers s'est refroidie, les étoiles ont commencé à se former et à se regrouper en galaxies. L'énergie qui anime les étoiles, y compris notre Soleil, provient des atomes d'hydrogène qui s'assemblent (fusionnent) pour former des atomes plus gros. Ainsi, au cœur des étoiles, des atomes abondants sur Terre, comme le silicium, l'oxygène, le carbone, l'azote et le fer, ont commencé à se former. Au fil du temps, les étoiles ont projeté dans l'espace une grande quantité de matière, y compris ces atomes nouvellement formés. Ainsi, il y a environ 4,6 milliards d'années, le système solaire de notre Soleil a commencé à se former à partir de l'hydrogène originel et des "cendres" d'anciennes étoiles. Le système de notre Terre fait partie de notre système solaire.

Figure 2.1. Galaxies photographiées par le télescope Hubble. Des couleurs ont été ajoutées, en fonction des données recueillies, pour mettre en évidence les caractéristiques clés des images.



Encadré 2.1. L'univers depuis ton jardin.

Tu peux voir les étoiles de l'univers et certaines des planètes du système solaire depuis ton jardin, mais tu pourras en voir beaucoup plus si tu te rends dans une zone rurale proche par une nuit sans lune, où il n'y a pas d'éclairage public ou autre. À mesure que vos yeux s'habituent à l'obscurité, de plus en plus d'étoiles apparaissent. Les étoiles scintillent, mais si une planète est en vue, elle brillera d'une lumière plus stable. Si vous voyez une lumière qui se déplace régulièrement dans le ciel, il s'agit d'un satellite qui reflète le soleil. S'il fait vraiment sombre, vous pouvez peut-être voir une bande d'étoiles s'étendant au-dessus de votre tête ; c'est la Voie lactée, les étoiles de notre propre galaxie, que vous voyez de face. Si vous avez un appareil photo dont l'obturateur peut rester ouvert et que vous le posez sur un endroit stable, vous pourrez capturer ces vues de l'univers. En laissant l'obturateur ouvert pendant une heure ou plus, vous pourrez également capturer la façon dont les étoiles semblent se déplacer dans le ciel au gré de la rotation de la Terre.

Encadré 2.1. L'univers depuis votre propre jardin, suite.



Une chapelle en France sous la Voie lactée



Mouvement des étoiles capturé par un obturateur ouvert, chilie

Notre système solaire contient les huit planètes, présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Planètes du système solaire, dans l'ordre à partir du Soleil

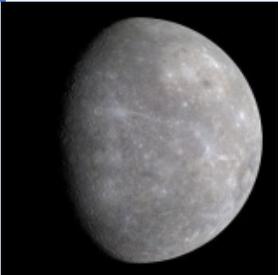
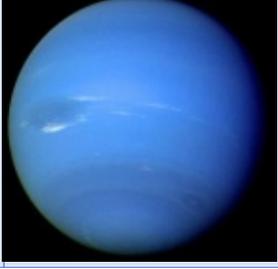
Noms	Image (non à l'échelle)	Distance au soleil, millions de Km	Dia-mètre, Km	Masse 10^{24} Kg	Tempé-rature moyen-ne de sur-face	Autres caratéristiques
Mercure		57,9	4879	0,33	167	Pas de lunes -Surface cratérisée -Planète terrestre solide
Venus		108,2	12,104	4,874	464	Pas de lunes - Couvert par un nuage - Cratérisé surface - Solide terrestre planète
Terre		149,6	12,756	5,97	15	Une lune - Les océans - Quelques cratères connus - Solide terrestre planète - Plaque tectonique identifié

Tableau 2.1. Planètes du système solaire, dans l'ordre à partir du Soleil, suite

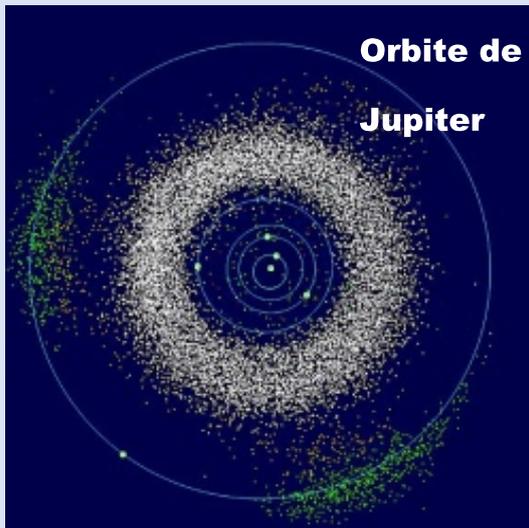
Noms	Image (non à l'échelle)	Distance au soleil, millions de Km	Dia-mètre, Km	Masse 10^{24} Kg	Température moyenne de surface	Autres caractéristiques
Mars		227,9	6792	0,64	-65	<ul style="list-style-type: none"> - 2 lunes - Surface cratérisée - Grand volcan - Processus sédimentaires passés - Planète terrestre
Jupiter		778,6	142,984	1898	-110	<ul style="list-style-type: none"> - 67 lunes - Système d'anneaux - Ceintures de nuages - Grande tache d'orage rouge - Planète géante gazeuse
Saturne		1433,5	120,536	568	-140	<ul style="list-style-type: none"> - 62 lunes - Système d'anneaux - Ceintures de nuages - Géante gazeuse planète
Uranus		2782,5	51,118	86,8	-195	<ul style="list-style-type: none"> - 27 lunes - Système d'anneaux - Planète géante gazeuse
Neptune		4495,1	49,528	102	-200	<ul style="list-style-type: none"> - 14 lunes - Système d'anneaux - Planète géante gazeuse

Pluton n'est plus considéré comme une planète, mais comme l'une des planètes naines.

Notre système solaire contient non seulement des planètes et des planètes naines, mais aussi des ceintures d'astéroïdes et de comètes. De nombreuses météorites qui frappent la Terre et d'autres planètes proviennent à l'origine de la ceinture d'astéroïdes ou de comètes. Les impacts de météorites et de corps plus gros constituent l'un des événements catastrophiques qui affectent la Terre et les autres planètes au fil du temps ; voir section 3.4.

Encadré 2.2. La ceinture d'astéroïdes.

La principale ceinture d'astéroïdes se situe entre les orbites de Mars et de Jupiter et contient des milliards et des milliards de morceaux de roche et de pierre. Certains sont riches en carbone, d'autres en silicium et d'autres encore en nickel-fer. Le plus gros astéroïde fait près de 1000 km de diamètre, mais la plupart sont de la taille d'un caillou ou plus petits. Bien que les astéroïdes soient nombreux, ils sont si éloignés les uns des autres que de nombreux vaisseaux spatiaux les ont traversés sans dommage. Alors que dans d'autres parties du système solaire, des débris spatiaux de ce type s'entrechoquent pour former une planète, il semble que la grande planète voisine, Jupiter, ait affecté cette ceinture, empêchant la formation d'une planète.



La ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter



Astéroïde Gaspia photographié depuis la sonde Galileo

Encadré 2.3. Les comètes.

Les comètes sont des corps glacés du système solaire qui, lorsqu'ils se rapprochent du Soleil, libèrent des gaz qui forment souvent une queue blanche. La queue s'écoule dans la direction du vent solaire, en s'éloignant toujours du Soleil. De nombreuses comètes ont d'énormes orbites ovales qui les font passer de l'espace lointain au cœur du système solaire et en ressortir.



Comète Hale-Bop vue de Croatie en 1997.



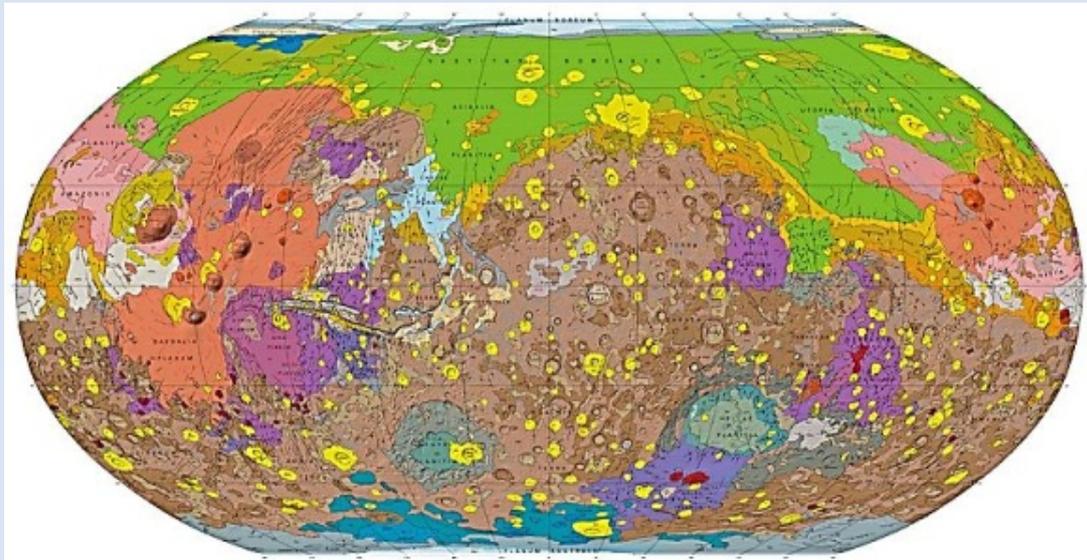
La comète Churyumov-Gerasimenko en septembre 2014 telle que photographiée par la sonde Rosetta avant l'atterrisseur. Philae s'est posé sur sa surface

Les seuls corps du système solaire sur lesquels nous avons pu jusqu'à présent faire atterrir des instruments en toute sécurité sont la Lune de la Terre, la comète Churyumov-Gerasimenko, les planètes Mars et Vénus, et Titan, la lune de Saturne.

Encadré 2.4. Géologie planétaire - Mars

Avant de poser des instruments sur Mars, nous avons déjà une très bonne idée de la géologie de la planète, puisque les principes géologiques qui s'appliquent sur Terre s'appliquent également aux autres planètes. Les observations des télescopes et des satellites en orbite avaient montré une énorme région volcanique couvrant 25% de la surface, dont trois énormes volcans, les plus grands du système solaire (en rouge et violet sur la carte). Il y avait également de très grands cratères produits par des impacts, avec des bords surélevés et des dépressions centrales, le plus grand mesurant 1800 km de diamètre (en jaune sur la carte). Près de l'équateur, il y avait un profond système de canyons de plus de 4000 km de long, formé par des failles dans un passé lointain. Certaines parties de la surface présentaient des systèmes de vallées creusées par les eaux de crue ; plus de 4000 vallées formées par l'eau avec des lits de lacs et des deltas ont maintenant été cartographiées.

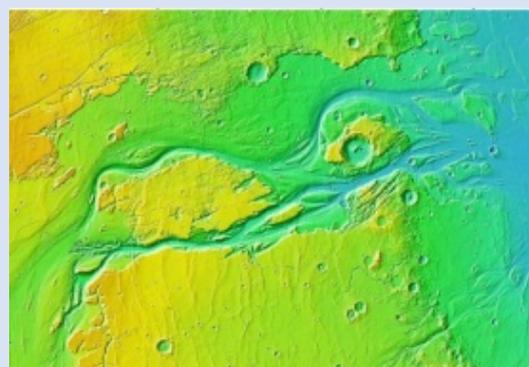
Les atterrisseurs ont fourni encore plus de preuves de l'écoulement de l'eau, notamment des couches sédimentaires et des cailloux arrondis. Les atterrisseurs ont également montré que la majeure partie de Mars est un désert cratérisé, recouvert de rochers et de poussière. Où que soit l'eau qui coulait autrefois à la surface, elle n'y est plus aujourd'hui.



Carte géologique de Mars. Les zones vertes correspondent à la géologie des plaines, les rouges et les violets aux roches volcaniques, les bleus à la géologie polaire, les bruns et les oranges aux roches des hautes terres et les jaunes aux cratères d'impact.



Le système de canyons faillés près de l'équateur



Le canal d'écoulement de Kasei Valles

Encadré 2.4. Géologie planétaire - Mars, suite



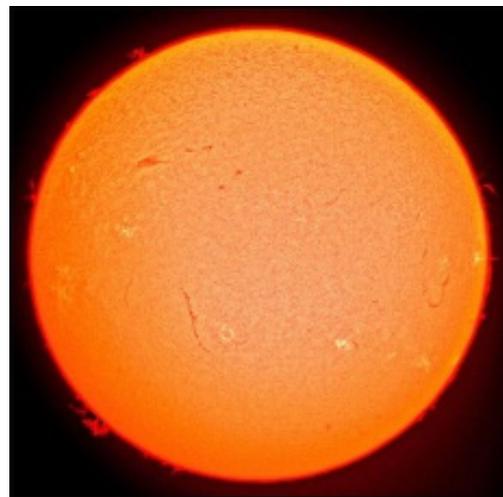
Vue du site Pathfinder sur Mars - rochers et poussière au premier plan et collines en arrière-plan

2.2 Le soleil

Figure 2.2. Le Soleil - notre principale source d'énergie

Le Soleil est notre étoile. Il fournit de l'énergie à tout le système solaire et au-delà.

L'énergie du Soleil traverse l'espace, principalement sous forme de lumière visible, de rayonnement infrarouge et ultraviolet. Lorsque cette énergie réchauffe les surfaces terrestres et océaniques, une partie est renvoyée par rayonnement et réchauffe l'atmosphère. L'énergie est reçue du soleil pendant la journée et est renvoyée dans l'espace la nuit. Ces flux d'énergie s'équilibrent de sorte que la température de la Terre entière reste la même chaque jour. Les observations spatiales de la production d'énergie du Soleil qui ont débuté dans les années 1970 montrent que cette production d'énergie varie selon plusieurs cycles, mais seulement d'environ 0,1 %.



2.3 Soleil, Terre et Lune

2.3.1 Jour/nuit

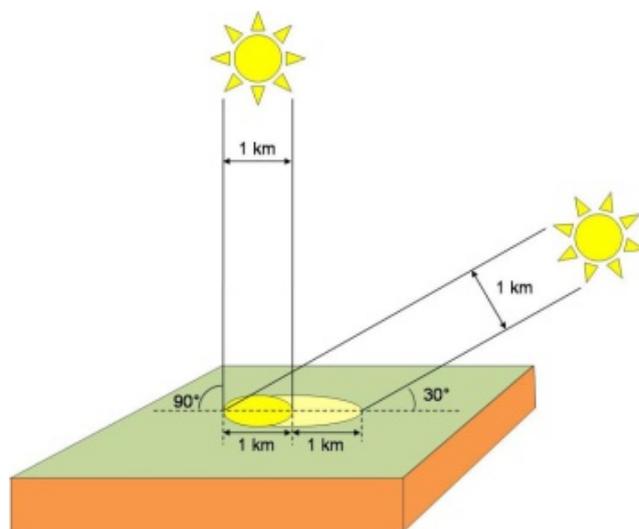
La Terre reçoit l'énergie du Soleil sous forme de rayonnement ultraviolet, visible et infrarouge, qui la réchauffe. Le réchauffement est maximal lorsque le Soleil apparaît le plus haut dans le ciel, comme le montre la figure 2.3. Lorsque le Soleil apparaît directement au-dessus de nos têtes, un faisceau de rayonnement de 1 km de large réchauffe une zone de 1 km de large de la Terre, mais lorsque l'angle du Soleil est de 30°, un faisceau similaire de 1 km de large réchauffe une zone de 2 km de large de la Terre, de sorte que la moitié de la quantité de chaleur est reçue en chaque point.

Encadré 2.5. Modification des ombres en fonction de l'heure de la journée.



Lorsque le Soleil apparaît au plus haut dans le ciel au milieu de la journée, les ombres sont courtes. Au fur et à mesure que le soleil descend, les ombres s'allongent. La position changeante du Soleil dans le ciel est le résultat de la rotation de la Terre. Ici, la photo de gauche a été prise à 13h00 et celle de droite à 16h00 à Ibadan au Nigeria.

Figure 2.3. L'effet de réchauffement de l'angle du Soleil dans le ciel



Le réchauffement de la Terre prend du temps, de sorte que la partie la plus chaude de la journée se situe généralement après le moment où le Soleil est le plus haut dans le ciel.

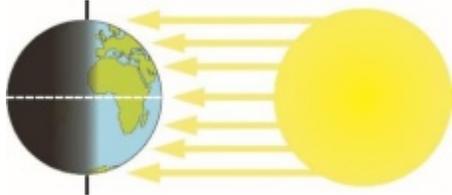
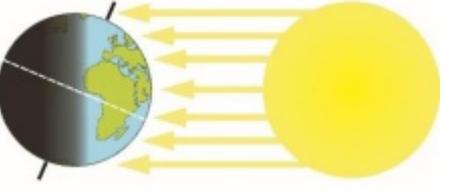
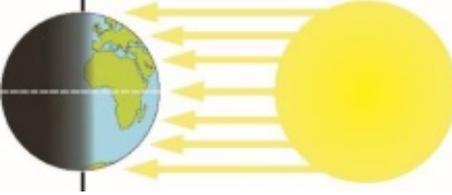
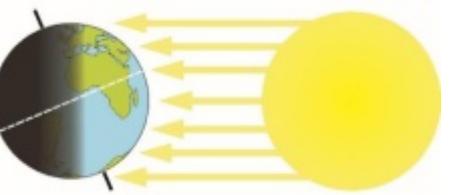
La quantité de chaleur reçue dépend de l'état de la surface. Les surfaces sombres absorbent et réémettent plus de chaleur que les surfaces de couleur claire, car ces dernières réfléchissent davantage le rayonnement ; c'est l'effet albédo. La terre se réchauffe plus vite que l'eau, car l'eau fait circuler la chaleur reçue dans les profondeurs du plan d'eau. Mais la terre se refroidit également plus vite que l'eau, car l'eau en circulation met du temps à perdre sa chaleur. Cela signifie que si vous vivez près d'une grande étendue d'eau, les températures n'augmenteront pas autant que si vous vivez loin de l'eau, mais elles ne baisseront pas non plus autant. Ainsi, les zones côtières ont normalement des températures plus modérées que les zones intérieures.

La Terre renvoie dans l'espace l'énergie qu'elle a reçue pendant la journée sous forme de rayonnement infrarouge pendant la nuit. La partie la plus froide de la nuit se situe généralement peu après l'aube, lorsque le rayonnement sortant commence à être équilibré par le rayonnement entrant.

2.3.2 Les saisons

L'effet de réchauffement de la hauteur apparente du Soleil dans le ciel (figure 2.3.) a une incidence sur les saisons de la Terre, comme le montre le tableau 2.2. La longueur des jours et des nuits a également un effet important.

Tableau 2.2. L'inclinaison de la Terre à l'origine des saisons

Hémisphère	Saison	Diagramme	Angle des rayons	Longueur du jour/nuit
Mars			Mars	
Nord	Printemps		Le même angle de rayons et la même longueur de jour/nuit partout sur Terre	
Sud	Automne			
Juin			Juin	
Nord	Été		Le soleil est haut dans le ciel	Longues journées pour recevoir le soleil
Sud	Hiver		Sud froid car:	Le soleil est bas dans le ciel
Septembre			Septembre	
Nord	Automne		Le même angle de rayons et la même longueur de jour/nuit partout sur Terre	
Sud	Printemps			
Décembre			Décembre	
Nord	Hiver		Le soleil est bas dans le ciel	Nord est froid car:
Sud	Été		Le soleil est haut dans le ciel	Sud chaud car:
				Longues nuits pour perdre la chaleur
				Longues journées pour recevoir le soleil

Il n'y a pas beaucoup de changements saisonniers près de l'équateur, car le soleil est toujours haut dans le ciel ; il fait donc chaud toute l'année. Les variations saisonnières sont modérées par les masses d'eau proches, de la même manière que les températures quotidiennes. Ainsi, les zones côtières restent normalement plus fraîches en été que les zones intérieures, mais sont plus chaudes en hiver.

2.3.3 Les phases de la Lune

Comme la Terre, la moitié de la Lune est éclairée par le Soleil et l'autre moitié est toujours dans l'obscurité. La Lune met environ 27 jours pour faire le tour de la Terre, ou orbiter autour d'elle. Lorsque la moitié de la Lune qui est éclairée par le Soleil fait face à la Terre, nous pouvons voir toute la Lune - c'est la pleine Lune. Au fur et à mesure que la Lune poursuit son orbite, nous voyons de moins en moins la partie éclairée et de plus en plus la partie sombre. Au bout de 13 jours environ, la face cachée de la Lune est tournée vers nous et nous ne pouvons plus la voir du tout : c'est la phase de nouvelle Lune. Ensuite, nous voyons de plus en plus la face éclairée de la Lune alors qu'elle revient vers la phase de pleine lune, comme le montrent les figures 2.4 et 2.5.

Figure 2.4. Les phases de la Lune

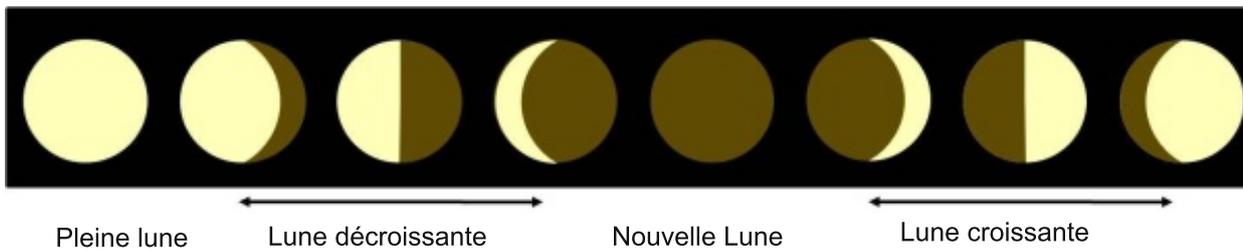


Figure 2.5. La Lune devenant pleine - un collage de trois photographies

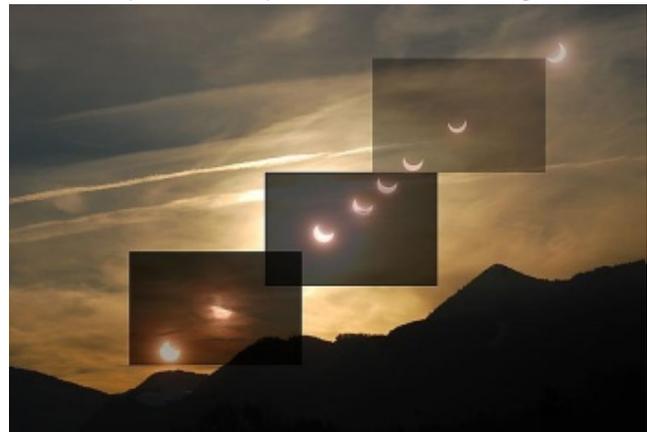


2.3.4 Les éclipses

L'orbite de la Lune forme un angle avec l'orbite de la Terre. En général, la Lune ne se déplace pas entre la Terre et le Soleil et la Terre ne se déplace pas entre la Lune et le Soleil.

Parfois, cependant, la Lune se déplace entre la Terre et le Soleil, ce qui se traduit par une éclipse solaire sur la Terre. Bien que la Lune soit beaucoup plus petite que le Soleil, elle est beaucoup plus proche de la Terre, de sorte que lorsqu'elle se trouve entre les deux, elle peut couvrir complètement le Soleil. Lors d'une telle **éclipse solaire**, on ne voit la Lune couvrir le Soleil que depuis certaines parties de la Terre ; dans d'autres zones, on observe une éclipse partielle, comme dans la figure 2.6.

Figure 2.6. Un collage de photographies d'une éclipse solaire partielle vue d'Allemagne



Si vous souhaitez observer une éclipse solaire, vous devez vous protéger les yeux en portant des lunettes spéciales éclipse. Pendant que vous regardez, vous verrez la forme de la Lune qui recouvre progressivement le Soleil, tandis que la Terre devient de plus en plus sombre. Puis la Lune s'éloigne et la lumière normale du jour réapparaît lentement.

Lorsque la Lune se déplace derrière la Terre et que le Soleil, la Terre et la Lune sont alignés, l'ombre de la Terre recouvre la Lune dans une **éclipse lunaire**. L'ombre de la Terre se déplace jusqu'à ce qu'elle recouvre toute la Lune et qu'on ne puisse plus la voir. Puis l'ombre se déplace et la Lune réapparaît. Pendant ce temps, la réfraction de la lumière par l'atmosphère terrestre peut colorer la Lune en rouge-orange pendant un certain temps, figure 2.7.

Figure 2.7. Collage de photos d'une éclipse de Lune



3.1 Période géologique

La Terre, telle que mesurée par la **datation radiométrique**, a le même âge que le système solaire, soit 4,6 milliards d'années (4600 millions d'années).

Avant que la datation radiométrique ne devienne disponible, plusieurs géologues avaient tenté d'estimer son âge. Ils avaient conclu qu'elle était très ancienne et avaient écrit que l'étude de la Terre revenait à regarder dans un "abîme de temps" (John Playfair en 1805) sans "aucun vestige d'un début - aucune perspective d'une fin" (James Hutton en 1795). Bien qu'à cette époque, il n'était pas possible de découvrir l'âge en années (ou en millions d'années) d'un quelconque événement terrestre, il était possible de mettre en ordre les événements géologiques. La mise en ordre des événements est appelée **datation relative**, car elle permet de dire quel événement était plus ancien et quel autre plus jeune, les uns par rapport aux autres.

3.2 La datation relative

Plusieurs méthodes différentes sont utilisées pour la **datation relative**. Elles ont été découvertes il y a longtemps et ont été utilisées par les géologues depuis lors. Elles sont présentées dans le tableau 3.1. Certaines de ces méthodes sont des principes, car elles fonctionnent la plupart du temps, mais il peut y avoir des circonstances géologiques particulières où elles ne s'appliquent pas ; d'autres sont des lois, qui fonctionnent toujours, à condition que les observations soient faites avec soin.

Tableau 3.1. Méthodes de datation relative

Méthode de datation relative	Première-ment décrit par:	Détail de la méthode	Exemple
Principe de superposition des strates	Nicholas Steno en 1669	Lorsque des roches sont déposées, celles qui se trouvent au sommet sont les plus jeunes (sauf, par exemple, lorsqu'une séquence est renversée par une déformation ou lorsque des failles ont poussé une séquence plus ancienne sur une séquence plus jeune).	 <p>Craie inclinée à Chypre - le plus jeune au sommet</p>  <p>Roche plissée au Groenland - la roche au sommet de l'île est renversée, avec une roche plus ancienne au sommet.</p>
Loi des relations transversales	Nicholas Steno en 1669	Tout ce qui (par exemple, une fracture, une roche, une veine, une surface d'érosion) coupe tout autre élément doit être plus jeune.	 <p>Dykes dans le Colorado, aux États-Unis ; roche grise la plus ancienne, coupée par un dyke presque horizontal, puis par un dyke incliné - le plus jeune.</p>

Tableau 3.1. Méthodes de datation relative, suite

Méthode de datation relative	Première-ment décrit par:	Détail de la méthode	Exemple
Loi des fragments inclus	Charles Lyell en 1830	Tout fragment inclus dans une autre roche doit être plus ancien	 <p>Herm, îles Anglo-Normandes, Royaume-Uni ; les xénolithes (fragments inclus) de la roche sombre dans le granite plus pâle sont plus anciens.</p>
Loi de la succession de faunes	William Smith en 1816	Les groupes de fossiles se succèdent dans un ordre connu dans la séquence des roches, ce qui nous permet de classer les roches dans l'ordre du temps.	 <p>L'un des dessins de William Smith représentant un groupe de fossiles utilisés pour dater une roche.</p>
Les roches déformées/métamorphosées doivent être plus anciennes que celles qui n'en ont pas - une loi	Personne inconnue	Étant donné que la déformation et les événements métamorphiques régionaux affectent toutes les roches d'une région, toute roche non déformée ou non métamorphosée doit être plus jeune.	 <p>Une discordance à Bochum, en Allemagne. La roche supérieure non déformée est plus jeune que la roche grise déformée et inclinée située en dessous.</p>

Certaines de ces méthodes de datation relative sont basées sur deux autres principes importants, décrits pour la première fois par Nicholas Steno, comme le montre le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Principes de mise en place des sédiments, des laves et des cendres volcaniques

Principes de formation de roches	Décrit premièrement par:	Détail	Exemple suivant le principe	Exemple ne suivant pas le principe
Principe d'horizontalité original	Nicholas Steno en 1669	Les couches de sédiments sont à l'origine déposées horizontalement (tout comme les laves et les cendres volcaniques), mais elles sont parfois déposées en biais.	 Sédiments miocènes déposés horizontalement - Drahomyrchany, Ukraine	 Sédiments qui, à l'origine, ne se sont pas déposés horizontalement - sables à lits croisés (stratifiés) déposés pendant la période glaciaire. Estonie
Principe de continuité latérale	Nicholas Steno en 1669	Les couches sédimentaires, les dépôts de lave et de cendres se poursuivent latéralement sur de grandes étendues - mais il existe des situations inhabituelles où ce n'est pas le cas.	 Les roches sédimentaires à continuité latérale du Grand Canyon, Arizona, États-Unis.	 Sédiments non continus, dépôts fluviaux en Islande - qui s'arrêtent sur les flancs de la vallée.

Ces principes et ces lois peuvent être utilisés pour déterminer l'histoire géologique d'une région, sans connaître l'âge réel des roches.

Encadré 3.1. Utilisation de méthodes de datation relative pour déterminer l'histoire géologique des roches ; dans cette séquence rocheuse du désert du Néguev en Israël :



Les roches sédimentaires horizontales se sont déposées en séquence, de sorte que, selon le "principe de superposition", les roches les plus anciennes se trouvent au fond.

- À l'origine, les roches se sont déposées horizontalement et de façon continue sur une large zone, comme le veut le "principe d'horizontalité originelle" et le "principe de continuité latérale".

- La couche la plus épaisse près de la base de la séquence est un conglomérat contenant des cailloux ; selon la "loi des fragments inclus", les cailloux doivent être plus anciens que la couche dans laquelle ils se trouvent.

- Les roches ont été coupées par un dyke vertical de roche ignée qui, selon la "loi des relations transversales", doit être plus jeune que les sédiments horizontaux qu'il coupe.

- Tout a été coupé par la surface d'érosion qui constitue aujourd'hui la falaise, il s'agit donc de l'événement le plus récent, selon la "loi des relations transversales".

Encadré 3.1. Utilisation de méthodes de datation relative pour déterminer l'histoire géologique des roches, suite L'histoire des roches est donc la suivante :

- Dernier événement -
- * le sommet et la face de la falaise actuelle ont été érodés
 - * la séquence de roches a été coupée par une nappe de magma liquide qui s'est solidifiée en une digue
 - * les couches restantes se sont déposées, rajeunissant vers le haut
 - * le lit le plus bas de la falaise a été déposé, suivi par les couches suivantes
 - * conglomérat contenant les galets.
- Événement le plus ancien - une roche s'est formée, puis a été érodée pour former des galets.

William Smith a utilisé des fossiles pour déterminer la datation relative des roches, décrivant sa méthode comme la "loi de la succession faunique". Il a reconnu que de nombreuses couches de roches sédimentaires contenaient certains groupes de fossiles et que ceux-ci pouvaient être repérés sur de vastes zones. Cela signifie que chaque fois qu'il trouvait une roche avec un certain groupe de fossiles, il savait qu'il s'agissait d'une roche du même âge. Cette méthode s'appelle la corrélation. Il s'est également rendu compte que les couches contenant certains groupes de fossiles étaient toujours trouvées dans le même ordre. Cela signifie que lorsqu'il trouvait une roche avec un groupe de fossiles, il savait que des roches avec d'autres groupes de fossiles seraient toujours trouvées au-dessus ou en dessous, comme le montre le tableau 3.3. Bien que Smith ait utilisé sa méthode pour corréler les roches et les placer en séquences, il ne savait pas pourquoi les fossiles se trouvaient toujours dans le même ordre. Ce n'est que plus tard que Charles Darwin a compris que la raison de cet ordre était **l'évolution**.

Tableau 3.3. La méthode de William Smith appliquant la "loi de la succession faunistique"

Séquence de William Smith		Âge lié aux périodes de l'échelle des temps géologiques, reconnu d'après Smith	Le dessin original du groupe de fossiles de William Smith
Le plus jeune	Craie inférieure	Age crétacé inférieur	
	Sable vert	Age de crétacé précoce	
	Argile à chêne (maintenant appelée argile de Kimmeridge)	Jurassique supérieur, âge Kimméridgien	
Le plus âgé	Pierre de Kelloways	Âge du Jurassique moyen	

Nous pouvons maintenant appliquer la méthode de Smith plus largement, puisque nous savons que certains fossiles ne se trouvent que dans des roches de certains âges. Ainsi, en reconnaissant les fossiles, nous connaissons l'âge géologique des roches, comme dans le tableau 3.4.

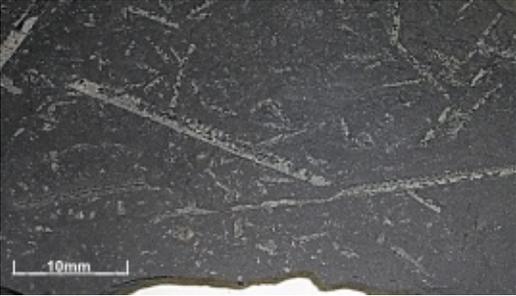
Tableau 3.4. Fossiles typiques trouvés dans des roches d'âges différents

Age géologique des roches	Fossile trouvé uniquement dans des roches de cet âge.	Image de fossiles
<p>Quaternaire</p>	<p>Coquille Saint-Jacques gibbeuse <i>Argopecten</i> - vit sur le fond de la mer mais peut faire claquer sa coquille pour se déplacer et échapper à ses prédateurs ; on la trouve dans les sédiments néogènes, quaternaires et modernes ; ce spécimen est moderne.</p>	
<p>Néogène</p>	<p>Coquille d'huître <i>Crassostrea titan</i>, qui vivait sur les rivages rocheux de la mer ; ce spécimen provient de la formation de Santa Margarita, Californie, États-Unis.</p>	
<p>Paléogène</p>	<p>Dents fossiles du requin tigre des sables <i>Carcharias tingitana</i> : les dents de ce requin ne se trouvent que dans le Paléogène ; ces spécimens proviennent de Khouribga, au Maroc.</p>	
<p>Crétacé</p>	<p>Echinoderme <i>Micraster leskei</i>, un oursin vivant sur et dans les sédiments du fond marin ; cette espèce ne se trouve qu'au Crétacé bien que d'autres formes de <i>Micraster</i> se trouvent au Paléogène ; ce spécimen provient de la craie près de Puy, Dieppe, France.</p>	

Tableau 3.4. Fossiles typiques trouvés dans des roches d'âges différents, suite

Age géologique des roches	Fossile trouvé uniquement dans des roches de cet âge.	Image de fossiles
<p>Jurassique</p>	<p>Ammonoïte <i>Calliphylloceras</i> qui vivait comme une pieuvre avec une coquille, nageant dans la mer ; les parois entre les chambres avaient des formes très complexes, montrées ici par la peinture noire ; ces formes ne se trouvent que dans les ammonites du Jurassique et du Crétacé.</p> 	
<p>Trias</p>	<p>Ammonoïde cératites cératites ; il vivait en nageant dans la mer comme une pieuvre avec une coquille ; il avait des parois entre les chambres qui étaient doucement incurvées vers la bouche de la coquille, mais complexes dans l'autre direction ; ce spécimen de Oberer Muschelkalk.</p> 	
<p>Permien</p>	<p>Ammonoïde goniatite (également présent dans les roches du Carbonifère et de la fin du Dévonien) ; ressemblait à une petite pieuvre avec une coquille ; vivait en nageant dans l'océan - avait des parois entre les chambres avec des formes simples en zigzag.</p> 	
<p>Carbonifère</p>	<p>Caninia : coraux rugueux solitaires qui vivaient enracinés dans le fond marin ; ces spécimens proviennent du calcaire de Lecompton, au Kansas, aux États-Unis.</p>	

Tableau 3.4. Fossiles typiques trouvés dans des roches d'âges différents, suite

Age géologique des roches	Fossile trouvé uniquement dans des roches de cet âge.	Image de fossiles
Dévonien	Phacops trilobite - vivait au fond de la mer, probablement en tant que prédateur actif ; ce spécimen provient des schistes siliceux du Dévonien moyen, Ohio, États-Unis.	
Silurien	Monograptus graptolite avec un seul bras portant une colonie d'animaux graptolites ; flottait dans l'océan.	
Ordovicien	Graptolite Tetragraptus avec quatre bras* ; chacun des bras portait une colonie de petits animaux graptolites ; la colonie flottait dans l'océan ; ce spécimen provient de la série ordovicienne inférieure Bendigoian, Bendigo, Victoria, Australie. - seulement trois des quatre bras (stipes) sont visibles sur la photo	
Cambrien	Trilobite Paradoxides ; ils vivaient au fond de la mer et étaient probablement des prédateurs.	

Lorsque les géologues utilisaient les fossiles pour corréliser et séquencer les roches, ils ont découvert qu'il y avait des changements soudains dans les groupes de fossiles à certains endroits du registre fossile. Nous savons aujourd'hui que cela était dû à de grandes extinctions à ces moments-là, mais les premiers géologues étaient surtout intéressés par la façon dont ces changements pouvaient être utilisés pour diviser les roches. Les fossiles ont été utilisés pour identifier les périodes géologiques (dont les noms figurent dans la première colonne du tableau 3.4).

Encadré 3.2. Un exemple de période géologique - le Trias

La période du Trias est la première période de l'ère mésozoïque ("vie moyenne") et a été nommée par Freidrich von Alberti en 1834 en raison de ses trois couches principales (tri = trois), que l'on retrouve dans toute l'Allemagne et dans le nord-ouest de l'Europe. Il s'agit de lits rouges à la base, suivis d'un calcaire, avec une série de mudstone/sandstone au sommet. Il a pu distinguer les roches triasiques des roches sous-jacentes et sus-jacentes grâce aux changements majeurs dans les fossiles trouvés à la base et au sommet de la séquence. Nous savons maintenant que ces changements sont le résultat d'extinctions massives à grande échelle.

Aujourd'hui, dans la mesure du possible, les positions des principales limites de la colonne géologique sont identifiées par un "Global Boundary Stratotype Section and Point" (GSSP). On trouve un endroit quelque part sur la Terre où se trouve une série de lits fossilifères de l'âge correct, où l'on peut trouver la position exacte de la frontière. Un "pic doré" est placé à cet endroit pour marquer ce point de référence important.

Le "pic doré" pour le bas du Trias (et donc le haut de la période permienne précédente) se trouve à Meishan, dans la province chinoise du Zhejiang, où un microfossile conodont appelé *Hindeodus parvus* apparaît pour la première fois dans la séquence géologique.

Le sommet du Trias (et donc la base du Jurassique) a son "pic d'or" à Kuhjoch dans le Tyrol en Autriche, où l'ammonite *Psiloceras spelae tirolicum* est trouvée pour la première fois.



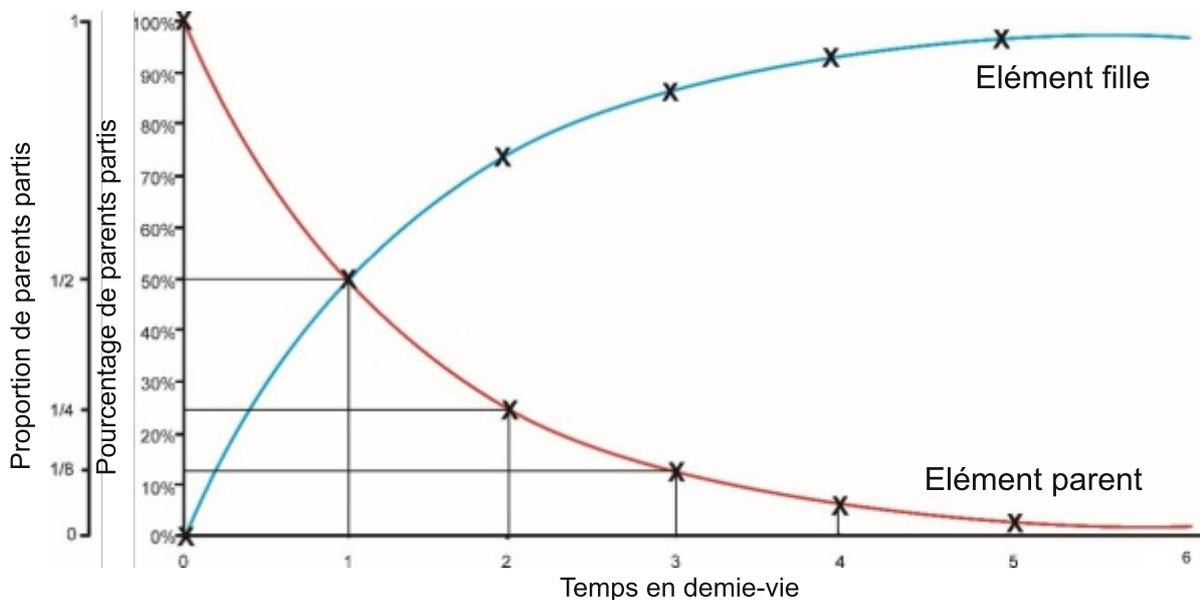
La "pointe d'or" est un marqueur en bronze de l'une des limites géologiques de la période triasique. Un moulage en plâtre de la cératite, qui apparaît pour la première fois dans les archives géologiques, marque la limite.

Les méthodes de datation relative étaient utilisées depuis de nombreuses années pour déterminer l'âge relatif des roches et des périodes géologiques, mais nous ne connaissions pas l'âge des périodes, ni celui des limites entre les périodes, jusqu'à ce que la datation radiométrique devienne disponible.

3.3 La datation absolue

La datation radiométrique est devenue possible lorsqu'on a découvert que les éléments radioactifs contenus dans certaines roches et certains minéraux se décomposent pour former d'autres éléments. Leur désintégration dans le temps se produit d'une manière prévisible qui peut être représentée sur un graphique ; on l'appelle souvent la **courbe de désintégration radioactive** (figure 3.1).

Figure 3.1. La courbe de décroissance radioactive pour la décomposition de tous les matériaux radioactifs



L'élément radioactif qui se désintègre est appelé le parent ; le nouvel élément produit par la désintégration est la fille. Le graphique montre qu'après un certain temps, la moitié de l'élément s'est désintégrée pour produire la fille ; ce temps est appelé la **demi-vie**. Après une autre demi-vie, une autre moitié du parent s'est décomposée, il ne reste donc plus qu'un quart ; la substance contient alors 25% du parent et 75% de la fille. Après une troisième demi-vie, un autre huitième (12,5%) du parent s'est décomposé, de sorte que la substance contient 12,5% de parent et 87,5% de fille. La décomposition se poursuit, le pourcentage de parent diminuant à mesure que la quantité de fille augmente.

Bien que toutes les matières radioactives se décomposent selon ce schéma, la durée de leur demi-vie varie énormément, allant de milliards d'années à des microsecondes, voire moins. Si nous choisissons un élément radioactif dont la vitesse de décomposition est connue, nous pouvons mesurer les quantités de produits parents et de produits filles, ce qui nous donne l'âge auquel l'élément s'est formé. Cela donne ensuite l'âge du minéral ou de la roche dans lequel il se trouve. Cette méthode est appelée **datation absolue** car elle donne un âge en années, milliers, millions ou milliards d'années. Comme les mesures comportent une petite erreur calculée, les mesures de datation radiométrique sont toujours indiquées avec l'erreur potentielle.

Encadré 3.3. La marge d'erreur donnée par les dates absolues radiométriques.



La ville d'Edimbourg en Ecosse est construite autour d'un ancien volcan. Des minéraux de feldspath provenant des roches volcaniques ont été utilisés pour dater l'éruption. La date donnée par la désintégration radioactive de l'argon dans le feldspath était de 349 + 4 millions d'années, ce qui montre que le volcan est entré en éruption au Carbonifère, il y a 353 à 345 millions d'années.

La datation absolue ne peut être utilisée que pour les roches ou les minéraux qui contiennent le bon type d'éléments radioactifs et donne la date à laquelle cette roche s'est formée. Cette méthode fonctionne bien pour la plupart des roches ignées et certaines roches métamorphiques. Elle n'est pas aussi utile pour les roches sédimentaires, car les grains de sédiments se sont formés plus tôt, avant d'être érodés et déposés.

Il est donc difficile de relier les dates radiométriques aux dates de corrélation des fossiles, car les fossiles se trouvent dans les roches sédimentaires. C'est l'une des raisons pour lesquelles il a fallu beaucoup de temps pour attribuer des dates absolues aux limites entre les périodes de la colonne géologique. Cependant, ces dates ont maintenant presque toutes été confirmées, ce qui nous permet de produire la colonne géologique avec les dates, présentées dans le tableau 3.5. Les événements majeurs de l'histoire géologique ont été ajoutés à la dernière colonne de ce tableau.

Tableau 3.5. Les principales subdivisions des temps géologiques basées sur le dernier Tableau chronostratigraphique international publié par la Commission internationale de stratigraphie

Eon	Ere	Période	Abréviation	Age	Evénements majeurs
Phanérozoïque	Cénozoïque	Quaternaire	Q	0	Il ya des Millions d'années (Ma) 3,3 : Les plus ancien outils de pierre 50: Montagnes Himalayennes 66: extinction massive (K-Pg) 130: Premières plantes à fleurs 160: Premiers oiseaux 190: Ouverture de l'océan Atlantique 220: Premières mammifères 252: "Grande mort"-Extinction massive 299: Foration du supercontinent Pangée 315: Premiers reptiles 370: Premiers amphibien 400: Premiers Insectes 430: Premières plantes terrestres 530: Premiers poissons 541: Vie avec des coquilles/parties dures 2000: Premiers organismes multicellulaires 2100: Premiers Eucaryotes 2700: Oxygène libre dans l'atmosphère 3500: Premières bactéries et algues 4000: Roches anciennes connues 4600: Origine de la Terre
		Néogène	N	2,6	
		Paléogène	Pg	23	
	Mésozoïque	Crétacée	K	66	
		Jurassique	J	145	
		Trias	T	201	
		Permien	P	252	
	Paléozoïque	Carbonifère	C	299	
		Dévonien	D	359	
		Silurien	S	419	
		Ordovicien	O	444	
		Cambrien	Cm	485	
				541	
	Précambrien	Protérozoïque		541	
Archéen			2500		
Hadéen			4000		
			4600		

Les méthodes de datation des roches s'étant améliorées, certaines des dates du tableau ont changé au fil du temps. Le tableau 3.5 présente la dernière version.

3.4 Vitesse des processus

À une certaine époque, on pensait que la plupart des processus géologiques se déroulaient lentement et régulièrement. Nous savons maintenant que, si certains sont effectivement très lents et réguliers, d'autres peuvent être très rapides et catastrophiques. Par exemple, il faut des millions d'années pour qu'une séquence de roches sédimentaires se mette en place, mais les couches individuelles peuvent être déposées en quelques secondes. De même, le refroidissement du magma liquide en profondeur jusqu'à ce qu'il devienne une roche ignée solide peut prendre des millions d'années, alors que les volcans

peuvent entrer en éruption en quelques secondes. Les roches peuvent être soulevées lentement, comme lorsque la glace qui les recouvre a fondu, permettant à la terre de s'élever, ou peuvent être soulevées soudainement, lors de tremblements de terre.

Il semble maintenant que l'évolution, que l'on considérait également comme un processus régulier, se déroule souvent par à-coups, tandis que les extinctions massives semblent également être des catastrophes soudaines.

Il est donc devenu évident que les archives géologiques, qui s'étendent sur un milliard d'années, sont le résultat d'une combinaison de processus extrêmement lents entrecoupés de violentes catastrophes, d'autres processus agissant à tous les moments intermédiaires.

Encadré 3.4. Des processus très, très rapides aux processus très, très lents

En haute mer, les boues fines se déposent en suspension dans l'eau de mer très, très lentement, de sorte qu'il faut parfois des millions d'années pour constituer une séquence sédimentaire. Cependant, parfois, sur terre, dans les zones côtières et dans les profondeurs océaniques, des couches de sédiments peuvent être déposées beaucoup plus rapidement, en quelques jours ou même quelques heures, par des tempêtes, des glissements de terrain ou d'autres événements catastrophiques.



Carottes de sédiments des grands fonds marins près du Groenland ; les couches de sédiments se sont accumulées sur de longues périodes.



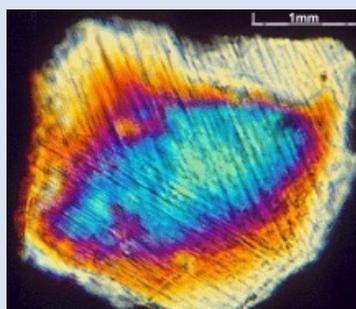
Couche grise d'un dépôt de tsunami vieux de 8 000 ans en Écosse, déposé en quelques minutes, avec des couches de tourbe sombre au-dessus et en dessous.

Encadré 3.5. Événements d'impact catastrophiques

Les objets provenant de l'espace entrent souvent en collision avec la Terre et les autres planètes, mais la plupart d'entre eux sont très petits et ne sont pas détectés. Cependant, les astéroïdes de 1 km de diamètre percutent la Terre tous les demi-millions d'années en moyenne, tandis que les astéroïdes de 5 km de diamètre entrent en collision avec la Terre tous les 20 millions d'années environ. De nombreux petits astéroïdes se brisent dans l'atmosphère, mais les plus gros frappent la Terre et produisent des cratères. La taille de l'impact dépend du diamètre, de la densité, de la vitesse et de l'angle du corps qui entre en collision. Bien que les cratères volcaniques puissent souvent ressembler à des cratères d'impact, seuls les cratères d'impact présentent de petites billes de verre appelées tektites et du quartz choqué produit par la déformation du quartz pendant l'impact. Certains impacts produisent également des couches d'iridium, ainsi que des couches de suie et de cendres.



Formes courantes de la tektite - haltère et larme



Quartz choqué avec des plans de déformation vus au microscope en lumière polarisée croisée.

Encadré 3.5. Événements d'impact catastrophiques, suite

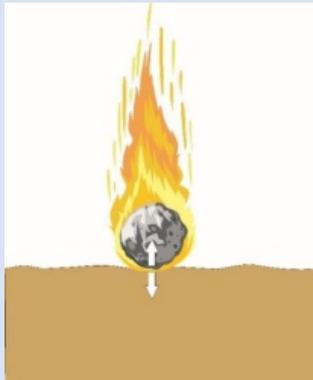


Le cratère de Lonar, en Inde, est le résultat d'un impact qui aurait eu lieu il y a environ 52 000 ans.

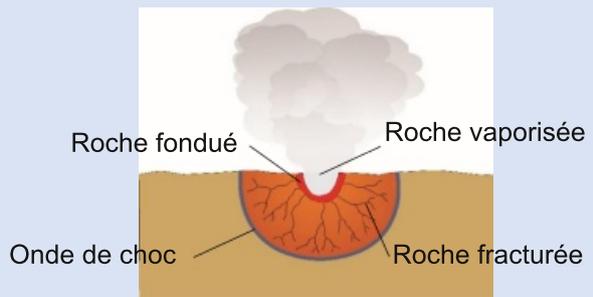


Le cratère Manicouagan, d'une largeur de 100 km, dans la région de la Côte-Nord, au Québec, au Canada, vu depuis la station spatiale internationale - formé par un impact de 215 Ma

La géologie des impacts est inhabituelle car de nombreux événements se produisent en quelques secondes, alors que les géologues étudient habituellement des périodes beaucoup plus longues. Les impacts se déroulent généralement selon les étapes présentées ci-dessous. Le résultat est la forme familière du cratère, illustrée par le cratère Meteor.



Étape 1: Phase de contact et de compression



Directions de mouvement de roches

Débris de roches projetés Débris de roches projetés



Étape 2: Phase d'excavation



Étape 3: Phase de modification



Cratère Meteor (Barringer) près de Flagstaff en Arizona, aux États-Unis, montrant une dépression d'impact typique avec un centre surélevé, entouré par le bord élevé du cratère - formé il y a environ 50 000 ans.

L'ensemble du système terrestre est constitué de très nombreux sous-systèmes. Ceux-ci peuvent être divisés en ceux de la géosphère, de l'hydrosphère, de l'atmosphère et de la biosphère, bien qu'il existe de nombreuses interactions et rétroactions entre ces différents sous-systèmes, comme le montre le chapitre 1.

4.1 La géosphère

La géosphère est la Terre solide. Elle comprend la Terre entière, avec son noyau, son manteau, sa croûte, ses roches, ses minéraux, ses fossiles et ses sols. Elle comprend également tous les processus qui affectent la Terre solide et ses matériaux.

4.1.1 Matériaux et propriétés de la Terre

La partie extérieure de la Terre est formée de roches, elles-mêmes formées de minéraux ou de fragments d'autres roches et souvent recouvertes de sol.

4.1.1.1 Minéraux

Les minéraux sont des substances non organiques formées naturellement avec des structures cristallines et des propriétés fixes. Ils peuvent être constitués d'un seul élément, mais la plupart sont des composés chimiques de deux éléments ou plus. Les substances naturelles n'étant généralement pas aussi pures que les produits chimiques manufacturés, elles peuvent présenter de petites différences en termes de chimie, de structure cristalline et de propriétés physiques. Les différents minéraux peuvent être reconnus par leurs propriétés - les principales sont la couleur, la forme du cristal, la dureté et la façon dont ils se brisent. Certains minéraux ont des propriétés particulières qui facilitent leur identification, comme la réaction de la calcite avec l'acide chlorhydrique dilué, le goût salé de l'halite, ou la haute densité et l'éclat métallique des minerais comme la galène. Les minéraux courants sont présentés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. Minéraux courants, leur chimie, leur forme et leurs propriétés physiques

Nom	Image	Chimie	Forme de bon cristaux	Propriétés physiques
Quartz cristaux provenant de: Localité inconnu		Dioxyde de silicium: SiO_2	Presque hexagonal (forme à 6 cotés)	Généralement blanc, gris ou incolore, mais peut présenter d'autres couleurs pâles ; dur ; difficile à casser.
Feldspath Cristaux provenant de : Rock Creek Canyon, Sierra Nevada, Californie, USA		Silicate de calcium/sodium/potassium ; varie de $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ à $(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$.	Souvent en forme de boîte	Généralement blanc ou gris, parfois rose ; dur ; se brise le long des surfaces planes.

Tableau 4.1. Minéraux courants, leur chimie, leur forme et leurs propriétés physiques, suite

Nom	Image	Chimie	Forme de bons cristaux	Propriétés physiques
Mica Cristaux provenant de : localité inconnue		Silicate complexe de silicium et d'oxygène avec calcium, sodium, potassium, aluminium, magnésium et/ou fer.	Plaques presque hexagonales (à 6 côtés)	Généralement incolore ou noir ; faible dureté ; se brise facilement en feuilles plates.
Calcite Cristaux provenant de: Mine de Nkana, Zambie.		Carbonate de calcium ; CaCO_3	L'éperon en dents de chien est une forme courante, en forme de dents de chien.	Blanc ou incolore ; dureté assez faible ; se casse facilement en cubes écrasés ; réagit à l'acide chlorhydrique dilué.
Halite Cristaux provenant de: Mine de sel de Wieliczka, Pologne		Chlorure de sodium ; NaCl	Forme cubique	Incolore, blanc ou rose ; faible dureté ; se casse très facilement en cubes ; goût salé.
Gypse Cristaux provenant de : localité inconnue		Sulfate de calcium ; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Cristaux minces, forment des "roses du désert" comme celle de l'image.	Incolore, blanc ou rose ; faible dureté ; se brise facilement sur les surfaces planes.
Pyrite Cristaux provenant de : localité inconnue		Sulfure de fer ; FeS_2	Souvent en forme de cube	Brillant, jaune cuivré ; dur ; difficile à casser ; densité élevée.

Tableau 4.1. Minéraux courants, leur chimie, leur forme et leurs propriétés physiques, suite

Nom	Image	Chimie	Forme de bons cristaux	Propriétés physiques
Galène Cristaux provenant de: Mine Gibraltar, Naica, Chihuahua, Mexique.		Sulfure de plomb ; PbS Un minerai de plomb	Souvent en forme de cube	Gris brillant ; faible dureté ; se casse facilement en forme de cubes ; densité élevée.

Encadré 4.1. Un minéral inhabituel : le diamant



Les diamants se forment sous une forte pression dans les profondeurs de la Terre à partir de l'élément carbone. Ils sont remontés à la surface dans des roches volcaniques inhabituelles appelées kimberlites. Le magma ascendant perce des tubes circulaires à travers la croûte terrestre à grande vitesse, transportant les diamants. Les diamants sont extraits des cheminées de kimberlite, comme le "Big Hole" à Kimberley, en Afrique du Sud, illustré sur la photo. Lorsque les kimberlites sont érodées, les diamants sont transportés par les rivières et déposés dans des dépôts alluviaux ; de nombreux diamants sont également extraits de ces dépôts.

Les diamants sont si particuliers car les fortes liaisons atomiques du carbone en font le minéral le plus dur sur Terre. Ils ont également une surface très brillante. Les diamants bruts, comme celui de la photo centrale, peuvent être taillés pour réfléchir encore plus la lumière, ce qui en fait les pierres précieuses les plus précieuses, largement utilisées en joaillerie. Les diamants plus petits sont utilisés pour la coupe et le polissage industriels en raison de leur dureté, et sont également souvent utilisés dans les forêts des dentistes.

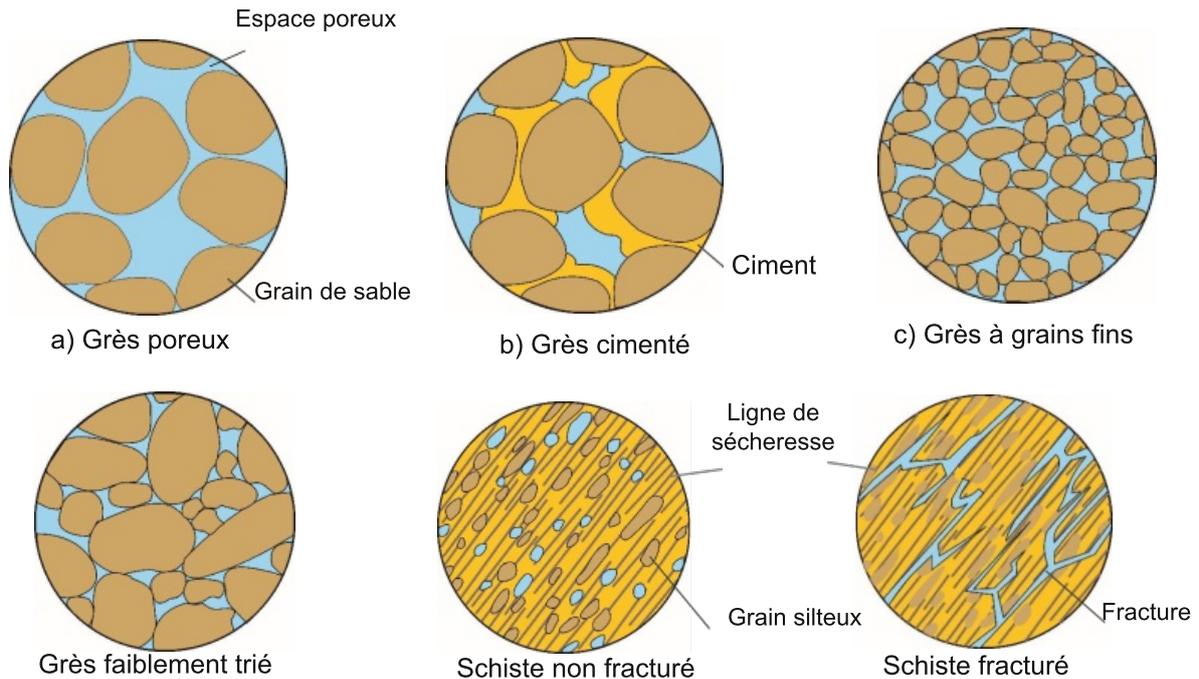
4.1.1.2 Les roches

Les roches sont des substances formées naturellement. Elles sont constituées de minéraux, de fragments d'autres roches ou de fossiles et sont formées par les processus du cycle de la roche décrits dans la section 1.4.4. Les roches sont identifiées et décrites en fonction de leur composition chimique et de leur texture physique. La composition chimique est liée aux minéraux qui forment la roche, tandis que la texture de la roche dépend des types et des tailles des particules et de la façon dont elles sont disposées. Ces caractéristiques sont à leur tour liées à la résistance des roches à l'usure, à leur porosité et à leur perméabilité.

La porosité est la quantité d'espace ou de pores dans une roche, mesurée en pourcentage. Une porosité de 15 % est une porosité élevée pour les roches ; la plupart des roches ont des porosités beaucoup plus faibles que cela. **La perméabilité** d'une roche mesure la vitesse à laquelle les fluides peuvent s'écouler à travers la roche. Les roches à porosité élevée ont une perméabilité élevée si les pores sont suffisamment grands pour que les fluides puissent s'écouler et si les pores sont reliés entre eux. Les roches dont les pores sont très petites, comme les argiles, ne laissent pas passer les fluides et sont donc poreuses mais

impermeables. De même, les trous des bulles de gaz de certaines laves ne sont pas reliés entre eux, de sorte que la roche est là encore poreuse mais imperméable (figure 4.1). Les roches constituées de cristaux imbriqués, ou qui sont bien cimentées ou à grains très fins, empêchent les fluides de s'écouler et sont imperméables, à moins qu'elles ne contiennent des fissures et des fractures. La porosité et la perméabilité contrôlent les quantités de fluides naturels tels que l'eau, le pétrole et le gaz qui peuvent être stockés dans les roches et s'écouler à travers elles.

Figure 4.1. Porosité et perméabilité dans les roches. La porosité et la perméabilité de (a) ont été réduites par du ciment en (b) ; la perméabilité de (c) est assez faible car les espaces interstitiels sont petits ; la perméabilité de (d) est également faible car les espaces interstitiels entre les gros grains ont été remplis par des grains plus petits ; le schiste non fracturé de (e) est imperméable jusqu'à ce qu'il soit fracturé en (f).



Les roches formées de grains comprimés ensemble et/ou cimentés naturellement sont des **roches sédimentaires** - elles peuvent avoir une gamme de compositions et de textures. Les roches sédimentaires les plus courantes sont riches en quartz, feldspath et minéraux argileux. Leur granulométrie peut varier : conglomérats à gros grains (grains arrondis) et brèches (grains anguleux), grès à grains moyens et roches sédimentaires à grains fins comme les mudstones, les shales et les argiles/calcaires. Les calcaires sont également des roches sédimentaires communes et sont formés principalement de fragments de minéraux de carbonate de calcium comme la calcite, provenant le plus souvent de coquillages brisés. Les calcaires peuvent être identifiés parce que le carbonate de calcium réagit avec un acide dilué - une goutte d'acide chlorhydrique sur du calcaire produira une réaction de pétilllement. Les calcaires peuvent être à gros grains ou à grains fins et leur couleur peut aller du gris au crème, jusqu'au blanc de la craie à grains fins.

Les roches ignées et métamorphiques sont formées de cristaux imbriqués qui les rendent normalement très résistantes à l'usure et imperméables, à moins qu'elles ne soient fracturées. Dans les exemples les plus grossiers, les cristaux imbriqués sont visibles à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe.

Les roches ignées étaient autrefois des roches fondues appelées **magma**, et se forment généralement lorsque le magma se refroidit. Au fur et à mesure que le magma refroidissait, des cristaux de minéraux se sont développés jusqu'à s'imbriquer les uns dans les autres, et la roche est devenue solide. Les minéraux de différentes compositions ont des couleurs différentes et se cristallisent à des températures différentes. Les roches ignées sont donc des mélanges de minéraux de différentes couleurs, formes et tailles. Les cristaux ont normalement des orientations aléatoires. La seule exception à la formation de roches ignées par refroidissement du magma est le cas où le magma est expulsé de façon explosive des volcans sous forme de blocs solides ou de cendres volcaniques.

Les roches métamorphiques sont formées à partir de roches sédimentaires, ignées ou métamorphiques plus anciennes par un **métamorphisme** provoqué par une augmentation de la température, de la pression ou des deux. Elles se forment à l'état solide, il n'y a donc pas de fusion (les roches formées par fusion sont des roches ignées). L'augmentation de la température provient soit de la cuisson par un magma proche, soit d'un enfouissement profond. Lorsqu'une pression est impliquée, les roches métamorphiques ne peuvent se former que dans des situations de collision de plaques et non pas simplement par la pression d'enfouissement d'épaisses séquences de roches sus-jacentes. Les roches métamorphiques produites par la seule augmentation de la température ont des cristaux imbriqués orientés de manière aléatoire, tandis que les roches métamorphiques formées par l'augmentation des pressions plate-tectoniques ont des cristaux imbriqués qui sont orientés perpendiculairement aux pressions. Le marbre, étant une roche métamorphique formée de cristaux de carbonate de calcium, réagit avec l'acide chlorhydrique dilué de la même manière que le calcaire.

Ces propriétés permettent de distinguer les trois grands groupes de roches les uns des autres : en étudiant les grains ou les cristaux, en testant la perméabilité (en faisant tomber de l'eau à la surface ou en plongeant des spécimens dans l'eau et en observant les bulles qui s'élèvent), et en grattant les roches avec un ongle ou un morceau de métal, comme une pièce de monnaie. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.2. Le calcaire et le marbre réagissent également avec l'acide chlorhydrique dilué.

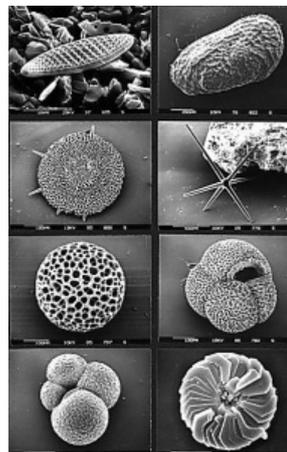
Tableau 4.2. Résultats de tests simples permettant de distinguer les trois principaux groupes de roches

Observation/test Groupe de roches	Examen des grains/ cristaux	Test de perméabilité	Test d'écrasement
Sédimentaire	Grains cimentés ou comprimés ensemble	L'eau s'enfonce ou des courants de bulles s'élèvent de l'échantillon, sauf si les grains sont fins ou bien cimentés.	Facile à rayer, sauf s'il est bien cimenté.
Ignées	Cristaux imbriqués, orientés de façon aléatoire.	L'eau ne s'enfonce pas dans la surface ; les bulles ne s'élèvent pas de l'échantillon.	Difficile à rayer, sauf si elle est bien usée
Métamorphique	Cristaux imbriqués ; orientés de façon aléatoire s'ils ont été formés principalement par la chaleur ; parallèles ou subparallèles s'ils ont été formés conjointement par la pression et la chaleur.	Difficile à rayer, sauf si elle est bien usée	

4.1.1.3 Fossiles

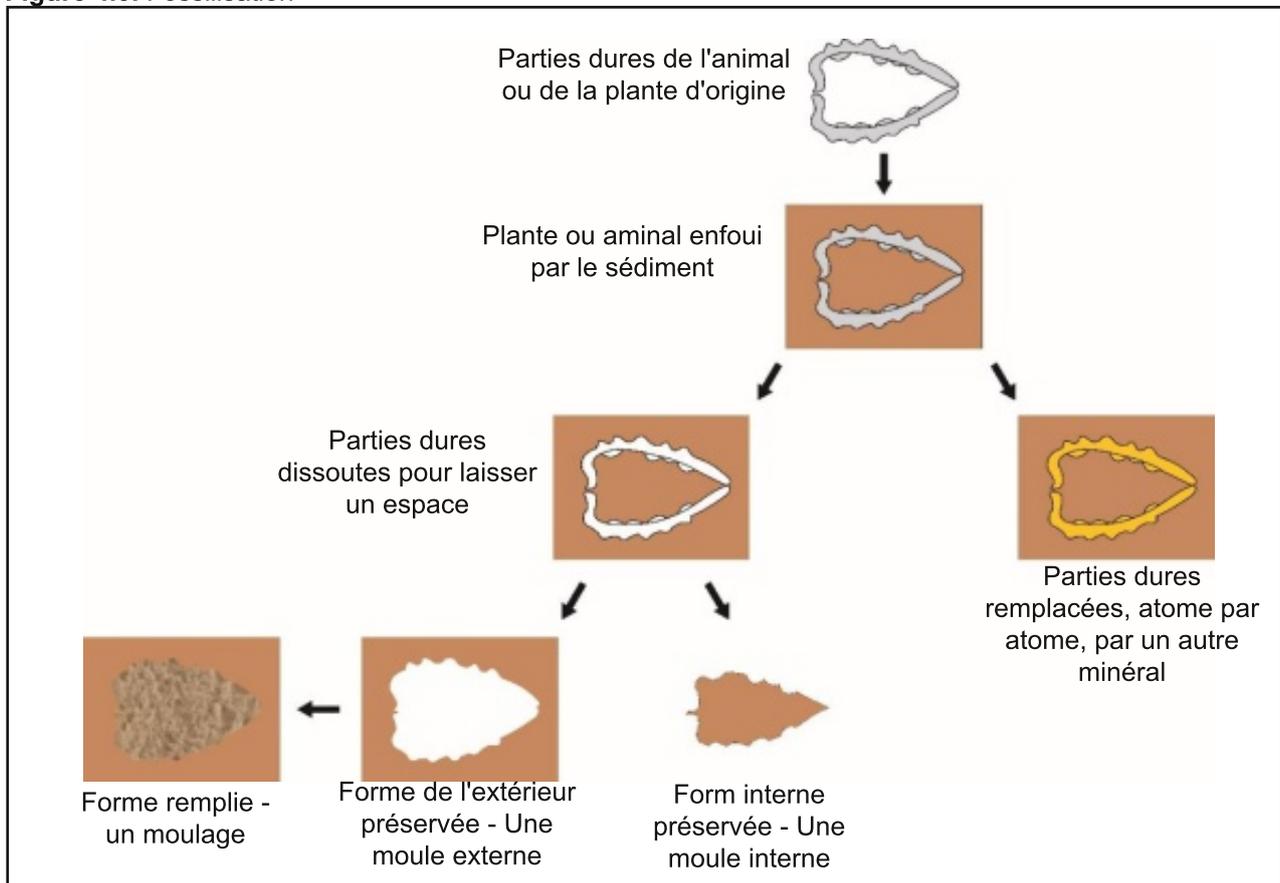
Les fossiles comprennent toute trace préservée de vie et sont généralement considérés comme ayant plus de 10 000 ans. Leur taille varie des plus grands dinosaures aux plus petits microfossiles (figure 4.2.).

Figure 4.2. Argentinosaurus d'Argentine, le plus grand type de dinosaure connu à ce jour, et images au microscope électronique à balayage (MEB) de minuscules microfossiles marins.



On trouve des fossiles dans les roches sédimentaires et dans certaines roches métamorphiques de faible degré (peu métamorphisées). Ce sont les restes préservés des parties dures des organismes, comme les coquilles ou les os, et très occasionnellement les parties organiques molles (peau, fourrure, plumes, etc.). Dans certains cas, les matériaux d'origine ont été remplacés atome par atome par d'autres minéraux, qui peuvent ou non conserver toutes les caractéristiques d'origine. Parfois, les fossiles ont été dissous, laissant des trous (moules) dans la roche environnante. Les moules peuvent avoir été remplis ultérieurement par d'autres matériaux, formant des moulages des fossiles originaux (figure 4.3.).

Figure 4.3. Fossilisation



Les preuves préservées des corps des fossiles sont appelées **fossiles corporels** tandis que les **traces fossiles** sont les signes laissés par les organismes dans les sédiments, tels que les empreintes, les terriers, les forages et les traces de radicelles. Les principaux modes de fossilisation sont présentés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3. Processus importants de fossilisation

processus de fossilisation	Image	Groupe fossile
Enfouissement - Parties molles et dures préservées		Fossile de petit mammifère ressemblant à une musaraigne - montrant les os et la fourrure conservée. Fossile de la formation de Yixian, province de Liaoning, Chine, au début du Crétacé.

Tableau 4.3. Processus importants de fossilisation, suite

Processus de fossilisation	Image	Groupe de fossile
<p>Fossilisation- seules les parties dures sont préservées</p>		<p>Un trilobite Calymene Fossile de la formation Henryhouse, Oklahoma, États-Unis Âge silurien</p>
<p>Remplacement - minéral original remplacé par un nouveau minéral</p>		<p>Ammonite, formée à l'origine de carbonate de calcium, aujourd'hui pyrite Fossile de Bully Calvados, France Âge jurassique</p>
<p>Formation de moisissures</p>		<p>Moule interne et externe d'un gastéropode de type escargot (le fossile lui-même a été dissous, laissant la forme de l'intérieur et de l'extérieur de la coquille). Fossile de la formation de Galena, Iowa, États-Unis Âge ordovicien</p>
<p>Moulage-formation</p>		<p>Moulage d'une empreinte de dinosaure ; le dinosaure a laissé son empreinte dans de la boue qui a durci avant d'être remplie de sable ; la boue a été retirée et le grès a été retourné pour révéler le moulage de grès. Fossile de la formation d'Ashdown, Fairlight, Sussex, Angleterre.</p>

Tableau 4.3. Processus importants de fossilisation, suite

Processus de fossilisation	Image	Groupe de fossile
Traces de fossiles - terriers et sentiers		Des terriers et le lieu de repos d'un trilobite. Fossiles de la formation de Gog, Lake Louise, Alberta, Canada Âge cambrien
Traces de fossiles - traces de radicelles		Traces de racines d'une plante Lepidodendron fossile (corps fossile) avec traces de radicelles (moisissures - traces fossiles) Fossile provenant du nord-est de l'Ohio, États-Unis Âge carbonifère

4.1.1.4 Roches sédimentaires

Les roches sédimentaires ont été déposées sous forme de sédiments et sont identifiées par leur composition minérale et leur granulométrie (tableau 4.4). Les roches sédimentaires sont généralement perméables, sauf si elles sont bien cimentées ou à grain fin, et la plupart sont faciles à gratter. Les grains sont faciles à voir dans les roches de type sable, mais généralement impossibles à voir dans les roches de type boue, même avec une loupe.

Tableau 4.4. Classification des roches sédimentaires.

Composition chimique		Riche en silice	Riche en carbonate de calcium	Riche en chlorure de sodium	Riche en carbone
Caratéristiques		Les roches sédimentaires les plus courantes ; résistantes si elles sont bien cimentées, sinon faciles à rayer ; généralement gris foncé ou pâle, brun, crème ou rouge.	Réagissent à l'acide chlorhydrique dilué ; faciles à rayer ; généralement gris pâle, crème ou blanc.	Composé d'halite au goût salé ; cristaux cubiques ; très facile à rayer ; rose, blanc ou incolore.	Très facile à gratter ; se casse souvent en formes cubiques ; noire ; peut contenir des fossiles de plantes.
Types de roches communes - voir tableau 4.5					
Taille de grain	Fin < 0,0625 mm	Mudstone ; shale ; argile ; claystone	Calcaire, charbon	Roche salée	Charbon
	Moyen 0,0625 - 2 mm	Grès, Siltite	Calcaire		
	Gros >2 mm	Conglomérat, brèche			

La plupart des sédiments sableux sont déposés en lits, tandis que les boues sont déposées en couches plus fines appelées laminations. Au fur et à mesure que les sédiments s'enfouissaient, les boues étaient comprimées en mudstones, schistes ou argiles/calcaires plus compacts et les boues calcaires étaient comprimées en calcaire ou craie, à mesure que l'eau était extraite.

Pendant ce temps, l'eau s'écoulait à travers les espaces interstitiels des sédiments plus grossiers, tels que les lits de galets, les sables et les sables coquilliers, et les minéraux cristallisaient à partir de l'eau comme un ciment naturel, qui collait les grains ensemble ; ces sédiments se sont lithifiés en conglomérats à gros grains et en grès ou calcaires à grains moyens, comme le montre le tableau 4.5. Ainsi, pour les roches sédimentaires, les deux principaux processus de formation de la roche sont la **compaction** et la **cimentation**.

Tableau 4.5. Roches sédimentaires communes

Roches sédimentaires	Image Spécimen	Image Exposition	Source de l'image d'exposition
Conglomérat			Exposition de conglomérat, près de San Sebastian, Espagne Âge crétacé
Grès crème			Grès crème à lits croisés, île de Bressay, îles Shetland, Royaume-Uni Âge dévonien
Grès rouge			Grès rouge de Navajo à Antelope Canyon, Arizona, États-Unis. La couleur rouge est due au ciment de fer hématite. Âge trias/jurassique
Argilite			Argilite rouge du Permien avec des lits de siltstone plus pâles, Bassin de Lodève, Hérault, la Lieude, Mérifons, France.

Tableau 4.5: Roches sédimentaires communes (suite)

Roches sédimentaires	Spécimen	Image Exposition	Source de l'image d'exposition
Shale			Shale marin, Slate Hill Road, Marcellus, New York, États-Unis Âge dévonien
Argile			Argile, Estonie Âge quaternaire
Calcaire fossilifère			Calcaire fossilifère de l'arc et de la pile du Green Bridge of Wales, Pembrokeshire, Pays de Galles Âge carbonifère
Calcaire oolithique			Calcaire oolithique du Jura dans la carrière de Rothenstein III, région du Jura, France Âge du carbonifère
Craie			La haute falaise de craie de MØn, Danemark Âge crétacé

Tableau 4.5: Roches sédimentaires communes (suite)

Roches sédimentaire	Spécimen	Image Exposition	Source de l'image d'exposition
Sel de roche			Grotte de sel du Colonel, Israël. Les expositions naturelles de sel ne se trouvent que sous terre, car le sel se dissout dans l'eau.
Charbon			Filon de charbon plongeant avec une ancienne entrée de mine, formation de Stellarton, Nouvelle-Écosse, Canada Âge carbonifère

Encadré 4.2. Une roche sédimentaire inhabituelle - le chert (ou silex)



Le chert se présente sous forme de blocs appelés nodules dans les calcaires à grains fins (photo de droite). Lorsqu'il se trouve dans la craie, il est appelé silex (photo de gauche) et était utilisé à l'époque préhistorique pour fabriquer des pointes de flèches et d'autres outils tranchants.

Le chert et le silex se forment lorsque de fines boues calcaires se déposent dans des conditions calmes au fond de la mer et que des organismes microscopiques morts composés de silice (dioxyde de silicium) se déposent en même temps. Lorsque la boue calcaire est comprimée en calcaire ou en craie, la silice se dissout dans l'eau entre les particules. Elle se recristallise ensuite en nodules de chert/flint à grain très fin, qui se développent dans la roche au fil du temps. Les nodules ont des formes arrondies et des tailles bizarres et se trouvent souvent en couches. Les plages situées sous les falaises de craie sont généralement constituées de galets de silex très durs, car la craie est érodée par la mer.

4.1.1.5 Roches ignées

Les roches ignées se sont formées à partir d'un magma autrefois en fusion, soit lorsque le magma s'est refroidi et cristallisé, soit lorsqu'il est entré en éruption explosive dans un volcan. La plupart des roches ignées sont imperméables et résistent aux rayures grâce à leurs cristaux imbriqués ; elles sont identifiées par la taille de leurs cristaux et leur composition chimique. Les cristaux des roches à gros grains sont faciles à voir, ceux des roches à grains moyens nécessitent une loupe et les cristaux des roches à grains fins sont généralement impossibles à voir sans microscope. Les roches à grain grossier formées par le refroidissement lent d'un magma en profondeur sont appelées **roches plutoniques** ; les roches ignées à grain fin ont été éjectées sous forme de **roches volcaniques**.

La composition chimique de la roche est liée aux minéraux présents et ceux-ci produisent la couleur générale de la roche. Les roches riches en fer et en magnésium ont des minéraux riches en fer/magnésium de couleur sombre, tandis que les roches riches en silicium ont principalement des minéraux de couleur pâle comme le feldspath et le quartz. Cela donne le système de classification du tableau 4.6.

Tableau 4.6. Classification des roches ignées

Composition chimique		Riche en Fer/magnésium	Intermédiaire	Riche en silicium
Caractéristiques		Minéraux sombres; couleur sombre; densité élevée (Sentir lourd)	Caractéristiques intermédiaires	Minéraux pâles, couleur pâle, roche de densité normale
Taille du cristal	Fin (<1 mm)	Basalte	Andésite	Cendre volcanique
	Moyen (1-3 mm)	Dolérite	Inconnue	Inconnue
	Gros (> 3 mm)	Gabbro	Inconnue	Granite

Tableau 4.7: Roches ignées communes

Roches ignées	Image		Source de l'image d'exposition
	Spécimens	Exposition	
Granite			Expositions de granite, Mount Hope, Victoria, Australie Âge dévonien
Gabbro			Gabbro d'Ukraine dans un mur géologique dans le parc botanique populaire, Blankenfelde Pankow, Berlin, Allemagne
Dolérite			Dyke de dolérite au bord d'une rivière, Agwa Rock, parc provincial du lac Supérieur, Canada

Tableau 4.7: Roches ignées communes (suite)

Roches ignées	Image		Source d'image d'exposition
	Spécimen	Exposition	
Basalte			Colonnes de basalte (formées lors du refroidissement du basalte) à la Chaussée des Géants, Irlande du Nord Âge tertiaire
Andésite			Coulées de lave andésitique, volcan Stewart Peak, Colorado, États-Unis Âge tertiaire
Cendre volcanique			Cendres volcaniques déposées sous forme de couches de tuf dans les îles Éoliennes près de la Sicile, Italie Âge quaternaire

Encadré 4.3. Une roche ignée inhabituelle - le verre volcanique



Comme les autres roches ignées, le verre volcanique est formé par le refroidissement du magma. Lorsque le magma se refroidit lentement sous terre, de gros cristaux ont le temps de se former. Lorsqu'il fait éruption sous forme de lave à la surface, il se refroidit beaucoup plus rapidement et présente donc des cristaux beaucoup plus petits, comme le basalte, une lave à grains fins. Si le refroidissement est encore plus rapide, les atomes du liquide n'ont pas le temps de se rassembler en cristaux, et le verre se forme. Le verre volcanique de cette coulée de lave, de ce spécimen et de ce couteau préhistorique s'est formé ainsi. Le verre à vitre et le verre à bouteille sont fabriqués en refroidissant de la même manière la silice fondue.

4.1.1.6 Roches métamorphiques

Les roches métamorphiques se forment lorsque des roches sédimentaires, ignées ou métamorphiques plus anciennes recristallisent à l'état solide sous l'effet d'une chaleur et/ou d'une pression accrues. Les roches ne fondent pas au cours du métamorphisme, sinon elles deviendraient des roches ignées.

La plupart des roches métamorphiques résultent de l'augmentation de la chaleur et de la pression lors de la formation des montagnes causée par la collision des plaques. C'est le **métamorphisme régional**. Dans ces conditions intenses, certains minéraux se transforment en d'autres minéraux, certains minéraux recristallisent pour devenir plus fins et plus longs, tandis que d'autres minéraux tournent jusqu'à être alignés à angle droit par rapport à la direction de la pression.

Les roches métamorphiques se forment également lorsque des roches sont cuites par un corps igné chaud situé à proximité. Comme la recristallisation des minéraux se fait principalement par la chaleur et qu'il n'y a pas de pression tectonique, les cristaux des nouvelles roches sont orientés de manière aléatoire.

Le type de roche métamorphique formé par la chaleur et la pression (métamorphisme régional) ou principalement par la chaleur (**métamorphisme thermique**) dépend de la composition de la roche d'origine, comme le montre le tableau 4.8.

Tableau 4.8. Classification des roches métamorphiques

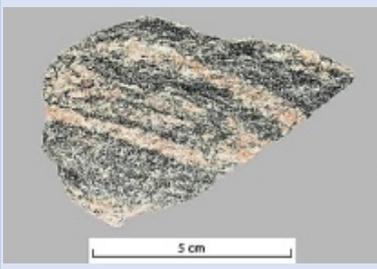
Composition du minéral		Minéraux de quartz et argile dans le siltite ou shale	Quartz dans le Grès	Calcite dans le calcaire
Types de roches métamorphiques régionales communes - voir tableau 4.9				
Augmentation de la chaleur et de la pression ↓	Bas degré	Ardoise	Métaquartzite (quartzite)	Marbre
	Moyen degré	Schiste		
	Haut degré	Gneiss		
Types de roches métamorphiques thermiques communes				
Augmentation de la température		Cornéenne	Quartzite	Marbre

Comme les roches métamorphiques sont constituées de cristaux imbriqués, elles sont généralement imperméables et résistent mieux aux rayures que la plupart des roches sédimentaires. Les roches métamorphiques régionales peuvent être identifiées grâce à leurs minéraux alignés. Dans les ardoises à grains fins, ils produisent des faiblesses dans la roche, qui peut être brisée en fines feuilles le long des faiblesses ou des plans de clivage. Dans les schistes à grains plus grossiers, on peut voir les minéraux alignés refléter la lumière par éclairs lorsqu'on déplace un spécimen. Les minéraux forment des bandes dans les gneiss ; parfois, les bandes sont déformées en plis complexes. Il est difficile de voir un alignement de minéraux dans la métaquartzite ou le marbre et donc de distinguer la métaquartzite et le marbre régionaux du métamorphisme thermique. La métaquartzite ressemble à un grès dur et sucré imperméable ; le marbre peut également avoir l'air sucré, mais il réagit à l'acide chlorhydrique dilué. La cornéenne est également dure et, étant une roche métamorphique thermique, elle est formée de minéraux orientés de manière aléatoire, mais ceux-ci sont généralement impossibles à voir dans cette roche à grain fin.

Tableau 4.9. Roches métamorphiques communes

Roches métamorphiques	Image		Source de l'image d'exposition
	Spécimens	Exposition	
Ardoise			Ardoise dans une coupe de route protégée par des ancrages rocheux et un grillage, Monts Rothaar, Rhin du Nord, Allemagne Âge dévonien

Tableau 4.9. Roches métamorphiques communes, suite

Roches métamorphiques	Spécimens	Image Exposition	Source de l'image d'exposition
Schiste			Mica schiste, La Pierre Blanche, île de Groix, Bretagne, France Âge dévonien
Gneiss			Mica schisteux, La Pierre Blanche, île de Groix, Bretagne, France Âge dévonien
Marbre			Bloc de marbre dans la carrière de Carrare, en Italie - largement utilisé comme pierre de construction et pour la sculpture de statues Âge jurassique
Métaquartzite (Quartzite)			Exposition de métaquartzite, El Castellar, Saragosse, Espagne Âge ordovicien

4.1.1.7 Le sol

Le sol résulte de l'interaction entre la vie et les matériaux de surface de la Terre - ainsi, là où il n'y a pas de vie, il n'y a pas de sol. Le sol se forme grâce aux interactions entre la géosphère solide, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère. Les sols se forment sur des matériaux de surface meubles, comme les dépôts fluviaux ou glaciaires, ou par l'altération biologique de la roche-mère. Les nombreux sols différents qui peuvent se former dépendent de nombreux facteurs, notamment le climat, l'altitude, la pente et le type de roche ou d'autres matériaux de surface.

Les sols ont presque toujours une couche de surface ou couche arable, généralement de couleur sombre. La couche superficielle est la principale zone d'implantation des racines des plantes ; de nombreux micro-organismes et animaux comme les vers y vivent et c'est là que l'on trouve la plupart des matières organiques en décomposition ou humus. Les principaux constituants de la couche arable sont donc : la vie animale et végétale, l'humus, les sédiments ou fragments de roche, l'eau et l'air. De petites quantités de terre arable contiennent des milliards de plantes et d'animaux microscopiques appartenant à des milliers d'espèces différentes.

Sous la couche superficielle de la plupart des sols se trouve une zone de sous-sol où des matériaux à grain fin s'accumulent après avoir été entraînés vers le bas par l'eau du sol ; c'est là que se produisent la plupart des changements chimiques. La base d'un sol est la roche-mère ou tout autre matériau de surface original.

Le sol est un élément clé de l'écosystème de la Terre ; toutes les grandes plantes poussent dans le sol. Il constitue un habitat essentiel pour un large éventail d'autres plantes et d'animaux, et est à la base de toute l'agriculture. Il recycle les nutriments et les déchets organiques et influe sur la qualité de l'eau qui y circule. Le sol interagit également avec les gaz de l'atmosphère. La meilleure couche arable pour la croissance des plantes se compose d'environ la moitié de matériau solide et l'autre moitié d'espace, rempli d'eau ou d'air. La matière solide est un mélange de sable, de limon et d'humus organique ; différents mélanges de sable, de limon, d'argile et d'humus donnent une gamme de types de sol différents.

Les agriculteurs essaient de rendre les sols plus productifs en y ajoutant différents constituants. Dans les régions où les sols sont acides, on ajoute de la chaux (oxyde/hydroxyde de calcium - $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour les neutraliser. Dans d'autres régions, l'ajout d'argiles améliore les sols, tandis qu'ailleurs, l'ajout de fumier animal ou d'engrais de potassium et d'azote augmente la productivité des sols.

Figure 4.4. Séquence pédologique à Altenberg, Allemagne



Encadré 4.4. Charles Darwin et le sol



Charles Darwin a été l'une des premières personnes à comprendre l'importance des vers de terre dans la formation du sol. Il avait remarqué qu'une couche de chaux blanche à base de carbonate de calcium qui avait été déposée sur le sol d'un champ anglais plusieurs années auparavant formait maintenant une couche de plusieurs centimètres sous terre. Il pensa que cela devait être dû à l'action des vers de terre et construisit sa propre lombriculture pour étudier son idée. Il a publié ses idées sur l'importance des vers de terre dans la formation du sol en 1881.

Photos d'un lombricompostage artisanal dans une bouteille en plastique coupée - avant l'ajout de vers de terre et après plusieurs jours d'activité des vers de terre.

4.1.2 **Processus de la Terre et caractéristiques observées**

Les processus terrestres sont reliés entre eux par le cycle des roches, illustré à la figure 1.7. Le cycle des roches comprend les processus superficiels d'altération, d'érosion, de transport et de dépôt qui sont étroitement liés à la partie superficielle du cycle de l'eau. Après leur dépôt, les sédiments peuvent être enfouis par les sédiments sus-jacents lorsque le compactage et la cristallisation du ciment naturel les transforment en roches sédimentaires.

Les processus de la tectonique des plaques entraînent la partie interne du cycle des roches, déformant les roches, provoquant le métamorphisme, l'activité ignée et le soulèvement des roches à la surface, où elles sont à nouveau attaquées par les processus de surface.

4.1.2.1 Processus de surface

L'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère interagissent avec la géosphère, façonnant le paysage et formant et déposant des sédiments. Les roches de surface sont attaquées par la météorisation et l'érosion. L'altération est la désagrégation (rupture physique) et la décomposition (décomposition chimique) des matériaux à la surface de la Terre sans élimination de matériaux solides. L'érosion est l'enlèvement de matériaux solides, qui peuvent ensuite être transportés plus loin.

Bien que les processus d'altération aient tendance à agir ensemble, ils peuvent être divisés en effets physiques, chimiques et biologiques distincts, comme le montre le tableau 4.10.

Tableau 4.10. Processus d'altération courants

	Processus	Description	Image	Source
Physique	Gel/dégel	L'eau pénètre dans les fissures, gèle, se dilate, puis dégèle et s'infiltré plus profondément ; au fur et à mesure que les cycles de gel/dégel se poursuivent, la fissure s'élargit. Important lorsque le gel et le dégel sont fréquents, comme au sommet des montagnes.		Bloc rocheux cassé, sud de l'Islande
	Chauf-fage/refroi-dissement	Les roches deviennent très chaudes le jour et très froides la nuit ; comme les minéraux se dilatent et se contractent à des vitesses différentes, la roche est fragilisée et se fissure. Important dans les régions chaudes qui deviennent très froides la nuit.		Feuilles de granit se détachant sous l'effet de la chaleur et du froid, Half Dome, parc national de Yosemite, États-Unis.
Chimique	Eau acide sur le calcaire et le marbre	L'eau de pluie dissout le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère et absorbe davantage de CO ₂ en traversant le sol. L'acide carbonique faible dissout le carbonate de calcium. Lorsque le calcaire est dissous le long des joints, ceux-ci s'élargissent et des grottes peuvent se former.		Pavage de calcaire carbonifère avec des joints élargis (grykes), Doolin Quay, Irlande.
	Oxydation du grès et du quartzite	L'eau de pluie s'écoule le long des joints, oxydant (rouillant) les minéraux de fer pour obtenir des couleurs jaune, brun et rouge vives.		Altération chimique le long d'un joint dans la formation Khondalite Rock à la plage de Rushikonda, Visakhapatnam, Inde.

Tableau 4.10. Processus d'altération courants, suite

	Processus	Description	Image	Source
Biologique	Lichens et mousses	Les lichens sont les premières plantes à coloniser la roche nue. Leurs minuscules radicelles se développent dans les pores entre les grains de roche, et affaiblissent la roche lorsque le lichen sèche et se contracte. Ils ont également des effets biochimiques. Les lichens sont souvent suivis par les mousses, puis par les sols		Lichens poussant sur une roche nue, États-Unis
	Formation du sol	Les effets biologiques de l'altération de la roche produisent du sol.		Couches de sol dans la vallée du Rhin près de Rastatt, Allemagne

L'érosion est l'enlèvement de matériaux solides. Les paysages sont modelés et les sédiments sont formés par quatre grands processus d'érosion, comme le montre le tableau 4.11.

Tableau 4.11. Processus d'érosion importants

	Processus	Description	Image	Source
Eaux en mouvement (dans les rivières et la mer)		L'eau qui coule ramasse et érode les particules et transporte également des sédiments qui érodent la roche-mère. La plupart des phénomènes d'érosion se produisent pendant les inondations, lorsque les berges des rivières peuvent s'effondrer de façon catastrophique.		Effondrement de berge dû à l'érosion, rivière Tista, Sundarganj Thana, Bangladesh
		Les vagues et les sédiments qu'elles transportent érodent le pied des falaises côtières, provoquant souvent des chutes de pierres. Ces derniers sont ensuite brisés par les vagues.		Plage fermée par un éboulement dû à l'érosion côtière, Oddicombe, Devon, Angleterre

Tableau 4.11. Processus d'érosion importants, suite

Processus	Description	Image	Source
Gravité	Les fragments de roche, souvent affaiblis par les intempéries, tombent sous l'effet de la gravité. Les éboulements à grande échelle produisent des éboulis en pente qui ont des formes coniques sous les ravines. L'érosion par gravité comprend les chutes de pierres et les roches glissantes, des glissements de terrain.		Cônes d'éboulis, lac Bow près de Crowfoot Mountain, Alberta, Canada
L'air en mouvement (le Vent)	Le vent érode des particules de la taille du sable, du limon et de la boue ; le sable peut former des dunes locales, mais le limon et la boue peuvent être transportés loin sous forme de nuages de poussière.		Nuage de tempête de sable soufflant sur Al Asad, Irak
	Érosion éolienne d'un affleurement rocheux par un vent fort : plus de grains de sable touchent et érodent la base de l'affleurement que le sommet, ce qui explique pourquoi la base est si étroite.		Nuage de tempête de sable soufflant sur Al Asad, Irak
Glace en mouvement (Glacier)	Bien que la glace elle-même ne puisse pas éroder le substrat rocheux, les sédiments qu'elle transporte le peuvent. Lorsque les nappes de glace ou les glaciers se déplacent, le substratum rocheux est érodé dans le sens du mouvement de la glace, ce qui crée des rayures ou des stries. Les débris transportés par la glace sont broyés en même temps.		Personne sur un socle rocheux rayé par le mouvement glaciaire, glacier de Gorner, Zermatt, Suisse

Ensemble, l'altération et l'érosion façonnent le paysage. La résistance des roches aux intempéries et à l'érosion dépend de la stabilité chimique des minéraux à la surface de la Terre et de la façon dont les grains de la roche sont liés entre eux. Les roches formées de cristaux imbriqués et de grains bien cimentés ont tendance à résister à l'érosion et à former des terres plus élevées, des falaises côtières et des promontoires, tandis que les roches moins résistantes forment des vallées et des baies. L'angle de pendage des roches résistantes et d'autres caractéristiques géologiques contrôlent souvent la forme du paysage, produisant une variété de reliefs et de caractéristiques côtières (tableau 4.12).

Tableau 4.12. Formes de terrain formées par des couches de roches résistantes

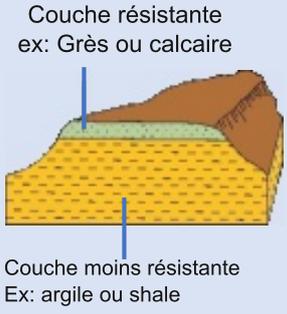
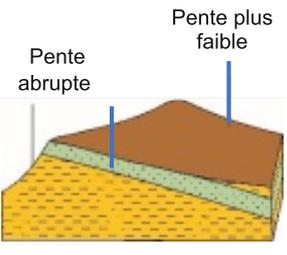
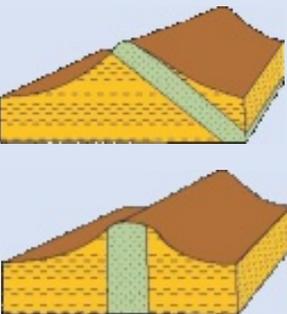
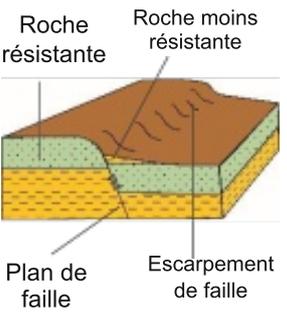
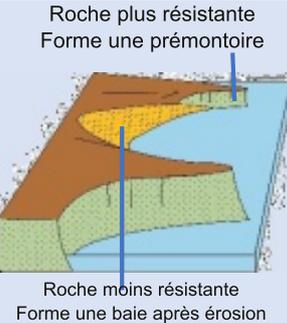
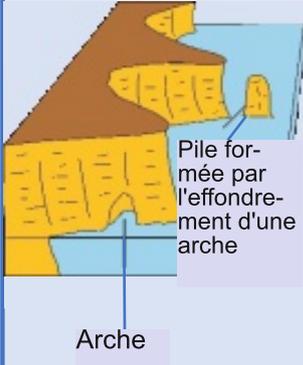
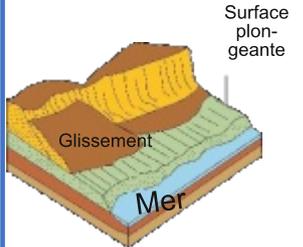
Forme de terrain	Description	Schéma	Image	Source
Plateau	Les plateaux ont des sommets plats et des côtés plus abrupts. Ils se forment lorsque des roches résistantes sont horizontales ou presque (les plateaux peuvent également se former en tant que surfaces d'érosion sur différentes roches).	 <p>Couche résistante ex: Grès ou calcaire</p> <p>Couche moins résistante Ex: argile ou shale</p>		Plateau de la montagne de la Table, Le Cap, Afrique du Sud
Cuesta	Les cuestas ont une pente plus forte dans une direction et une pente plus faible dans l'autre direction. Elles se forment lorsque des roches résistantes ont une faible pente (pendage).	 <p>Pente abrupte</p> <p>Pente plus faible</p>		Cuesta vue depuis le ferry de l'île Victoria, Vancouver, Canada
Crête	Les crêtes ont des pentes raides dans deux directions et se forment lorsque les roches résistantes ont un fort pendage ou sont verticales.			Crête, Mont Rundle, près de Banff, Alberta, Canada
Escarpe-ment de faille	Lorsque les roches d'un côté d'une faille sont plus résistantes que l'autre, un escarpement de faille se forme souvent.	 <p>Roche résistante</p> <p>Roche moins résistante</p> <p>Plan de faille</p> <p>Escarpe-ment de faille</p>		Escarpe-ment de faille d'Abert Rim, Oregon - l'un des plus hauts des États-Unis
Promon-toire et baie	Lorsque certaines roches côtières sont plus résistantes que d'autres, des promontoires et des baies se forment.	 <p>Roche plus résistante Forme un promontoire</p> <p>Roche moins résistante Forme une baie après érosion</p>		Une baie entre des promontoires, Cabo de la Vela, Colombie

Tableau 4.12. Formes de terrain formées par des couches de roches résistantes, suite

Forme de terrain	Description	Schéma	Image	Source
Falaise côtière	Lorsque les roches résistantes sont horizontales ou s'inclinent en s'éloignant de la mer, des falaises abruptes se forment normalement, souvent avec des caractéristiques telles que des arches et des cheminées.	 Pile formée par l'effondrement d'une arche Arche		Falaises abruptes et arche, Island Archway, Great Ocean Road, Victoria, Australie.
Pente côtière	Lorsqu'il n'y a pas de roches résistantes ou que les couches rocheuses sont inclinées vers la mer, des pentes côtières peu profondes se forment généralement.	 Surface plongeante Glissement Mer		Falaises côtières qui s'effondrent, Shippards Chine, île de Wight, Angleterre

L'érosion est très active dans des conditions de haute énergie comme les tempêtes. Après que les sédiments ont été érodés, par la gravité, l'eau en mouvement, le vent ou la glace, ils sont transportés ; ils sont souvent déposés et érodés plusieurs fois pendant le transport. La plupart des dépôts permanents se produisent dans des conditions plus calmes, à faible énergie. Certaines caractéristiques du paysage dépendent davantage de l'érosion et du dépôt que des caractéristiques des roches sous-jacentes, comme le montre le tableau 4.13.

Tableau 4.13. Caractéristiques du paysage formées principalement par l'érosion et le dépôt

	Processus	Description	Image	Source
Erosion	Par mouvement d'eau	L'eau qui s'écoule érode la roche-mère à la base des vallées des hautes terres, les rendant plus profondes. Lorsque les matériaux glissent le long des parois, elles prennent souvent la forme d'un V.		Vallée fluviale en forme de V, Goriot, Pakistan
	Par mouvement de glace	Les glaciers qui dévalent les vallées des hautes terres érodent à la fois les côtés et la base des vallées, produisant des vallées en forme de U.		Vallée glaciaire en U du Prapic près d'Orcières, Hautes-Alpes, France

Tableau 4.13. Caractéristiques du paysage formées principalement par l'érosion et le dépôt, suite

		Processus	Description	Image	Source
Dépôt	Par l'eau dans les plaines d'inondation		Lorsque les rivières débordent, l'eau s'écoule sur les plaines d'inondation de chaque côté, déposant des couches de boue et de limon. Les couches de boue s'accumulent pour former de larges plaines d'inondation plates, traversées par les méandres des rivières.		Canaux sinueux de la plaine d'inondation du Zambèze en Namibie, vus du ciel ; piste d'atterrissage en bas à droite.
	Par l'eau des lacs et des mers		Les rivières transportant des sédiments dans les lacs et les mers calmes déposent les sédiments, formant des deltas souvent en forme d'éventail.		Le delta de Silvaplana se déversant dans le lac de Silvaplana, en Suisse
	Par la fonte des glaces		La fonte des glaces dépose des mélanges de rochers et d'argile (till) aux extrémités et sur les côtés des glaciers et aux endroits où la fonte des glaces a eu lieu. Ces dépôts bosselés sont appelés moraines.		Le glacier Isunnguata Sermia en arrière-plan a déposé la moraine au premier plan, Kangerlussuaq, Groenland

De nos jours, l'homme peut déplacer chaque année plus de sédiments que tous les fleuves du monde réunis, par le biais des mines, des carrières, de la construction et de l'agriculture. Malgré cela, la plupart des formations paysagères restent naturelles et il en sera toujours ainsi.

4.1.2.2 Processus sédimentaires

La météorisation et l'érosion produisent des sédiments, qui sont décomposés pendant le transport. Les fragments de roche s'arrondissent. Les minéraux moins stables se décomposent, généralement en minéraux argileux, tandis que les minéraux plus stables, comme le quartz, sont broyés. Dans des conditions plus calmes, les fragments de roche, le quartz, l'argile et d'autres minéraux se déposent et les sédiments s'accumulent. Les sables et boues calcaires, formés de minéraux de carbonate de calcium, se déposent généralement dans les mers chaudes et peu profondes des régions tropicales et subtropicales et peuvent ensuite se lithifier en calcaire.

Les sédiments forment une série de structures sédimentaires au fur et à mesure de leur dépôt, qui témoignent de la manière dont ils se sont déposés, comme le montre le tableau 4.14.

Tableau 4.14. Structures sédimentaires importantes

Structure sédimentaire	Description	Image	Source
Litage	En général, les sédiments ne se déposent pas de manière régulière, mais souvent, chaque couche est déposée dans la précipitation, avec des temps plus calmes ou même de l'érosion entre les deux. Les couches de sédiments à grain moyen et grossier sont appelées lits ; les roches sont des lits.		Grès et siltstones lités, Quebrada das Conchas, Salta, Argentine
Lamination	Les boues sont également souvent déposées en couches, mais il s'agit de couches beaucoup plus fines appelées laminations .		Argilite stratifiée, Hesselberg, Allemagne ; Jurassique inférieur
Stratification entrecroisée	La stratification croisée se forme lorsque le sable est déposé dans les dunes. Le sable est transporté d'un côté de la dune et tombe en cascade sur le front sous la forme d'une série de lits inclinés vers le bas. Les dunes formées par l'eau produisent des lits croisés à petite échelle, généralement inférieurs à 1 m d'épaisseur, tandis que les vents produisent des lits croisés de dunes pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur.		Grès à lit croisé à grande échelle (formé par le vent), sentier d'Angel's Landing, parc national de Zion, Utah, États-Unis ; vent de droite
Ripple mark asymétrique	Les courants d'eau sur le sable, plus lents que ceux qui forment les lits croisés, forment plutôt des marques de rides asymétriques. L'eau s'écoule vers le haut du côté peu profond et dépose le sable sur le côté plus abrupt des rides. Les rides formées par l'eau peuvent être des lobes ou des lignes droites, mais les rides asymétriques formées par le vent sont généralement droites.		Grès cambrien marqué par des ondulations asymétriques, Wiśniówka Duża, Pologne ; direction de l'écoulement de l'eau du haut vers le bas du plan de litage
Ripple mark symétrique	Les rides symétriques sont formées par les vagues dans les eaux peu profondes. Elles présentent des pentes égales de chaque côté et se forment généralement en lignes droites et parallèles. Les crêtes des vagues qui forment les rides sont parallèles à celles-ci et sont souvent parallèles à la côte.		Grès fin marqué par des ondulations symétriques, Sierras Bayas, Olavarria, Argentine. Les crêtes des vagues se sont déplacées du haut à gauche vers le bas à droite

Tableau 4.14. Structures sédimentaires importantes, suite

Structure sédimentaire	Description	Image	Source
Litage dégradé	Lorsqu'un courant transportant des sédiments de tailles diverses ralentit, les plus grosses particules se déposent en premier, puis des grains de plus en plus fins se déposent sur le dessus, formant un lit unique de sédiments qui va du grossier en bas au fin en haut ; le litage graduel peut être utilisé pour montrer qu'une séquence de sédiments n'a pas été renversée par un plissement.		Litage dégradé - Gravier éocène dans un mur de jardin près de Besalú en Catalogne, Espagne
Fentes de dessiccation (Fentes de boue)	Lorsque la boue se dessèche, elle se fissure en formes polygonales ; si les fissures sont ensuite remplies de sable, elles sont souvent préservées. Ces fissures de dessiccation montrent que la boue a dû s'assécher et ne peut donc pas être une boue d'eau profonde.		Fentes de dessiccation autour d'une empreinte de dinosaure dans une argile, Loulle, Franche-Comté, France.

Si les sédiments sont déposés dans des régions en subsidence, ils peuvent devenir des séquences sédimentaires épaisses. Après l'enfouissement, les sédiments fins sont compactés et les sédiments plus grossiers sont comprimés et cimentés en roches sédimentaires.

Beaucoup plus tard, le mouvement de la tectonique des plaques peut soulever la séquence de roches sédimentaires. Lorsque les roches sédimentaires soulevées sont érodées, les sédiments font à nouveau partie du cycle sédimentaire. Le cycle sédimentaire est une partie du cycle des roches.

4.1.2.3 Processus ignés

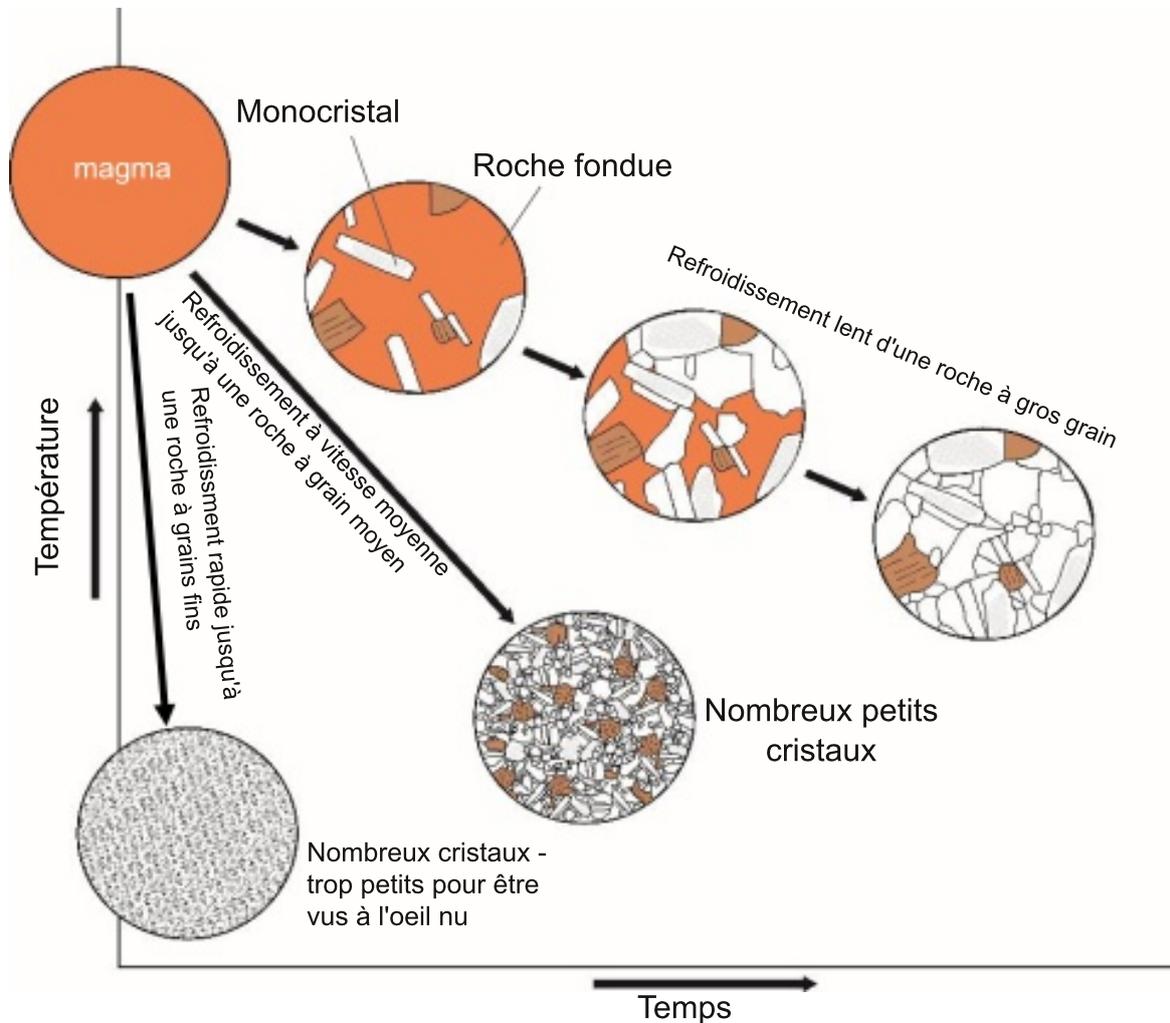
Lorsque les roches deviennent suffisamment chaudes, elles fondent. Comme les roches sont généralement constituées d'un mélange de minéraux, elles ne fondent souvent pas entièrement mais seulement partiellement, les minéraux au point de fusion le plus bas fondant en premier. Si le magma produit par la **fusion partielle** s'écoule, il a une composition chimique différente de celle de la roche d'origine, car les minéraux à point de fusion élevé sont laissés sur place. Les processus de fusion partielle produisent donc toute une série de magmas différents, de composition différente.

Les masses fondues riches en fer et en magnésium se forment à partir des minéraux dont le point de fusion est le plus élevé et se cristallisent donc à des températures élevées, généralement bien supérieures à 1000°C. Les masses fondues riches en silicium, en revanche, sont constituées de minéraux à point de fusion plus bas et cristallisent donc à des températures plus basses, généralement inférieures à 1 000°C. Cela a une incidence sur la fluidité des masses fondues (leur viscosité) et sur les processus ignés qui se produisent. Le magma en fusion se forme dans les profondeurs du sous-sol et, parce qu'il est plus chaud et moins dense que la roche environnante, il monte.

La température à laquelle les roches fondent ne dépend pas uniquement du point de fusion des minéraux, mais aussi de la quantité d'eau présente et de la pression des roches sus-jacentes. Les roches fondent à des températures plus basses lorsqu'elles sont "humides" et que la pression est réduite. Les processus ignés sont actifs dans les zones océaniques et continentales, mais les magmas, les pressions, la teneur en eau et d'autres facteurs diffèrent, et les corps ignés produits sont donc également différents.

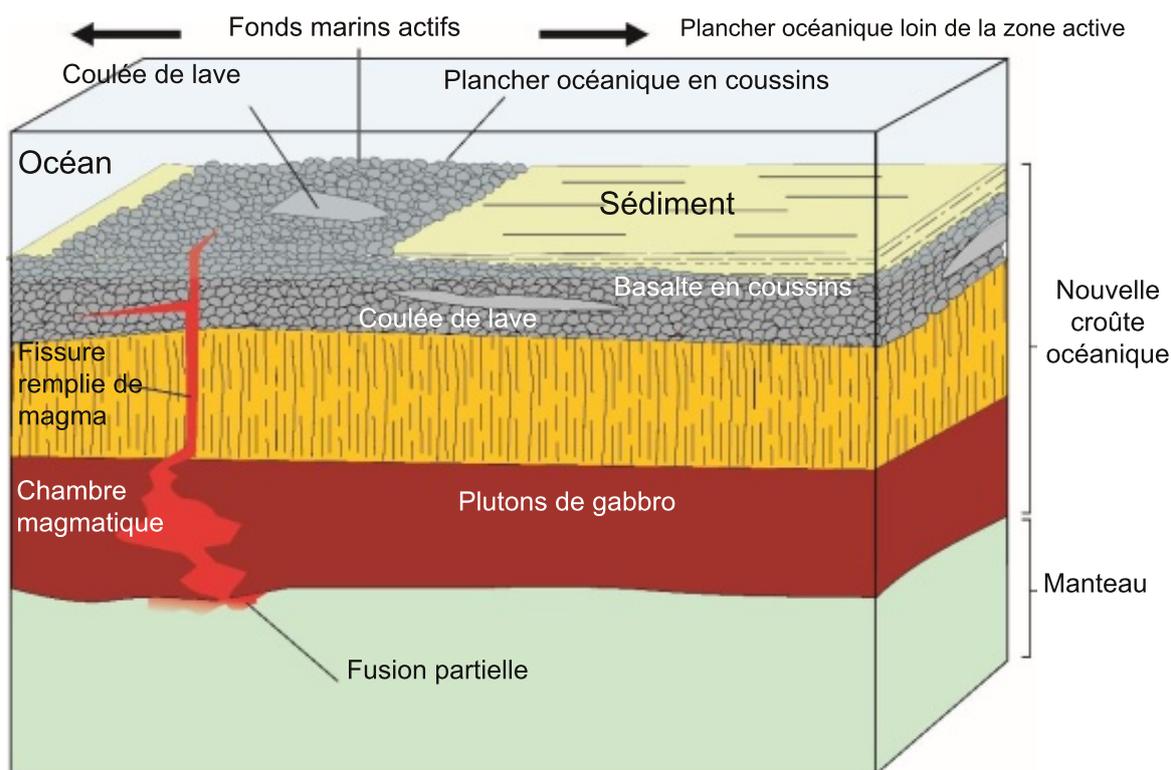
Les magmas en ascension peuvent s'arrêter en profondeur, se refroidir et se cristalliser dans des **chambres magmatiques**. Le magma a tout le temps de se refroidir et les cristaux de se développer dans la masse fondue qui se refroidit. Le résultat est une roche ignée à gros grains. Si le magma s'élève plus haut, il se refroidit et cristallise plus rapidement, ce qui donne une roche à grain moyen. S'il remonte jusqu'à la surface, il fait l'objet d'une éruption volcanique. Les laves ainsi formées se refroidissent très rapidement pour donner des roches ignées à grain fin (figure 4.5).

Figure 4.5. Le refroidissement et la cristallisation des roches ignées



Sous les océans, là où les plaques tectoniques s'écartent, le manteau solide est très chaud et s'écoule très lentement vers le haut. En s'écoulant vers le haut, la pression est réduite et le manteau très riche en fer/magnésium fond partiellement en magmas encore riches en fer/magnésium. Ces magmas remontent et certains se refroidissent lentement dans des chambres magmatiques pour former des plutons gabbro à gros grains à la base de la croûte océanique en formation. Ces magmas riches en fer et en magnésium sont très fluides (faible viscosité) et certains continuent donc à s'élever par des fractures. Ceux-ci se refroidissent plus rapidement en dolérites à grain moyen, sous forme de dykes. D'autres magmas remontent au fond de l'océan et s'écoulent sous forme de laves, généralement en forme de coussins (pillow lava). Cela produit généralement une nouvelle croûte océanique de roches ignées riches en fer et en magnésium, avec des gabbros grossiers à la base, des couches verticales de dolérites à grain moyen au-dessus, et des couches de basalte en coussins à grain fin à la surface (figure 4.6).

Figure 4.6. Corps ignés dans les océans



Sous les continents, dans les zones où les plaques tectoniques convergent, les roches se réchauffent. L'eau contenue dans les roches abaisse le point de fusion, ce qui entraîne une fusion partielle de celles-ci. Les magmas qui se forment dépendent des roches qui fondent, de sorte qu'une gamme de compositions chimiques des magmas est possible. Certains magmas sont riches en fer/magnésium, d'autres sont intermédiaires entre le fer/magnésium et les types riches en silicium ; les magmas les plus courants sont riches en silicium.

Les magmas riches en silicium sont très visqueux (peu coulants) et n'atteignent donc généralement pas la surface, mais cristallisent lentement dans les chambres magmatiques souterraines sous forme de granites à gros grains. S'ils atteignent la surface, étant visqueux, ils font généralement éruption de manière explosive, produisant des cendres volcaniques étendues. Les magmas intermédiaires font également l'objet d'éruptions explosives, mais s'écoulent des volcans sous forme de laves, pour se refroidir sous forme d'andésites à grain fin. Les magmas riches en fer et en magnésium font généralement éruption sous forme de basaltes. Les tubes qui relient les volcans à leurs chambres magmatiques nourricières sont appelés des **tubes/conduit volcaniques**, qui sont parfois exposés à la surface après érosion sous forme de **bouchons volcaniques**.

Entre les chambres magmatiques profondes et les volcans de surface, les magmas peuvent être injectés dans les roches environnantes.

S'ils traversent les couches rocheuses, ce sont des **dykes** ; s'ils suivent les couches, ce sont des **sills**. Les chambres magmatiques souterraines qui ont cristallisé sont généralement en forme de bulles et sont appelées **plutons** si elles sont petites et **batholites** si elles sont grandes (figure 4.7). Les batholithes, les plutons, les dykes et les filons-couches sont regroupés sous le nom de **roches ignées intrusives**, car le magma a pénétré dans la roche-mère environnante. Celles qui se trouvent à la surface sont des **roches ignées extrusives**, car elles ont été extrudées à la surface. Les différentes caractéristiques produites par ces processus sont présentées dans le tableau 4.15.

Figure 4.7. Corps ignés sur les continents

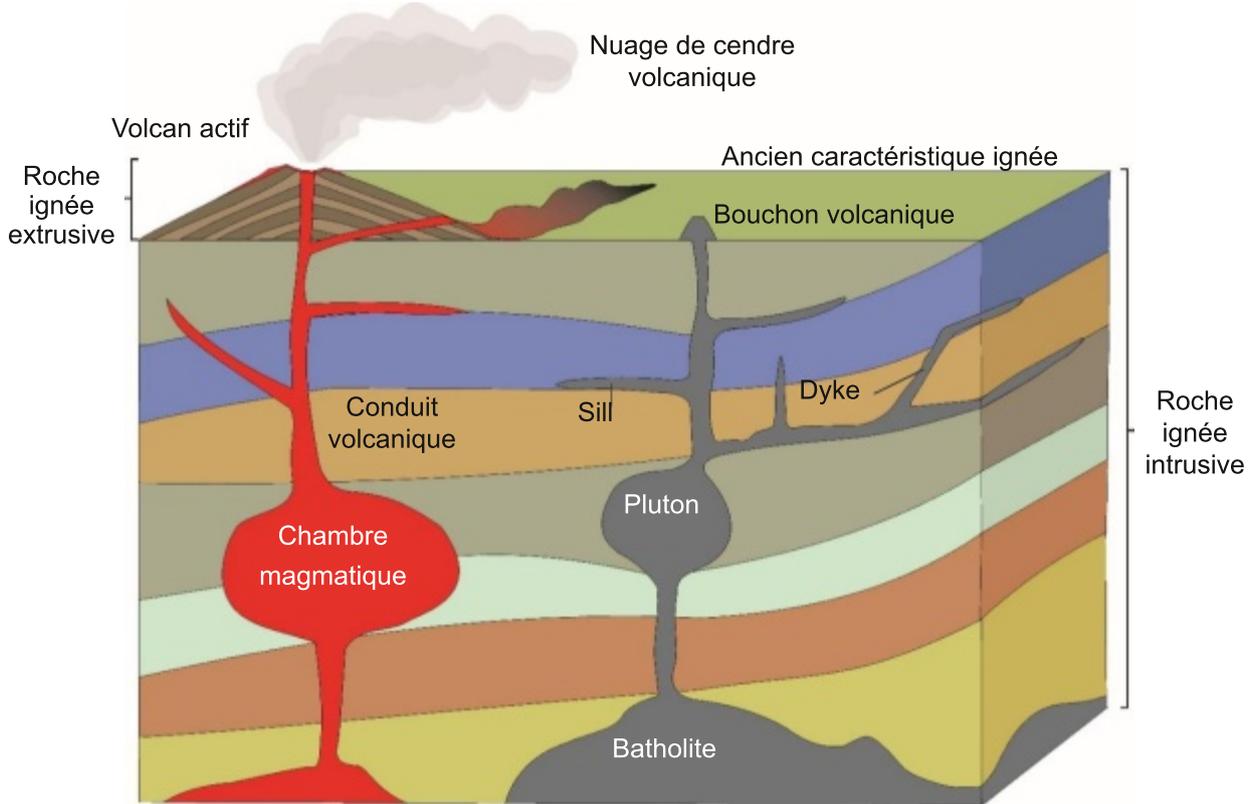


Tableau 4.15. Caractéristiques ignées importantes

Caractéristique ignée	Description	Image	Source
Pillow lava/Lave en coussin moderne	Lorsque des basaltes fluides sont éjectés (extrudés) dans l'eau, comme au fond de l'océan, de petites langues de magma s'écoulent et les parties extérieures deviennent solides ; le solide flexible agit comme un sac qui se remplit de lave en forme de coussin.		Laves modernes en coussins sur le fond de l'océan, photographiés lors de l'expédition Galapagos Rift dans l'ouest de l'océan Pacifique, en 2002.
pillow lava/Lave en coussin ancien	Lorsque d'anciens coussins se cassent en deux, on peut souvent voir le basalte à grain plus fin des marges. Comme les coussins plus tardifs s'enfoncent entre les coussins antérieurs au fur et à mesure de leur formation, leurs formes peuvent être utilisées pour déterminer si une séquence a été retournée (inversée).		Basaltes en coussins inversés de l'Ordovicien, Crozon, Bretagne, France.

Tableau 4.15. Caractéristiques ignées importantes, suite

Caractéristique ignée	Description	Image	Source
Sill	Les magmas qui s'infiltrent le long des couches sédimentaires ou volcaniques (plans de litage) se refroidissent et se cristallisent, formant des sills.		Filon rocheux de Kilt, Skye, Royaume-Uni ; les couches sus-jacentes ont été érodées.
Dyke	Les dykes se forment lorsque les magmas remplissent les fractures des roches, puis se refroidissent et se cristallisent.		Dykes précambriens en dolérite sombre (1100Ma), coupant des roches plus pâles de 1800Ma, îles Koster, Suède.
Pluton/Batholite	Les batholites étaient de grandes chambres magmatiques, les plutons de plus petites. Lorsque le magma se refroidissait lentement, des roches ignées à gros grains comme le granite ou le gabbro se formaient. Elles ont généralement cuit la roche environnante, formant une auréole métamorphique.		Image satellite de l'intrusion granitique de 30 km de large du massif de Brandberg, en Namibie, qui a transformé les roches environnantes en une auréole métamorphique sombre.

Les processus ignés font partie du cycle interne des roches, la partie du cycle des roches alimentée par l'énergie provenant de la Terre. Nous connaissons le fonctionnement des processus du cycle des roches ignées depuis de nombreuses années, mais leurs causes sous-jacentes n'ont été comprises que plus récemment, grâce à la théorie de la tectonique des plaques, comme le montre le tableau 4.21.

4.1.2.4 Processus métamorphiques

Les roches sont métamorphosées lorsque des plaques tectoniques entrent en collision lors d'épisodes de formation de montagnes, avec de fortes augmentations souterraines de température et de pression ; ce processus est appelé métamorphisme régional. Les roches peuvent également être métamorphosées par la cuisson de magmas ignés proches, dans le cadre du métamorphisme thermique. Dans les deux cas, les roches sédimentaires, ignées ou autres roches métamorphiques d'origine recristallisent à l'état solide en roches métamorphiques. Toutefois, si les roches sont chauffées au point de fondre complètement, le changement a dépassé le stade du métamorphisme pour devenir un processus igné.

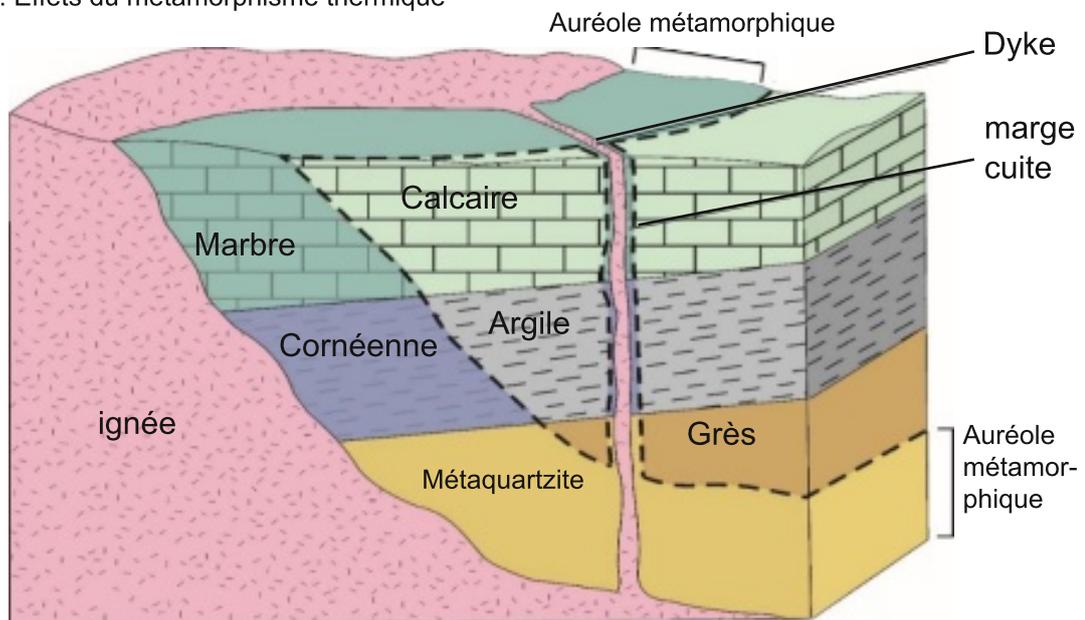
Le métamorphisme régional, provoqué par la collision des plaques, produit des roches allant des ardoises de qualité inférieure aux gneiss de qualité supérieure, ainsi que des marbres et des métaquartzites, comme le montre le tableau 4.16. Ces roches résistantes sont généralement imperméables et ont tendance à former des terrains plus élevés et des paysages assez accidentés.

Tableau 4.16. Roches métamorphiques formées par le métamorphisme régional



L'ampleur du métamorphisme thermique provoqué par les magmas ignés dépend de la taille du corps magmatique. Les petits corps cuisent simplement la roche environnante, produisant d'étroites **marges cuites**. Les corps plus grands contiennent beaucoup plus d'énergie thermique et produisent de larges zones cuites appelées **auréoles métamorphiques**. Là où les roches à grain fin sont transformées en cornéennes, les grès deviennent des métaquartzites et les calcaires des marbres (figure 4.8 et tableau 4.16).

Figure 4.8. Effets du métamorphisme thermique



Les causes du processus du cycle des roches qu'est le métamorphisme sont maintenant expliquées par la théorie de la tectonique des plaques (Tableau 4.21).

4.1.2.5 Processus de déformation

Lorsque des plaques entrent en collision lors d'épisodes de formation de montagnes, non seulement les roches peuvent être métamorphosées, mais elles peuvent également être déformées de différentes manières. À des profondeurs inférieures à environ 10 km, les pressions et les températures sont si intenses que la plupart des roches se plient et commencent à couler pour former des **plis**. À des niveaux plus élevés, où les pressions latérales sont encore énormes, les roches ont tendance à se briser plutôt qu'à se plier. Ainsi, plus près de la surface, les roches ont un comportement fragile et se fracturent, tandis qu'à plus grande profondeur, elles ont un comportement plastique, se pliant et s'écoulant.

Les roches se déforment également lorsque les plaques s'écartent ou se déplacent l'une par rapport à l'autre mais, comme les températures sont relativement basses, elles se fracturent généralement plutôt que de se comporter de manière plastique.

Lorsque les roches se fracturent, s'il n'y a pas de mouvement des roches de part et d'autre, un **joint** se forme. En revanche, si les roches situées de part et d'autre sont déplacées, il s'agit d'une **faille**. De nombreux joints résultent de l'écartement des roches, sous l'effet de la tension. La tension, lorsque les roches sont écartées, forme également des **failles normales**, lorsqu'un côté glisse vers le bas par rapport à l'autre.

Lorsque les roches glissent les unes sur les autres, des **failles coulissantes** se forment, généralement avec des faces presque verticales.

Lorsque les roches sont comprimées, un côté peut être forcé vers le haut et sur l'autre dans une **faille inverse** qui a une surface faillée, ou **plan de faille**, d'environ 45°. Dans le cas d'une compression très intense, les plans de faille ont généralement des angles plus faibles, d'environ 10°, et on les appelle des **failles de chevauchement** (tableau 4.17).

Tableau 4.17. Fractures causées par une rupture fragile - joints et failles

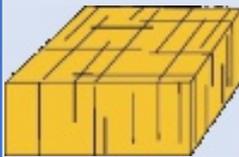
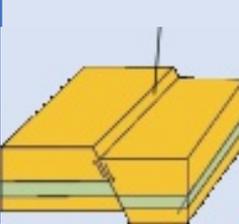
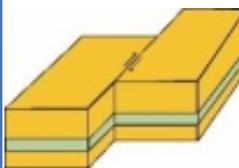
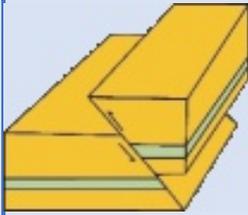
Trait	Contrainte	Description	Schéma	Image	Source
Série de joints	Tension horizontale	Ensemble de plans parallèles traversant la roche sans mouvement relatif, souvent verticaux, parfois horizontaux ou à d'autres angles.			Lit de limon articulé dans un schiste ordovicien, Fort Plain, New York, États-Unis.
Faille normale		Sous l'effet d'une tension, un bloc a glissé le long du plan de faille par rapport à l'autre - généralement abrupt, 60° ou plus.			Faille normale dans les parois du canal de Corinthe, en Grèce
Faille décrochante	Passage coulissants verticaux	Les blocs ont glissé l'un sur l'autre, généralement sur un plan de faille quasi vertical.			Vue satellite de la faille de Piquiang, Montagnes Tian Shan, Chine

Tableau 4.17. Fractures causées par une rupture fragile - joints et failles, suite

Trait	Contrainte	Description	Schéma	Image	Source
Faille inverse	Compression horizontale	Sous compression, un bloc a été poussé vers le haut par rapport à un autre - sur des plans de faille de plus de 45°.			Faille inversée dans le grès, Oregon, États-Unis
Faille chevauchant		Sous une forte compression, un bloc a été forcé sur un autre - sur un plan de faille de moins de 45°, souvent autour de 10°.			Bloc de droite poussé sur le bloc de gauche, Lilstock Bay, Somerset, Royaume-Uni.

Les roches qui se comportent de manière plastique lorsqu'elles sont comprimées forment des plis. Les plis peuvent avoir des tailles très variées, de l'échelle de la montagne à celle du millimètre. Les plis se produisent en série, comme vous pouvez le voir en mettant vos mains sur un tissu posé sur une surface brillante et en les faisant glisser ensemble. Vous verrez une série de plis ; les plis ascendants sont appelés **anticlinaux** et les plis descendants sont des **synclinaux**. Les formes des plis dépendent du type de roche et de l'importance de la compression ; elles vont de **plis ouverts** et doux à des **plis serrés** et à des **plis isoclinaux** aux côtés parallèles. Les plis peuvent être anguleux ou arrondis. La zone de flexion des plis est la **charnière**, tandis que les côtés sont les **membres** du pli (tableau 4.18).

Tableau 4.18. Types de plis

Type de faille	Description	Image	Source
Anticlinal	Anticlinal plié vers le haut - cet anticlinal est un pli ouvert avec une charnière arrondie		Un anticlinal dans du gneiss précambrien le long de la NJ Route 23 près de Butley, New Jersey, USA - personne pour l'échelle
Synclinal	Synclinal plié vers le bas - un pli ouvert avec une charnière assez angulaire.		Un synclinal dans les grès néogènes de la formation de Barstow, dans le comté de San Bernardino, en Californie, aux États-Unis.

Tableau 4.18. Types de plis, suite

Type de faille	Description	Image	Source
Plis ouvert	Plis ouverts, avec un angle entre les membres de plus de 45°, ainsi que charnières arrondies		Calcaire plissé dans les gorges de Glaserbachklamm, en Autriche.
Plis serrés	Plis serrés avec charnière angulaire		Plis serrés près d'Ágios Pávlos, dans le sud de la Crète.
	Plis serrés ayant un angle inférieur à 45°	Pli serré avec une charnière arrondie	
Plis isoclinal	Plis avec des membres parallèles		Petit pli isoclinal dans les Monts d'Arrée près de Commana, France

La théorie de la tectonique des plaques est désormais en mesure d'expliquer bon nombre des causes sous-jacentes de la déformation de la Terre, comme l'explique le tableau 4.21.

4.1.3 Structure de la Terre et preuves

Nous savons à quoi ressemblent les roches de la partie externe de la Terre, sur les continents, car nous pouvons voir des affleurements rocheux naturels dans les falaises maritimes et les zones montagneuses, ainsi que des roches dans les coupes et les carrières de routes et de voies ferrées. Nous découvrons la nature des roches dans les profondeurs de la Terre grâce aux mines et aux forages de plusieurs mètres à plusieurs kilomètres de profondeur. Nous savons aussi à quoi ressemblent les roches du fond des océans, grâce au programme de forage en eaux profondes. Mais nous devons utiliser d'autres types de preuves pour découvrir à quoi ressemble la Terre en dessous de la profondeur des forages.

Encadré 4.5. Le forage le plus profond de la Terre



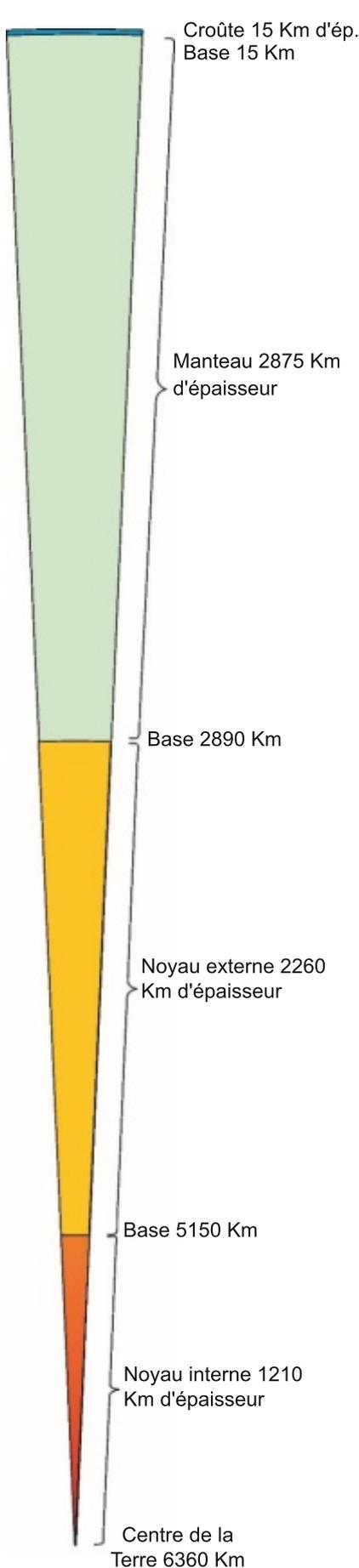
Le trou de sonde le plus profond jamais foré sur Terre est le Kola Superdeep Borehole, d'une profondeur de 12,3 km. Il a été foré dans l'extrême nord-ouest de la Russie, pendant plus de 20 ans, et s'est terminé en 1992. Le forage a traversé la croûte continentale sur environ un tiers de sa longueur, principalement dans le granite et le gneiss précambriens. L'une des surprises fut de constater que la roche était encore saturée d'eau en profondeur dans le forage.

4.1.3.1 Preuves

La meilleure preuve que nous ayons de l'état de la Terre sous nos pieds, en dessous de la profondeur du forage, est la preuve sismique des tremblements de terre. A chaque fois qu'il y a un gros tremblement de terre, les ondes de choc traversent la Terre en vibrant. Elles rayonnent à travers la Terre comme des ondulations sur un lac après que vous y ayez jeté une pierre. La vitesse des ondes dépend du matériau qu'elles traversent, ce qui nous aide à déterminer où se trouvent les limites entre les différents types de roches et à quoi ressemblent ces dernières.

Nous disposons également d'autres indices sur la composition des couches de la Terre, comme décrit dans les sections ci-dessous, mais ce sont les indices provenant des ondes sismiques qui nous ont donné le plus d'informations, comme le montre la figure 4.9.

Figure 4.9. Coupe transversale de la Terre

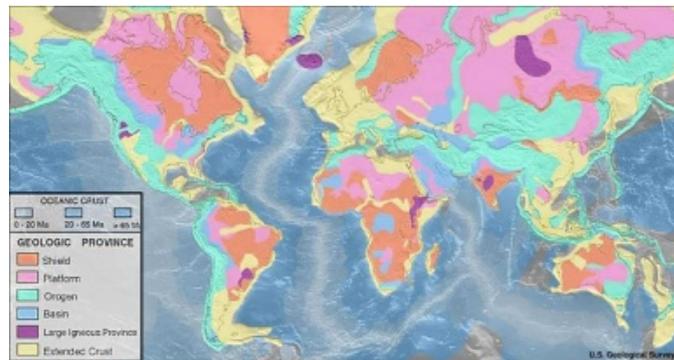


4.1.3.2 La croûte

La figure 4.9 montre que la croûte est très mince par rapport à la distance au centre de la Terre. Un bon modèle de l'épaisseur de la croûte est un timbre-poste collé sur un ballon de football. Il existe deux sortes de croûte : la croûte continentale que l'on trouve sous les continents et les plateaux continentaux, et la croûte océanique sous les océans.

La carte géologique de la figure 4.10 montre que la croûte des continents est beaucoup plus complexe que celle des océans. Cela s'explique par le fait que la croûte continentale est généralement beaucoup plus ancienne que la croûte océanique et que certaines zones ont été impliquées dans plusieurs cycles du cycle des roches. Les roches les plus anciennes trouvées jusqu'à présent sur Terre ont plus de 4 000 millions d'années et font partie de la croûte continentale en Australie. En revanche, les parties les plus anciennes de la croûte océanique ont rarement plus de 200 millions d'années et ont une histoire beaucoup plus simple.

Figure 4.10. La géologie de la croûte terrestre



L'épaisseur de la croûte continentale sur laquelle nous vivons varie de 25 à 70 km environ. Bien que les roches sédimentaires ne représentent qu'environ 5 % du volume de l'ensemble de la croûte, elles couvrent 75 % de la surface de la croûte continentale, soit environ les trois quarts de la zone de couleur vive de la figure 4.10. Les estimations suggèrent que ces roches sédimentaires continentales sont composées à 79 % de mudstone, 13 % de sandstone et 8 % de calcaire.

8 % de calcaire. La majeure partie du volume de la croûte continentale est formée de roches ignées comme le granite, et de roches métamorphiques comme le gneiss (figure 4.11). Toutes ces roches ont été formées par des processus normaux du cycle des roches, même si certains des matériaux qui les composent ont fait plusieurs fois le tour du cycle des roches.

Les preuves de la structure et des roches de la croûte océanique comprennent des données sismiques, des données issues de forages en eaux profondes et des informations provenant d'endroits comme Chypre, où une collision de plaques a fait remonter la vieille croûte océanique sur le continent. Ces données montrent que la croûte océanique comporte quatre couches principales. La couche supérieure est constituée de sédiments d'eau profonde qui ne se trouvent pas au niveau des dorsales océaniques, mais qui deviennent de plus en plus épais en s'éloignant des dorsales. Sous les sédiments se trouve une couche de basalte à grain fin, souvent sous forme de lave en coussin. Le basalte recouvre une couche constituée de nombreuses feuilles verticales de dykes de dolérite à grain moyen. Sous cette couche se trouve une épaisse couche de gabbro à gros grains, avant d'atteindre le fond de la croûte océanique et le sommet du manteau (Tableau 4.19).

Figure 4.11. Les roches les plus courantes de la croûte continentale

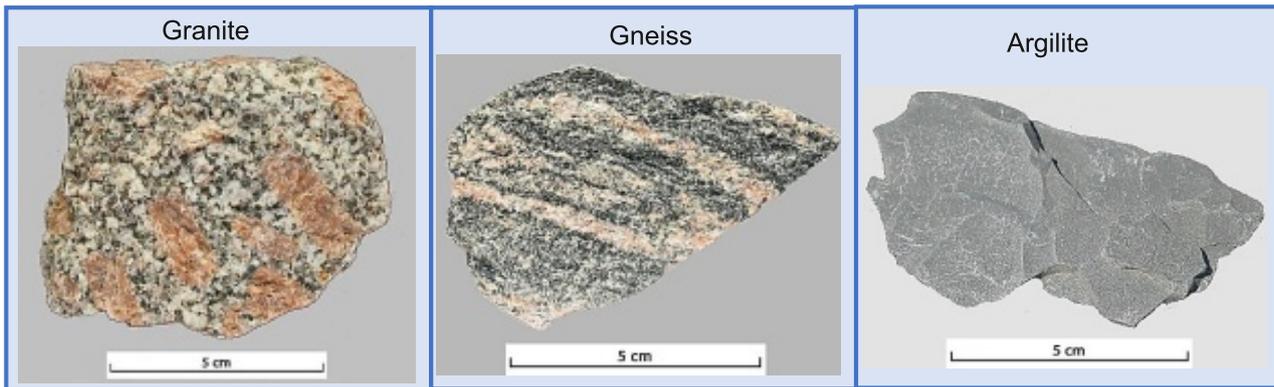
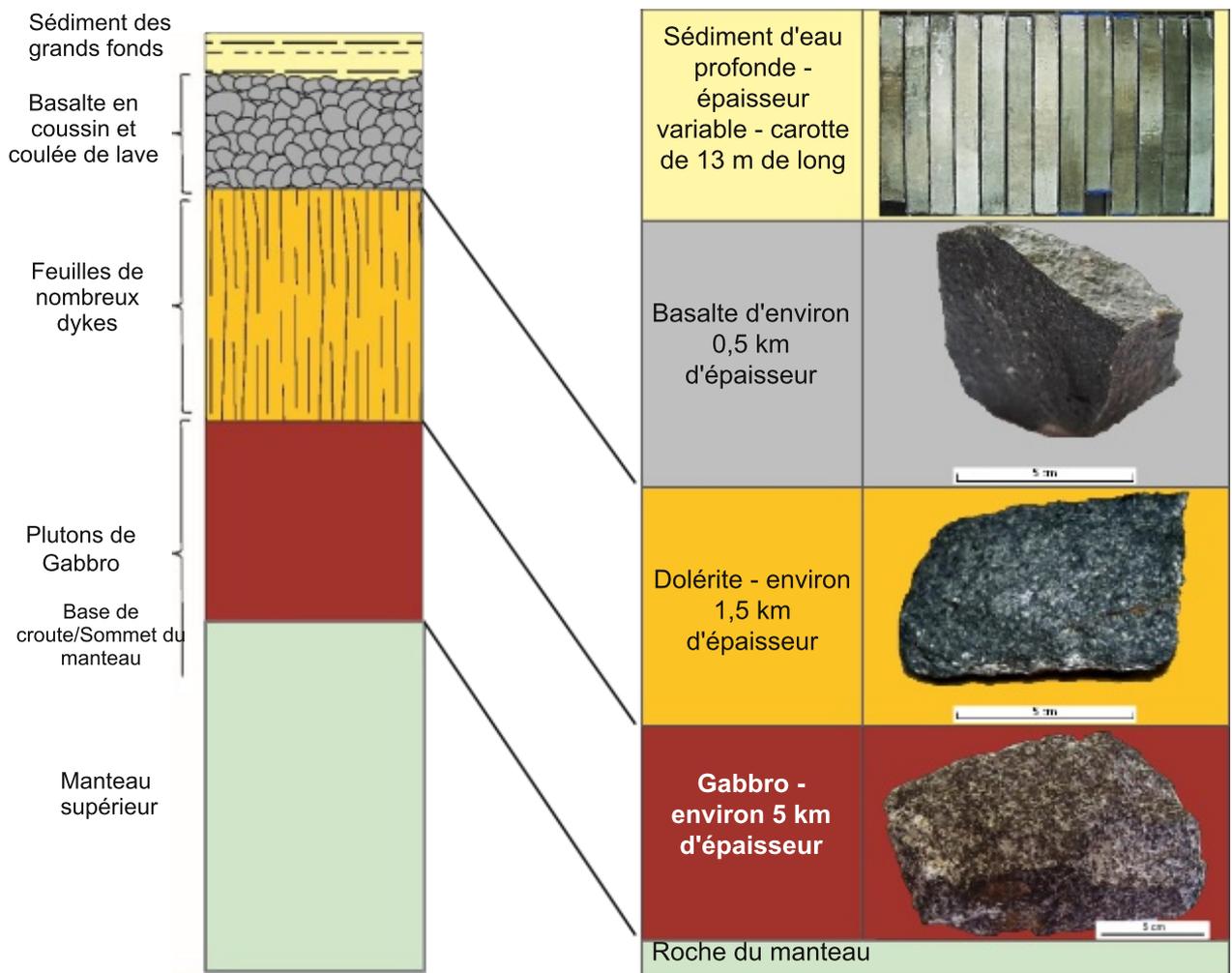


Tableau 4.19. Roches crustales océaniques



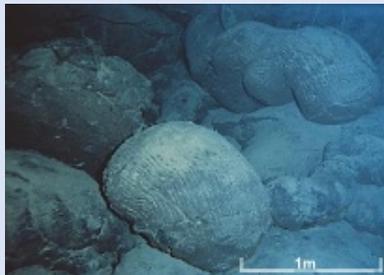
Les preuves montrent comment une nouvelle croûte océanique se forme sur les marges de plaques divergentes. Le magma issu de la fusion partielle locale du manteau remonte au niveau des dorsales océaniques. Là, il s'accumule et se solidifie sous la surface, formant des gabbros à gros grains. S'il remonte à la surface par des fractures verticales, il fait éruption sous forme de lave au fond de l'océan, souvent avec des formes caractéristiques de lave en coussin, et se solidifie rapidement en basalte à grain fin. Pendant ce temps, le magma dans les fractures verticales se solidifie plus lentement en dolérite à grain moyen. Chaque fois qu'une fracture s'ouvre, une nouvelle feuille se forme, produisant de plus en plus de feuilles de dykes de dolérite.

Encadré 4.6. Formation sous-marine des laves en coussins

Lorsque la lave basaltique fait éruption sous l'eau, elle forme des "formes en oreiller". Des langues de lave orange ou rouge apparaissent et leur surface extérieure est rapidement refroidie par l'eau pour former un revêtement extérieur solide, mais flexible. Au fur et à mesure de l'éruption de la lave, la roche nouvellement formée prend la forme d'un oreiller. Les coussins ultérieurs, pressés sur le dessus, s'affaissent pour épouser la forme des coussins antérieurs. Comme ce processus ne se produit que dans l'eau, les anciens coussins préservés dans des séquences rocheuses montrent qu'ils ont dû se former sous l'eau. Filmer la formation de lave en coussins peut être très dangereux car la mer environnante contient des poches invisibles d'eau brûlante.



Une langue de lave sous l'eau



Des coussins au fond de la mer près d'Hawaï



Anciennes laves en coussins, coupe transversale

La croûte océanique à trois couches nouvellement formée est lentement éloignée de la marge de la plaque divergente par le mouvement des plaques. Des boues à grain fin (souvent des coquilles de plancton microscopique riches en calcaire) tombent de l'océan supérieur et se déposent sur les coussins. Plus la plaque se déplace, plus cette couverture sédimentaire s'épaissit, jusqu'à atteindre 1 km ou plus d'épaisseur près des bords des océans.

Aux marges des océans, la croûte océanique est souvent ramenée dans le manteau, par subduction. Cela explique pourquoi la croûte océanique n'a généralement pas plus de 200 millions d'années et pourquoi, plus la croûte océanique est éloignée de la marge de la plaque divergente, plus elle devient ancienne, comme le montre la figure 4.10.

La densité moyenne de la croûte océanique, comme le montre la vitesse des ondes sismiques et les mesures des échantillons de roche, est supérieure à la densité moyenne de la croûte continentale. Le manteau sous-tend l'ensemble de la croûte et de nombreuses observations ont montré que, bien que le manteau soit complètement solide, il est capable de s'écouler très lentement sous l'effet des pressions et des températures intenses qui règnent en profondeur et du temps dont il dispose (il se déplace d'environ 1 cm par an). Ainsi, les croûtes océanique et continentale sont toutes deux soutenues par le manteau solide sous-jacent qui s'écoule. C'est parce que la croûte océanique est plus dense que la croûte continentale qu'elle s'enfonce à un niveau inférieur. Cela signifie que la quasi-totalité de la croûte océanique se trouve bien en dessous du niveau de la mer, alors que la plupart de la surface de la croûte continentale se trouve au-dessus du niveau de la mer. La croûte océanique est également plus mince, avec une épaisseur moyenne d'environ 7 km seulement (tableau 4.20).

Tableau 4.20. Caractéristiques des couches terrestres

Couche		Profondeur moyenne, Km		Épaisseur moyenne Km		Etat		Densité relative moyenne*	
Croûte continentale	Croûte océanique	35	7	35	7	Solide	Solide	2,7	2,9
Manteau		2890		2875		Solide		3,3 - 5,7	
Noyau externe		5150		2260		Liquide		9,9 - 12,2	
Noyau interne		6360		1210		Solide		12,6 - 13,0	
		Centre de la Terre							

* La densité relative est le rapport entre la densité d'un matériau et la densité de l'eau - et ne nécessite donc aucune unité.

4.1.3.3 Le manteau

La frontière entre la croûte et le manteau sous-jacent a été découverte à partir de mesures d'ondes sismiques en 1909. Les données sismiques modernes prouvent qu'une grande partie du manteau solide peut s'écouler au cours des temps géologiques, ce qui explique non seulement le "flottement" de la croûte mais aussi le mouvement des plaques tectoniques de la Terre.

Encadré 4.7. De quoi est fait le manteau ?

Dans les années 1960, une tentative de forage à travers la croûte océanique jusqu'au manteau a échoué, de sorte que les seules preuves dont nous disposons sur ce que pourraient être les roches du manteau sont des preuves de seconde main.



Certaines éruptions volcaniques contiennent des fragments d'autres roches que l'on pense avoir été apportées par le manteau sous-jacent.



Dans certaines zones de collision pour la formation de montagnes, les roches du manteau semblent avoir été poussées sur le continent, avec d'anciennes roches de la croûte océanique par-dessus.



On pense que les météorites pierreuses proviennent des manteaux de petites planètes qui se sont désintégrées dans le passé.

Sur la base de cette preuve et d'autres, on pense que le manteau est constitué de péridotite et de roches similaires. La péridotite est une roche très dense formée principalement des minéraux olivine verte et pyroxène de couleur sombre.

4.1.3.4 Le noyau

La densité relative de la Terre entière est d'environ 5,5, mais la densité des parties extérieures de la Terre est bien inférieure à cette valeur ; la Terre doit donc avoir un noyau beaucoup plus dense. La limite du noyau a été découverte par des études sismiques en 1914. D'autres données sismiques ont montré que la partie extérieure du noyau est liquide (puisque les ondes de cisaillement sismiques ne la traversent pas) tandis que la partie intérieure du noyau est solide. On pense que les courants dans le noyau externe liquide sont à l'origine du champ magnétique de la Terre.

Encadré 4.8. De quoi est fait le noyau ?

La limite du noyau se situe à près de 3 000 km sous la surface de la Terre, ce qui signifie que nous ne pourrons jamais prélever de roches du noyau. Nous avons donc besoin de preuves de seconde main pour déterminer de quoi le noyau est probablement constitué.

Le fer a la bonne densité pour être une roche centrale et c'est un matériau que l'on trouve couramment dans l'espace. De nombreuses météorites sont des météorites ferreuses composées d'un mélange de fer et d'un peu de nickel ; on pense qu'elles proviennent de petites planètes qui se sont brisées dans un passé lointain. Ce mélange de fer et de nickel a une densité et des caractéristiques sismiques similaires à celles du noyau. On pense donc que le noyau est constitué d'un alliage de fer et de nickel. Il est liquide dans le noyau externe et solide au centre. Des recherches récentes suggèrent que le noyau pourrait également contenir un peu de silicium.



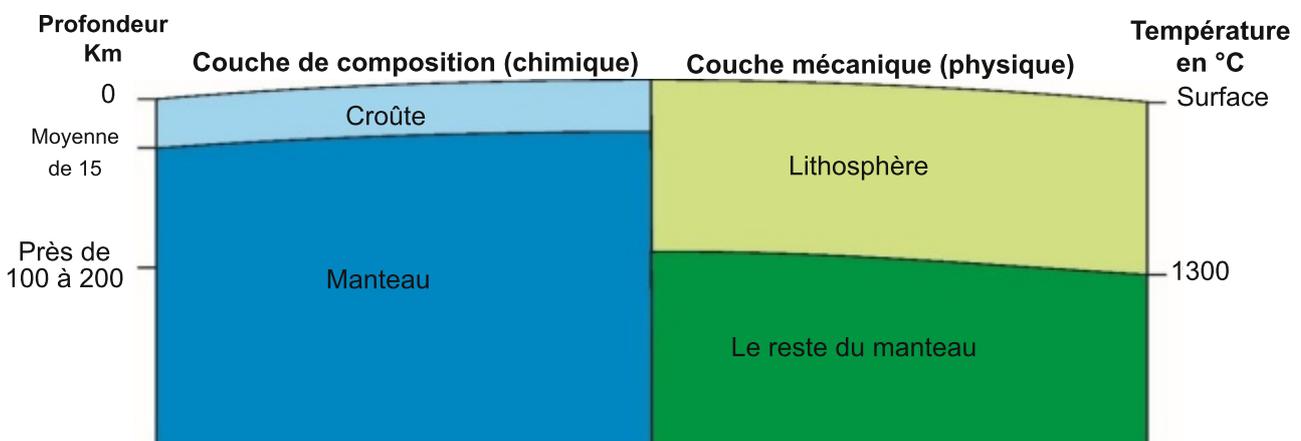
Météorite de fer de 30 cm de diamètre provenant de Sibérie - la partie extérieure a fondu lors de sa chute dans l'atmosphère.

4.1.3.5 La lithosphère

Les limites croûte-manteau et manteau-noyau sont marquées par des changements de chimie : la croûte est riche en silicium avec un peu de fer, le manteau contient beaucoup plus de fer et le noyau est presque entièrement constitué de fer. Nous savons maintenant qu'il existe une autre limite importante dans la Terre, marquée non pas par des changements chimiques mais par des changements mécaniques, des changements dans la façon dont les roches se comportent.

Cette frontière est la base de la lithosphère, marquée par la zone où la température de la roche atteint environ 1300°C. Les roches situées au-dessus de cette zone de température sont solides et rigides, tandis qu'en dessous de cette zone, elles sont solides mais capables de se déformer et de s'écouler très lentement. La lithosphère solide et rigide est constituée de la croûte et du manteau supérieur extrême, et forme les plaques de la Terre. Celles-ci sont déplacées par les processus de la tectonique des plaques, le manteau plus faible situé en dessous permettant ce mouvement. La figure 4.12 montre la structure de la Terre externe avec la croûte, la lithosphère et le manteau.

Figure 4.12. La partie externe de la Terre



Les plaques de la Terre sont donc constituées de lithosphère et peuvent se déplacer sur le reste du manteau. Bien que le manteau soit solide, il peut s'écouler lentement. Les propriétés et le mouvement des plaques sont décrits par la théorie de la tectonique des plaques.

4.1.4 Tectonique des plaques et preuves

4.1.4.1 Théorie unificatrice

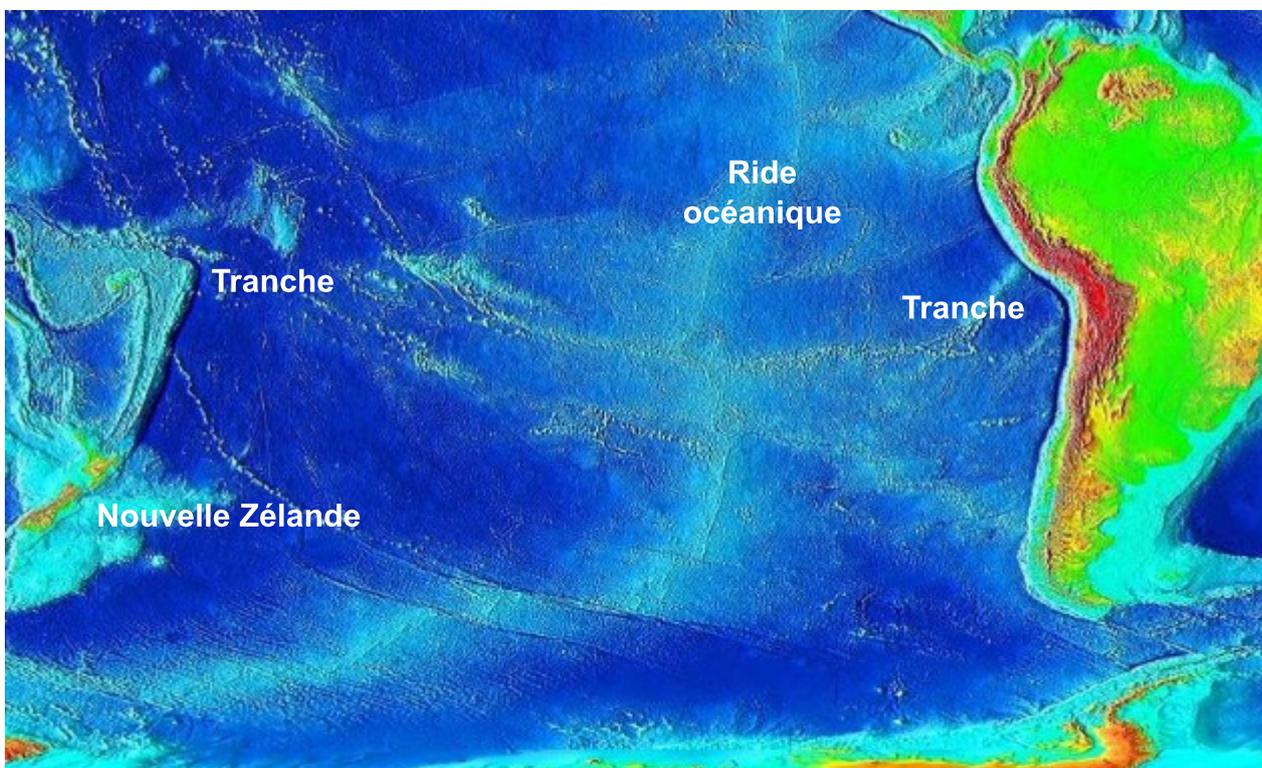
Dès que des cartes du monde raisonnablement précises sont devenues disponibles, on a remarqué que les côtes de l'Afrique et de l'Amérique du Sud présentaient une correspondance étroite entre elles. Mais ce n'est qu'en 1915 qu'Alfred Wegener a publié un livre contenant des preuves montrant qu'elles avaient autrefois été réunies, sa théorie de la **dérive des continents**. Le livre, qui a été publié en anglais en 1922, contenait des preuves, non seulement de la concordance des continents en puzzle, mais aussi de la correspondance géologique et des fossiles de chaque côté. Wegener a également montré comment la dérive des continents pouvait expliquer les changements d'environnement enregistrés dans les roches continentales, où les dépôts de glace étaient souvent suivis de grès désertiques et plus tard de roches équatoriales. Ses travaux ont été largement ignorés, en partie parce qu'il n'a pas pu suggérer un mécanisme convaincant pour déplacer les continents. La plupart des géologues de l'époque pensaient que la croûte terrestre pouvait se déplacer de haut en bas, mais pas latéralement. On pensait également que la croûte terrestre était trop fine pour former des continents à la dérive. Nous savons maintenant que la croûte terrestre est vraiment trop fine pour former des plaques ; les plaques sont formées à partir de la lithosphère, beaucoup plus épaisse (figure 4.12).

Au cours de la Seconde Guerre mondiale, dans les années 1940, les scientifiques ont mis au point deux méthodes de détection des sous-marins qui se sont avérées essentielles à la théorie de la tectonique des plaques. La méthode du sonar consiste à envoyer des ondes sonores dans l'eau et à recevoir celles qui rebondissent ; cette méthode permet de détecter les sous-marins mais aussi les fonds marins et leur profondeur.

Les magnétomètres ont également été mis au point pour détecter le magnétisme des sous-marins, mais ils ont aussi été utilisés plus tard pour détecter les changements magnétiques du plancher océanique. Dans

Les années 1950 et 1960, le sonar a été utilisé pour cartographier le fond des océans. Cette cartographie a montré que les océans avaient des crêtes peu profondes près du centre des océans et des zones plus profondes, appelées fosses, près des marges océaniques. Certaines de ces crêtes mesuraient plus de 1,5 km de haut et les fosses descendaient à des profondeurs de plus de 11 km (figure 4.13). Cela a conduit Harry Hess à proposer son hypothèse d'étalement du **plancher océanique** en 1962. Selon Hess, la nouvelle croûte océanique se formait au niveau des dorsales proches du centre des océans et était déplacée latéralement jusqu'à atteindre les fosses, où elle était ramenée dans le manteau. La température jouait un rôle clé dans sa théorie. Là où le nouveau matériau se formait, il était très chaud et donc de plus faible densité, ce qui produisait les crêtes. Au fur et à mesure que le matériau s'éloignait, il se refroidissait et s'enfonçait jusqu'à ce que, dans les tranchées, il devienne si froid et si dense qu'il pouvait retourner dans le manteau.

Figure 4.13. Le plancher de l'océan Pacifique Sud ; la dorsale océanique près du centre et les fosses à l'est et à l'ouest.



Alors que les scientifiques cartographiaient les fonds océaniques à l'aide de sonars, ils ont également utilisé des magnétomètres pour mesurer le magnétisme des fonds océaniques. Ils ont constaté que le plancher océanique était magnétique. À certains endroits, le magnétisme s'alignait avec le magnétisme normal de la Terre, pour donner un signal magnétique plus fort. À d'autres endroits, le magnétisme du plancher océanique était dans la direction opposée et annulait une partie du magnétisme normal de la Terre pour donner un signal plus faible.

Lorsque tout cela a été reporté sur une carte, un motif a été observé de part et d'autre des dorsales océaniques, comme celui illustré à la figure 4.14. Ce phénomène a été expliqué par Vine et Matthews au Royaume-Uni et par Morley au Canada en 1963. Ils savaient déjà que, lorsque des roches contenant des minéraux magnétiques se refroidissent, elles se magnétisent dans la même direction que le champ magnétique dans lequel elles se refroidissent. Ainsi, les laves basaltiques qui se refroidissent aujourd'hui se magnétisent dans la direction du champ magnétique actuel, avec une magnétisation nord-sud. Ils connaissaient également la théorie selon laquelle, bien que le pôle magnétique nord soit actuellement proche du pôle Nord géographique (et le pôle magnétique sud proche du pôle Sud), ce magnétisme s'est inversé à de nombreuses reprises dans le passé géologique. Il y a donc eu des périodes où le pôle magnétique nord se trouvait près du pôle sud et le pôle magnétique sud près du pôle nord.

Cela leur a permis d'expliquer que le motif magnétique du fond de l'océan était formé par des basaltes qui s'étaient magnétisés en refroidissant. S'ils ont refroidi lorsque le magnétisme de la Terre était dans la même direction que celui d'aujourd'hui, ils ont adopté un magnétisme nord-sud, mais s'ils ont refroidi lorsqu'il était dans la direction opposée, ils ont adopté un magnétisme sud-nord. Les roches à magnétisme nord-sud renforcent le magnétisme nord-sud actuel, ce qui donne une anomalie positive, appelée **polarité magnétique normale**. Les basaltes présentant un magnétisme sud-nord réduisent le champ magnétique global, ce qui donne une anomalie négative, appelée **polarité magnétique inversée**, comme dans la figure 4.15.

Figure 4.14. Anomalies magnétiques sur la crête de Reykjanes au sud-ouest de l'Islande

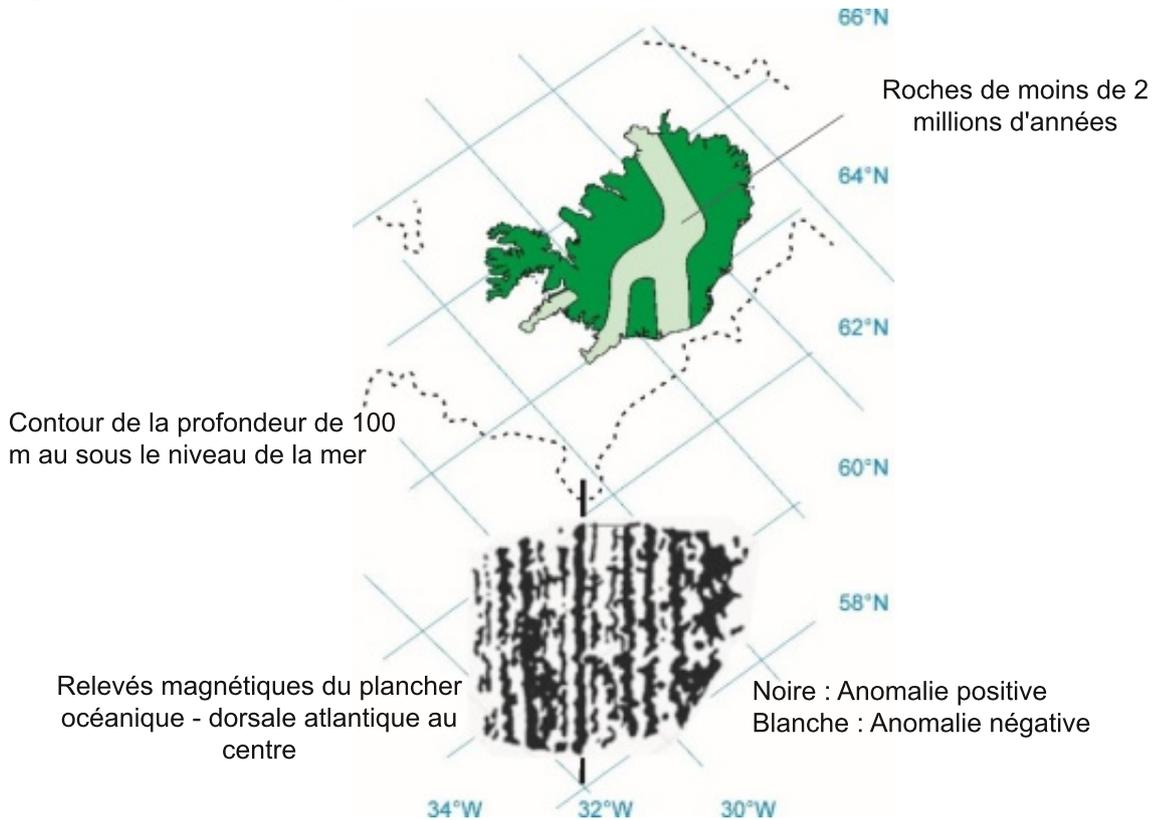
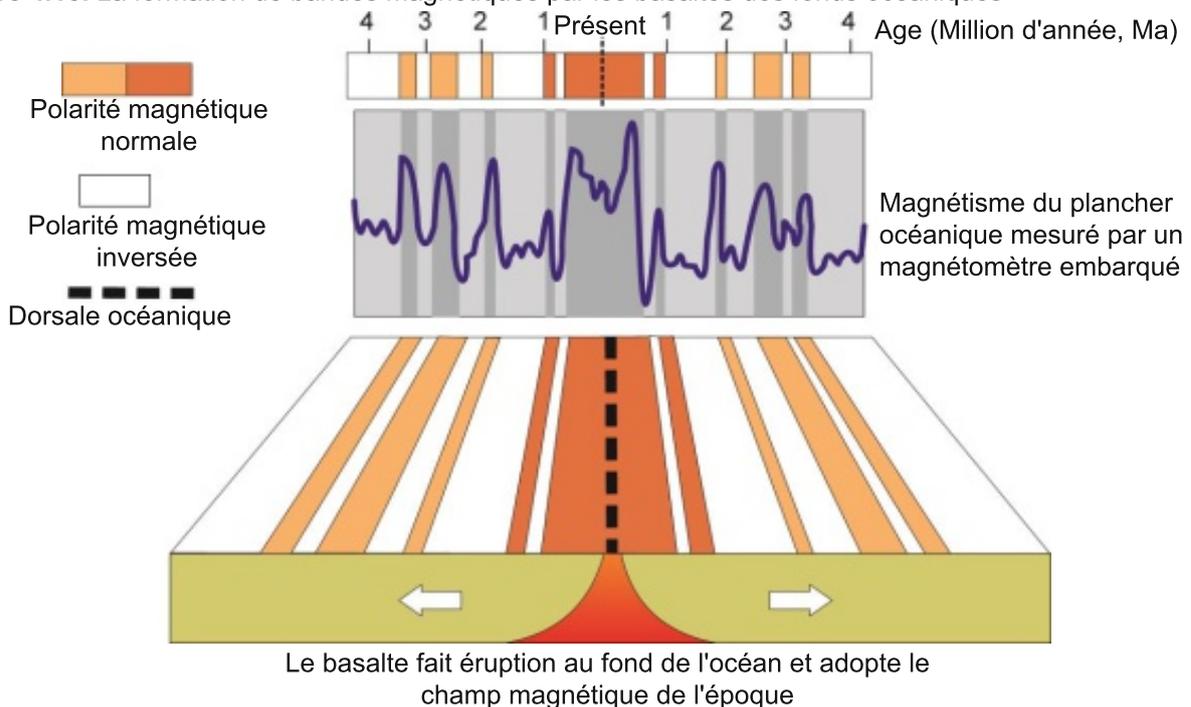


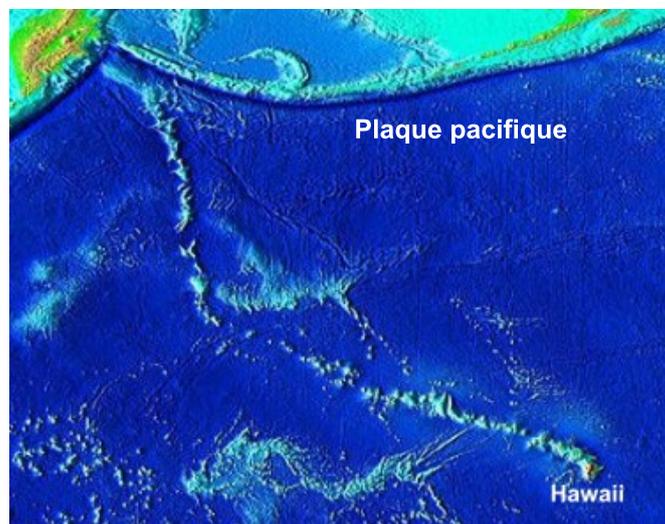
Figure 4.15. La formation de bandes magnétiques par les basaltes des fonds océaniques



Les inversions des pôles magnétiques de la Terre ne sont pas régulières : parfois, il peut y avoir un long intervalle entre les inversions et à d'autres moments, elles se produisent rapidement. C'est pourquoi les bandes magnétiques du plancher océanique ont des largeurs différentes, et aussi pourquoi le motif d'un côté d'une dorsale océanique est l'image miroir du motif de l'autre côté. La preuve des bandes magnétiques a fourni un excellent soutien à l'hypothèse de l'étalement du plancher océanique de Hess.

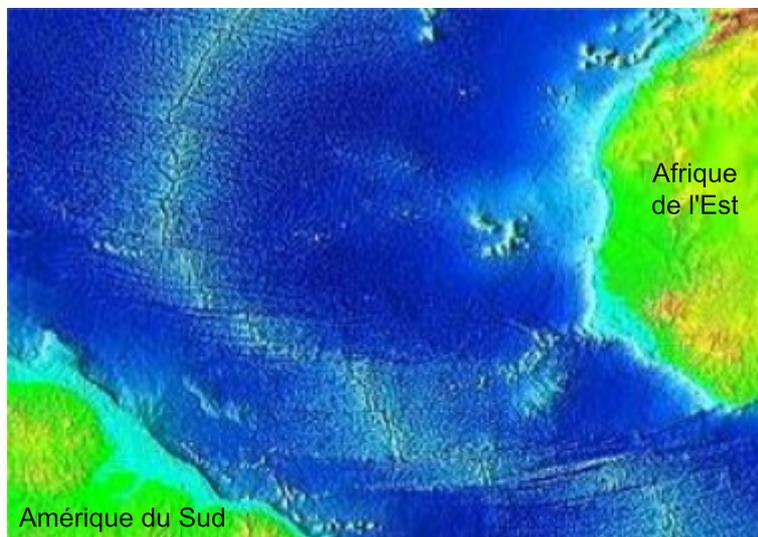
L'un des problèmes posés par l'idée de l'étalement du plancher océanique était que l'activité volcanique dans les océans n'était pas seulement centrée sur les dorsales océaniques, mais qu'elle était également présente dans certaines îles volcaniques éloignées des dorsales. John Tuzo Wilson a expliqué cela en 1963 par sa théorie du hotspot. Un panache de roche chaude s'élève dans le manteau et fond partiellement pour former un magma de basalte. Celui-ci s'élève à travers la lithosphère pour entrer en éruption dans un volcan. Au fur et à mesure que la lithosphère se déplace sur ce point chaud, une chaîne de volcans est produite, comme le montre la figure 4.16. Plus les îles volcaniques ont été transportées loin du point chaud, plus elles sont anciennes.

Figure 4.16. La chaîne d'îles volcaniques et de monts sous-marins volcaniques liée au point chaud d'Hawaï dans l'océan Pacifique. La courbure soudaine de la chaîne est liée à un changement dans la direction du mouvement de la plaque du Pacifique



En 1964, John Tuzo Wilson a identifié un autre élément clé soutenant l'idée de l'expansion des fonds marins. Il s'est aperçu que non seulement de nouveaux fonds marins se formaient au niveau des dorsales océaniques et étaient ramenés dans le manteau au niveau des fosses océaniques, mais aussi que les dorsales océaniques étaient décalées en de nombreux endroits par d'énormes failles, qu'il a appelées **failles transformantes** (figure 4.17).

Figure 4.17. Failles transformantes décalant la dorsale océanique de l'océan Atlantique



Toutes ces preuves réunies sont devenues la nouvelle théorie unificatrice de la tectonique des plaques, largement acceptée au milieu des années 1960. La nouvelle théorie unifiait la théorie de la dérive des continents de Wegener avec la théorie de l'étalement des fonds marins de Hess et toutes les autres preuves pour expliquer que toute la Terre extérieure était brisée en morceaux, appelés plus tard plaques, qui se déplaçaient à la surface de la Terre. Ces plaques avaient trois sortes de marges : les crêtes et les fosses océaniques reconnues par Hess et les failles transformantes reconnues par Wilson. Lorsque les plaques se déplacent, elles entraînent les continents avec elles, de sorte que les continents ne dérivent pas, comme le proposait Wegener, mais sont transportés par le mouvement des plaques.

Wilson s'est alors rendu compte que le mouvement des plaques pouvait expliquer la formation de supercontinents dans le passé géologique, et que, lorsque les continents se rapprochaient, puis se séparaient, de nouveaux océans se formaient. Ce cycle de formation et de dislocation des supercontinents est maintenant appelé le **cycle de Wilson** ou le **cycle des supercontinents**.

La nouvelle théorie unificatrice explique non seulement les caractéristiques géologiques à l'échelle mondiale, mais aussi les épisodes de formation de montagnes et les soulèvements qui sont des éléments clés du cycle des roches. Elle explique comment des régions peuvent présenter des séquences rocheuses dans lesquelles les roches sédimentaires ont été déposées dans des environnements très différents, allant des glaciers aux équatoriaux et des mers profondes aux montagnes. Le mouvement des plaques a ensuite été considéré comme l'une des forces motrices de l'évolution, unifiant ainsi de nombreux domaines de la géologie. Depuis lors, de plus en plus de preuves ont été trouvées pour soutenir la théorie de la tectonique des plaques ; elle explique la plupart des caractéristiques géologiques, mais pas toutes. Ce sont ces caractéristiques qui ne sont pas expliquées par la théorie "normale" de la tectonique des plaques qui font l'objet de nombreuses recherches scientifiques aujourd'hui.

4.1.4.2 Construction des plaques et subduction

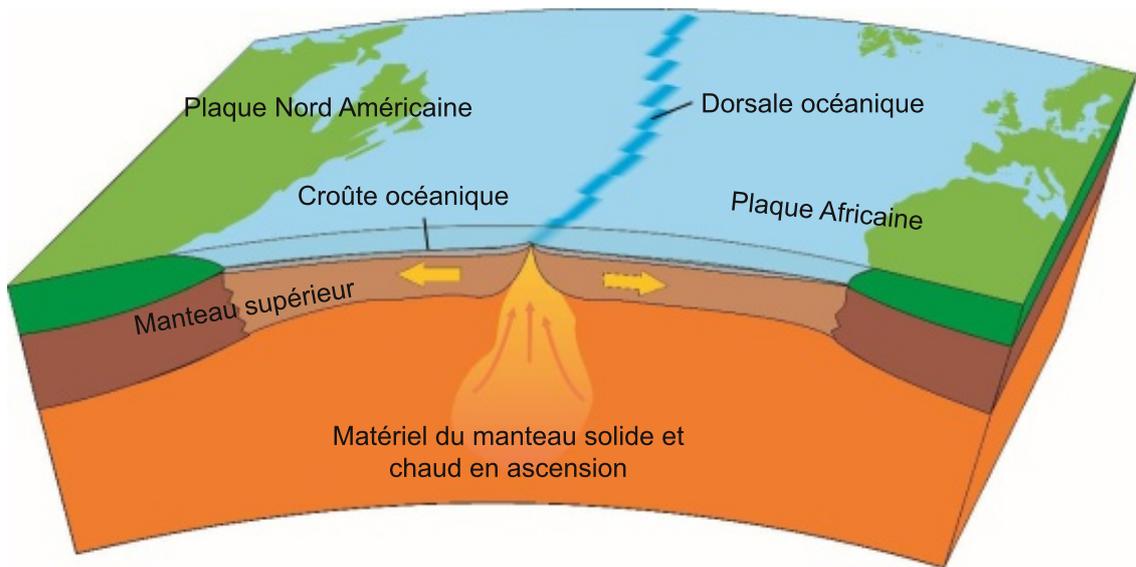
La lithosphère de la Terre est fragmentée en une série de grands et petits morceaux appelés plaques tectoniques. Lorsque ces plaques se déplacent, elles entraînent les continents avec elles. Au niveau des dorsales océaniques, de nouveaux matériaux de plaque se forment et s'éloignent de la dorsale, on parle alors de **marges de plaques divergentes**. Les dorsales océaniques sont décalées par des failles transformantes où aucun matériau de plaque n'est construit ou perdu, ces failles transformantes sont donc également appelées **marges de plaques conservatrices**, où la plaque est conservée.

Le nouveau matériau de plaque chaud et flottant des dorsales océaniques se refroidit lentement et s'enfonce en s'éloignant des dorsales. Il finit par devenir si froid et si dense qu'il commence à s'enfoncer à nouveau dans le manteau ; cet enfoncement est appelé **subduction**. Le résultat de la subduction est que deux plaques se rapprochent l'une de l'autre, c'est pourquoi elles sont également appelées **marges convergentes**. La lithosphère subduite est réintégrée dans le manteau, de sorte que les roches de la lithosphère sont recyclées dans le cycle global de la tectonique des plaques.

4.1.4.3 Caractéristiques des marges de plaque

Marges de plaques divergentes. Sur ces marges, un nouveau matériau de plaque se forme au niveau des dorsales océaniques lorsque les plaques s'écartent, permettant au magma formé par la fusion partielle du manteau sous-jacent de monter. Ce magma se solidifie dans des chambres magmatiques produisant des gabbros, dans des dykes sous forme de dolérite, ou au fond de l'océan sous forme de laves basaltiques (tableau 4.19). Cette nouvelle croûte, ainsi qu'une partie du manteau sous-jacent, devient une nouvelle lithosphère lors de la création d'une nouvelle plaque océanique (figure 4.18).

Figure 4.18. Nouvelle lithosphère océanique en cours de création sur la dorsale océanique au milieu de l'océan Atlantique



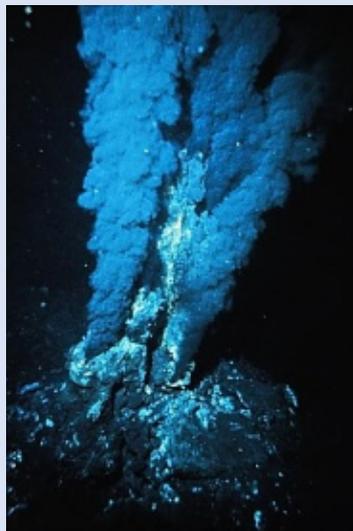
Encadré 4.9. La découverte de fumeurs noirs sur les dorsales océaniques

En 1977, le sous-marin Alvin, un submersible de haute mer, étudiait une zone de dorsale océanique à 2 km de profondeur, lorsque ses deux pilotes ont vu pour la première fois des fumeurs noirs. Ils ont découvert que l'eau noire fumante qui bouillonnait était surchauffée à plus de 400°C et fortement acide. Ils ont découvert d'étranges formes de vie vivant de l'énergie et des nutriments produits par les fumeurs. Des recherches plus poussées ont montré que l'eau de mer froide était attirée vers le fond marin fissuré à proximité, où les roches chaudes situées en dessous la réchauffaient. L'eau surchauffée a dissous les minéraux des roches environnantes en remontant vers le fond de la mer. Lorsqu'elle a jailli, l'eau a réagi avec l'eau de mer et des minéraux noirs se sont cristallisés sous forme de "fumée noire". C'est ce qu'on appelle aujourd'hui des **cheminées hydrothermales**.

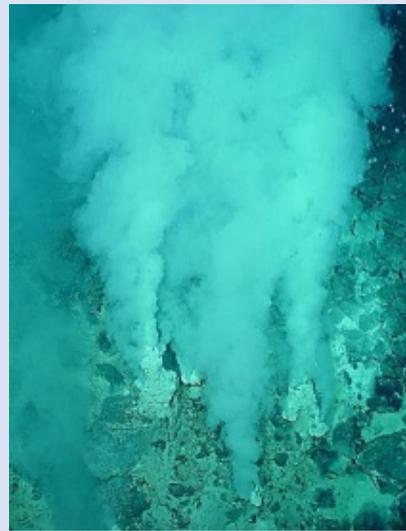
Cette découverte étonnante d'un nouveau processus inimaginable dans les profondeurs des fonds marins a modifié notre compréhension, non seulement des processus chimiques océaniques, mais aussi de la manière dont les communautés biologiques pouvaient se développer sans lumière. Elle a également permis de mieux comprendre la géophysique des dorsales océaniques. Il est rare qu'une seule découverte ait un tel impact sur notre compréhension de la biologie, de la chimie et de la physique. Alvin et d'autres sous-marins de haute mer poursuivent aujourd'hui encore le suivi de cette découverte. Des fumeurs blancs ont maintenant été découverts sur les fonds océaniques, loin des dorsales océaniques, avec une "fumée" blanche alcaline bouillonnante de minéraux de couleur pâle dans du dioxyde de carbone liquide.



Véhicule submersible de haute mer, Alvin



Fumérole noir, dorsale atlantique



Fuméoles blancs, Arc des Mariannes, Océan pacifique

Lorsque les plaques nouvellement formées s'écartent les unes des autres, cela provoque une tension et un rifting, la plaque solide étant fracturée par une série de failles normales. La partie centrale glisse vers le bas dans une vallée de rift. On trouve de telles vallées de rift au centre des dorsales océaniques du monde entier (figure 4.19). L'Islande est l'un des rares endroits où une dorsale océanique se trouve sur terre ; la figure 4.20 montre une petite vallée de rift islandaise faisant partie du système de rift de la dorsale océanique.

Figure 4.19. La vallée du rift au centre d'une dorsale océanique

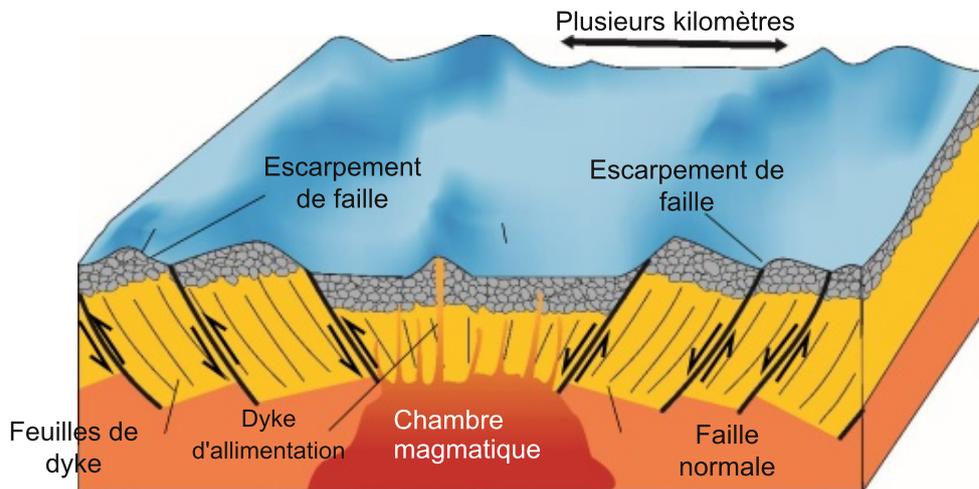


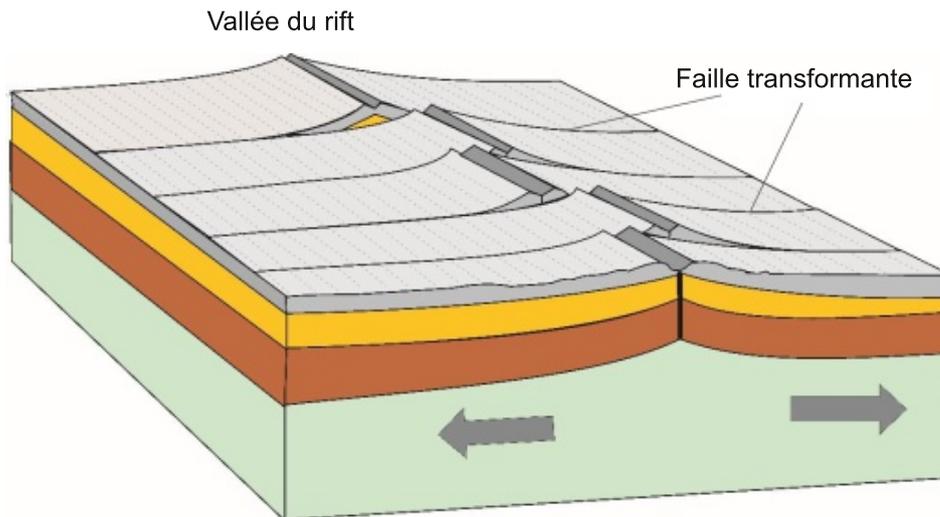
Figure 4.20. Une petite vallée de rift en Islande, liée au rift de la dorsale océanique



Les récents forages en eaux profondes et les preuves sismiques montrent que la nouvelle lithosphère océanique se forme d'une manière différente dans certaines parties de l'océan. Dans certaines zones, il semble que des dalles de manteau soient tirées vers le haut depuis le bas, le long de failles profondes, pour devenir de la nouvelle lithosphère océanique. Ce nouveau processus est encore à l'étude. Quelle que soit la façon dont la nouvelle lithosphère océanique se forme, dès qu'elle apparaît, des boues d'eau profonde commencent à se déposer sur elle depuis l'océan supérieur. Cette couverture de boue devient de plus en plus épaisse au fur et à mesure que la plaque s'éloigne des dorsales océaniques et traverse le plancher océanique profond.

Les marges conservatrices des plaques. Les dorsales océaniques sont décalées par des failles transformantes (figure 4.17) au niveau de ces marges, et celles-ci sont différentes de toutes les autres failles. Bien qu'elles se déplacent l'une par rapport à l'autre selon un mouvement de glissement normal, elles se prolongent dans des zones de fracture au-delà des dorsales océaniques, où les roches de chaque côté de la faille se déplacent dans la même direction, bien qu'à des vitesses légèrement différentes, comme le montre la figure 4.21.

Figure 4.21. Une série de failles transformantes décalant une dorsale océanique et une vallée de rift



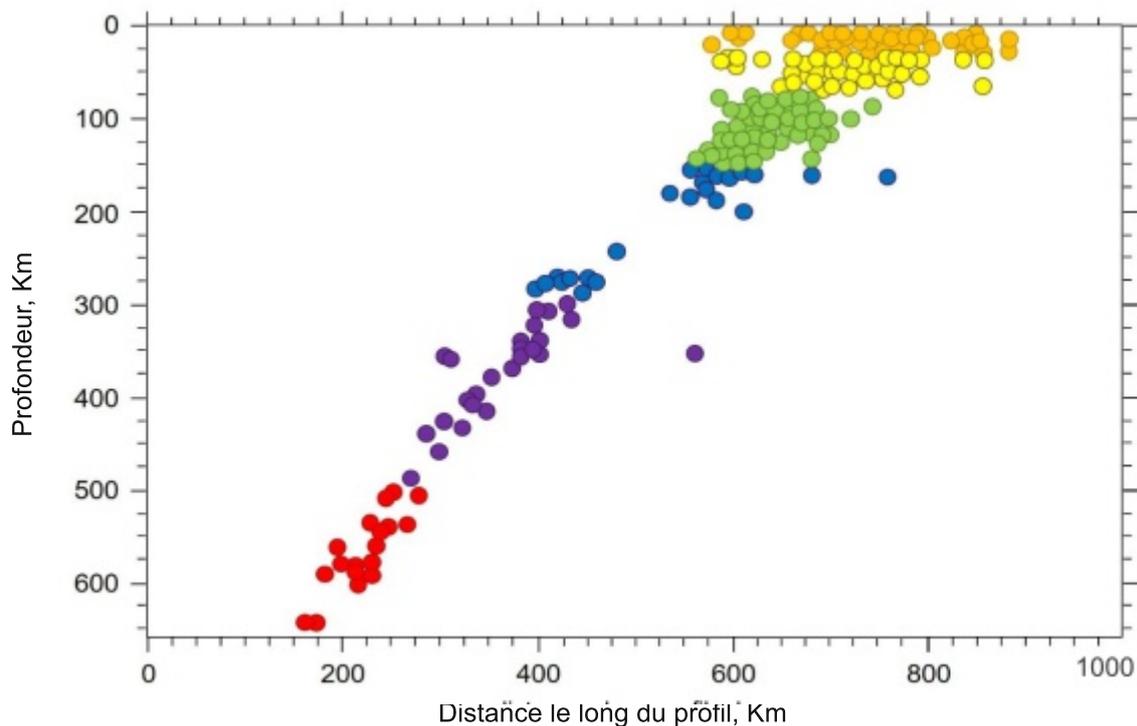
Les failles transformantes ne se contentent pas de décaler les dorsales océaniques mais relient également les marges des dorsales océaniques aux zones de subduction. Elles affectent également les continents ; des exemples célèbres de coupures de continents sont la faille alpine en Nouvelle-Zélande et la faille de San Andreas aux États-Unis (figure 4.22). Les failles transformantes étant des marges de plaques conservatrices, elles ne présentent aucune activité volcanique, malgré ce que l'on peut voir dans certains films populaires.

Figure 4.22. La faille de San Andreas en Californie, aux États-Unis. Le sol au premier plan a subi une faille de 130 mètres vers la gauche depuis que le ruisseau a creusé sa vallée, le décalant de cette distance.



Des tremblements de terre se produisent sur toutes les marges de plaques actives mais, comparés à ceux des zones de subduction, les tremblements de terre des marges divergentes et des failles transformantes sont tous de faible intensité ; ils ne se produisent que jusqu'à la profondeur de la lithosphère, dont l'épaisseur est inférieure à 100 km. Cependant, là où les plaques sont subduites, la lithosphère froide est entraînée dans le manteau et peut provoquer des séismes à toutes les profondeurs jusqu'à environ 750 km. La subduction provoque une zone inclinée de séismes, comme le montre la figure 4.23.

Figure 4.23. Tremblements de terre enregistrés dans la zone de subduction des îles Kouriles, dans le nord-ouest de l'océan Pacifique. Les séismes sont codés par couleur en fonction de leur profondeur, ce qui montre que la plaque est subduite vers la gauche.



Lorsque la lithosphère océanique froide s'enfonce dans le manteau, elle entraîne avec elle l'eau de mer piégée dans les roches. Cette eau, associée à l'augmentation de la température au fur et à mesure que la lithosphère s'enfonce, provoque la fusion partielle des roches situées au-dessus de la lithosphère en cours de subduction, produisant ainsi du magma. Une fois formé, le magma chaud a une densité inférieure à celle des roches situées au-dessus et s'élève, provoquant une activité ignée dans la plaque supérieure.

Les effets de la subduction sont différents selon l'endroit où elle se produit. Lorsqu'une plaque océanique se subduit sous une autre, une série d'îles volcaniques est produite. Lorsqu'une plaque océanique s'enfonce sous une plaque portant un continent, une chaîne de montagnes se forme avec une activité volcanique associée. Lorsque deux plaques portant des continents sont rapprochées par la subduction de la lithosphère océanique située entre elles, une chaîne de montagnes encore plus grande résulte de la collision.

Marges convergentes océan-océan. Lorsque deux plaques océaniques se rapprochent l'une de l'autre, la plaque la plus froide est plus dense et subduit donc. La subduction produit une fosse en eaux profondes où les deux plaques se rencontrent et une zone inclinée de tremblements de terre, comme sur la figure 4.23. La fusion partielle d'une partie de la dalle en subduction produit un magma intermédiaire (ni riche en fer ni en silicium) qui monte en éruptions volcaniques explosives produisant une chaîne de volcans. La fosse et les volcans forment une courbe à la surface de la Terre, ce qui donne un autre nom à ce type de marge : une **marge d'arc insulaire** (figure 4.24).

Figure 4.24. Subduction lors de la collision de deux plaques océaniques

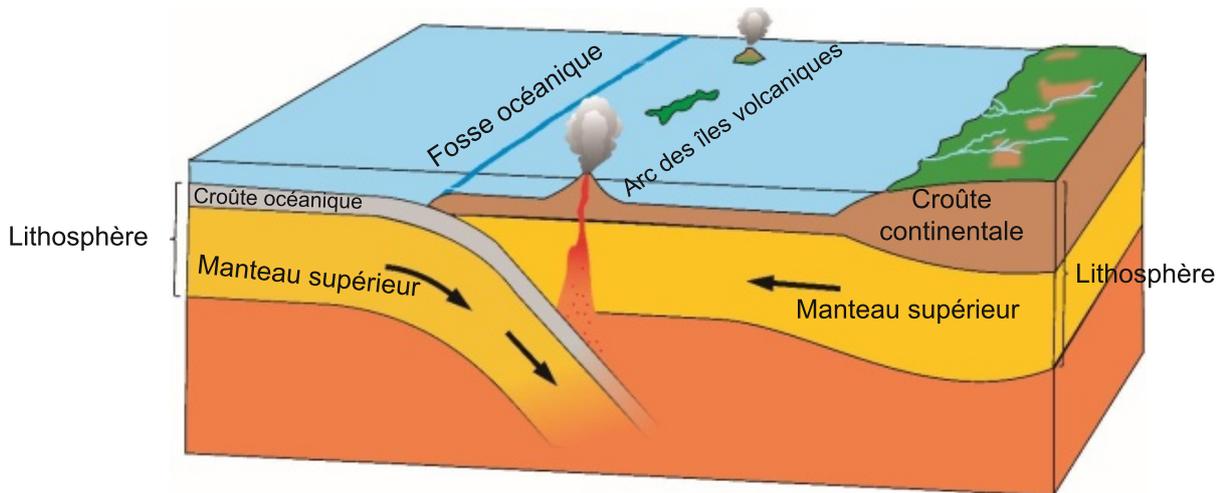
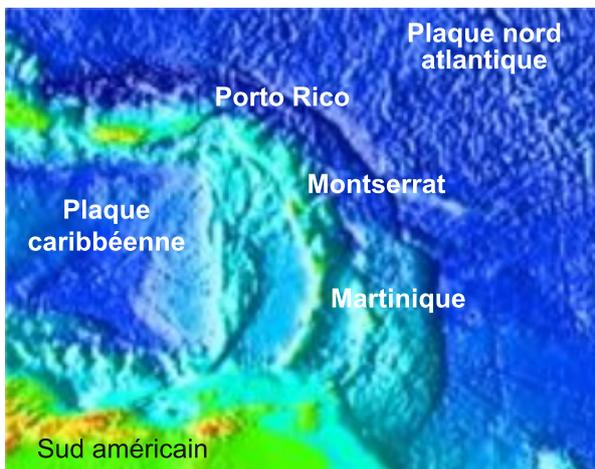


Figure 4.25. L'arc insulaire des Caraïbes, montrant la courbe de la fosse sous-marine avec l'arc d'îles volcaniques à l'intérieur, lorsque la plaque de l'Atlantique Nord entre en collision avec la plaque des Caraïbes.

Figure 4.26. Le volcan de Soufrière Hills en éruption sur l'île de Montserrat, dans l'arc insulaire des Caraïbes.



Marges convergentes océan-continent. Lorsqu'une plaque océanique entre en collision avec une plaque portant un continent, les roches continentales sont moins denses que la lithosphère océanique, ce qui entraîne la subduction de la plaque océanique. Comme pour les arcs insulaires, il en résulte une zone inclinée de séismes, couplée à des éruptions volcaniques explosives. Cependant, la présence d'un continent sur une plaque entraîne de nombreux autres effets. Lors de la subduction de la plaque océanique, des tranches du plancher océanique sont arrachées et empilées, comme le montre la figure 4.27, en un épais coin de sédiments appelé **prisme d'accrétion**. Cela ajoute de nouveaux matériaux au continent, qui se développe ainsi vers l'extérieur. Il croît également vers le haut et vers le bas car, à mesure que de nouveaux matériaux sont ajoutés, des montagnes se forment et le continent s'épaissit. Lorsque les montagnes s'élèvent, elles s'enfoncent davantage dans le manteau sous-jacent, car ce dernier, bien que solide, est capable de s'écouler. Ainsi, à mesure que les montagnes de la croûte continentale s'élèvent, leurs bases sont forcées de s'enfoncer plus profondément. Les masses de croûte continentale forcées à descendre pour soutenir les chaînes de montagnes sont appelées **racines de montagne**.

Bien que les températures et les pressions des racines des montagnes soient intenses en raison de leur grande profondeur, il existe également des pressions de compression supplémentaires dues à la force des plaques qui se déplacent ensemble. Ce sont ces pressions latérales qui déforment et métamorphosent les roches. Pendant ce temps, le magma est produit par la fusion partielle liée à la plaque en subduction. Non seulement des magmas intermédiaires sont produits, mais la fusion partielle de la croûte inférieure produit également des fontes riches en silicium. Ces derniers sont généralement si visqueux qu'ils se solidifient avant d'atteindre la surface dans de grandes chambres magmatiques, formant des plutons et des batholites. Le lent refroidissement de cette roche riche en silicium forme le granite. Si le magma riche en

silicium atteint la surface, comme le magma intermédiaire, il provoque des éruptions explosives de cendres volcaniques très dangereuses.

Figure 4.27. Subduction d'une plaque océanique sous une plaque continentale

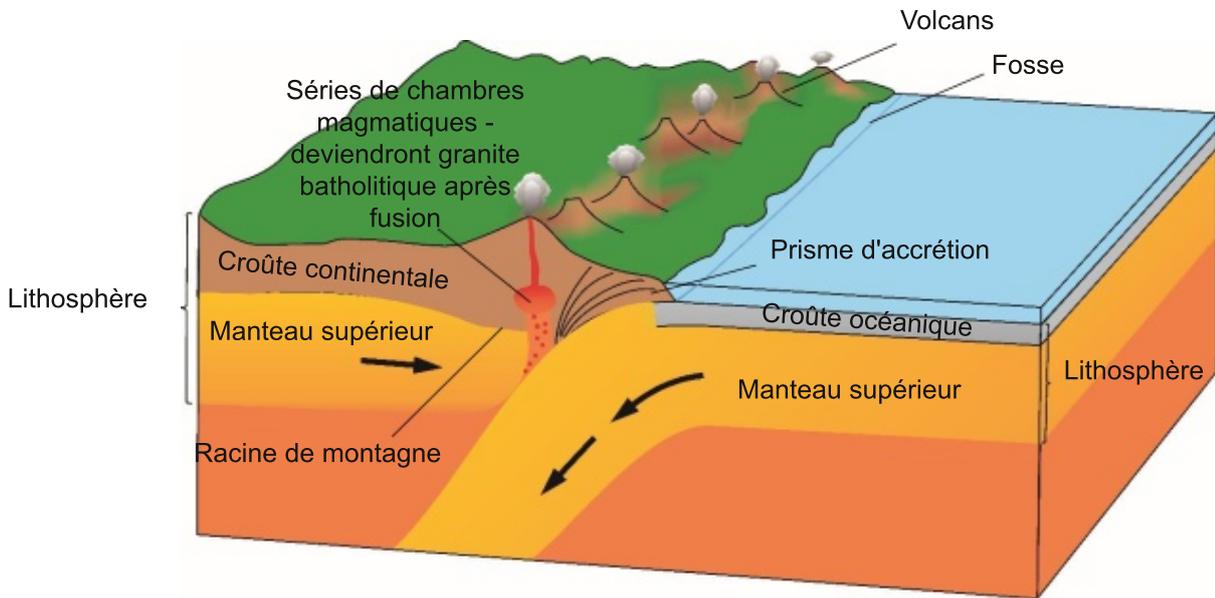


Figure 4.28. La zone de collision formée par la plaque Nazca en subduction sous la plaque sud-américaine.

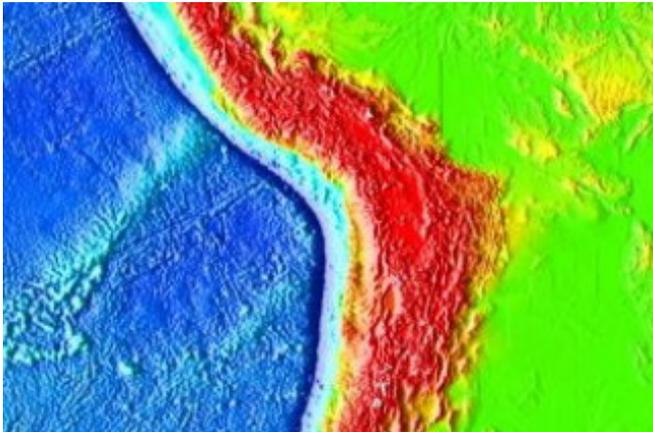


Figure 4.29. La chaîne de montagnes des Andes entre le Chili et l'Argentine



Marges convergentes continent-continent. Lorsque deux plaques portant des continents se rapprochent l'une de l'autre, la plaque océanique située entre elles se subduit et l'océan se referme progressivement. La collision des continents sur les plaques produit de hautes chaînes de montagnes aux racines profondes, les plus hautes chaînes de montagnes de la Terre. La collision provoque une déformation intense, avec des failles de chevauchement et des plissements à grande échelle, ainsi qu'un métamorphisme jusqu'aux degrés les plus élevés. Bien que la zone de collision puisse être active pendant des millions d'années, la subduction ne peut plus avoir lieu et il n'y a donc plus d'activité volcanique. Néanmoins, la région est très sujette aux tremblements de terre, souvent de grande magnitude et catastrophiques (Figures 4.30, 4.31 et 4.32).

Figure 4.30. Une zone de collision entre deux plaques continentales

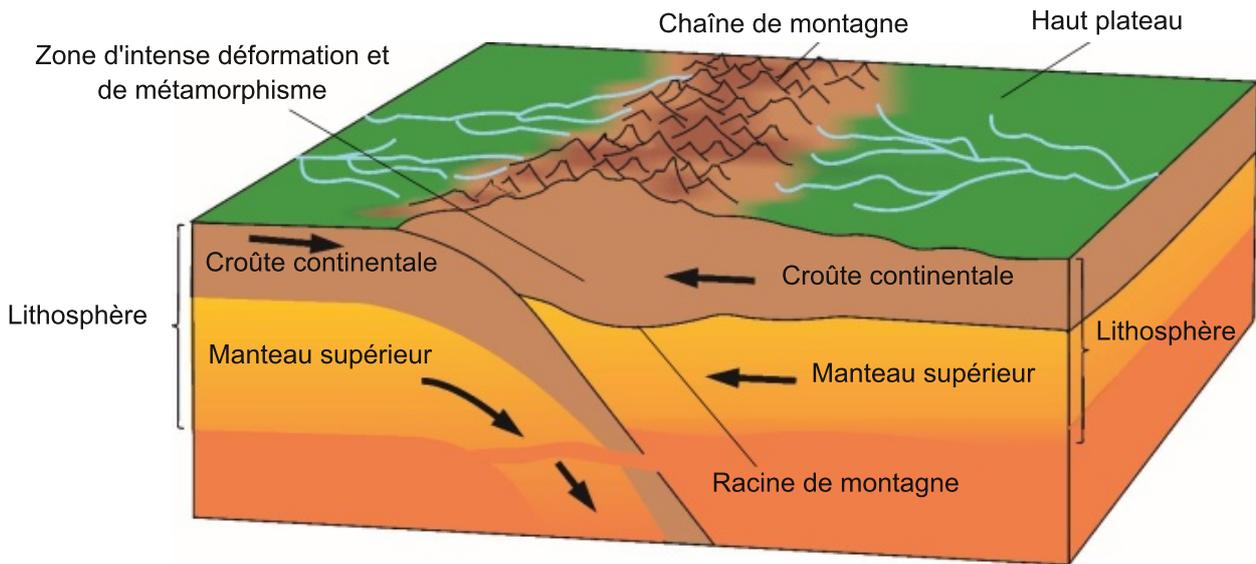


Figure 4.31. Collision de la plaque indienne avec la plaque eurasiennne, produisant la chaîne de montagnes de l'Himalaya.

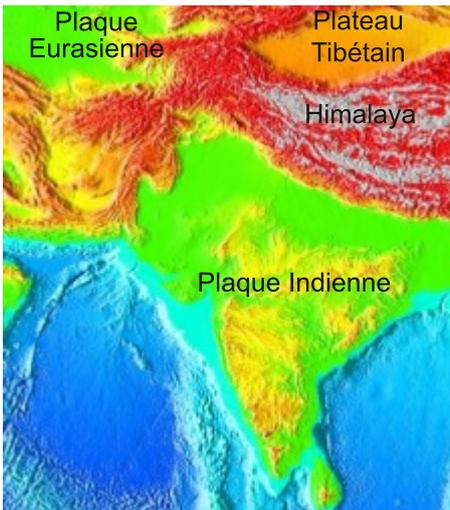


Figure 4.32. La chaîne de montagnes de l'Himalaya vue de la Station spatiale internationale, avec le Mont Everest en haut au centre



Encadré 4.10. Nappes de chevauchement produites par les collisions de plaques

Lorsque deux plaques continentales entrent en collision, des nappes de roches peuvent être poussées vers le haut et déplacées sur plusieurs kilomètres le long de failles de chevauchement à faible angle. Parfois, les roches situées à l'avant des chevauchements peuvent être renversées en d'énormes plis, où la séquence rocheuse à la base des plis est complètement inversée.



Le chevauchement de Glaris dans les Alpes suisses. La roche sombre près du sommet de la montagne a été poussée vers le nord sur plus de 100 km au-dessus des roches inférieures, lorsque la chaîne de montagnes alpines a été soulevée par la collision entre les plaques africaine et européenne.



Le pli de la Dent de Morcles, dans les Alpes suisses, près du Valais. Les roches plus foncées au sommet de la montagne ont le même âge que celles situées sous le pli, où la séquence de roches inférieures a été renversée par la collision des plaques africaine et européenne.

Maintenant que nous savons comment fonctionnent les marges des plaques, nous pouvons expliquer les parties du cycle des roches qui étaient difficiles à comprendre avant l'avènement de la théorie de la tectonique des plaques, comme le montre le tableau 4.21.

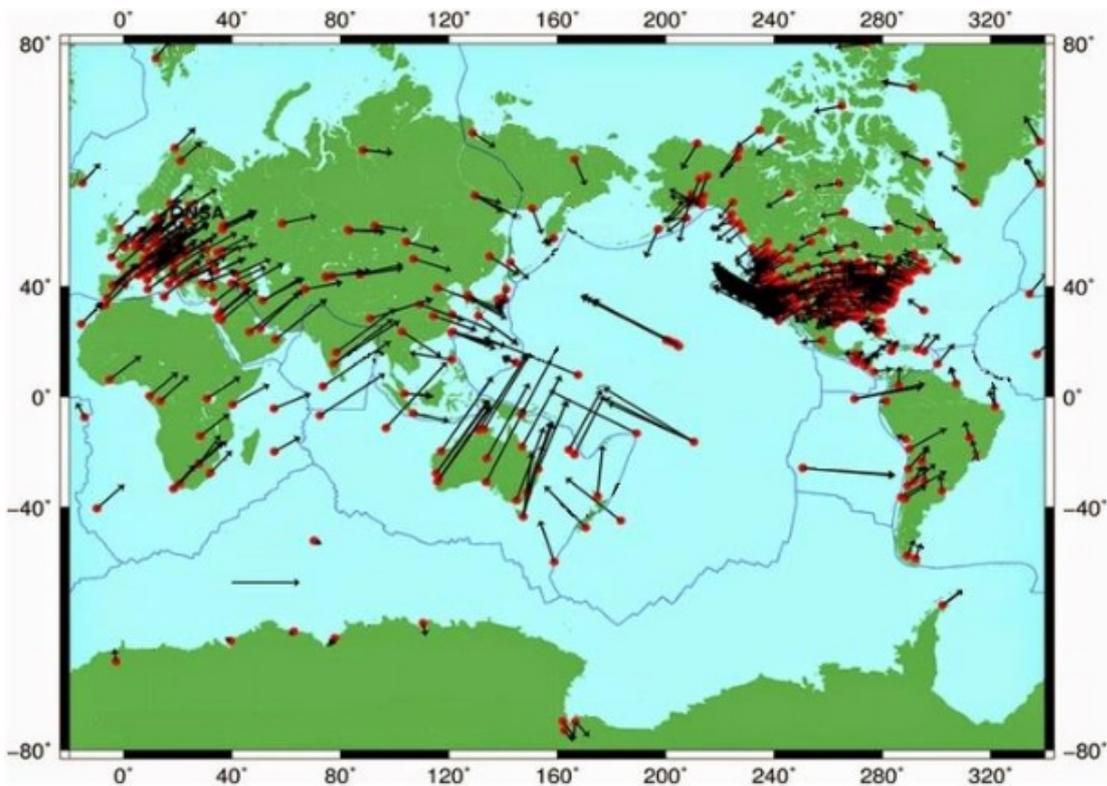
Tableau 4.21. Processus du cycle interne des roches maintenant expliqués par la théorie de la tectonique des plaques

Processus du cycle interne de la roche	Explication des plaques tectoniques
Métamorphisme	Métamorphisme régional : lorsque des chaînes de montagnes se forment sur les marges des plaques océaniques et continentales, les roches sont transportées à des profondeurs où les températures et les pressions des roches sus-jacentes sont très élevées ; la contrainte de compression supplémentaire exercée par les plaques en collision entraîne la recristallisation de la roche
	Métamorphisme thermique : les magmas intrudés, formés comme décrit ci-dessous, cuisent les roches environnantes dans une auréole métamorphique.
Fusion (fusion partielle)	Dans les zones de subduction : la plaque en subduction entraîne de l'eau avec elle ; l'eau et l'augmentation de la température provoquent la fusion partielle des roches situées au-dessus de la plaque et le magma de plus faible densité formé par ce processus remonte ensuite.
	Sur les marges des plaques divergentes : sous les dorsales océaniques, le manteau devient suffisamment chaud pour fondre partiellement, générant des magmas riches en fer et en magnésium qui forment le nouveau matériau des plaques océaniques.
Intrusion ignée	Lorsque le magma des marges des plaques remonte dans la croûte plus froide située au-dessus, il se refroidit et se cristallise dans de grandes chambres magmatiques sous forme de plutons ou de batholites.
Activité volcanique	Si le magma des marges des plaques et des points chauds atteint la surface, il entre en éruption ; les éruptions peuvent être relativement sûres ou catastrophiques
Soulèvement	Lorsque des chaînes de montagnes se forment sur les marges des plaques océaniques-continentales ou continentales-continentales, une partie de la roche est soulevée tandis que d'autres zones sont enfoncées dans les racines des montagnes. Comme la chaîne de montagnes "flotte" dans le manteau solide, lorsque la roche sus-jacente est enlevée par l'érosion, les roches sous-jacentes se soulèvent et sont soulevées.
Déformation	Sur les marges divergentes : lorsque les plaques s'écartent, les roches fragiles se fracturent en failles normales, un côté glissant sur l'autre.
	Aux marges conservatrices : dans la formation de failles transformantes, une plaque glisse sur une autre et les roches fragiles se fracturent en failles coulissantes.
	Sur les marges des plaques convergentes océaniques-continentales ou continentales-continentales, les énormes forces de compression provoquent la fracture des roches près de la surface en failles inverses et en failles de chevauchement ; à plus grande profondeur, les roches se déforment par plissement.

4.1.4.4 Mécanisme et vitesses de déplacement

Aujourd'hui, le mouvement des plaques peut être suivi par des satellites grâce au système de positionnement global (GPS). Cela montre des taux de mouvement des plaques compris entre 1 et 10 cm par an, soit à peu près le rythme de croissance de vos ongles (figure 4.33).

Figure 4.33. Taux de déplacement des plaques ; la longueur des flèches indique la vitesse de la plaque mesurée par le GPS.



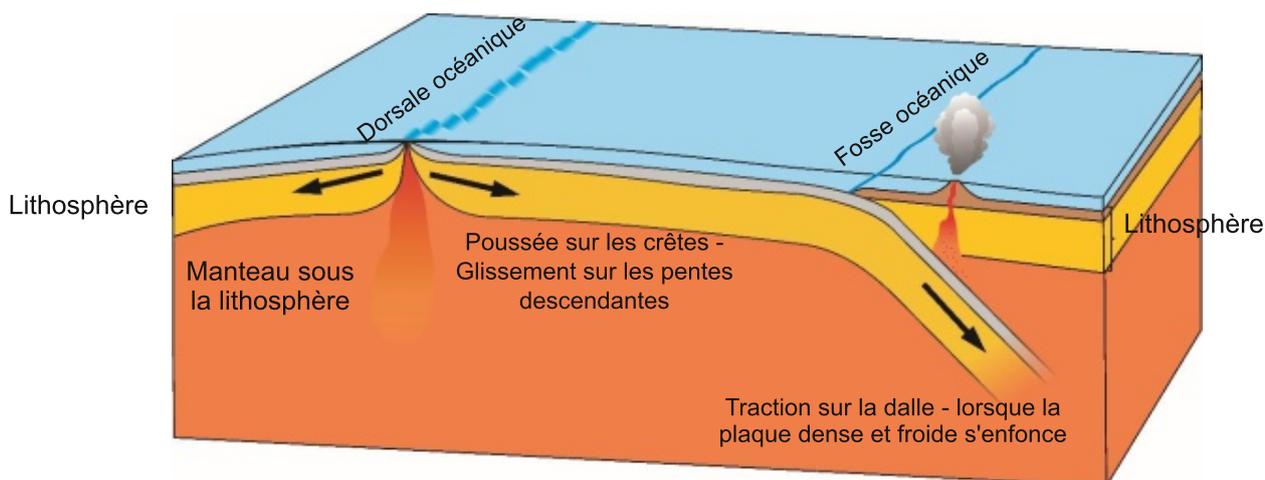
Pendant de nombreuses années, on a pensé que les plaques étaient entraînées par des courants dans le manteau solide sous-jacent ; ces courants entraînés par la chaleur sont appelés **courants de convection**. Aujourd'hui, nous pouvons utiliser les informations sismiques pour scanner la Terre, comme les scanners médicaux peuvent être utilisés pour scanner votre corps. Ce balayage a jusqu'à présent remis en question l'idée de courants de convection à grande échelle dans le manteau. Il se peut donc que le **mécanisme de convection du manteau** ne soit pas la principale force motrice du mouvement des grandes plaques.

Les plaques se déforment dans les zones de subduction parce qu'elles sont plus denses que les roches environnantes. Il semble que la plupart des mouvements de plaques puissent s'expliquer par le fait que la dalle de lithosphère froide et dense qui s'enfonce entraîne la plaque à laquelle elle est attachée à travers la surface ; c'est le **mécanisme de traction de la dalle**. Ce mécanisme agit comme un tissu dont un bord est suspendu au-dessus d'une table lisse - lorsque le bord tombe sur le sol, il entraîne le reste du tissu sur la surface.

Là où il n'y a pas d'effet important de l'attraction des dalles, il semble y avoir une poussée des dorsales océaniques. Les dorsales océaniques étant plus élevées que le plancher océanique environnant, la lithosphère nouvellement formée glisse sur les dorsales et pousse la plaque vers l'avant ; c'est le **mécanisme de poussée par les dorsales**.

L'attraction des plaques et la poussée des dorsales semblent désormais être les principales forces motrices des grandes plaques, même si les recherches se poursuivent ; d'autres forces peuvent également avoir des effets (figure 4.34).

Figure 4.34. Mécanismes de mouvement des plaques



4.1.4.5 Preuves

Nous disposons aujourd'hui de tellement de preuves pour soutenir la théorie de la tectonique des plaques qu'elle peut presque être considérée comme un "fait" plutôt que comme une théorie. Cela est d'autant plus vrai que, comme toutes les bonnes théories, elle a rassemblé de nombreuses idées et proposé des prédictions, qui ont été testées et se sont avérées correctes. Cependant, comme la plupart des théories, la tectonique des plaques n'explique certainement pas tous les processus de la Terre extérieure, et certaines de ses prédictions sont encore à l'étude.

Les principales preuves qui soutiennent aujourd'hui la théorie de la tectonique des plaques sont résumées dans le tableau 4.22.

Tableau 4.22. Les principales preuves soutenant la théorie de la tectonique des plaques

Preuve	Proposé par	Explication	Image
Forme en puzzle	Du Toit, Wegener	Les continents étaient ensemble mais se sont séparés, c'est pourquoi les formes de leurs côtes correspondent. Des reconstitutions ultérieures basées sur les bords des plateaux continentaux et utilisant la modélisation informatique ont montré une correspondance très proche.	<p>Chevauchement ■ Lacunes</p>
Preuve géologique sur le puzzle	Du Toit, Wegener	Les formes des roches sur les continents correspondent, lorsque les continents sont remis ensemble. Ici, les roches de couleur brune ont plus de 2000 millions d'années et celles de couleur vert pâle ont 2000 à 600 millions d'années.	

Tableau 4.22. Les principales preuves soutenant la théorie de la tectonique des plaques, suite

Preuve	Proposé par	Explication	Image
Preuve de fossile sur le puzzle	Wegener	Les endroits où l'on trouve des fossiles terrestres s'emboîtent lorsque les continents sont mis ensemble ; cette carte montre où se trouvent ces fossiles : Cynognathus (brun), Lystrosaurus (orange), Glossopteris (vert) et Mesosaurus (bleu).	
Preuve paléoclimatique	Wegener	Les zones des continents qui étaient à l'origine recouvertes de glace correspondent lorsque les continents sont réassemblés ; les cartes montrent la zone précédemment glacée en grisé	
Relief de la Terre	Hess	Hess s'est rendu compte que les caractéristiques du plancher océanique, comme les tranchées et les crêtes océaniques, pouvaient être reliées entre elles dans son hypothèse de l'étalement du plancher océanique ; cette hypothèse a ensuite été étendue, par la tectonique des plaques, pour inclure également les caractéristiques continentales.	
Distribution de carte volcanique		La configuration des volcans sur la Terre, représentée par des points rouges ; ils sont tous liés aux limites des plaques ou aux "points chauds"	

Tableau 4.22. Les principales preuves soutenant la théorie de la tectonique des plaques, suite

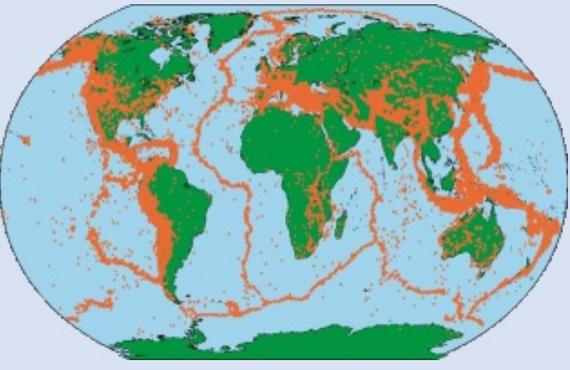
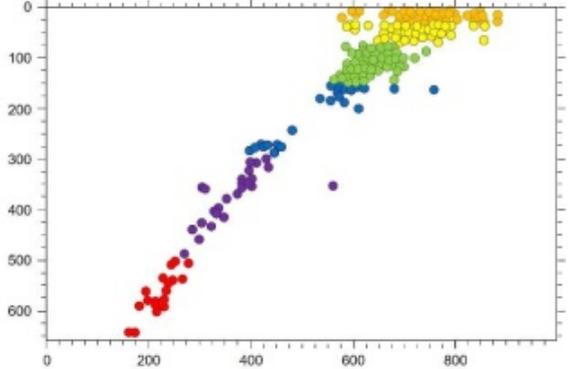
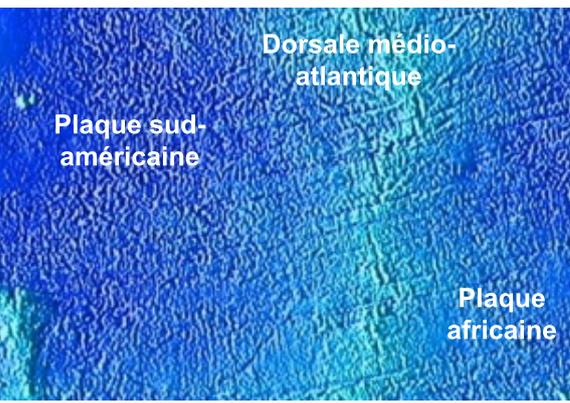
Preuve	Proposé par	Explication	Image
<p>Carte de distribution des tremblements de terre</p>		<p>La répartition des principaux séismes, représentés ici par de petits points orange, montre que, bien qu'il y ait des séismes en de nombreux endroits, la plupart se produisent sur les marges des plaques, en particulier dans les zones de subduction.</p>	
<p>Profondeur des tremblements de terre</p>	<p>Benioff, Wadati</p>	<p>L'augmentation de la profondeur des séismes le long des zones de subduction montre l'inclinaison de la plaque en subduction, comme expliqué ci-dessus.</p>	
<p>Bandes magnétiques</p>	<p>Vine and Matthews, Morley</p>	<p>Le motif symétrique des "bandes magnétiques" dans les basaltes des fonds océaniques de part et d'autre des dorsales océaniques montre comment la nouvelle lithosphère océanique s'écarte de part et d'autre, comme expliqué ci-dessus.</p>	
<p>Les failles transformantes</p>	<p>J. Tuzo Wilson</p>	<p>Lorsque les dorsales océaniques sont décalées, on observe des failles inhabituelles qui se déplacent latéralement entre les dorsales mais dans la même direction en s'éloignant des dorsales ; ces failles transformantes relient également différentes sortes de marges de plaques, comme la faille de San Andreas par exemple.</p>	 <p>Dorsale médio-atlantique</p> <p>Plaque sud-américaine</p> <p>Plaque africaine</p>

Tableau 4.22. Les principales preuves soutenant la théorie de la tectonique des plaques, suite

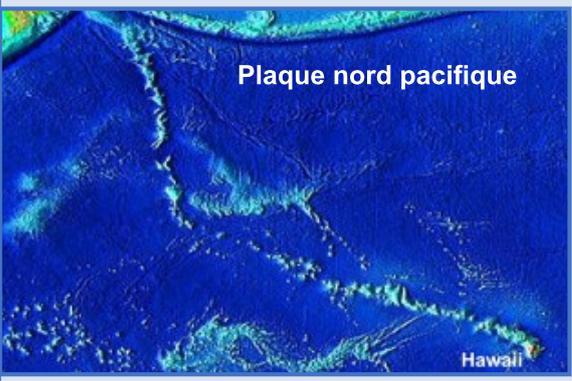
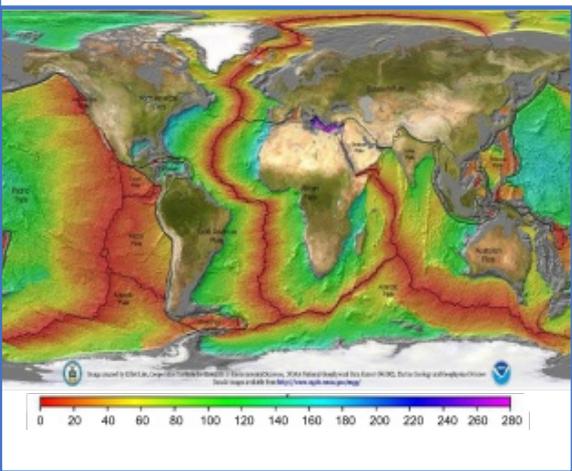
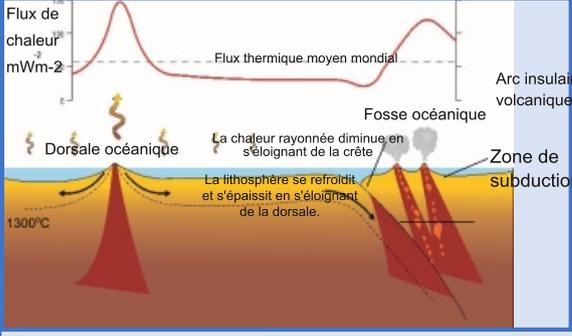
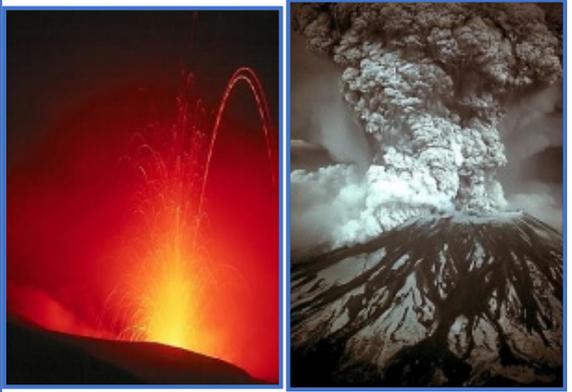
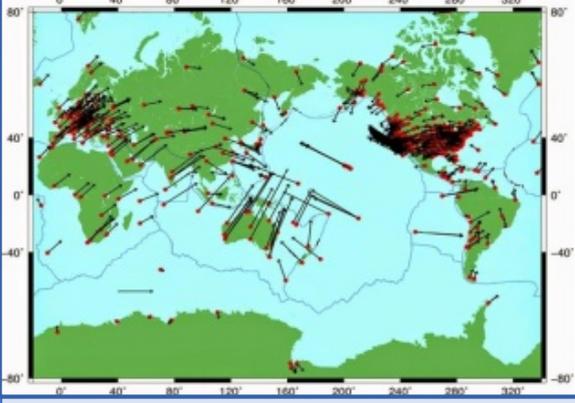
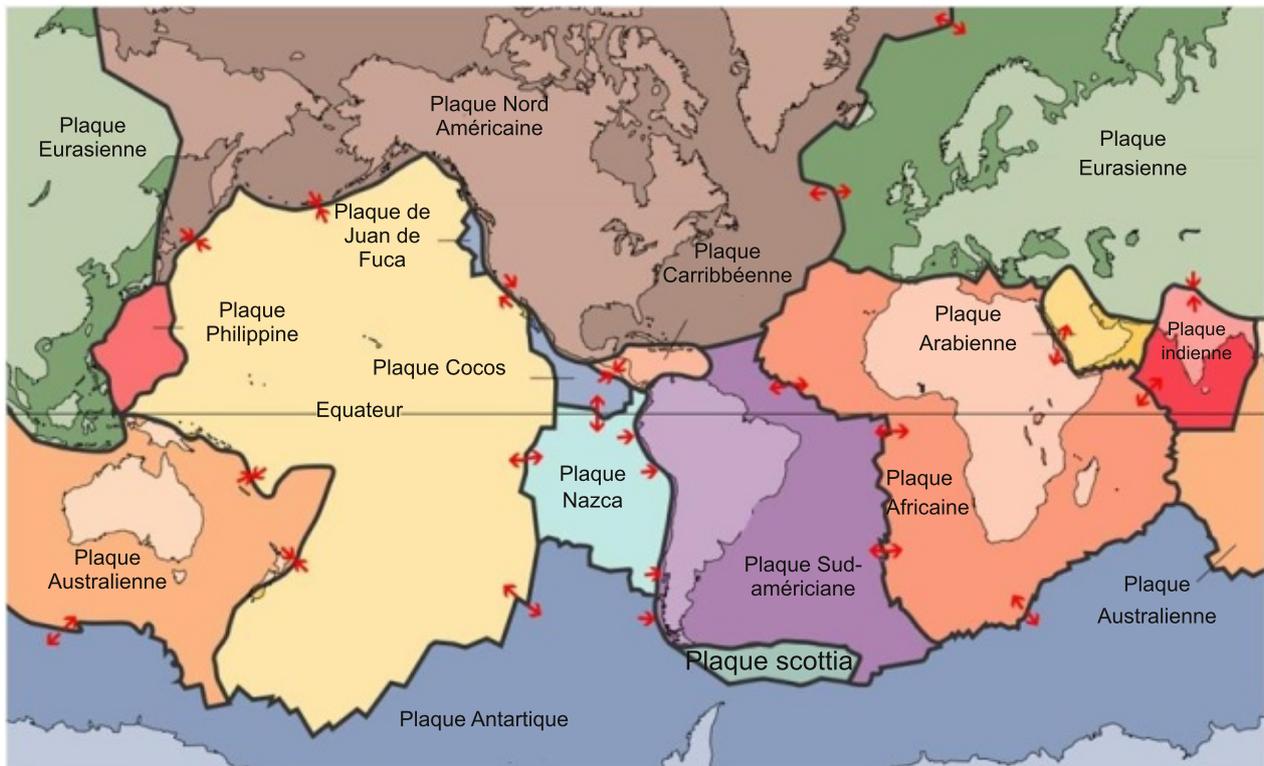
Preuve	Proposé par	Explication	Image
Points chauds	J. Tuzo Wilson	Lorsque les plaques se déplacent sur des "points chauds" dans le manteau, l'activité volcanique fait éruption à travers eux ; les volcans éteints vieillissent en s'éloignant du point chaud, ce qui montre la direction du mouvement des plaques, comme expliqué ci-dessus	
Âge du plancher océanique		Les forages en eaux profondes ont permis de récupérer des roches qui peuvent être datées par radiométrie. Cette carte montre l'âge des roches les plus anciennes trouvées dans différentes parties des océans ; les roches du fond des océans sont les plus jeunes près des dorsales océaniques et deviennent plus anciennes en s'éloignant.	
Flux de chaleur		Les mesures de la chaleur qui s'échappe de la Terre montrent des points hauts au niveau des dorsales océaniques et des zones volcaniques continentales, des points bas au niveau des tranchées, et le refroidissement lent et régulier de la plaque lorsqu'elle s'éloigne des dorsales.	
Composition du magma		Les éruptions au niveau des dorsales océaniques et des points chauds sont constituées de basalte ; les éruptions dans les zones de subduction sont principalement constituées d'andésite et de cendres volcaniques. Les différents types de magma s'expliquent par les différents processus de plaques qui s'y déroulent.	

Tableau 4.22. Les principales preuves soutenant la théorie de la tectonique des plaques, suite

Preuve	Proposé par	Explication	Image
Mesures du mouvement des plaques		Les mouvements actuels des plaques sont représentés par des mesures GPS ; plus la flèche est longue dans ce diagramme, plus le mouvement est rapide.	

Les nombreuses recherches scientifiques sur la tectonique des plaques ont fourni les données nécessaires pour dessiner une carte détaillée des principales plaques et des marges de plaques sur la Terre, comme dans la figure 4.35. Une carte du monde ne peut montrer que les plaques majeures ; il existe également de nombreuses plaques mineures.

Figure 4.35. Les principales plaques tectoniques de la Terre ; les flèches rouges indiquent les directions du mouvement des plaques sur les marges des plaques.



4.2 L'hydrosphère

L'hydrosphère est le nom donné à toute l'eau présente sur notre planète - des vastes océans à la condensation que l'on peut voir sur l'extérieur d'une canette de boisson fraîche, et des hauteurs de l'atmosphère au fond du trou de forage le plus profond.

4.2.1 L'eau continentale

4.2.1.1 Sources d'eau continentales

Le principal réservoir d'eau sur Terre est constitué par les océans, mais l'eau est amenée sur les continents par les processus du cycle de l'eau décrits au chapitre 1. Bien que seulement 2,5 % environ de l'eau de la Terre se trouve sur les continents (le reste se trouve dans les océans), l'eau douce des continents a non seulement un large éventail d'effets géologiques, mais elle est également vitale pour la vie sur Terre. Les différentes sources d'eau continentale sont présentées dans le tableau 4.23.

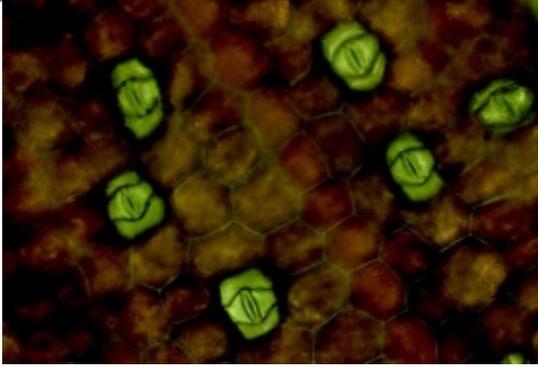
Tableau 4.23. L'eau continentale sur Terre

Source d'eau	Pourcentage de l'eau continentale	Image	Source
Calottes glaciaires, glaciers et neige permanente	68,7		La calotte glaciaire recouvrant l'île Saunders dans la baie de Baffin, près du Groenland
Eaux souterraines	30,1		Eau souterraine émergeant du sol - une source d'eau contenant des minéraux dissous dans les montagnes du Caucase, en Asie occidentale.
Glace de sol et permafrost (sol gelé et eaux souterraines)	0,86		Sol structuré produit par le pergélisol dans la toundra gelée des Western Arctic National Parklands, en Alaska, aux États-Unis.

Tableau 4.23. L'eau continentale sur Terre, suite

Source d'eau	Pourcentage d'eau continentale	Image	Source
Lacs	0,2		Le lac Satpara, l'un des lacs d'altitude les plus élevés du Pakistan
Humidité du sol	0,05		Sol humide du Lüningsburg en Basse-Saxe, Allemagne
Atmosphère	0,04		Nuages dans le ciel au Muelle de El Quisco, Valparaiso, Chili, 1997
Eau des marais	0,03		La forêt marécageuse d'eau douce de Ratargul à Sylhet, au Bangladesh

Tableau 4.23. L'eau continentale sur Terre, suite

Source d'eau	Pourcentage d'eau continentale	Image	Source
Rivière	0,006		Les méandres du fleuve Yukon, dans le nord du Canada
Eau biologique	0,003		Une feuille de Tradescantia zebrina vue au microscope, montrant les stomates verts, qui libèrent l'eau dans l'atmosphère lors de la transpiration.

Plus des deux tiers de l'eau continentale se trouvent dans les calottes glaciaires des régions polaires et dans les zones montagneuses couvertes de glace et de neige. Cette eau s'accumule sous forme de neige qui se transforme en calottes glaciaires et en glaciers ; elle est recyclée lors de leur fonte.

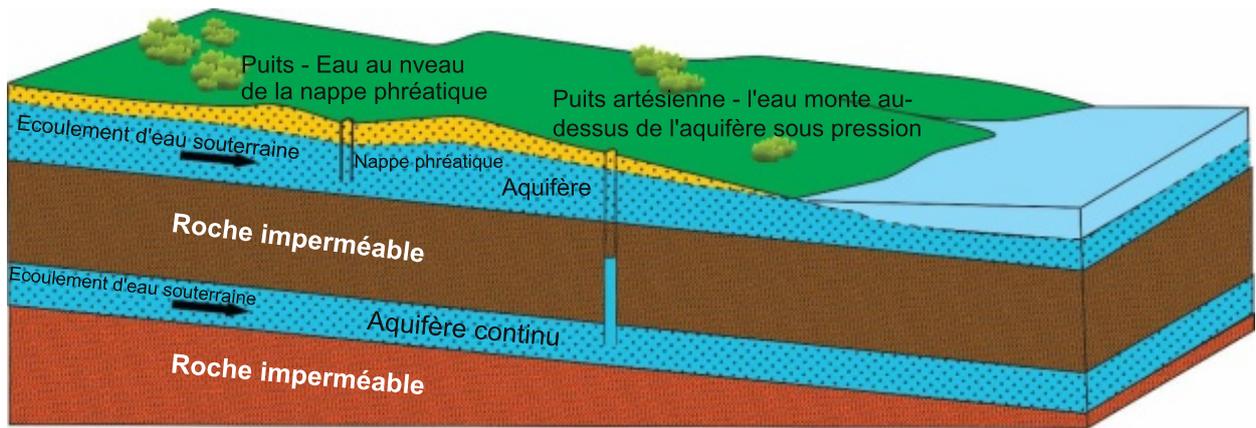
La majeure partie de l'eau continentale restante se trouve sous terre, dans les pores des roches, sous forme d'eau souterraine ou, lorsque le sol est gelé, sous forme de permafrost. Moins de 1 % de l'eau de la Terre forme tous les lacs, réservoirs et réseaux fluviaux. Un infime pourcentage de l'eau de la Terre se trouve dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau invisible et de gouttelettes d'eau visibles dans les nuages. L'eau atmosphérique est rapidement recyclée, apportant de l'eau sur les continents par la pluie et d'autres types de précipitations comme la neige et la grêle.

Lorsqu'il pleut, une partie de la pluie s'écoule sur le sol dans des gouttières et des petits ruisseaux, puis dans des ruisseaux et des rivières plus importants. Cependant, une partie percole dans le sol, un processus connu sous le nom **d'infiltration**. Les animaux et les plantes du sol utilisent une grande partie de cette eau et une partie est recyclée dans l'atmosphère par les plantes. Les plantes absorbent l'eau par leurs racines, la font remonter le long de leurs tiges et de leurs troncs, et la perdent par leurs feuilles sous forme de vapeur d'eau dans l'air ; c'est le processus de **transpiration**.

Une partie de l'eau s'écoule plus bas, dans la roche-mère. L'eau s'écoule dans la roche jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau où tous les minuscules pores sont remplis d'eau. C'est ce qu'on appelle la **zone saturée**, car elle est saturée d'autant d'eau qu'elle peut en contenir. Le sommet de la zone saturée est la nappe phréatique. Si vous regardez dans un puits, vous pouvez voir la surface de l'eau bien en dessous - c'est la **nappe phréatique**. L'eau de la zone saturée est appelée **eau souterraine** et elle s'écoule en descendant sous terre jusqu'à ce qu'elle ressorte de la roche à **une source**, un marais ou une tourbière, ou qu'elle se jette dans une rivière, un lac ou la mer. L'eau souterraine ne s'écoule que lentement, et peut parfois rester dans la roche pendant des milliers d'années.

Les roches qui contiennent de l'eau pouvant être extraite pour être utilisée sont appelées **aquifères**. La plupart des aquifères sont ouverts à l'air libre, mais il arrive que la roche contenant l'eau souterraine plonge sous une couche imperméable, l'aquifère devient alors un aquifère captif et l'eau qu'il contient est une **eau artésienne**. Lorsque des puits sont forés dans des aquifères captifs, l'eau remonte au niveau qu'elle avait lorsqu'elle était captive (figure 4.36). Si la zone où elle a été confinée se trouve au-dessus de la surface de la Terre où le forage est effectué, l'eau s'écoule du sol dans un **puits d'écoulement**.

Figure 4.36. Aquifères



4.2.1.2 Approvisionnement en eau

L'eau est peut-être notre ressource la plus importante. Sans eau, la vie est impossible et les humains ne peuvent pas survivre. L'eau est vitale pour l'agriculture et pour de nombreux besoins industriels, ainsi que pour nos besoins domestiques quotidiens. La plus grande partie de l'eau dans le monde est utilisée pour l'agriculture ; environ un quart de l'eau utilisée dans le monde l'est par l'industrie et seulement environ 8% par les ménages. Néanmoins, seuls 85 % environ de la population mondiale ont accès à de l'eau potable. Les 15 % restants doivent puiser leur eau dans des rivières, des lacs ou des puits, alors que l'accès à une eau propre est connu pour être le facteur le plus important pour la santé humaine.

L'eau du robinet, qui provient soit des eaux de surface des rivières et des réservoirs, soit des eaux souterraines, doit être traitée pour être utilisable. Le traitement comprend la décantation et la filtration pour éliminer les sédiments boueux en suspension, ainsi que des méthodes chimiques et biologiques pour éliminer les matières organiques comme les bactéries, les algues et les virus.

La majeure partie de l'eau sur Terre provient de sources de surface, mais environ 40 % sont des eaux souterraines pompées dans des aquifères. Les eaux souterraines sont naturellement filtrées par la roche-mère et sont donc généralement beaucoup plus propres que les eaux de surface. Les approvisionnements commerciaux en eaux souterraines subissent cependant toujours un traitement de l'eau, même si la plupart des eaux prélevées directement des sources peuvent être bues sans danger. En effet, une grande partie de l'eau de source est mise en bouteille dans le commerce pour être vendue sans aucun traitement.

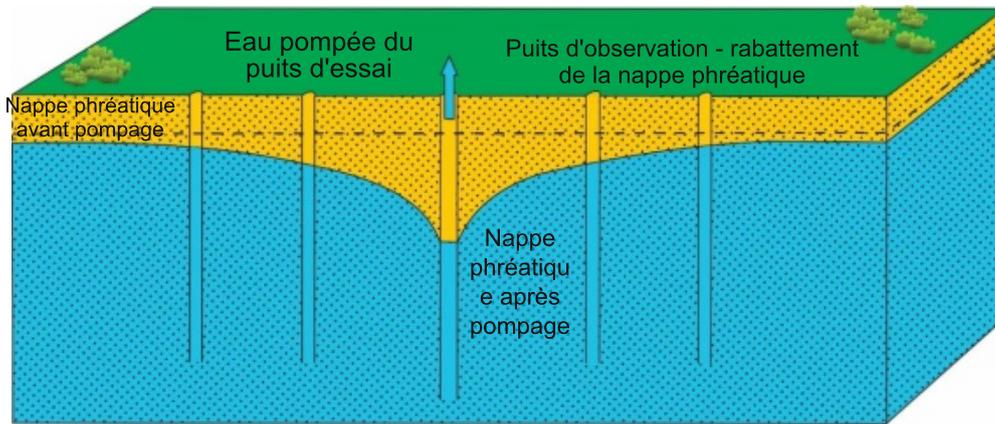
Encadré 4.11. L'eau de source vendue dans le commerce

Il existe une très large gamme d'eaux de source embouteillées en vente.



Les hydrogéologues recherchent de l'eau en étudiant la topographie et la géologie d'une zone, puis en forant un trou de sonde, appelé **puits**. Une série de puits d'observation est forée en ligne de part et d'autre du puits d'essai et l'eau est pompée à partir du puits d'essai, ce qui fait baisser la nappe phréatique. Si le rabattement s'effectue sur une large zone, l'eau s'écoule facilement dans le puits d'essai et il est probable que le projet soit couronné de succès. Cependant, si la zone de rabattement est petite, la roche n'est pas très perméable et le puits risque de ne pas être fiable pour l'approvisionnement en eau (Figure 4.37).

Figure 4.37. Puits test



Lorsqu'un puits a été trouvé, l'eau doit être pompée (sauf s'il s'agit d'un puits artésien). Dans le passé, le pompage se faisait à la main ou à l'aide d'énormes machines à vapeur. De nos jours, les pompes manuelles sont encore utilisées dans les zones rurales, ainsi que les pompes éoliennes, mais ailleurs, les eaux souterraines sont pompées à l'aide de pompes diesel ou électriques.

Encadré 4.12. Méthodes de pompage des eaux souterraines



Station de pompage victorienne, Londres, Angleterre, qui contenait une qui contenait autrefois un énorme moteur de pompage à vapeur



Pompes éoliennes, Namaqualand, Afrique du Sud



Pompe diesel pour eaux souterraines utilisée aujourd'hui, Angleterre



Une pompe manuelle moderne, gare de Pindial, Inde

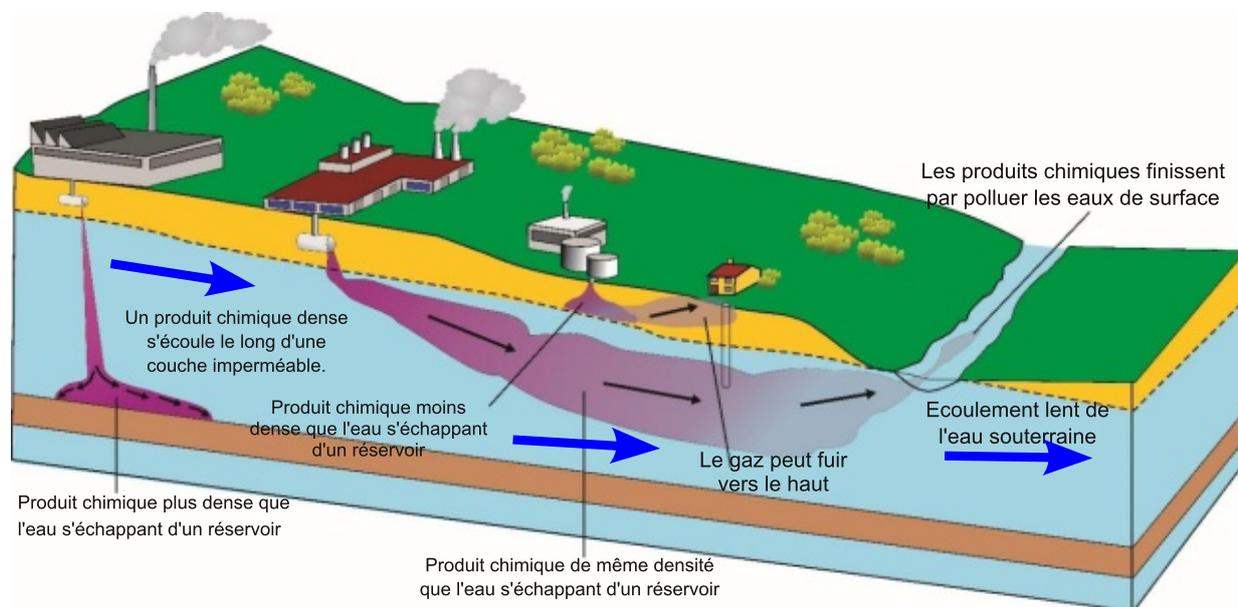
4.2.1.3 Contamination de l'eau

Les eaux de surface et souterraines peuvent être contaminées par des sources naturelles, mais la plupart des contaminations de l'eau sont dues à l'activité humaine. La contamination peut être le fait de fluides légers (faible densité), comme les carburants, qui flottent sur les eaux de surface ou sur la nappe phréatique, de fluides lourds (forte densité) qui coulent au fond des réservoirs ou des aquifères, ou d'un large éventail de matières en suspension ou dissoutes dans l'eau.

Les principaux contaminants des eaux de surface proviennent de l'activité urbaine. Il s'agit notamment du sel et de l'huile provenant des routes, de la contamination industrielle due aux fuites de réservoirs de produits chimiques et de carburant, des terrils de mines et des personnes qui se débarrassent des produits de nettoyage, des détergents, de l'huile, des peintures et des produits de jardinage en les versant dans les égouts. L'agriculture produit également des déchets, notamment des déchets animaux, des engrais et des pesticides.

Il existe également une pollution souterraine des eaux souterraines. Elle peut provenir des décharges urbaines, des fuites des égouts et des fosses septiques, des canalisations industrielles et des puits mal construits dans les zones urbaines et rurales (figure 4.38).

Figure 4.38. Panaches de pollution des eaux souterraines



Les géologues de l'environnement s'efforcent de prévenir la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines. Ils recherchent des zones de roches imperméables pour l'élimination des déchets, afin d'éviter que les fluides provenant des déchets ne s'infiltrent dans les réserves d'eau et ne les polluent. La protection de l'environnement peut inclure la collecte régulière d'échantillons d'eau de surface et la vérification de leur contamination, ainsi que la surveillance des puits d'essai autour des sites de contamination potentiels. Lorsqu'une contamination des eaux souterraines se produit, elle peut être nettoyée, mais les méthodes d'assainissement sont très coûteuses.

4.2.2 L'eau océanique

L'océan et l'eau de mer couvrent aujourd'hui plus des deux tiers de la surface de la Terre, bien qu'il y ait eu des périodes dans le passé géologique où les océans couvraient des zones beaucoup plus grandes ou beaucoup plus réduites. Les principaux océans profonds de la Terre comprennent l'océan Pacifique, l'océan Atlantique, l'océan Indien, l'océan Arctique et l'océan Austral, et il existe de nombreuses mers sur les plateaux continentaux.

4.2.2.1 Composition de l'eau

L'eau de mer contient environ 3,5 % de sel dissous, la salinité de l'eau de mer normale est donc de 3,5 %. Le sel est principalement constitué d'ions de sodium et de chlore, mais comprend également du magnésium, du calcium, du potassium, de l'hydrogénocarbonate, du sulfate et d'autres ions mineurs. Ces ions ont été amenés dans la mer par les rivières dans un lointain passé géologique et s'y sont concentrés. Lorsque l'eau douce des rivières se mélange à l'eau de mer, la salinité diminue et l'eau devient saumâtre.

Ailleurs, dans les mers peu profondes qui s'évaporent fortement, l'élimination de l'eau fait augmenter la salinité jusqu'à ce que l'eau devienne tellement sursaturée en sel que des cristaux se forment et se déposent au fond de la mer. L'eau de mer a un goût désagréable, mais l'eau de mer sursaturée a un goût vraiment horrible et peut vous piquer les yeux.

L'eau douce est moins dense que l'eau salée, de sorte que, lorsque les eaux des rivières se jettent dans la mer, leurs eaux flottent à la surface sans se mélanger pendant longtemps. Il existe généralement une frontière claire entre l'eau douce au-dessus et l'eau de mer plus salée en dessous.

4.2.2.2 Marées

Les zones côtières sont affectées par les marées, qui sont causées par l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil liée à la rotation de la Terre.

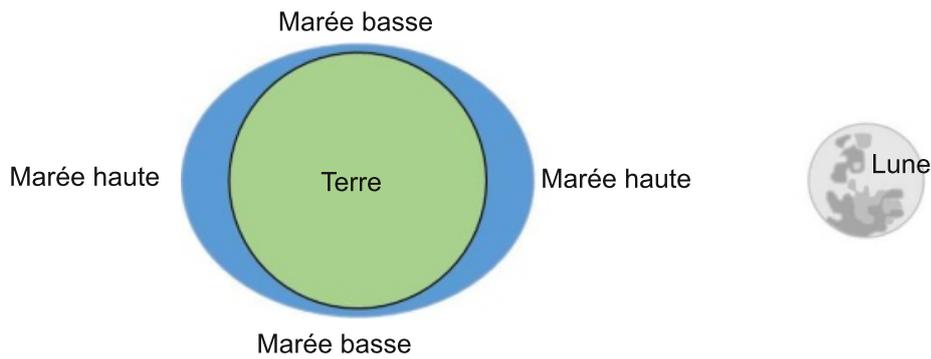
Figure 4.39. Marée basse et marée haute - le pont Humber, Angleterre



La plupart des zones côtières connaissent chaque jour deux marées hautes séparées par deux marées basses. La marée monte en tant que marée montante pendant plusieurs heures jusqu'à ce qu'elle atteigne son niveau le plus élevé, la marée haute. Ensuite, la marée redescend lentement jusqu'à ce qu'elle atteigne son point le plus bas, la marée basse, avant que le cycle ne recommence. Les marées montantes et descendantes déplacent la zone des vagues de haut en bas sur les plages et les zones côtières rocheuses. Pendant ce temps, les plaines de marée sont inondées par de l'eau relativement calme, avant que celle-ci ne s'écoule, les laissant à nouveau exposées.

La principale cause des marées est l'attraction gravitationnelle de la Lune. L'attraction de la Lune provoque une marée haute sur le côté de la Terre où se trouve la Lune, et sur le côté opposé également, avec des marées basses entre les deux, comme l'illustre la figure 4.40. Ainsi, comme la Terre tourne sous la Lune une fois par jour, la plupart des régions connaissent deux marées hautes et deux marées basses par jour. Comme le temps nécessaire pour que cela se produise est d'environ 25 heures, le schéma des marées se déplace d'environ une heure chaque jour.

Figure 4.40. La Lune à l'origine des bourrelets de marée



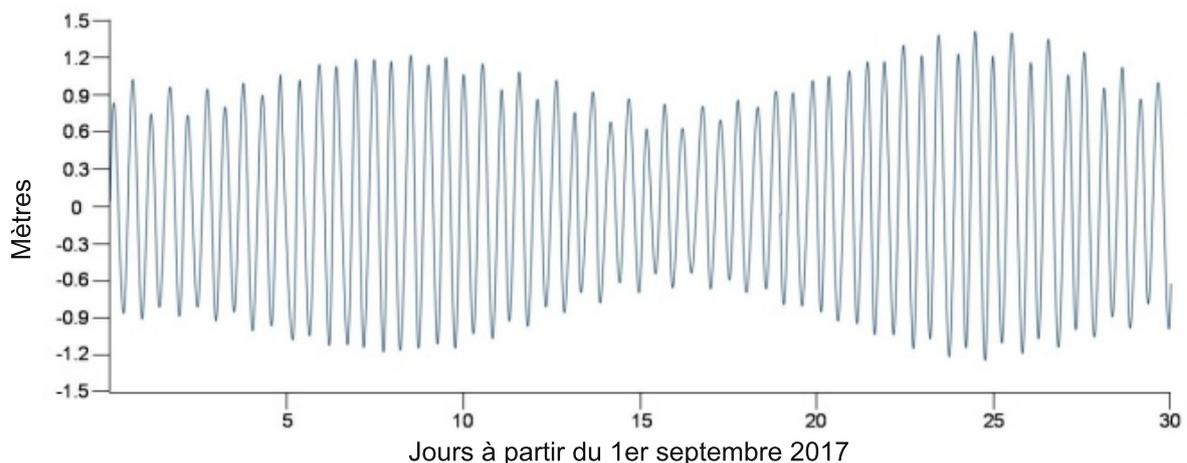
Bien que le Soleil soit beaucoup plus éloigné, il est beaucoup plus grand que la Lune et a donc également un effet. Cela signifie que lorsque la Lune et le Soleil sont alignés, l'attraction est plus forte, avec des marées hautes plus élevées et des marées basses plus faibles.

-Ce sont les **marées de printemps**. (Les marées de printemps n'ont rien à voir avec la saison du printemps, bien que, curieusement, les marées de printemps les plus fortes se produisent généralement au printemps et en automne). Cependant, lorsque la Lune et le Soleil sont perpendiculaires l'un à l'autre, leur attraction gravitationnelle globale est réduite, ce qui entraîne des marées hautes plus faibles et des marées basses plus fortes

- les marées de **mortes-eaux**.

Le résultat pour la plupart des zones côtières est un graphique de marées comme celui de la figure 4.41. Le graphique montre que chaque jour a deux marées basses et deux marées hautes, mais que la marée haute est la plus haute et la marée basse la plus basse aux alentours du 8e et du 25e jour. Ce sont les jours des marées de vives-eaux. Les marées de mortes-eaux ont lieu vers le 3e et le 16e jour. Si vous voulez voir les plus grandes étendues de plages et de boues plates, visitez la côte à marée basse de printemps. Cependant, si vous voulez voir la plus grande érosion côtière des côtes abruptes, visitez la côte lors des marées de vives-eaux les plus hautes, lorsque les marées amènent les vagues les plus hautes sur la plage et les falaises. Au même moment, les battures sont complètement inondées.

Figure 4.41. Changements de marée - un exemple à Bridgeport, Connecticut, USA



4.2.2.3 Vagues

Lorsque vous observez les vagues au bord de la mer, vous avez l'impression qu'elles déplacent d'énormes volumes d'eau. Cependant, si vous observez un objet flottant au-delà de la ligne de déferlement, vous verrez qu'il se déplace de haut en bas et à peine latéralement. En effet, au passage de la crête d'une vague, l'eau monte et avance un peu, tandis qu'au passage du creux d'une vague, elle descend et recule un peu, de sorte que l'eau de surface se déplace en cercle vertical. En profondeur, sous chaque vague, l'eau se déplace en cercles plus petits jusqu'à ce que la vague disparaisse en profondeur. Ainsi, bien que les vagues des océans déchaînés puissent atteindre plusieurs mètres de haut, elles ne provoquent aucun mouvement horizontal global de l'eau.

Lorsque les vagues atteignent la côte, le frottement au fond de la mer augmente, de sorte que le bas de la vague ralentit, ce qui fait que la vague devient plus haute. Finalement, elle devient suffisamment haute pour s'effondrer vers l'avant et former un déferlement. Lorsque les déferlantes sont hautes, elles sont propices à la pratique du surf. Lorsque le déferlement s'effondre sur la plage, l'eau s'engouffre sur la plage, mais s'écoule ensuite sous l'effet de la gravité, jusqu'à l'arrivée de la prochaine vague.

Figure 4.42. Vagues - grandes et petites



Les vagues sont provoquées par le vent qui souffle sur la surface de la mer en haute mer. La friction entre le vent et l'eau provoque l'apparition de petites vagues, qui sont poussées vers l'avant par le vent. Ainsi, plus la durée et la distance de l'océan sur lequel souffle le vent sont longues, plus les vagues sont grandes ; les vents plus forts produisent également de plus grandes vagues. Les meilleures plages de surf, avec les plus grosses vagues, se trouvent donc en face des océans ouverts.

Les vagues et les marées, en travaillant ensemble, produisent une série de caractéristiques côtières.

Tableau 4.24. Caractéristiques côtières produites par les vagues et les marées

Processus	Description	Image	Source
Formation des plages de tempête	Lorsqu'une tempête coïncide avec une marée haute de vives-eaux, une onde de tempête pousse les vagues de tempête encore plus haut sur la plage que d'habitude, construisant un banc de galets et de vase à l'arrière de la plage.		Une plage de tempête à l'arrière de la plage de Veluga à Batanes aux Philippines.
Plate-forme de marée	Pendant les marées hautes, et en particulier les marées de vives-eaux, les estrans sont recouverts d'eau ; la boue se dépose hors de l'eau immobile pour former une couche à chaque fois que l'estran est inondé ; les couches s'accumulent au fil du temps pour former des estrans.		Vasières à marée près de Palau Melaka, Malacca City, Malaisie
Formation à la flèche	Lorsque les vagues frappent une plage à un angle, la vague qui s'effondre pousse le sable en diagonale vers le haut de la plage, mais la vague redescend directement vers le bas de la plage, emportant le sable. Le sable est donc déplacé régulièrement le long de la plage dans un mouvement qui ressemble aux dents d'une scie. À l'extrémité de la plage, le sable est emporté vers la mer, formant une		Vue satellite de la flèche Farewell à l'extrémité nord de l'île du Sud, en Nouvelle-Zélande.

4.2.2.4 Circulations à grande échelle des fluides sur la Terre

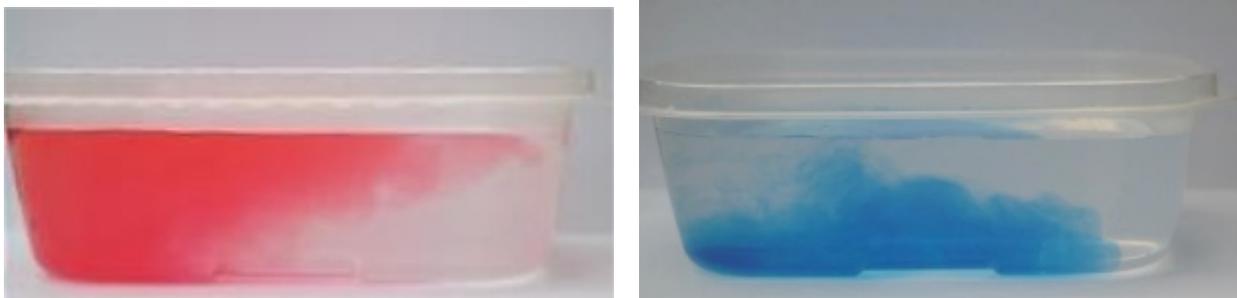
Les océans et l'atmosphère sont tous deux des fluides et des forces similaires agissent sur ces fluides en produisant des effets similaires.

Lorsque les deux types de fluides (eau et air) sont réchauffés, ils deviennent moins denses que le fluide environnant et s'élèvent donc ; lorsqu'ils atteignent des conditions supérieures plus froides, ils s'écoulent vers l'extérieur. Dans les océans, cela signifie que l'eau qui a été réchauffée dans les régions tropicales s'écoule sous forme de courants à la surface de l'océan. Au fur et à mesure que l'eau chaude s'écoule, l'eau plus froide du dessous remonte ; cette eau est souvent riche en nutriments et ce sont donc des zones où la vie océanique est prolifique. Pendant ce temps, dans l'atmosphère, l'air chaud qui monte exerce moins de pression sur la surface de la Terre, ce qui provoque une **dépression**. L'air chaud s'élève et s'écoule vers l'extérieur dans la haute atmosphère. Ces flux de fluides font partie de la convection.

Lorsque les fluides sont refroidis, ils deviennent plus denses et coulent. Dans les océans, l'eau la plus froide se trouve dans les régions polaires. Cette eau froide s'enfonce et coule sur le fond des océans. Dans l'atmosphère, l'air froid s'enfonce, provoquant une **haute pression**. Lorsqu'il atteint la surface de la Terre, il s'écoule à travers la surface vers les zones de basse pression ; ce flux d'air de surface est le vent. Ces flux complètent le cycle de convection.

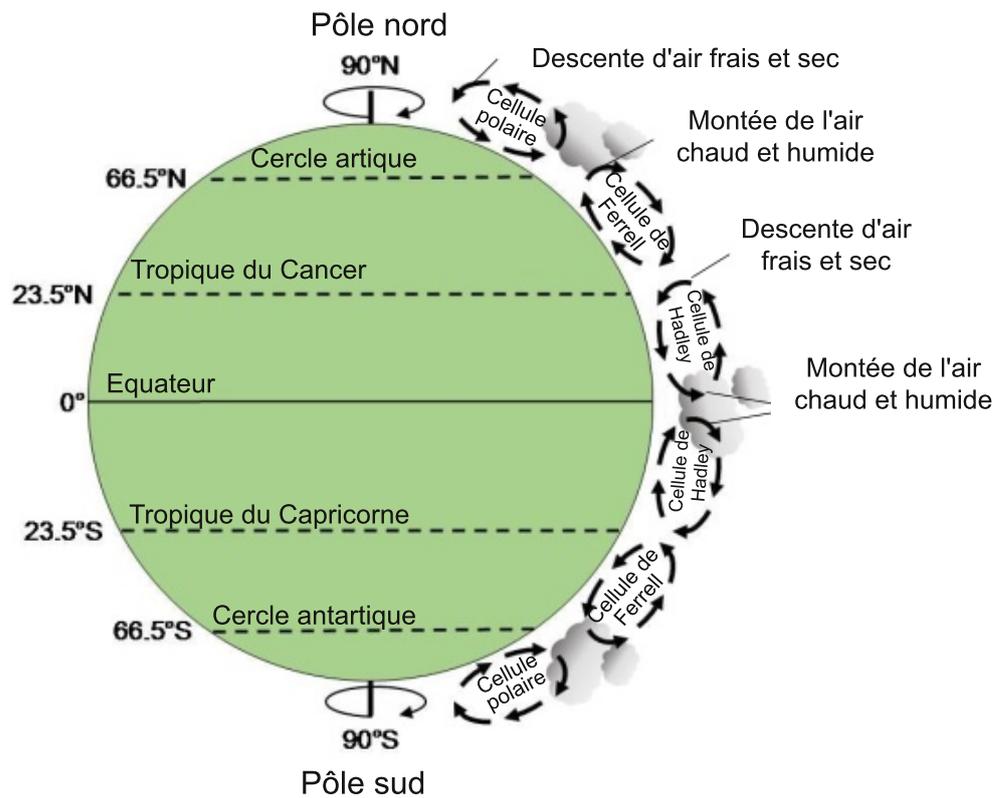
Les flux de fluides chauds et froids se produisent également à des échelles beaucoup plus petites. Vous pouvez souvent voir le chatouillement de l'air chaud qui s'élève au-dessus d'un radiateur ou d'un feu ; l'inverse se produit si vous ouvrez un congélateur vertical pieds nus, vous pouvez sentir l'air froid s'écouler vers le bas sur votre peau. Si vous prenez un bain et ajoutez de l'eau chaude, vous pouvez souvent sentir l'eau chaude couler à la surface, alors que si vous ajoutez de l'eau froide, elle coule au fond de la baignoire et n'est pas aussi agréable (figure 4.43).

Figure 4.43. Un courant chaud de couleur rouge coule à la surface ; un courant froid de couleur bleue coule au fond - tous deux dans une boîte à lunch en plastique.



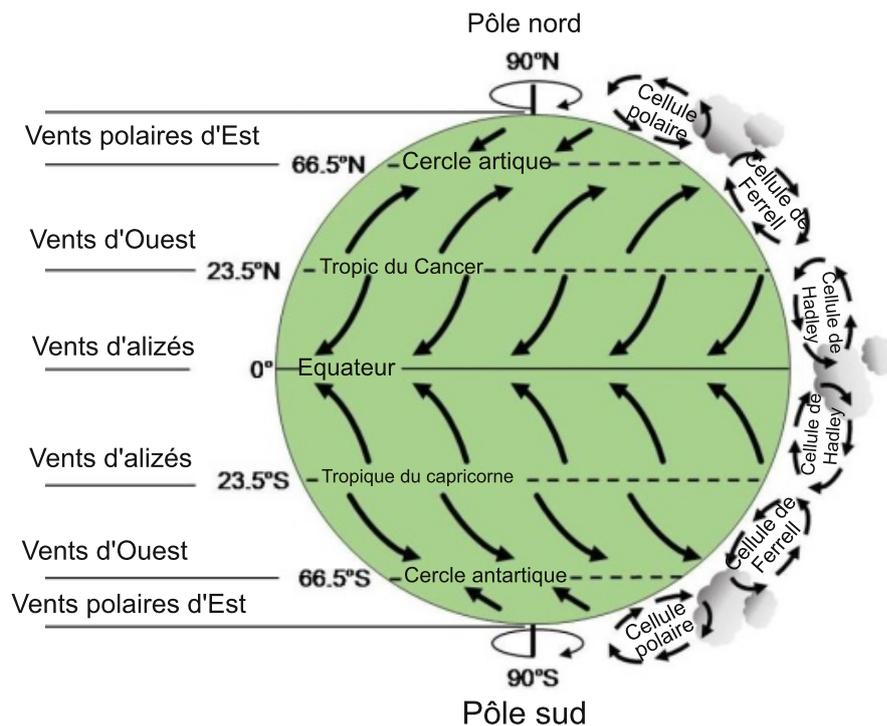
Les zones équatoriales, étant très chaudes, ont de l'air ascendant et une basse pression. L'air chaud qui circule dans la haute atmosphère devient plus froid et descend au-dessus des zones désertiques subtropicales, comme le montre la figure 4.44. Lorsque cet air descendant atteint le sol, une partie de celui-ci retourne vers l'équateur pour compléter la circulation tropicale/subtropicale appelée cellule de Hadley. Mais une partie de l'air descendant s'écoule vers les pôles. En traversant les mers chaudes, il se réchauffe et finit par s'élever. Dans la haute atmosphère, une partie de l'air retourne vers l'équateur, pour compléter la cellule de circulation de Ferrel. D'autres soufflent vers les pôles, devenant ainsi plus froids. Il finit par descendre au-dessus des pôles et s'écoule vers l'équateur à la surface de la Terre, complétant ainsi la cellule de circulation polaire.

Figure 4.44. Circulation des masses d'air sur Terre



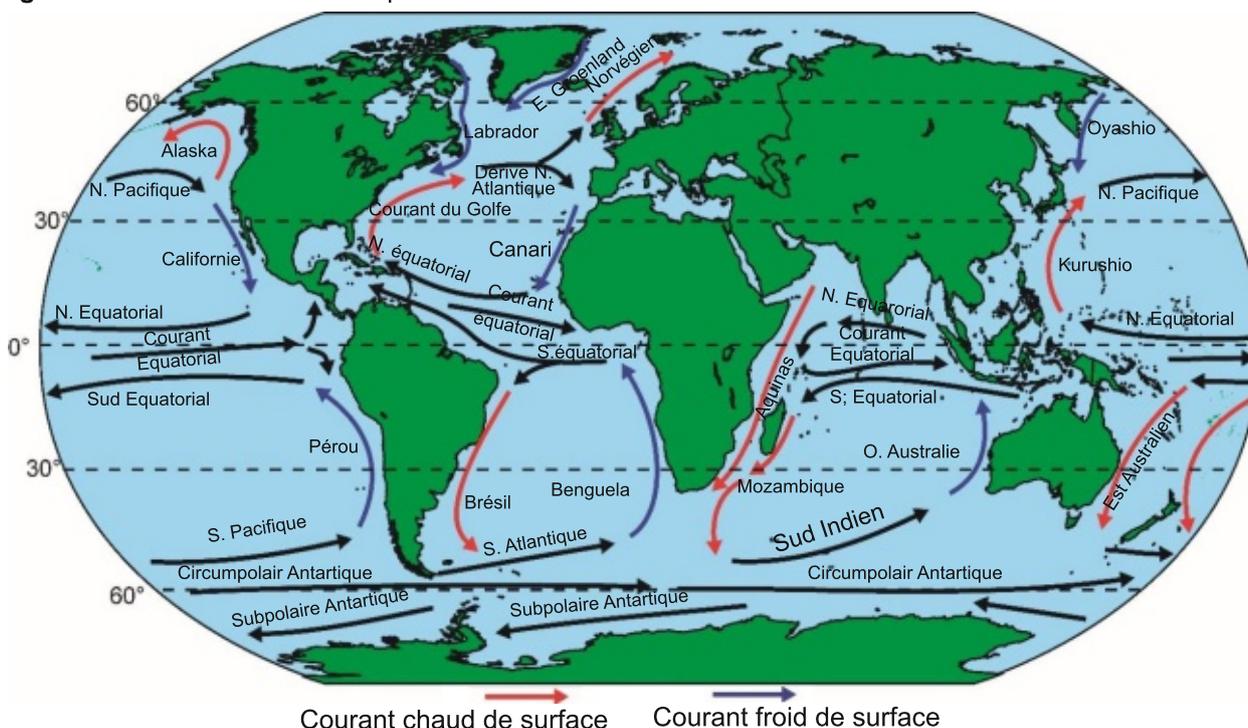
Ce modèle simple de circulation atmosphérique est affecté par la rotation de la Terre. Les flux d'air dans l'hémisphère nord sont déviés dans le sens des aiguilles d'une montre, tandis que ceux de l'hémisphère sud sont déviés dans le sens inverse. Cela donne un modèle généralisé de circulation des vents de surface, comme le montre la figure 4.45.

Figure 4.45. Schéma généralisé des vents de surface sur la Terre



Les vents de surface généraux à la base de la cellule de Hadley sont les alizés d'est. Ceux à la base de la cellule de Ferrel sont les vents d'ouest (vents soufflant de l'ouest) et les vents de surface de la cellule polaire sont les vents Polaires d'Est. Les vents globaux traînent sur la surface de l'océan, la faisant se déplacer dans la direction du vent et ajoutant à la direction naturelle du flux - dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud. Les principaux courants océaniques de surface tournent donc dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens inverse dans l'hémisphère sud, sous l'effet de la rotation de la Terre (figure 4.46).

Figure 4.46. Circulations océaniques de surface



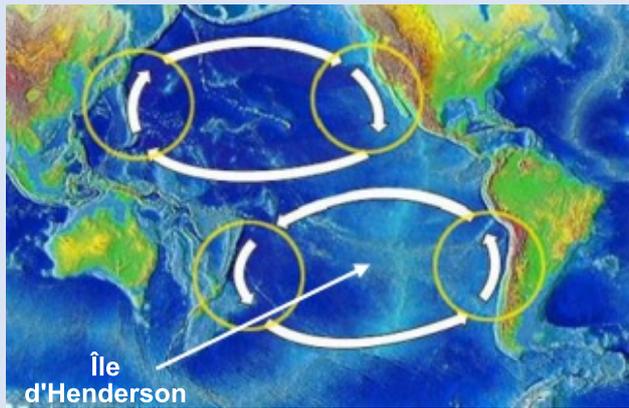
Encadré. 4.13. Les courants océaniques et l'île la plus polluée de la planète

L'île Henderson, située dans le sud de l'océan Pacifique, est inhabitée et fait partie des îles les plus éloignées de tout continent. La scientifique Jennifer Lavers, qui a dirigé une expédition sur l'île en 2015, a été stupéfaite par la quantité de pollution plastique qui s'y était accumulée. Elle a déclaré : "J'ai vu beaucoup de plastique au cours de mes voyages - dans certains des endroits les plus reculés - mais l'île d'Henderson est en tête de liste. La quantité de plastique est vraiment alarmante et vous coupe le souffle." L'expédition a trouvé jusqu'à 671 morceaux de plastique sur chaque mètre carré de plage et a estimé que les plages de l'île entière contenaient plus de 37 millions de débris - la pire pollution plastique enregistrée au monde. Cette pollution nuit gravement à la faune et à la flore : une tortue a été retrouvée étranglée par une ficelle en plastique et des bernard-l'ermite ont élu domicile dans des pots de cosmétiques en plastique.

La pollution s'accumule près du centre du gyre du Pacifique Sud. Ce courant océanique de surface circule dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans le sud de l'océan Pacifique, entraînant les débris flottants vers le centre.

Jennifer Lavers ajoute : "Une fois que le plastique est dans l'océan, il est pratiquement impossible de l'en retirer avec les technologies actuelles. Il faut donc s'efforcer de l'empêcher d'y pénétrer." Elle a vu de nombreuses brosses à dents en plastique rejetées à la mer et a déclaré que les brosses à dents en bambou et en fibres de bois coûtaient le même prix que celles en plastique mais ne pollueraient pas la Terre pendant des centaines d'années. Tout le monde devrait cesser de jeter des déchets sur les plages et utiliser moins de plastique en optant pour des matériaux moins nocifs.

Encadré. 4.13. Les courants océaniques et l'île la plus polluée de la planète, suite



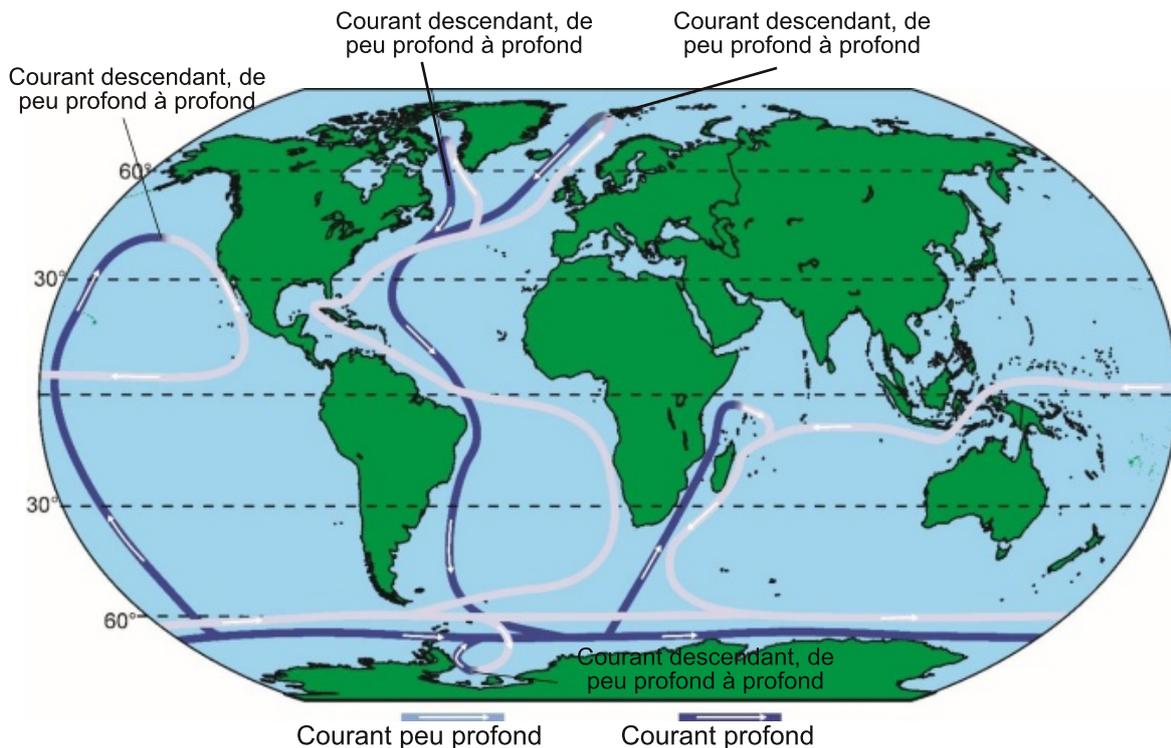
Courants océaniques de surface circulant dans le Pacifique Nord et Sud



La plage polluée de l'île inhabitée d'Henderson dans l'océan Pacifique Sud.

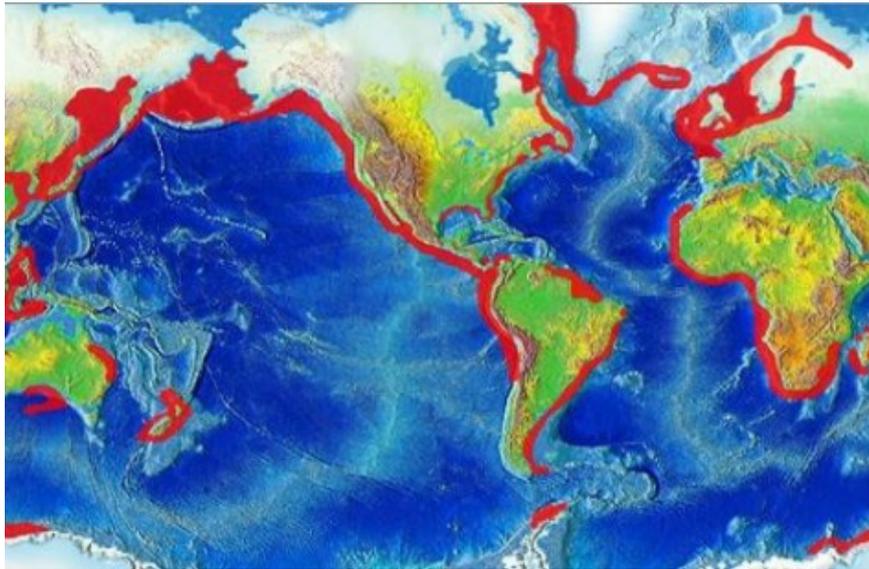
Les courants océaniques de surface sont liés aux courants océaniques profonds. Lorsque les courants océaniques chauds s'écoulent vers les pôles, ils deviennent plus froids et plus salés en raison de l'évaporation. Cela augmente leur densité, de sorte qu'ils coulent près des pôles sous forme de courants d'eau salée froids et denses. C'est ce qui produit le schéma de circulation des eaux peu profondes vers les eaux profondes illustré sur la figure 4.47.

Figure 4.47. Le schéma de circulation superficielle et profonde des océans de la Terre



La remontée des eaux profondes froides et riches en nutriments, provoquée par les vents qui chassent les eaux de surface plus chaudes, donne lieu à des efflorescences de plancton ; celles-ci fournissent la nourriture dans les meilleures zones de pêche de la planète, comme le montre la figure 4.48.

Figure 4.48. Les meilleures zones de pêche, indiquées en rouge, sont produites par la remontée des eaux froides des profondeurs océaniques.



Les interactions montrent à quel point les systèmes de la Terre sont liés entre eux. Le flux d'air atmosphérique, ou vent, entraîne les courants océaniques de surface, tandis que l'océan réchauffe l'air, contribuant ainsi à la circulation atmosphérique. Ensuite, la remontée d'eau riche en nutriments dans l'océan entraîne une vie marine abondante. Il est clair que l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère sont étroitement liées par ces processus.

4.3 L'atmosphère

L'atmosphère de la Terre, comme les autres sphères, est essentielle à la vie sur Terre. L'atmosphère comporte plusieurs couches, mais la couche la plus importante pour la vie est la couche la plus basse, la troposphère ; c'est la plus oxygénée et elle a la température adéquate pour la vie. La troposphère a une épaisseur d'environ 16 km à l'équateur et s'amincit vers les pôles. Si l'épaisseur de la croûte terrestre est équivalente à celle d'un timbre-poste collé sur un ballon de football, alors la troposphère est comme un timbre-poste de demi-épaisseur collé sur le dessus. La couche située au-dessus de la troposphère est également importante car elle contient de l'ozone, qui nous protège des rayons ultraviolets nocifs du Soleil (figures 4.49 et 4.50).

Figure 4.49. La Terre "bille bleue" montrant la très fine couche d'atmosphère en violet autour de l'extérieur.



Figure 4.50. La navette spatiale Endeavour en orbite dans l'atmosphère extérieure, montrant la couche orange de la troposphère et la couche blanche au-dessus qui contient l'ozone.



4.3.1 Composition de l'atmosphère

Lorsque la Terre primitive s'est refroidie il y a plus de 4 000 millions d'années, toute atmosphère primitive qui s'est formée a été balayée par le vent solaire et la Terre a été bombardée par des météorites. Mais, alors que le bombardement diminuait, une activité volcanique intense a ajouté de l'eau, du dioxyde de carbone et d'autres gaz comme l'azote, le méthane et le soufre à une nouvelle atmosphère. Une grande partie de l'eau est tombée en pluie de l'atmosphère, formant les premiers océans.

Cette première atmosphère ne contenait pas d'oxygène. Il y a environ 2500Ma, les premières bactéries à la photosynthèse ont évolué dans les océans. Les bactéries absorbaient le dioxyde de carbone de l'atmosphère et libéraient de l'oxygène par photosynthèse (figure 4.51). Le premier oxygène formé a réagi avec d'autres matériaux comme le fer, et ce n'est donc qu'environ 200Ma plus tard que l'oxygène libre a commencé à s'accumuler dans l'atmosphère.

Figure 4.51. Bactéries océaniques microscopiques, qui font de la photosynthèse, absorbent le dioxyde de carbone et libèrent de l'oxygène



L'oxygène libre présent dans l'atmosphère a fait de la surface de la Terre un environnement oxydant pour la première fois, mais ce n'est qu'à la fin du Précambrien, au début du Cambrien, il y a 541 millions d'années, que les animaux utilisant l'oxygène sont devenus abondants sur Terre. Depuis lors, les pourcentages des différents gaz qui composent l'atmosphère n'ont cessé d'évoluer. Aujourd'hui, l'atmosphère contient 78,09% d'azote, 20,95% d'oxygène, 0,93% d'argon et 0,04% de dioxyde de carbone, avec de petites quantités d'autres gaz. Elle contient également une quantité variable de vapeur d'eau, allant jusqu'à plus de 4 %, mais celle-ci n'est pas incluse dans les calculs de pourcentage des gaz atmosphériques car elle change beaucoup.

La mesure de la quantité de vapeur d'eau dans l'air est son humidité. Lorsque l'air atteint 100 % d'humidité, il ne peut plus contenir de vapeur d'eau. Ce gaz invisible commence alors à changer d'état et à se transformer en minuscules gouttelettes d'eau liquide (condensation, brume, brouillard, rosée ou nuage). Ces gouttelettes peuvent ensuite se rassembler pour former des gouttelettes d'eau ou des cristaux de glace, qui tombent sous forme de pluie ou d'autres types de précipitations. L'air très humide est désagréable s'il est chaud (souvent appelé "torride") ou froid (souvent décrit comme "brut"), de sorte que les gens préfèrent généralement des conditions d'air sec.

4.3.2 Flux atmosphérique

L'écoulement de l'air à l'échelle planétaire est déterminé par les différents niveaux de réchauffement de l'air qui entraînent des différences de densité, ainsi que par la rotation de la Terre, comme indiqué à la section 4.2.2.4 ci-dessus.

Ce sont également des facteurs clés dans les flux d'air plus locaux. Les masses d'air chaud s'élèvent à travers les régions de la Terre ; ce faisant, la rotation de la Terre les fait tourner, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud. Ces masses d'air ascendantes, qui provoquent une basse pression à la surface de la Terre, sont appelées cyclones. À la base des cyclones, à la surface de la Terre, l'air s'écoule vers l'intérieur sous forme de vents en spirale qui sont repérés par les formations nuageuses de la figure 4.52.

Figure 4.52. Les nuages en spirale d'un cyclone près de l'Islande le 4 septembre 2003.



Les nuages se forment car l'air ascendant se refroidit et l'air plus froid peut contenir moins d'eau que l'air plus chaud. L'eau forme des gouttelettes de nuage, qui produisent ensuite de la pluie ou de la neige. Les cyclones provoquent donc normalement des conditions venteuses et humides.

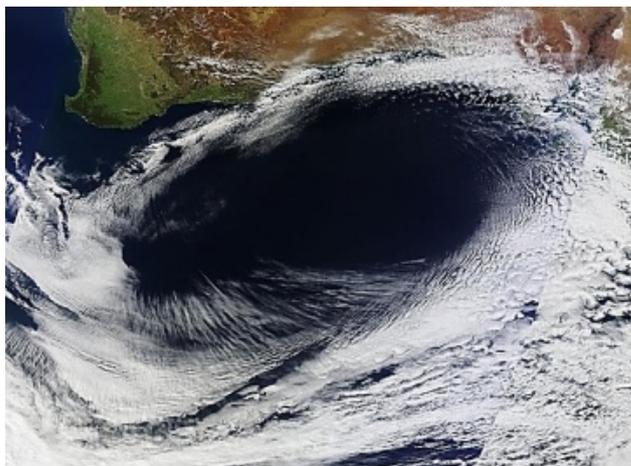
Lorsque les cyclones se développent au-dessus de la mer dans les zones tropicales, la mer chaude contient beaucoup de chaleur qui peut transformer les cyclones en ouragans ou en typhons beaucoup plus importants (figure 4.53). Lorsque les ouragans et les typhons touchent la terre ferme, ils apportent des vents de la force d'un ouragan et de très fortes pluies. Les vents violents peuvent pousser l'eau de mer sur la côte dans des ondes de tempête qui peuvent être très dommageables lorsqu'elles coïncident avec des marées hautes.

Figure 4.53. L'ouragan Isabel dans l'océan Atlantique Nord en 2003, avec l'œil caractéristique au centre. Des vents très destructeurs de $265 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ont été enregistrés, accompagnés de plusieurs millimètres de pluie.



Ailleurs, des masses d'air froid et descendant tournent également, dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens inverse dans l'hémisphère sud. Ces anticyclones sont des zones de haute pression (figure 4.54). L'air qui s'enfonce doucement dans les zones de haute pression provoque des vents plus légers que les cyclones et peu de vent dans les centres. En s'enfonçant, l'air se réchauffe et peut contenir de plus en plus de vapeur d'eau, ce qui fait que les anticyclones ont peu de nuages ou de pluie.

Figure 4.54. Un anticyclone près du sud de l'Australie en 2012. Les vents et les traînées nuageuses s'enroulent en spirale dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (ils s'enrouleraient dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord), mais l'air chaud qui descend ne produit aucun nuage au centre.



À des échelles encore plus petites, l'air froid descendant peut piéger la pollution, la fumée et les nuages en dessous, ce qui peut être très désagréable dans certaines villes (figure 4.55). Dans d'autres régions, le fort réchauffement de la terre peut provoquer des tourbillons d'air chaud ascendant appelés thermiques, où les oiseaux et les planeurs peuvent planer pendant de nombreuses heures (figure 4.56).

Figure 4.55. Smog de pollution à Shanghai, Chine, piégé sous l'air froid descendant



Figure 4.56. Un parapente près de Reichenburg, en Suisse, utilisant les thermiques pour s'élever.



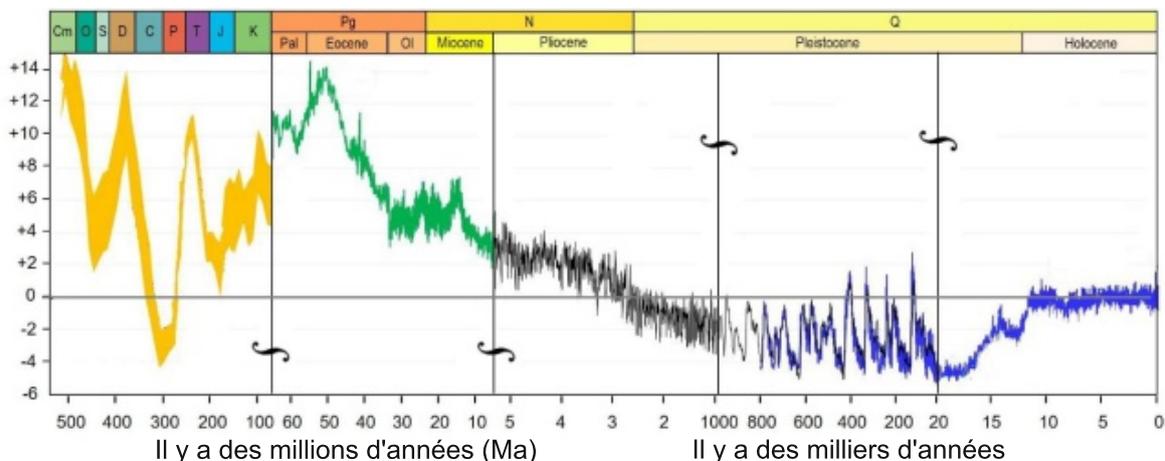
À une échelle encore plus petite, la fumée s'élève car elle est transportée vers le haut par les courants d'air chaud ascendants au-dessus des incendies.

À l'inverse, si vous vous tenez au pied d'un glacier par une journée calme, vous sentirez des tourbillons d'air froid descendant du glacier autour de vous.

4.3.3 Changement atmosphérique

Des preuves provenant de plusieurs sources différentes montrent que la température moyenne de la surface de la Terre a beaucoup changé dans le passé. La figure 4.57 présente cinq graphiques montrant comment la température est censée avoir varié au-dessus et au-dessous du 0 du graphique, correspondant à la température moyenne de la surface de la Terre aujourd'hui de 14°C. Le premier graphique montre l'évolution de la température de 540Ma à 65Ma, le second de 65Ma à 6Ma, le troisième de 6Ma à 1Ma, le quatrième de 1Ma à 20 000 ans et le dernier graphique pour les 20 000 dernières années.

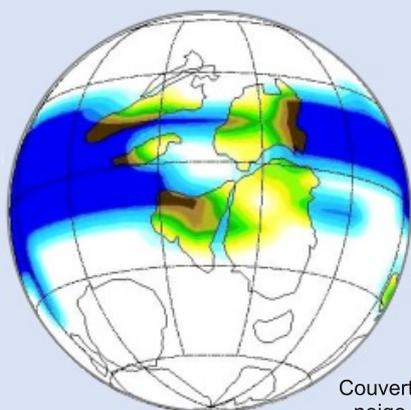
Figure 4.57. La température moyenne passée de la surface de la Terre (°C) telle qu'elle ressort de plusieurs indicateurs. Cinq graphiques sont tracés, bout à bout, montrant les changements sur des périodes de plus en plus courtes, jusqu'à aujourd'hui. Le zéro (0°C) sur les graphiques correspond à la température moyenne actuelle de la Terre, soit 14 °C.



Les graphiques montrent que dans le passé géologique, les températures moyennes les plus élevées étaient supérieures de plus de 10°C à la température actuelle (parfois plus de 14°C) ; les plus basses étaient inférieures de 5°C à la température actuelle. Aux températures actuelles, les pôles sont englacés, ce qui montre que lorsque les températures étaient plus basses dans le passé, les glaciations devaient être beaucoup plus répandues. Les graphiques montrent que les glaciations ou les **conditions glaciaires** étaient très répandues au Pléistocène et au Carbonifère/Permien. Il existe également des preuves de conditions d'accumulation de glace au cours des périodes Ordovicien/Silurien et de deux glaciations au Précambrien, avant le début des graphiques de la Figure 4.57. La dernière période glaciaire du Précambrien a été la plus importante que la Terre ait jamais connue ; il se peut que la Terre entière ait été recouverte de glace (ce qu'on appelle la "**Terre boule de neige**") ou qu'une zone de mer libre soit restée près de l'équateur (la "**Terre boule de glisse**").

Encadré 4.14. La Terre boule de neige ou la Terre boule de glisse ?

La théorie de la Terre boule de neige repose sur des preuves qu'entre 650 et 635Ma, des roches sédimentaires déposées par des nappes glaciaires ont recouvert des continents dont les mesures paléomagnétiques montrent qu'ils étaient proches de l'équateur. Cette idée serait renforcée si l'on pouvait démontrer que tous les dépôts sédimentaires qui se sont formés à cette époque étaient glaciaires. Mais cela est très difficile à prouver, car il n'y a pas de fossiles disponibles pour dater les roches sédimentaires déposées à l'époque (car la vie avec des parties dures n'avait pas encore évolué et ne serait normalement pas trouvée dans les dépôts glaciaires de toute façon). Il existe également des preuves sédimentaires qu'il y avait au moins quelques zones d'eau libre à cette époque. De nombreux spécialistes de la Terre sont donc plus satisfaits de l'idée d'une Terre en boule de glisse (avec de l'eau libre dans les mers proches de l'équateur) que de celle d'une Terre en boule de neige. Néanmoins, il existe de bonnes preuves que la Terre a connu une glaciation très sévère il y a environ 640 millions d'années.



Simulation par ordinateur de la couverture de glace pendant la Terre boule de neige

L'un des processus que l'on pense avoir déclenché les glaciations mondiales est la rétroaction positive de l'effet albédo, décrit dans la section 1.3 de ce livre. Au fur et à mesure que les couches de glace se développaient, elles réfléchissaient de plus en plus le rayonnement solaire, refroidissant la Terre et provoquant une nouvelle croissance des couches de glace, jusqu'à ce qu'une grande partie de la planète soit couverte de glace.

La fin de cette grave période glaciaire a peut-être été déclenchée par des volcans qui ont pompé de grandes quantités de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, provoquant un réchauffement à grande échelle par effet de serre.

Entre les périodes très froides, il y a eu des périodes où la Terre était beaucoup plus chaude qu'aujourd'hui, notamment au cours du Paléocène/Eocène, du Permo-Trias, du Dévonien et du Cambrien. Ces périodes, où il n'y avait pas de calottes glaciaires mondiales, sont souvent appelées " conditions de serre ".

Figure 4.58. Extraction d'une carotte de glace à partir d'un tube de carotte prélevé dans un forage de glace

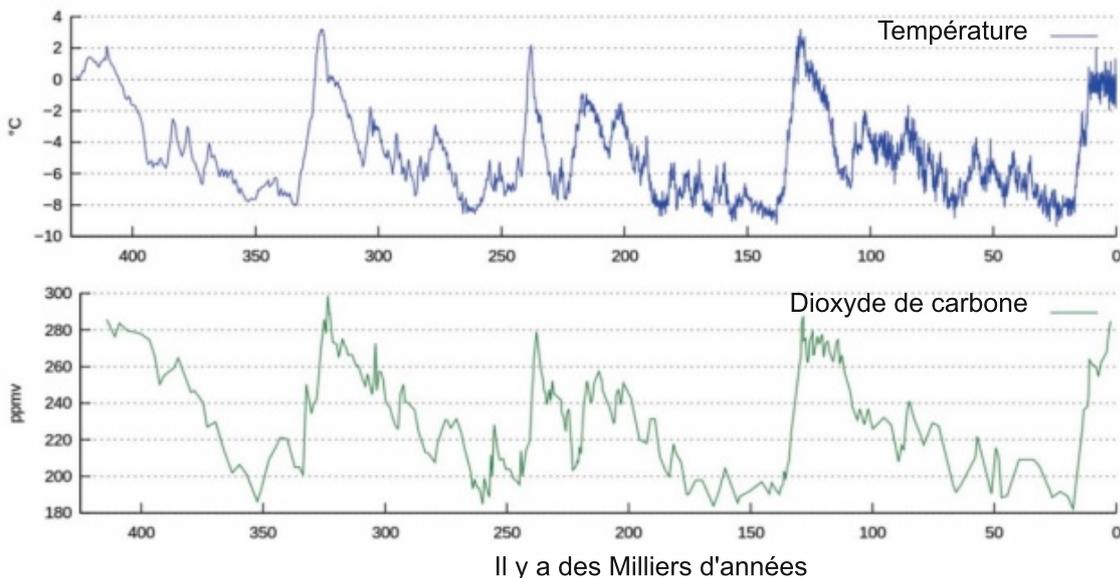


Au cours des temps géologiques, l'énergie globale du Soleil atteignant la Terre a augmenté, on pourrait donc s'attendre à ce que les températures mondiales affichent également une augmentation régulière. Comme il n'y a pas eu d'augmentation régulière de la température moyenne de la Terre, d'autres facteurs doivent avoir un effet.

Les carottes de glace donnent des indices sur les principaux facteurs qui affectent la température de la Terre. Des forages sont effectués dans les parties les plus épaisses des calottes polaires pour extraire des carottes de glace (figure 4.58). Les données provenant des carottes de glace peuvent être utilisées pour montrer la température, ainsi que le contenu de différents gaz dans l'atmosphère au moment où cette couche de glace s'est formée.

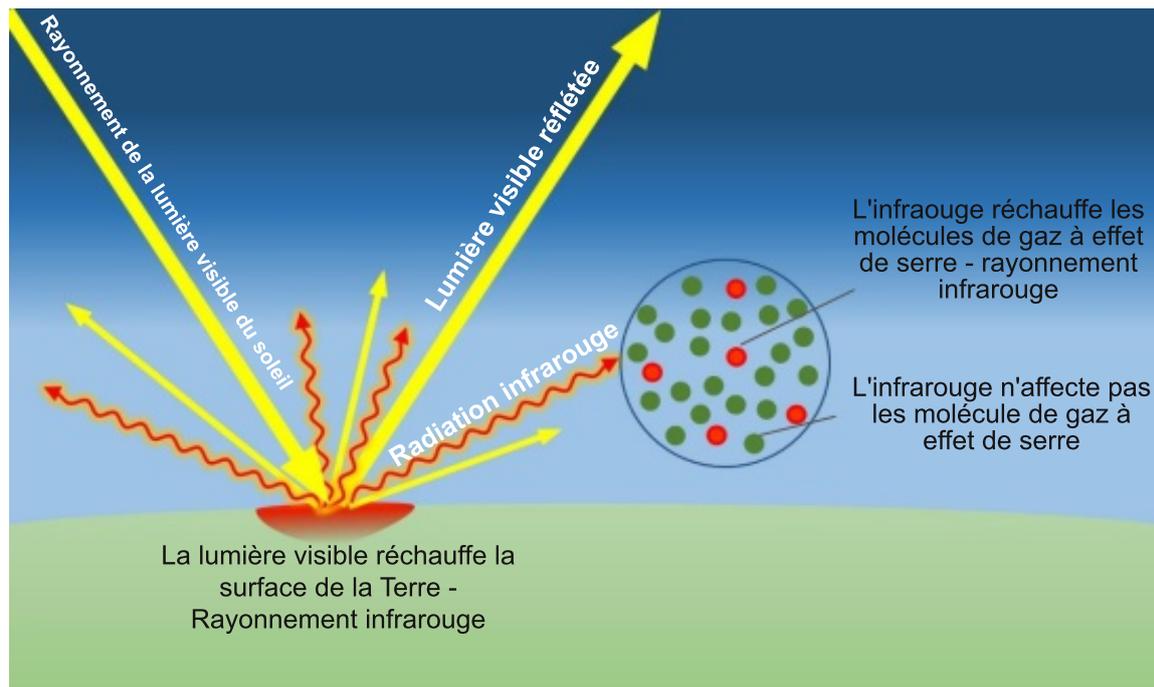
La figure 4.59 montre des graphiques de la température et de la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère au cours des 400 000 dernières années. Les graphiques montrent un lien très étroit entre la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et la température de la Terre. Alors que certains spécialistes des sciences de la Terre soutiennent que c'est la température de la Terre qui provoque le changement des niveaux de dioxyde de carbone, la plupart des spécialistes des sciences de la Terre pensent le contraire, estimant que les changements des niveaux de dioxyde de carbone provoquent les changements de la température de la Terre. Il est donc largement admis que des niveaux élevés de dioxyde de carbone provoquent des températures élevées sur Terre.

Figure 4.59. Graphiques de l'évolution de la température et de la variation du CO₂ dans l'atmosphère au cours des 400 000 dernières années, enregistrés dans la carotte de glace Vostok en Antarctique (ppmv = parties par million de CO₂ dans l'atmosphère en volume)



Le lien entre la température de la Terre et la quantité de dioxyde de carbone (et d'autres gaz clés) dans l'atmosphère est appelé **effet de serre**, comme le montre la figure 4.60.

Figure 4.60. L'effet de serre (le rayonnement infrarouge est de la chaleur)

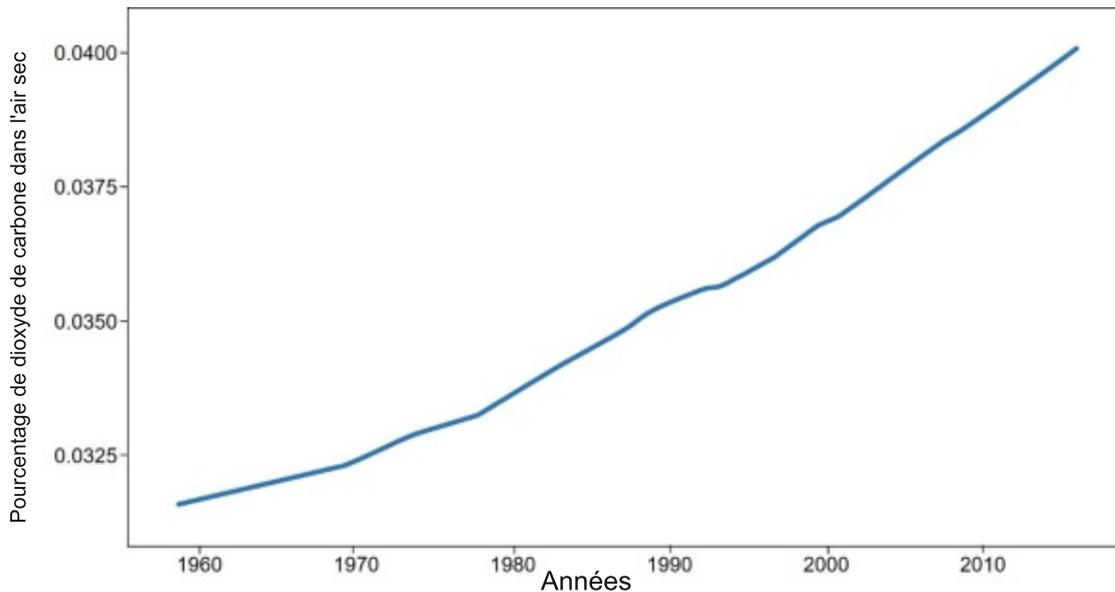


Le rayonnement du Soleil atteint la Terre sous forme de lumière visible. Une partie de ce rayonnement est réfléchié dans l'espace, mais une autre est absorbée par la surface de la Terre et réémise sous forme de chaleur, ou rayonnement infrarouge. Une partie de la chaleur réémise traverse l'atmosphère et s'échappe dans l'espace, mais une autre est absorbée par les gaz à effet de serre, ce qui réchauffe l'atmosphère. Plus il y a de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, plus celle-ci se réchauffe, réchauffant à son tour la Terre. Le gaz à effet de serre le plus abondant dans l'atmosphère terrestre est la vapeur d'eau, suivie du dioxyde de carbone, du méthane et de l'oxyde nitreux. La quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère varie en permanence et les quantités de méthane et d'oxyde nitreux sont faibles, de sorte que le principal gaz qui affecte la Terre à long terme semble être le dioxyde de carbone.

S'il n'y avait pas de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, tout le rayonnement du Soleil serait réémis, et la Terre serait si froide qu'elle serait gelée en permanence. Nous avons donc besoin de l'effet de serre pour que la Terre soit suffisamment chaude pour la vie. Le problème se pose lorsque des gaz à effet de serre supplémentaires sont ajoutés à l'atmosphère, provoquant un **effet de serre renforcé**. Il semble que les périodes très chaudes du passé de la Terre (conditions de serre) soient liées à des niveaux élevés de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces périodes peuvent être liées à des périodes d'activité de la tectonique des plaques entraînant une augmentation de l'activité volcanique qui libère les gaz à effet de serre.

Le changement climatique semble donc être étroitement lié aux quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. C'est pourquoi les scientifiques s'inquiètent de l'augmentation de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. La quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est surveillée depuis 1958 depuis l'observatoire situé au sommet du volcan tranquille Mauna Loa, à Hawaï. Ces mesures montrent l'augmentation régulière observée sur la figure 4.61.

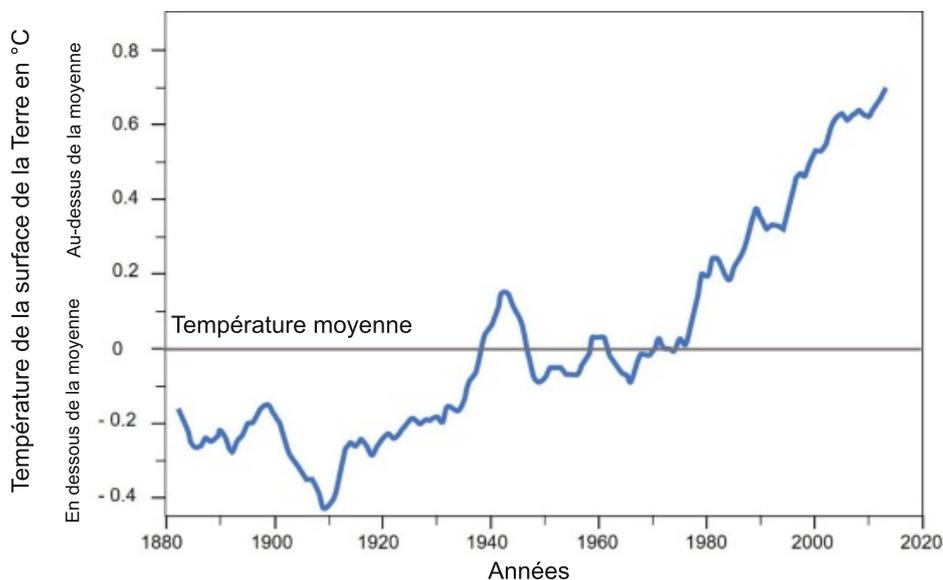
Figure 4.61. Évolution des niveaux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère depuis le début des mesures en 1958, mesurée depuis l'observatoire du Mauna Loa, à Hawaï. (Le sommet du Mauna Loa a été choisi comme site pour ces observations parce qu'il se trouve à un niveau élevé de l'atmosphère et loin des masses continentales ; les mesures ne sont pas liées à une quelconque activité volcanique).



La plupart des scientifiques pensent que l'augmentation constante de la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère est principalement due à la combustion par l'homme de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, ainsi qu'à la déforestation à grande échelle des forêts tropicales. La combustion de combustibles fossiles libère du dioxyde de carbone supplémentaire dans l'atmosphère et la destruction de la végétation laisse moins de plantes disponibles pour éliminer et stocker le dioxyde de carbone par photosynthèse. Bien que nous sachions que les océans peuvent absorber une partie du dioxyde de carbone supplémentaire présent dans l'atmosphère, les scientifiques poursuivent leurs recherches sur la quantité qui peut être absorbée et sur les effets que cela pourrait avoir sur les océans.

Cette augmentation constante de la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère semble être liée à l'augmentation assez régulière de la température de la Terre mesurée depuis les années 1960, comme le montre le graphique des données compilées par la National Aeronautics and Space Administration (NASA) aux États-Unis, illustré à la figure 4.62.

Figure 4.62. Évolution de la température à la surface de la Terre, d'après les données compilées par la NASA



Ainsi, avec l'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, très probablement due à l'activité humaine, la Terre se réchauffe. Une Terre plus chaude peut sembler être une bonne idée pour les personnes qui vivent dans des pays plus froids, mais une Terre qui se réchauffe constamment peut causer de gros problèmes, comme le montre le tableau 4.25.

Tableau 4.25. Problèmes susceptibles d'être causés par un réchauffement de la Terre

Problème potentiel	Effet probable
Un "point de basculement" peut être atteint (comme décrit dans la section 1.3), lorsque des boucles de rétroaction positive provoquent un réchauffement très important de la Terre	Tous les problèmes du tableau ci-dessous seraient beaucoup plus importants.
Les océans plus chauds apportent plus de chaleur à l'atmosphère.	La chaleur océanique provoque des tempêtes, de sorte que la Terre pourrait devenir beaucoup plus orageuse.
Les conditions plus chaudes augmentent les taux d'évaporation et de condensation.	Les changements du cycle de l'eau font que certaines régions de la planète deviennent plus humides et d'autres plus sèches.
Les calottes glaciaires terrestres fondent, ajoutant de l'eau aux océans.	L'élévation du niveau de la mer provoque des inondations supplémentaires dans les zones de faible altitude, notamment lors des tempêtes.
Les eaux océaniques se dilatent en se réchauffant	L'expansion des eaux océaniques contribue à l'élévation du niveau de la mer.
L'élévation du niveau des mers réduit la superficie des terres disponibles pour l'agriculture et l'industrie.	Des migrations massives de populations humaines peuvent se produire, à la recherche de terres plus favorables dans des régions du monde déjà surpeuplées.
Le réchauffement des océans affecte le volume et la vitesse des courants océaniques avec des effets sur les océans et l'atmosphère	Les courants océaniques redistribuent la chaleur sur Terre ; leur modification peut rendre certaines régions plus chaudes et d'autres plus froides
Les ceintures climatiques se déplacent vers les pôles	Le déplacement des ceintures climatiques entraîne l'épanouissement de certaines espèces dans de nouvelles régions, mais la disparition d'autres.
L'eau des océans devient plus acide car elle dissout le dioxyde de carbone	Les espèces telles que les coraux qui ne peuvent pas s'adapter à des eaux plus acides disparaissent, ainsi que leurs communautés de récifs coralliens.

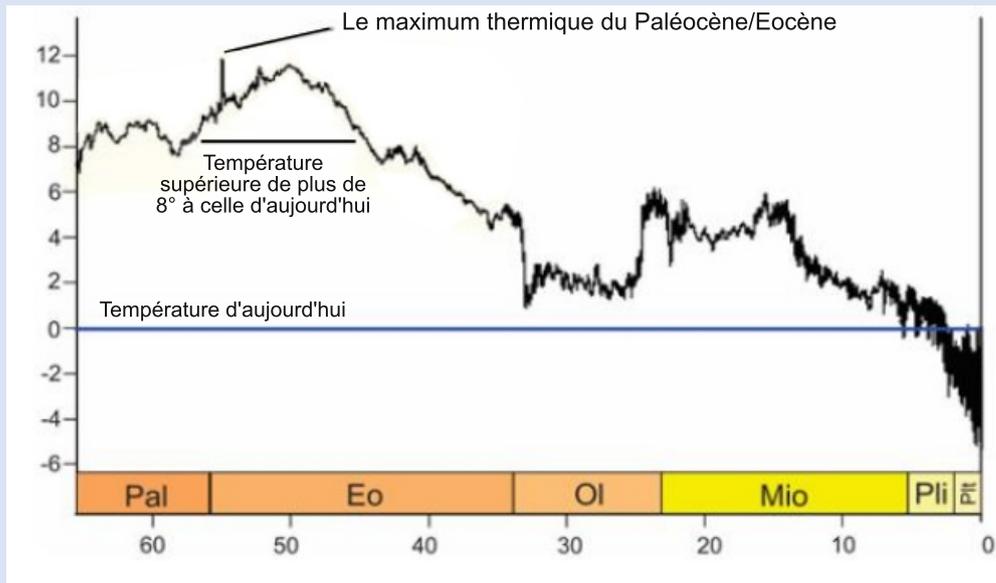
Le réchauffement de la Terre peut présenter certains avantages, comme la possibilité de faire pousser de nouvelles cultures dans les régions proches des pôles, la croissance accrue des forêts encouragée par le dioxyde de carbone supplémentaire, et le passage maritime du Nord-Ouest au nord du Canada qui devient viable pour la navigation en été. Toutefois, la plupart des gens soutiendraient que les inconvénients l'emportent largement sur les avantages possibles.

La Terre a déjà été soumise à un fort réchauffement climatique par le passé, comme à l'époque du Paléocène/Eocène, et a survécu. Cependant, la survie de l'homme et d'un large éventail d'autres espèces dans ces conditions est très douteuse.

Encadré 4.15. La Terre pendant le maximum thermique du Paléocène/Eocène

Pendant les conditions de serre à la limite entre le Paléocène et le début de l'Éocène, il y a environ 56 millions d'années, il est prouvé que la Terre était jusqu'à 12° plus chaude qu'aujourd'hui et qu'elle est restée plus de 8° plus chaude pendant près de 10 millions d'années. Ce phénomène était probablement lié aux énormes quantités de dioxyde de carbone libérées dans l'atmosphère à cette époque. Les géoscientifiques recherchent très activement cette période de températures élevées, car elle pourrait éclairer les études actuelles sur le changement climatique.

Encadré 4.15. La Terre pendant le maximum thermique du Paléocène/Eocène, suite



Température de la Terre (°C) comparée à la température actuelle, au cours des 65 derniers Ma

Il n'y avait pas de calottes glaciaires sur Terre à cette époque et l'expansion de l'océan chaud a contribué à l'élévation du niveau des mers qui a noyé de nombreuses zones continentales de faible altitude. Les preuves fossiles montrent que les forêts couvraient toute la Terre, de l'équateur aux pôles, à l'exception de quelques zones plus sèches. Les forêts tropicales humides ont poussé en Amérique du Nord et en Europe et les palmiers poussaient dans l'Arctique. De nouvelles espèces de mammifères sont apparues, mais il s'agissait surtout de très petites espèces naines, probablement parce que les petits mammifères sont mieux adaptés aux conditions chaudes que les grands animaux. Les reptiles étaient abondants, notamment les pythons et les tortues. Les insectes étaient courants. Les océans ont subi des changements majeurs. Alors que de nombreuses espèces microscopiques vivant au fond de l'eau disparaissent, les organismes planctoniques proches de la surface de la mer prospèrent. Les océans chauds regorgent de poissons et d'autres formes de vie marine. C'était un monde très différent de la Terre actuelle.

Les graphiques de la température de la Terre, en particulier au cours des derniers millions d'années, comme le montrent les figures 4.57 et 4.59, montrent des cycles réguliers de changement de température. On pense que ces cycles sont liés à la quantité de rayonnement solaire reçue par la Terre, principalement en raison des changements réguliers de la rotation de la Terre autour du Soleil. Cependant, les effets de serre modernes peuvent avoir un impact encore plus important que ces changements réguliers causés à l'époque.

4.4 La biosphère

Plus nous étudions la vie sur Terre, plus nous découvrons comment les processus de la biosphère sont très étroitement liés à ceux des autres sphères, la géosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère. Nous avons également découvert comment de petits changements dans une partie de l'un de ces systèmes peuvent produire de grands changements ailleurs.

4.4.1 L'évolution

William Smith avait montré que les fossiles dans les roches se trouvaient toujours dans le même ordre (voir section 3.2) mais les scientifiques ne savaient pas pourquoi cela se produisait. En 1858, Charles Darwin et Alfred Russel Wallace ont proposé une théorie expliquant pourquoi les séquences de fossiles changeaient de cette façon ; c'est la théorie de l'évolution.

La théorie de l'évolution est basée sur trois observations scientifiques concernant la biosphère :

- 1) les organismes individuels (tels que les animaux, les plantes, les fossiles) sont différents les uns des autres ;
- 2) certains individus sont mieux adaptés que d'autres pour survivre et se reproduire ; et

3) de nombreuses caractéristiques des individus sont transmises d'une génération à l'autre. Ces caractéristiques ont donné lieu à un processus qui a permis à des groupes d'animaux et de plantes de changer au fil du temps, ou d'évoluer, que Darwin a appelé la **sélection naturelle**. Ce processus a été appelé plus tard la "survie du plus apte", les organismes les mieux adaptés à la survie produisant une descendance, tandis que les moins adaptés disparaissent. Pour la première fois, l'évolution était capable d'expliquer la plupart des très nombreuses observations faites sur la vie sur Terre.

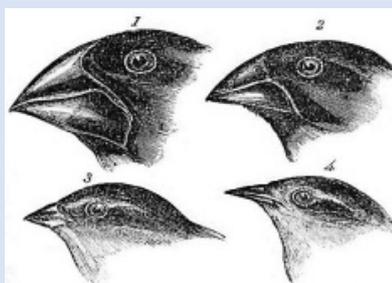
Nous savons maintenant comment les trois observations scientifiques de l'évolution peuvent être expliquées :

- 1) les individus diffèrent les uns des autres parce que la reproduction sexuelle fait que chaque individu possède un ensemble unique de gènes ;
- 2) certaines combinaisons de gènes d'un individu lui donnent de meilleures chances de survie que d'autres ; par exemple, certaines combinaisons de gènes peuvent donner à un animal des pattes plus longues, lui permettant de courir plus vite ; d'autres combinaisons de gènes peuvent donner à un arbre un tronc plus épais, lui permettant de devenir plus grand ;
- 3) lors de la reproduction sexuée chez les plantes et les animaux, la moitié des gènes provient d'un parent et l'autre moitié de l'autre parent ; la moitié des gènes reçus d'un parent transmet certaines caractéristiques du parent à la génération suivante.

Les archives fossiles montrent que certains types de vie semblent évoluer régulièrement, tandis que d'autres montrent qu'un groupe évolue soudainement vers un autre groupe. Les sauts évolutifs soudains semblent se produire lorsqu'un groupe d'animaux ou de plantes est séparé du reste de son groupe, par exemple sur une île ou au sommet d'une chaîne de montagnes. Dans ces conditions, lorsqu'une plante ou un animal développe une nouvelle caractéristique, celle-ci n'est pas perdue par le croisement avec d'autres individus courants, mais peut être préservée et développée au fil des générations.

Encadré 4.16. Charles Darwin et l'évolution

En 1831, Charles Darwin a rejoint le voyage d'exploration du voilier HMS Beagle en tant que naturaliste, un scientifique étudiant à la fois la géologie et la biologie. Au cours de ce voyage autour du monde de près de cinq ans, Darwin a consigné un nombre considérable d'observations sur la géologie, les fossiles et la faune des pays qu'il a visités et a collecté de nombreux spécimens. Certains des oiseaux qu'il a recueillis dans les îles Galápagos, dans l'est de l'océan Pacifique, se sont révélés par la suite être des types de pinson. Ces oiseaux s'étaient adaptés à différents modes de vie sur différentes îles, avec des adaptations spéciales à leur bec pour leur permettre de manger des noix, des fruits ou des vers. Darwin pensait qu'une seule espèce de pinson avait probablement atteint les îles depuis l'Amérique du Sud continentale, mais en se déplaçant vers les différentes îles, ils se sont isolés et ont ainsi évolué différemment pour devenir des espèces distinctes. Cette observation et d'autres semblables ont été un élément déclencheur important de sa réflexion sur l'évolution.



Après son voyage en 1839, Darwin a publié son livre d'observations, y compris ses études des roches volcaniques et son expérience d'un tremblement de terre de magnitude 8,5 au Chili. Ce n'est que 20 ans plus tard, en 1859, qu'il publie son livre sur la théorie de l'évolution, intitulé "On the Origin of Species".

Les différentes répartitions des continents résultant du mouvement des plaques ont eu des effets importants sur l'évolution de la vie sur Terre. Lorsque tous les continents étaient réunis en un supercontinent, il y avait peu de zones terrestres isolées et donc peu de possibilités de saut évolutif. Pendant ce temps, autour des côtes du supercontinent, les zones de mer peu profondes étaient à nouveau interconnectées, réduisant également les possibilités d'évolution.

À d'autres moments, lorsque les continents étaient séparés, des sauts évolutifs se sont produits sur les masses terrestres séparées et dans les mers peu profondes séparées. Les changements évolutifs qui ont donné à la Nouvelle-Zélande un mélange unique de faune et de flore en sont un exemple.

Figure 4.63. Carte des continents à 280Ma, à l'époque permienne, avec un supercontinent réunissant des zones terrestres et des mers peu profondes interconnectées (évolution plus lente).

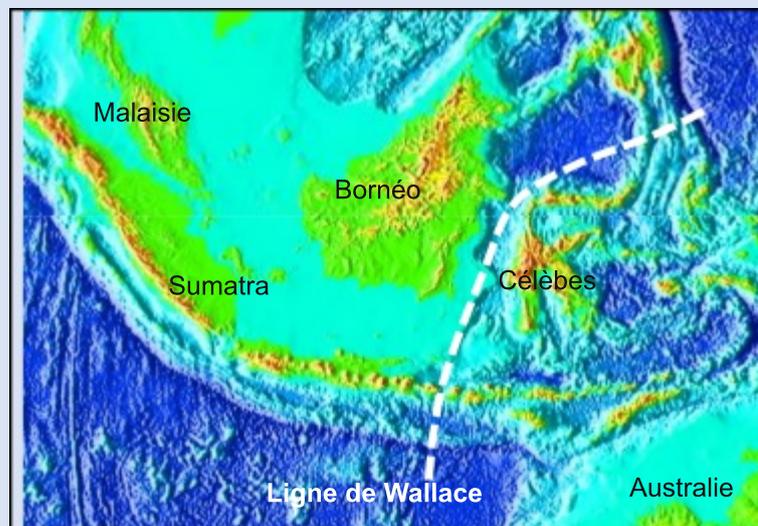


Figure 4.64. Carte des continents à 85Ma, à l'époque du Crétacé, avec des continents séparés et des mers peu profondes (évolution plus rapide)



Encadré 4.17. La lignée Wallace

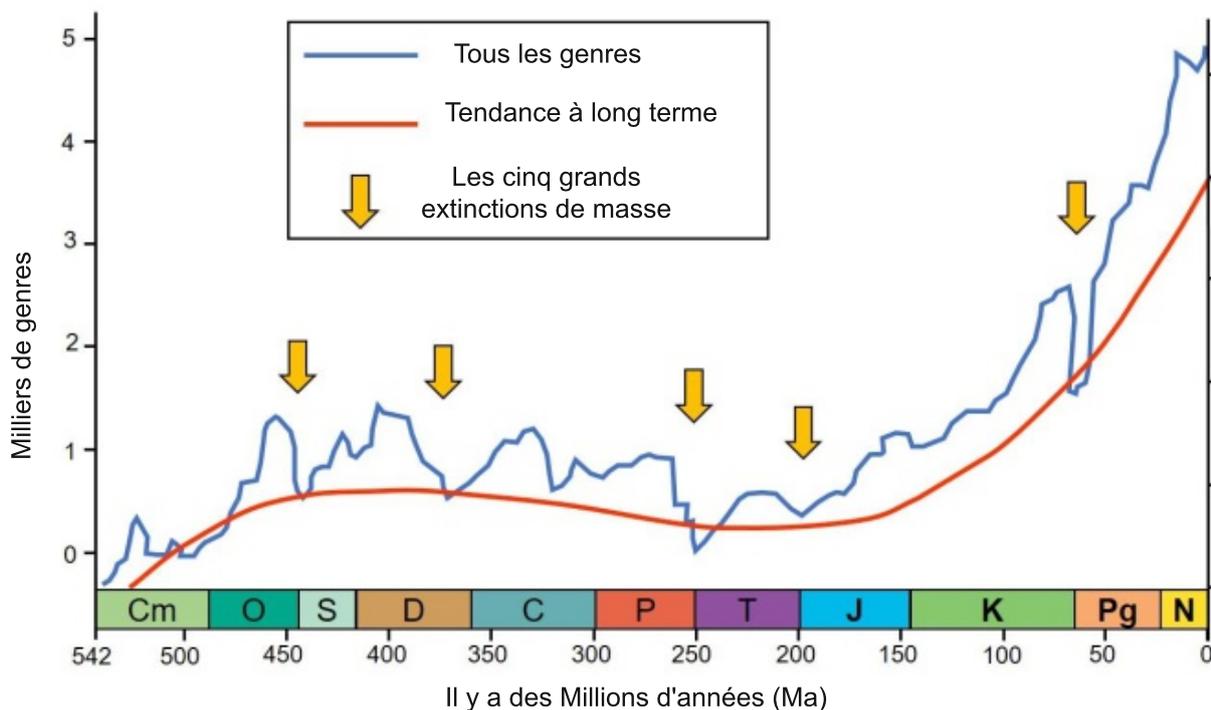
Alfred Russell Wallace, qui a co-développé avec Charles Darwin la théorie de l'évolution, a rassemblé ses idées au cours de ses grands voyages, d'abord dans la région amazonienne de l'Amérique du Sud, puis en Asie du Sud-Est. Il a identifié la ligne en Asie du Sud-Est, appelée aujourd'hui la ligne Wallace, qui sépare les animaux essentiellement asiatiques à l'ouest d'un mélange d'animaux asiatiques et australasiens à l'est. Il s'est alors demandé comment ces différents groupes d'animaux avaient pu se former, ce qui l'a amené à élaborer la théorie de l'évolution. Lorsque l'Australasie a été séparée de l'Asie dans le passé géologique, différents groupes d'animaux ont évolué dans les différentes régions.



La séquence globale de roches enregistre plusieurs épisodes **d'extinction massive**, lorsque de nombreux groupes différents ont disparu en même temps. En effet, les limites de chacune des principales périodes géologiques depuis le Cambrien ont été définies lorsqu'un événement d'extinction massive a provoqué des changements majeurs dans le registre fossile. Habituellement, avant un événement d'extinction massive, la vie semblait se dérouler normalement. Puis, lors de l'événement, un large éventail de groupes s'est soudainement éteint. Après l'événement, les groupes qui ont survécu ont évolué vers une série de nouveaux groupes, probablement parce qu'il n'y avait pas de concurrence avec les groupes qui avaient disparu. Ainsi, en plus de provoquer l'extinction de nombreux groupes, les extinctions massives ont également déclenché l'évolution ultérieure de nombreux nouveaux groupes.

Au cours des 450 derniers millions d'années, cinq extinctions massives majeures ont eu lieu, entraînant la disparition de plus de 60 % des espèces, mais la plus importante a eu lieu à la fin de la période permienne, lorsque plus de 90 % des espèces ont disparu.

Figure 4.65. La tendance à long terme de la vie sur Terre et les principales extinctions, comme le montre le nombre de genres (groupements biologiques contenant un certain nombre d'espèces).



De nombreuses théories différentes ont été avancées pour expliquer les extinctions massives, notamment d'énormes éruptions volcaniques, des baisses globales du niveau de la mer, des impacts d'astéroïdes et des changements majeurs du climat (refroidissement et réchauffement). Parfois, plusieurs de ces événements, ainsi que d'autres changements majeurs, semblent s'être produits en même temps.

Encadré 4.18. La grande extinction de masse "mourante"

À la fin du Permien (et au début du Trias), à 252 millions d'années, plus de 90 % de toutes les espèces de la Terre se sont éteintes. Jusqu'à 96 % de toutes les espèces marines se sont éteintes, sans compter les extinctions majeures d'animaux terrestres et d'insectes. Les conditions dévastatrices de cette extinction massive sont presque impossibles à imaginer : non seulement une grande partie de la vie animale et végétale a disparu sur terre, mais aussi dans les océans, où "presque toute la vie est morte".

De nombreuses idées ont été proposées pour expliquer cette "grande mort", notamment l'extrusion d'énormes volumes de lave basaltique, qui s'est produite au moment de l'extinction et aurait libéré d'énormes quantités de cendres et de gaz volcaniques dans l'atmosphère. Les cendres auraient bloqué la lumière du soleil, empêchant ainsi la photosynthèse, tandis que la libération de dioxyde de carbone volcanique aurait provoqué un réchauffement de la planète et une acidification des océans.

L'extinction de masse a peut-être été déclenchée par un astéroïde frappant la Terre, mais si tel était le cas et que le site d'impact se trouvait dans les océans, il aurait probablement déjà disparu, car le plancher océanique est recyclé par la tectonique des plaques. Cependant, aucune autre preuve d'un impact majeur ne semble avoir été préservée de cette époque non plus, de sorte qu'une explication par une collision d'astéroïdes pour cet événement semble peu probable.



Feuilles et cosques de *Glossopteris* - trouvées avant la "grande mort", mais pas après.

Encadré 4.19. L'extinction de masse K-Pg

À 66Ma, soit à la fin de la période du Crétacé et au début de celle du Paléogène, les trois quarts de la vie sur Terre se sont éteints. Aucun grand amphibien, aucun grand reptile (y compris les dinosaures, mais pas les crocodiles), ni aucun grand mammifère n'a survécu. Les groupes marins ont également été dévastés ; les ammonites se sont éteintes, ainsi que de nombreux groupes de poissons, de requins et de planctons.

Les conditions de l'époque ont dû être dévastatrices, tant de plantes et d'animaux sur terre et dans la mer ayant disparu en très peu de temps.

Un éventail d'idées scientifiques a été suggéré pour expliquer un événement aussi soudain et dramatique, notamment les énormes éruptions volcaniques des basaltes du Deccan Traps (dans ce qui est aujourd'hui l'Inde), l'élévation du niveau de la mer, le changement climatique ou une combinaison de ces éléments.

Lorsqu'on a découvert dans les années 1980 que la limite K-Pg est marquée dans de nombreuses séquences rocheuses par une couche de sédiments boueux riches en iridium, on a émis l'idée qu'un astéroïde avait heurté la Terre ; les astéroïdes sont riches en iridium, mais pas la Terre. Peu après, le cratère Chicxulub a été découvert dans le golfe du Mexique, en Amérique centrale. Ce cratère de 180 km de large et de 20 km de profondeur est considéré comme le site d'impact d'un astéroïde d'au moins 10 km de diamètre. Des preuves supplémentaires de l'impact sont fournies par du "quartz choqué" (cristaux de quartz déformés par une pression soudaine) et des perles de verre (tektites) de roches fondues et éjectées par la collision. Les scientifiques sont presque certains qu'une collision d'astéroïdes a provoqué le cratère, mais la question de savoir si cette collision a provoqué l'extinction de masse K-Pg, si elle y a contribué ou si elle n'a eu que peu d'effet sur la vie sur Terre à l'époque, fait encore l'objet de vifs débats.

L'extinction de masse K-Pg a laissé un grand nombre d'habitats presque vides, ce qui a donné lieu à une brusque poussée d'évolution après l'extinction. Les oiseaux, les poissons et les mammifères, en particulier, ont évolué vers de nombreux nouveaux groupes ; les mammifères sont devenus des chevaux, des chauves-souris, des baleines et des primates.



Tyrannosaurus rex - l'un des derniers groupes de dinosaures découverts avant l'extinction de masse K-Pg.



Géologues recueillant des sédiments à la limite K-Pg, Wyoming, États-Unis.

L'extinction de masse du Crétacé/Paléogène est souvent appelée extinction de masse K-Pg car, dans la colonne géologique, la période du Crétacé peut être abrégée en " K " (la lettre " C " avait été utilisée plus bas dans la colonne pour " Carbonifère ") et le Paléogène est abrégé en " Pg " (puisque " P " avait été utilisé précédemment pour la période " Permienne ") (Figure 4.65). Il est troublant de constater que l'extinction de masse K-Pg était appelée extinction de masse K-T avant que le T (" Tertiaire ") ne soit subdivisé. L'une de ces subdivisions a été appelée le "Paléogène" et le terme "Tertiaire" n'est plus utilisé officiellement.

Les extinctions massives n'ont pas eu que des effets négatifs, mais aussi des effets positifs, car chaque extinction massive a laissé de nouveaux habitats disponibles pour de nouvelles poussées d'évolution. Ainsi, sans l'extinction en général et l'extinction de masse en particulier, l'évolution n'aurait peut-être pas produit l'immense diversité de la vie sur Terre aujourd'hui.

4.4.2 Impact sur d'autres systèmes

Il semble que plus nous étudions les systèmes de la Terre, plus nous découvrons les effets vitaux de la vie sur ces systèmes. La biosphère a eu des effets majeurs sur l'évolution de la planète entière.

Par exemple, l'altération des roches fait intervenir toute une série de processus. Le gel et le dégel, ainsi que le chauffage et le refroidissement, ont pour effet physique de briser la roche en petits morceaux. Les plantes ont également de nombreux effets physiques, depuis les radicelles des lichens qui séparent les grains de roche, jusqu'au mouvement des racines des arbres dans les tempêtes qui soulèvent les rochers des parois rocheuses. De même, les effets chimiques des pluies acides et de l'oxydation dans la dégradation chimique des roches sont accrus par la vie dans le sol qui ajoute du dioxyde de carbone supplémentaire à la pluie, rendant l'eau du sol encore plus acide et capable d'attaquer la roche. La matière organique en décomposition produit également de l'acide, ce qui augmente la teneur en acide de l'eau, ainsi que toute une série d'autres effets de décomposition biochimique. Le sol ne se forme que là où il y a de la vie, qui ajoute des matières végétales et des animaux du sol. Ainsi, là où il y a peu de vie, comme dans les régions polaires ou les déserts secs, il n'y a pas de sol.

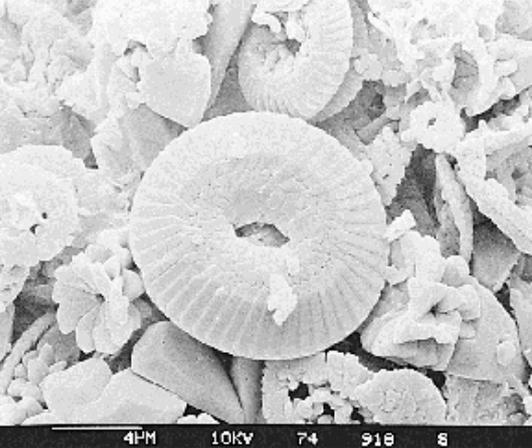
La vie joue également un rôle clé dans la formation des roches, ainsi que dans leur altération, comme le montre le tableau 4.26. Environ 10 % de toutes les roches trouvées à la surface de la Terre sont des calcaires, et la plupart d'entre eux résultent de processus biologiques. La vie est donc très importante pour la formation des roches.

La vie a également produit toutes nos réserves de combustibles fossiles. Le charbon se forme comme décrit dans le tableau 4.26 et, au cours de sa formation, libère du gaz naturel, ou méthane. Le pétrole est formé principalement par la décomposition de minuscules plantes et animaux planctoniques déposés dans la boue des fonds marins et enfouis par la suite.

Tableau 4.26. La contribution de la vie à la formation des roches

Processus	Description	Image	Source
Formation du charbon	Lorsqu'il y a une vie végétale abondante et que les plantes meurent, elles ne se décomposent pas complètement si elles tombent dans un milieu sans oxygène ; elles forment d'abord de la tourbe et plus tard, par enfouissement, des fossiles de feuilles de charbon		Fossile de feuilles dans le charbon du carbonifère
Formation de récif dans le calcaire	Les coraux et d'autres animaux construisent les récifs aujourd'hui et ont également été les principaux constructeurs de récifs dans le passé géologique.		fossile de corail d'âge pléistocène dans le parc d'État géologique Windley Key Fossil Reef, Floride, USA

Tableau 4.26. La contribution de la vie à la formation des roches

Processus	Description	Image	Source
Calcaires formés de débris fossiles	La plupart des calcaires sont formés de débris fossiles. Les fossiles sont parfois faciles à voir, comme dans ce spécimen, mais ils peuvent aussi être brisés en minuscules fragments, impossibles à voir à l'œil nu.		Pierre de construction altérée : calcaire formé de bivalves et de gastéropodes cénozoïques brisés au temple de Zeus, Olympie, Grèce.
Craie - calcaire à grain très fin formé de coccolithes	Avant que les microscopes électroniques à balayage (MEB) ne soient disponibles, les géologues avaient peu d'idées sur la formation de la craie. Aujourd'hui, les MEB ont montré que la craie est principalement constituée de coccolithes, les minuscules plaquettes de carbonate de calcium des algues planctoniques, ainsi que d'autres microfossiles		Image au microscope électronique à balayage de coccolithes ; ceux-ci constituent la boue carbonatée très fine qui peut éventuellement devenir de la craie.
Sédiments modifiés par le creusement	Dans de nombreux grès et argilites, les terriers d'animaux ont détruit le litage et les autres structures d'origine.		Terriers d'animaux ressemblant à des crabes dans des argiles du Jurassique, Makhtesh Qatan, sud d'Israël.

L'équilibre entre le stockage du carbone dans la formation du calcaire et sa libération par l'altération a probablement joué un rôle clé dans le passé géologique, par la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et l'effet de serre qui en résulte. La subduction des calcaires aux marges des plaques convergentes peut également avoir joué un rôle important dans les climats du passé géologique, par la décomposition du calcaire en dioxyde de carbone, libéré ensuite sous forme de gaz volcaniques.

Encadré 4.20. L'hypothèse Gaia de James Lovelock

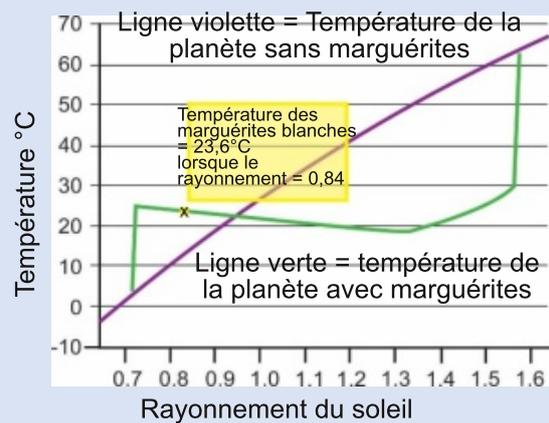
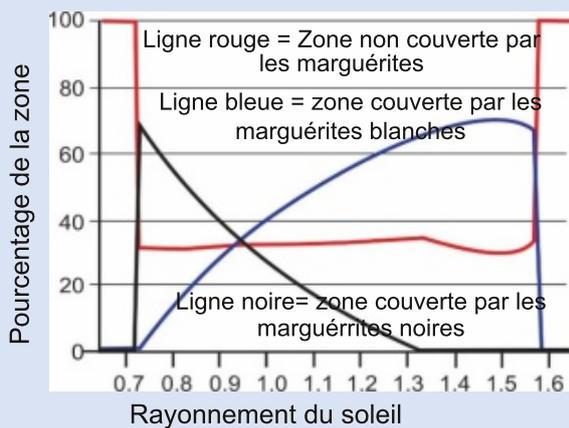
James Lovelock a proposé que la vie ne joue pas seulement un rôle important dans les systèmes terrestres, mais qu'elle les contrôle. Il a appelé son idée l'hypothèse Gaïa (d'après la déesse grecque de la Terre Mère, Gaïa) et soutient que, de la même manière que votre corps possède de nombreux systèmes différents pour le réguler, il en va de même pour la Terre. Par exemple, si vous avez trop chaud, vous transpirez pour vous rafraîchir, mais si vous avez trop froid, les frissons vous réchauffent. Lorsque les scientifiques n'étaient pas d'accord sur le fait que la Terre pouvait avoir des systèmes pour réguler sa température et d'autres aspects de ses systèmes, Lovelock a conçu un programme informatique qu'il a appelé "Daisyworld" pour montrer comment cela pourrait fonctionner.

Dans la simulation illustrée par les graphiques, la ligne marron du graphique de droite montre comment la température de sa planète simulée, si elle n'avait pas de vie, augmenterait en fonction de l'augmentation du rayonnement solaire. La planète simulée par Lovelock est similaire à la Terre, où le rayonnement reçu de notre Soleil n'a cessé d'augmenter au cours des temps géologiques.

Si, au début de la planète simulée, une grande zone était couverte de marguerites noires (ligne noire sur le graphique de gauche), la couleur noire aurait absorbé davantage de rayonnement et augmenté la température de la planète à plus de 20°C - la ligne verte sur le graphique de droite. Puis, à mesure que le rayonnement solaire augmentait, il est devenu trop chaud pour les marguerites noires et elles ont commencé à mourir, remplacées progressivement par des marguerites blanches (ligne bleue sur le graphique de gauche). Comme le soleil recevait de plus en plus de radiations, les marguerites blanches en réfléchissaient de plus en plus, ce qui maintenait la température à près de 20°C. À la fin, les marguerites ne pouvaient plus faire face et se sont éteintes. La température de la planète a alors augmenté de façon spectaculaire pour atteindre ce qu'elle aurait été s'il n'y avait pas eu de marguerites du tout. Ainsi, l'effet des marguerites a été de maintenir la planète simulée à une température relativement stable alors que la luminosité solaire (rayonnement du soleil) a plus que doublé.

Grâce à cette simulation, Lovelock a démontré comment une vie évolutive pouvait réguler la température d'une planète. Il pensait que, de différentes manières, la vie pouvait réguler les systèmes d'une planète entière comme la Terre, en maintenant sa capacité de vie, depuis l'apparition de la vie abondante jusqu'à aujourd'hui.

Une partie de la pensée de Lovelock sous-tend aujourd'hui la manière dont les scientifiques étudient les systèmes terrestres, bien que beaucoup ne soient pas d'accord sur le fait que la vie régule l'ensemble du système terrestre de la manière décrite par Lovelock.



5

Le système terrestre produit des ressources

Les ressources naturelles sont toutes les matières de la géosphère, de l'hydrosphère, de l'atmosphère et de la biosphère qui peuvent être utilisées par les humains. Elles comprennent le large éventail présenté dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1. Ressources naturelles de la Terre

Source	Certaines des ressources naturelles extraites pour être utilisées	Image	Source
Géosphère	<ul style="list-style-type: none"> - Sol - Roches en vrac pour la construction et l'industrie - Anciens minéraux évaporés - Minerais métalliques - Combustibles fossiles - Énergie géothermique - Uranium 		Les Jardins Butchart, Victoria, Colombie-Britannique, Canada, sont situés dans une carrière de calcaire réaménagée
Hydrosphère	<ul style="list-style-type: none"> - Eau potable - Eau pour l'industrie et l'agriculture - Minéraux évaporitiques - Énergie hydroélectrique, houlomotrice et marémotrice 		Évaporation du sel de sel, La Palma, les îles Canaries
Atmosphère	<ul style="list-style-type: none"> - Gaz de l'atmosphère - L'air pour l'industrie - Vent pour l'énergie 		Usine d'oxygène à membrane, utilisée pour extraire l'oxygène de l'air
Biosphère	<ul style="list-style-type: none"> - Poissons et autres créatures marines - Arbres - Produits de l'agriculture sur terre et dans la mer 		Culture d'algues en Indonésie

5.1 Matières premières et combustibles fossiles

Toutes les matières premières et tous les combustibles fossiles qui sont extraits du sol ont d'abord été concentrés naturellement. Cette concentration naturelle se produit de deux manières : soit les processus naturels ont concentré la matière elle-même, soit les processus naturels ont éliminé les autres matières non économiques, laissant derrière eux les matières utiles.

Les matières ne sont extraites pour être utilisées que si elles sont économiquement viables. Cela signifie qu'un matériau n'est extrait que si l'équilibre entre le besoin local ou mondial du matériau (la demande) et sa disponibilité locale ou mondiale (l'offre) rend le prix suffisamment élevé. Si le prix est suffisamment élevé pour couvrir les coûts de prospection, d'extraction et de remise en état, de traitement et de transport, alors le matériau vaut la peine d'être extrait.

Tout développement visant à répondre aux besoins humains doit être durable. **Le développement durable** a été décrit comme "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins". Cela signifie que les besoins économiques et démographiques doivent être satisfaits sans endommager l'environnement au point de ne plus pouvoir répondre aux besoins futurs. Pour l'extraction de matériaux naturels, tous les aspects de l'opération doivent être durables.

L'assainissement consiste à extraire le matériau en causant le moins de dommages possible à la communauté et à l'environnement environnants, et à ramener ensuite la zone à un état proche de sa qualité d'origine, tout en assurant un suivi afin que des problèmes ultérieurs ne se produisent pas. Certains pays ont des niveaux élevés de contrôle environnemental, ce qui garantit une restauration adéquate, tandis que d'autres pays ont des niveaux de contrôle plus faibles.

5.1.1 Matières premières en vrac pour la construction

La construction à grande échelle nécessite d'énormes quantités de matériaux, dont le transport peut être très coûteux. C'est pourquoi de nombreuses supercarrières sont situées sur la côte et d'autres grandes carrières ont leurs propres lignes de chemin de fer. La plupart des villes ont des carrières proches, bien reliées par des routes, pour répondre à leurs besoins en matière de construction. La roche concassée, le sable et le gravier de certaines carrières sont utilisés comme **agrégats** de construction.

Tableau 5.2. Exemples de matières premières en vrac utilisées dans la construction

Matière première en vrac	Détails	Image	Source
Roches ignées	Les roches ignées comme le granite, le gabbro et la dolérite sont très résistantes et sont utilisées comme agrégats dans le béton, la construction de routes et le ballast de roches concassées sur lequel sont posées les voies ferrées.		Le quai de chargement de granite de Glensanda, Loch Linnhe, Écosse, l'une des plus grandes carrières d'Europe, mais cachée dans les collines derrière le site.
Calcaire	Le calcaire est utilisé pour les agrégats et la fabrication du ciment		Calcaire de Nagara, Toyohashi, Japon

Tableau 5.2. Exemple de matières premières en vrac, utilisées pour la construction, suite

Matière première en vrac	Détails	Image	Source
Sable et gravier	Le sable et le gravier sont extraits pour les granulats dans le		béton Sablière près de Lisbonne, Portugal

5.1.2 Matières premières en vrac pour l'industrie

L'industrie a besoin de matières premières en vrac pour toute une série d'utilisations, notamment : la fabrication de matériaux de construction, l'approvisionnement des industries céramiques, et comme matière première pour les industries chimiques et les engrais agricoles (tableau 5.3). Comme les coûts de transport des matières en vrac sont élevés, les usines de transformation sont implantées le plus près possible des carrières, ou de bonnes liaisons de transport sont nécessaires. On les appelle *matières premières en vrac* car leur coût est faible par rapport à leur masse et leur volume importants, de sorte que pour être rentables, elles doivent être extraites en vrac à grande échelle.

Tableau 5.3. Exemples de matières premières en vrac utilisées dans la fabrication de matériaux de construction, l'industrie céramique et l'industrie chimique

Matière première en vrac	Détails	Image	Source
Calcaire	Ciment pour le béton ; les blocs de ciment et le mortier sont fabriqués en chauffant du calcaire et de l'argile ensemble dans un four et en broyant le résultat avec du gypse		Cimenterie, Holcim, Eclépens, Suisse
	Le calcaire est chauffé pour former de la chaux vive utilisée dans l'agriculture et dans les industries chimiques pour fabriquer de l'acier, des revêtements pour le papier, de l'eau de Javel, pour le raffinage du sucre et pour le traitement de l'eau.		Un four à chaux rotatif moderne, Wyoming, USA

Tableau 5.3. Exemples de matières premières en vrac utilisées dans la fabrication de matériaux de construction, l'industrie céramique et l'industrie chimique, suite

Source	Certaines des ressources naturelles extraites pour être utilisées	Image	Source
Le sel	Le chlorure de sodium n'est pas seulement récupéré par évaporation dans des bassins de sel, mais il est également extrait sous terre d'anciens gisements de halite. Il est utilisé pour saler les aliments, déglacer les routes et dans l'industrie chimique pour les plastiques et la fabrication du papier.		Cristaux cubiques d'halite minérale, mine de sel de Merkers, Allemagne
Potasse	La potasse est du chlorure de potassium et est récupérée par l'exploitation minière et le pompage de saumure. C'est la principale source de potassium dans les engrais agricoles et elle est utilisée pour produire une large gamme de produits chimiques industriels		L'eau pompée dans le minerai de potasse soluble est ensuite pompée sous forme de saumure dans des bassins d'évaporation pour récupérer la potasse, Utah, États-Unis.
Le gypse	Le gypse, un minéral à base de sulfate de calcium, est extrait et chauffé pour fabriquer le plâtre de Paris, qui est utilisé pour fabriquer les revêtements muraux en plâtre et en plaques de plâtre utilisés dans la plupart des bâtiments modernes		Une carrière de gypse dans des roches triasiques près de Nottingham, en Angleterre
Argile à briques	L'argile à briques est moulée en formes de briques, puis cuite dans des fours pour produire des briques domestiques pour la construction		Excavation d'argile à briques, Baduria, Bengale occidentale, Inde

Tableau 5.3. Exemples de matières premières en vrac utilisées dans la fabrication de matériaux de construction, l'industrie céramique et l'industrie chimique, suite

Matière première en vrac	Détails	Image	Source
Argile de Chine	L'argile de Chine est utilisée pour fabriquer de la porcelaine fine, ainsi que du papier et des cosmétiques		Fosse d'argile de Chine près de Kaznějov en République tchèque
Sable siliceux	Le sable siliceux est mélangé à de la soude (carbonate de sodium) de la chaux (oxyde de calcium) et d'autres produits chimiques, puis il est fondu et flottant sur du métal fondu pour fabriquer le verre utilisé dans les fenêtres d'aujourd'hui.		Vue aérienne de l'énorme fosse de sable siliceux près de Frechen, en l'ouest de l'Allemagne

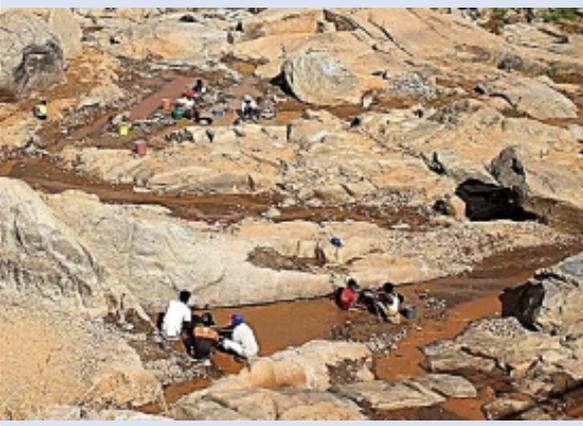
5.1.3 Minerais métalliques

Les minerais métalliques sont des concentrations naturelles de métaux qui ont une valeur économique. Ils doivent être encore plus concentrés que les matières premières en vrac pour que leur exploitation soit rentable. Divers processus sédimentaires, ignés et métamorphiques concentrent naturellement les minerais. Le tableau 5.4 en donne quelques exemples.

Tableau 5.4. Exemples d'extraction de minerais métalliques

Minéral métallique	Concentration naturelle	Image	Source
Fer, Hématite, Fe_2O_3	Les énormes séquences de grès ferrugineux en Australie et dans d'autres régions continentales ont été formées à l'ère précambrienne, par des processus sédimentaires que les scientifiques tentent toujours d'expliquer.		Mine de fer de Tom Price, Australie de l'ouest - tout ce que l'on voit est coloré en rouge par la poussière d'hématite

Tableau 5.4. Exemple d'extraction de minerai métallique, suite

Minerai métallique	Concentration naturelle	Image	Source
<p>Cuivre, chalcopysite, CuFeS_2</p>	<p>La chalcopysite et d'autres minéraux de cuivre ont été concentrés par des fluides hydrothermaux chauds qui ont pris naissance profondément sous la surface, par le biais de processus métamorphiques et hydrothermaux.</p>		<p>Mine de cuivre de Bingham Canyon, Utah, USA - la plus grande mine du monde, à plus d'un kilomètre de profondeur et quatre kilomètres de largeur</p>
<p>Le plomb, galène, PbS</p>	<p>Le minerai de plomb se trouve souvent avec des minerais de zinc, de cuivre et d'argent ; les minerais sont souvent concentrés par les fluides hydrothermaux produits lorsque des magmas pénètrent dans les roches environnantes.</p>		<p>Mine Mt Isa, Queensland, Australie ; la haute cheminée est celle de la fonderie de plomb ; la cheminée de la fonderie de cuivre est rouge-blanche.</p>
<p>L'or, or natif, Au</p>	<p>L'or se trouve à l'état natif, non combiné à un autre élément; comme c'est un minéral dense, après avoir été libéré de la roche par l'érosion, il peut être déposé sous forme d'or placérien dans le lit des cours d'eau</p>		<p>L'orpaillage commercial par le peuple Sakalava à Madagascar</p>

5.1.4 Minéraux industriels

Il s'agit de minéraux exploités pour leur valeur, qui ne sont pas des combustibles, des minerais métalliques ou des matières premières en vrac. Ils comprennent un très large éventail de matériaux. Deux exemples sont présentés dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5. Exemples d'extraction de minéraux industriels

Minéral industriel	Détail	Image	Source
Minéraux Terre Rare	Ces gisements contiennent des éléments de terres rares qui sont utilisés dans les appareils modernes tels que les mémoires d'ordinateurs, les téléphones portables, les DVD, les aimants, les éclairages fluorescents et les batteries rechargeables.		Vue satellite d'une mine de terres rares à Bayan Obo, en Chine.
Diamant	Les diamants provenant des profondeurs du manteau sont ramenés à la surface par des éruptions volcaniques qui forment des tuyaux jusqu'à la surface. Ils sont utilisés comme pierres précieuses et pour la coupe et le broyage industriels.		La mine Mir, Mirny, Russie

5.1.5 Les combustibles fossiles

Les combustibles fossiles sont les restes de plantes et d'animaux microscopiques conservés dans le sol. Lorsqu'elles étaient vivantes, les plantes absorbaient l'énergie du Soleil par photosynthèse. En mourant, leurs restes se sont accumulés, souvent dans de l'eau contenant peu ou pas d'oxygène. Comme l'oxygène est nécessaire pour que la matière organique se décompose complètement, les restes ne se sont que partiellement décomposés, formant des dépôts sédimentaires riches en matière organique. Lorsque ces dépôts ont été enterrés et comprimés, une grande partie de l'eau et des gaz de décomposition ont été expulsés, enrichissant encore davantage le contenu organique. Toutes les matières organiques contiennent l'élément carbone, et c'est la combustion du carbone dans les combustibles fossiles qui libère de l'énergie.

5.1.5.1 Tourbe et charbon

La tourbe est l'accumulation de matières végétales partiellement décomposées dans les eaux pauvres en oxygène des tourbières, des marais et des marécages. La tourbe s'accumule sur des milliers d'années, souvent sur une épaisseur de plus de 2 mètres. Les tourbières sont non seulement riches en carbone, mais elles capturent également le dioxyde de carbone libéré lors de la décomposition, et constituent donc l'une des principales réserves de carbone retiré de l'atmosphère. Si la tourbe est enterrée et comprimée, elle préserve une concentration encore plus grande de carbone.

La tourbe est coupée pour être brûlée et pour produire du compost organique pour les jardins. Cependant, comme les scientifiques ont mieux compris comment les tourbières jouent un rôle si important dans l'élimination du carbone de l'atmosphère, l'excavation de la tourbe a été réduite au niveau mondial.

Figure 5.1. Coupe commerciale de tourbe, Ljungby, Suède



Si la tourbe était enfouie à des profondeurs encore plus grandes, la compression par les sédiments sus-jacents la transformerait en charbon. Cependant, la plupart du charbon est produit dans les conditions de forêt tropicale des marécages tropicaux. Les plantes et les arbres poussent rapidement dans ces conditions chaudes et humides et, lorsqu'ils meurent et tombent dans les marécages pauvres en oxygène, ils ne se décomposent que partiellement. Si la zone s'affaisse, plusieurs mètres de matière organique peuvent s'accumuler, préservant parfois des feuilles, des racines ou des troncs d'arbre entiers. Lorsque la couche organique est enfouie de plus en plus profondément par les sédiments sus-jacents, la température augmente naturellement tandis que l'eau et les gaz de décomposition sont expulsés, produisant des filons de charbon. Plus la pression et la température augmentent, plus la quantité de gaz libérée est importante et plus la qualité du charbon est élevée ; le charbon de qualité supérieure contient la plus grande proportion de carbone.

Les gisements de charbon ont d'abord été exploités à la surface il y a longtemps. Ils ont ensuite été suivis sous terre par des tunnels horizontaux ou inclinés appelés adits, ou par des puits verticaux. L'exploitation souterraine du charbon est appelée exploitation profonde, et certaines mines de charbon ont atteint une profondeur de plus d'un kilomètre. L'extraction profonde du charbon se poursuit dans de nombreuses régions du monde, mais une alternative moins coûteuse est l'extraction à ciel ouvert du charbon.

Dans les mines à ciel ouvert modernes, la terre arable est enlevée et mise en tas. Ensuite, les roches sédimentaires recouvrant les veines de charbon sont enlevées et stockées ailleurs. Lorsque la veine de charbon est atteinte, le charbon est soigneusement nettoyé, puis de grandes machines sont utilisées pour extraire le charbon et le transporter hors de la mine. Parfois, l'exploitation à ciel ouvert révèle les anciens tunnels profonds d'extraction du charbon, comme dans la figure 5.2. Des fentes à ciel ouvert de plus en plus profondes sont creusées au fur et à mesure de l'extraction de veines plus profondes, parfois jusqu'à 60 m de profondeur. Ensuite, la fente suivante est creusée et remblayée avec les stériles de la fente précédente. Les mineurs à ciel ouvert travaillent sur le site, fente par fente, jusqu'à ce que tout le charbon ait été extrait et la dernière fente remplie. Ensuite, la terre végétale est remplacée et la zone est aménagée de manière à se rapprocher le plus possible de son état d'origine.

Figure 5.2. Une mine de charbon à ciel ouvert dans une veine de charbon à fort pendage, révélant une ancienne galerie d'exploitation profonde. Filon de Foord dans la formation carbonifère de Stellarton, Stellarton, Nouvelle-Écosse, Canada.



5.1.5.2 Pétrole et gaz naturel

Une grande partie du gaz naturel extrait de la Terre a été produite par le dégazage naturel du charbon lorsqu'il a été comprimé et chauffé pendant son enfouissement. Quant au pétrole brut et au gaz naturel, ils sont formés à partir de schistes et de mudstones riches en matières organiques, eux aussi chauffés et comprimés par enfouissement. La matière organique qui constitue la source du pétrole était à l'origine des plantes et des animaux planctoniques marins microscopiques. Ceux-ci se sont déposés au fond de la mer lorsqu'ils sont morts et ont été enterrés dans la boue qui a fini par devenir de la boue et du schiste. Le charbon et les argiles et schistes riches en matières organiques sont donc les roches mères originales du pétrole et du gaz. Toutes les matières organiques contenues dans les roches mères ont à l'origine obtenu leur énergie du soleil par photosynthèse et contiennent donc de "l'énergie solaire fossilisée".

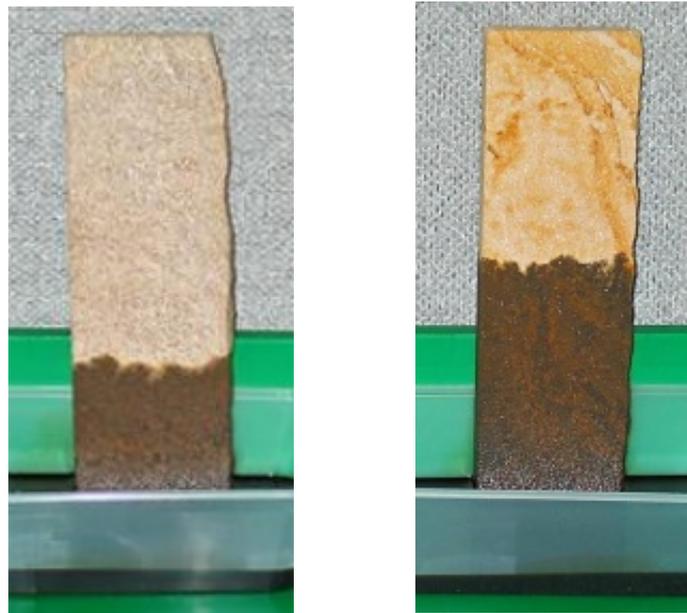
Pour que des gisements de pétrole et de gaz se forment dans le sous-sol, les cinq éléments indiqués dans le tableau 5.6 sont nécessaires, dans l'ordre, du bas vers le haut du tableau.

Tableau 5.6. Les cinq conditions nécessaires à la formation d'un gisement de pétrole et/ou de gaz

Exigences relatives aux champs pétroliers/gaziers	Détails	Image	Source
Piège	La forme de la roche de couverture recouvrant la roche réservoir doit permettre de piéger un corps de pétrole ou de gaz en forme de bulle en dessous. La forme courante d'un piège est un anticlinal, mais il existe également plusieurs autres types de pièges		Un anticlinal au col de Pang La au Tibet
Les roches de couverture	Les roches de couverture sont des roches à grain fin qui sont imperméables (les fluides ne peuvent pas s'écouler à travers elles) et qui piègent le pétrole et/ou le gaz dans leurs couches.		Argillite de l'anticlinal de Deakin, du Silurien Formation de Yarralumla, Canberra, Australie
Roche réservoir	Une roche réservoir est une roche qui possède suffisamment de pores interconnectés pour contenir un fluide tel que l'eau, le pétrole ou le gaz ; c'est une roche perméable qui doit être à la fois poreuse (avec des pores) et perméable (pour permettre au fluide de s'écouler). Les grès sont les roches réservoirs de pétrole les plus courantes		Grès contenant naturellement du pétrole, provenant du champ pétrolier de champ pétrolier de Hutton en mer du Nord
Chaleur d'enfouissement et pression	Lorsque les roches sont enfouies, leur température augmente naturellement. À environ 2 km de profondeur, la température atteint 60°C et les roches organiques commencent à libérer du pétrole. À 4 km de profondeur, la température atteint 120°C et une grande partie du pétrole a été libérée. Le gaz naturel commence également à être libéré à cette température. À 9 km de profondeur, à une température de plus de 200 °C, le gaz restant se transforme en graphite et ne peut plus être libéré.		
Roche mère	La roche mère est la roche riche en matière organique d'où proviennent le pétrole et le gaz à l'origine. Pour le gaz naturel, la roche mère est constituée de charbon ou de sources pétrolières. La plupart du pétrole et une partie du gaz naturel proviennent de schistes bitumineux noirs et organiques ou du contenu organique de grands volumes de schistes bitumineux plus pâles.		Schiste bitumineux provenant du gisement de l'Éocène dans la fosse de Messel près de Francfort, en Allemagne

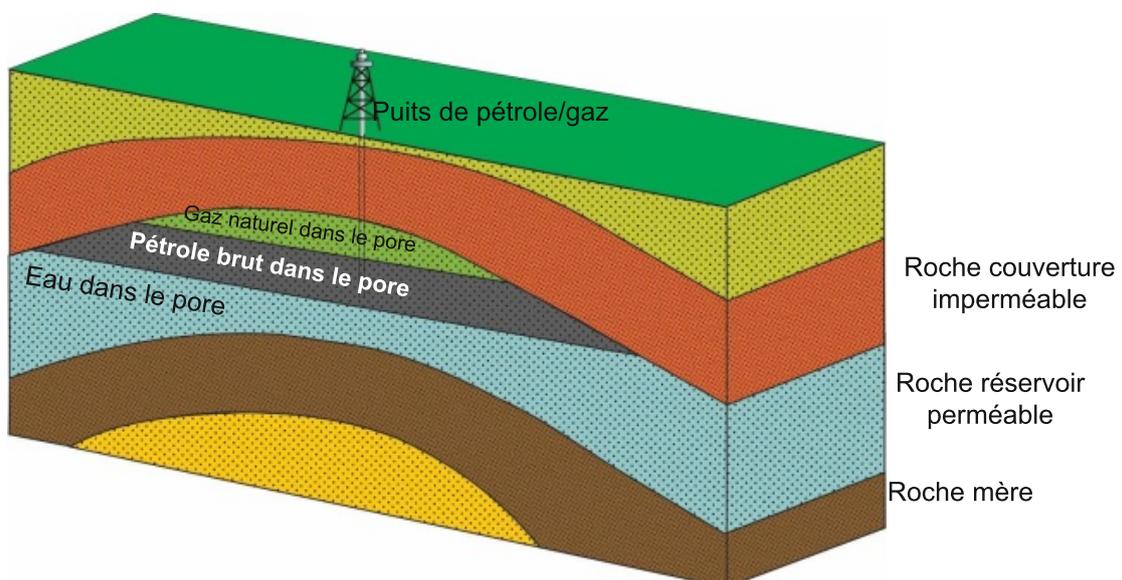
Toutes les roches poreuses contiennent des fluides dans leurs espaces interstitiels, généralement de l'eau. Lorsque les pressions et les températures d'enfouissement augmentent, les roches mères libèrent leur pétrole et leur gaz. Ceux-ci remontent car ils sont moins denses que l'eau contenue dans les espaces interstitiels. Ils continuent de monter à travers les roches perméables ou le long des fractures, jusqu'à ce qu'ils atteignent la surface de la Terre et soient perdus, ou jusqu'à ce qu'ils atteignent une couche de roche de couverture imperméable. Un réservoir souterrain de pétrole/gaz se forme si la roche couverture a la bonne forme pour piéger le pétrole/gaz en dessous, si elle est assez grande et si elle est surmontée d'une roche dont les pores sont assez grands pour contenir une bonne quantité de pétrole/gaz (une roche réservoir comme celles de la figure 5.3). Le gaz contenu dans les espaces interstitiels flotte sur le pétrole, qui flotte à son tour sur l'eau, comme le montre la figure 5.4.

Figure 5.3. Deux dalles de grès dans de l'huile de moteur - montrant comment différents grès peuvent absorber différentes quantités d'huile dans leurs espaces interstitiels.



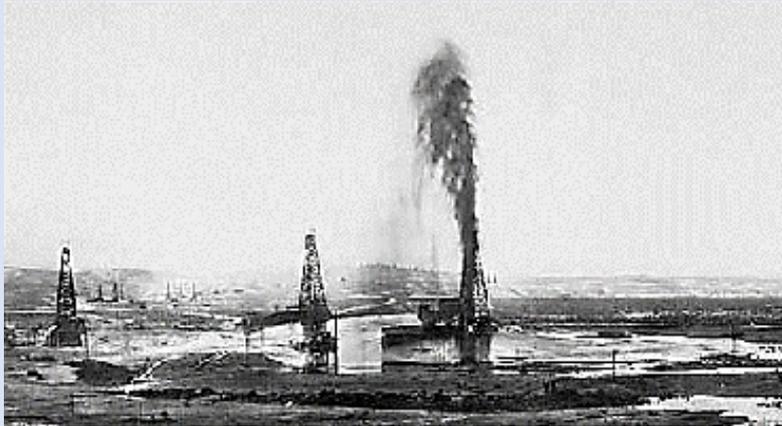
Lorsqu'un forage est effectué dans un piège contenant du pétrole et/ou du gaz, le pétrole/gaz remonte dans le trou car sa densité est inférieure à celle de l'eau et en raison de la pression des roches sus-jacentes. Il peut jaillir dangereusement à la surface, à moins qu'il ne soit soigneusement contrôlé par la série de valves reliées au sommet de tous les forages d'exploration pétrolière/gazière.

Figure 5.4. Un piège formé de roches repliées (un anticlinal) - il peut contenir du pétrole, du gaz ou les deux à la fois.



Encadré 5.1. Les vannes des forages pétroliers

Les puits de pétrole/gaz sont équipés d'un "arbre de Noël" de vannes à la surface, afin d'empêcher le pétrole/gaz naturellement pressurisé de jaillir dangereusement du puits (l'image de droite provient d'un puits du Dakota du Nord, aux États-Unis). Dans le passé, avant l'utilisation de ces valves, le pétrole était parfois projeté à la surface par de dangereux "gushers", comme sur l'image ci-dessous, prise aux États-Unis vers 1911.



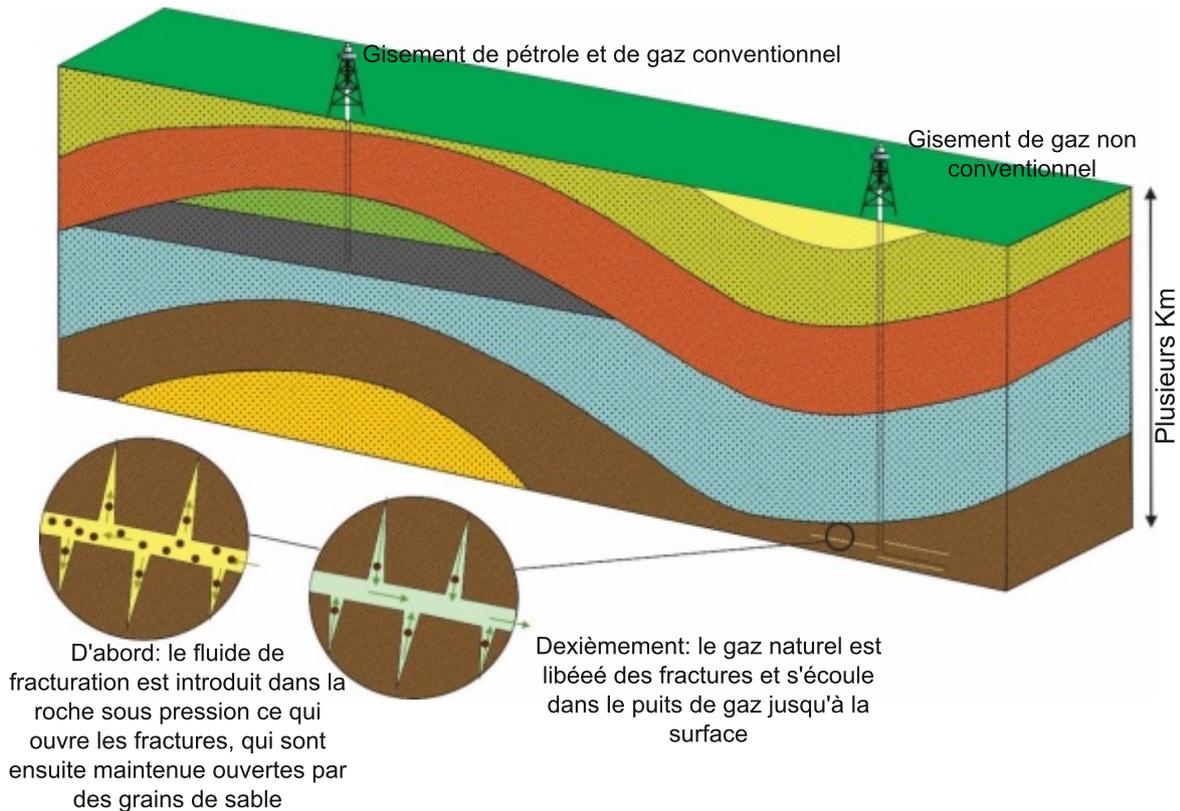
Les roches réservoirs de nombreux gisements de pétrole et de gaz modernes sont fracturées hydrauliquement (fracking) pour augmenter les quantités de pétrole/gaz pouvant être libérées par la roche. Lors de la fracturation, un fluide est pompé dans la roche sous une forte pression et fracture les espaces interstitiels, les élargissant ainsi. Le fluide contient du sable qui s'accroche dans les nouvelles fractures, les maintenant ouvertes. Les pores et les fractures plus larges libèrent alors plus facilement le pétrole et le gaz.

Encadré 5.2. Fracking de schiste et de grès "serré"

La fracturation peut être utilisée pour libérer le gaz naturel des roches de schiste qui ont peu de pores ou qui ont été enterrées si profondément que les pores sont petits. Étant donné que des quantités économiques de pétrole/gaz ne peuvent être extraites de ces roches sans fracturation, on les appelle souvent "gisements non conventionnels", par opposition aux gisements conventionnels illustrés dans le diagramme. Les gisements conventionnels sont fracturés depuis de nombreuses années.

Les puits de fracturation sont forés verticalement depuis la surface, puis horizontalement le long des couches à fracturer. Une série de trous de forage horizontaux est forée à partir de chaque trou de forage vertical. Le fluide de fracturation est ensuite pompé à une pression extrêmement élevée, afin de s'opposer à la masse des roches situées au-dessus. Le fluide de fracturation est un mélange de détergent (comme le liquide vaisselle), d'acide de la force du vinaigre, de gomme (comme la gomme que l'on trouve dans certains bonbons), d'eau et de sable. Le détergent aide le fluide à glisser dans le trou, l'acide favorise la dégradation chimique de la roche et la gomme épaissit le fluide. Les particules de sable favorisent l'ouverture des nouvelles fractures. L'effet est de rendre des roches auparavant presque imperméables suffisamment perméables pour libérer leur gaz.

Encadré 5.2. Fracking de schiste et de grès "serré", suite



Si la fracturation n'est pas correctement contrôlée, le tubage du trou de forage peut fuir, permettant au fluide ou au gaz de fracturation de s'échapper dans les aquifères proches de la surface et ainsi les polluer. Le maintien d'une étanchéité efficace des tubages de forage est l'un des contrôles les plus importants lors des opérations de fracturation et de l'extraction ultérieure du gaz.

5.1.6 La prospection

Les premiers prospecteurs avaient l'habitude de chercher des gisements naturels de minéraux ou des suintements de pétrole exposés à la surface de la Terre, mais ces affleurements et signes de surface ont presque tous été trouvés, de sorte que des méthodes plus techniques sont aujourd'hui nécessaires.

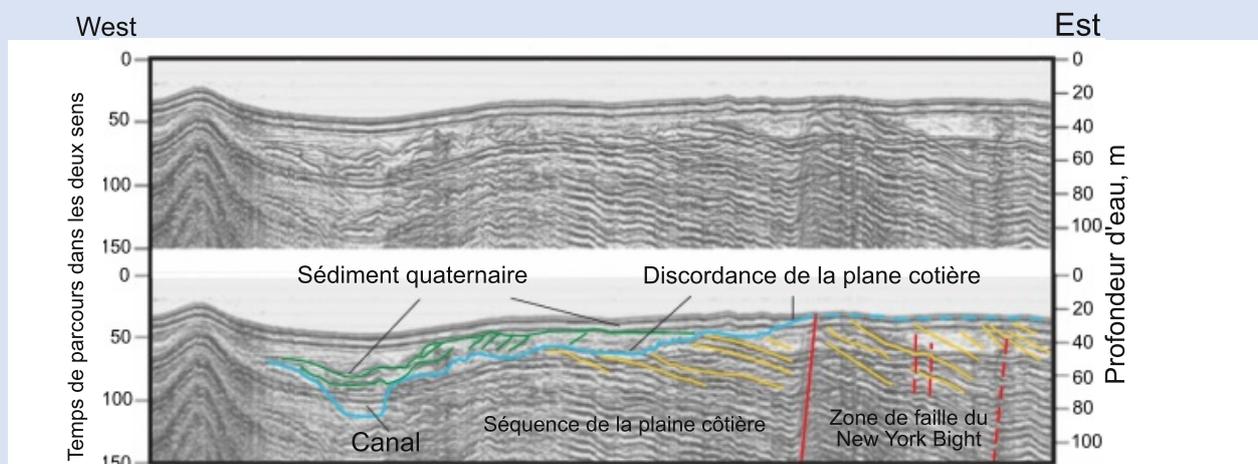
Les prospecteurs d'aujourd'hui savent, grâce à la cartographie géologique de surface sur terre, où les roches sources, les roches réservoirs et les roches de couverture sont susceptibles de se trouver dans le bon ordre, ils recherchent donc principalement des formes de pièges souterrains. Ils peuvent commencer par effectuer des levés gravimétriques et magnétiques par télédétection, car ceux-ci montrent où les roches plus denses ou plus magnétiques se rapprochent de la surface et peuvent indiquer où se trouvent les anticlinaux souterrains ou des formations similaires. Ensuite, ils sont susceptibles de réaliser des études sismiques pour montrer la structure des roches sous le sol. Lorsqu'une structure cible probable a été trouvée, un forage de prospection est effectué à la recherche de pétrole/gaz. Le forage d'un puits est très coûteux, en particulier en mer, et le géologue prospecteur doit donc faire preuve d'un grand soin dans la collecte des informations et dans la prévision des cibles probables.

Encadré 5.3. La prospection sismique

La prospection sismique repose sur la réflexion d'ondes de choc par les différentes couches de la séquence rocheuse. L'équipe d'exploration produit des ondes de choc sur terre par une explosion ou à l'aide d'un "camion vibrant", ou en mer par un canon à eau ou une explosion. Les ondes de choc descendent dans la séquence rocheuse et sont réfléchies par les différentes couches. Les ondes de choc réfléchies sont détectées par une série de microphones, appelés géophones sur terre ou hydrophones en mer.

Encadré 5.3. La prospection sismique, suite

Les résultats sont analysés par ordinateur pour produire une trace sismique, comme illustré ci-dessous. L'échelle verticale de gauche représente le temps de parcours dans les deux sens, c'est-à-dire le temps nécessaire à l'onde de choc pour atteindre le lit réfléchissant et rebondir vers le récepteur : cela indique la profondeur du lit, indiquée à droite. Le diagramme inférieur montre une interprétation de la trace sismique du diagramme supérieur, pour produire une image de la géologie, comme une coupe géologique.



Un profil sismique, pris à travers la baie de New York au large de la ville de New York, aux États-Unis

Si un profil sismique comme celui-ci avait été réalisé lors d'une prospection de pétrole/gaz, les bonnes cibles pour le pétrole/gaz pourraient être l'anticlinal indiqué à l'extrémité ouest du profil, ou les roches situées sous la discordance, si les roches situées au-dessus de la discordance sont imperméables.

Des levés gravimétriques et magnétiques sont également effectués lors de la prospection d'autres ressources naturelles, à la recherche d'anomalies de gravité (haute densité) et d'anomalies de magnétisation, comme indicateurs de cibles possibles de minerais métalliques.

Une méthode de prospection souvent utilisée pour la recherche de minerais métalliques est l'échantillonnage géochimique des cours d'eau et des sols. Le plus souvent, une série d'échantillons de sédiments est recueillie dans le lit d'un cours d'eau, séchée et tamisée pour obtenir des sédiments à grain fin. Ceux-ci sont ensuite envoyés à un laboratoire pour être analysés, généralement par spectrométrie de fluorescence X (XRF) pour plus de 50 éléments. Lorsque la prospection révèle des niveaux élevés d'éléments cibles, les niveaux augmentent généralement en amont jusqu'à ce qu'ils soient proches de leur source ; ceci est alors vérifié par un échantillonnage plus détaillé du cours d'eau. Lorsque la zone de la source a été localisée, l'échantillonnage du sol est effectué selon un modèle de grille jusqu'à ce que les valeurs les plus élevées soient trouvées.

Enfin, des fosses sont creusées jusqu'à ce que la roche mère soit identifiée et évaluée pour sa valeur en tant que futur site minier.

Encadré 5.4. Comment trouver une mine de diamants

- Rendez-vous sur un continent où des diamants ont déjà été trouvés (les diamants ne se forment que dans les zones de croûte continentale ancienne et épaisse).
- Effectuez un échantillonnage des cours d'eau et traitez chaque échantillon pour concentrer les minéraux lourds (denses).

Bien que les diamants soient rarement trouvés dans les cours d'eau, ils proviennent de roches volcaniques inhabituelles appelées kimberlites et celles-ci contiennent d'autres minéraux kimberlitiques lourds comme des grenats de couleur rouge profond.

- Envoyez le concentré de minéraux lourds au laboratoire pour analyse.
- Identifiez les zones des cours d'eau présentant des niveaux élevés de minéraux kimberlitiques et suivez-les jusqu'à leur zone d'origine.
- Effectuez un échantillonnage du sol selon un quadrillage dans la zone d'origine, concentrez les minéraux lourds et envoyez-les au laboratoire pour analyse.
- Trouvez l'anomalie de minéraux kimberlitiques la plus élevée et creusez, en espérant trouver de la kimberlite volcanique.
- Si vous avez beaucoup de chance, la kimberlite que vous trouverez sera peut-être l'une des rares kimberlites à contenir suffisamment de diamants pour être exploitable.

Encadré 5.4. Comment trouver une mine de diamants, suite



Collecte d'un échantillon de minéraux lourds dans un lit de rivière asséché



Concentration de minéraux lourds par jig sur le terrain



Concentré de minéraux lourds sur une kimberlite



Mine de diamant Premier, Cullinan, Afrique du Sud

Remarque : parfois, lorsqu'une kimberlite a été érodée dans le passé géologique, les sédiments des rivières ou des plages peuvent concentrer suffisamment de diamants pour qu'il soit intéressant de les extraire.

5.1.7 Protection et assainissement de l'environnement

Les sites modernes d'extraction de ressources disposent généralement de politiques de protection et d'assainissement de l'environnement. Les politiques de protection de l'environnement protègent la zone locale des effets de l'extraction. Les politiques d'assainissement garantissent que le site reste en bon état après la fin de l'extraction et que la surveillance continue du site se poursuit. Une gamme de méthodes de protection de l'environnement est utilisée, comme le montre le tableau 5.7.

Tableau 5.7. Méthodes de protection de l'environnement pendant l'exploitation des ressources naturelles

Méthode de protection environnemental	Détails	Image	Source
Digues	Des digues (bunds) sont construites autour du sommet des zones d'extraction afin qu'elles ne soient pas facilement visibles de l'extérieur, et pour réduire la poussière et le bruit		Digue construite autour du sommet d'une carrière de basalte près de Hohenfels-Essingen, en Allemagne.

Tableau 5.7. Méthodes de protection de l'environnement lors de l'exploitation des ressources naturelles, suite

Méthode de protection environnemental	Détails	Image	Source
Plantation	Des arbres sont plantés autour des sites d'extraction afin qu'ils ne soient pas facilement visibles de l'extérieur et pour réduire le bruit et la poussière provenant du site		Écran par la plantation d'arbres autour d'une carrière de basalte active, Hühnerberg, Bavière, Allemagne
Bassins de décantation	L'eau pompée des mines et des carrières ainsi que les eaux de ruissellement pendant les orages sont dirigées vers des bassins de décantation. La boue se décante avant que l'eau ne soit utilisée pour les opérations de lavage ou ne se déverse dans les cours d'eau locaux		Cagdiano Mining Corporation aux Philippines
Traitement des eaux contaminées	Les eaux usées sont traitées pour éliminer la pollution avant d'être rejetées dans les cours d'eau		Traitement des eaux usées des mines pour éliminer la pollution par les métaux en Australie
Lavage de véhicule	La boue et la poussière sont lavées des véhicules, afin qu'elles ne soient pas transportées sur les routes voisines.		Un système de lavage des roues de camions en Allemagne
Plantation de végétation sur les décharges	La végétation est plantée sur les décharges afin que les racines fixent le sol et réduisent l'écoulement de l'eau à la surface, réduisant ainsi l'érosion		Terrasses enherbées de terrils en argile de chine, Higher Coldvreath, Cornouailles, Angleterre

Tableau 5.7. Méthodes de protection de l'environnement lors de l'exploitation des ressources naturelles, suite

Méthode de protection environnemental	Détails	Image	Source
Eaux souterraines	Une série de forages est réalisée autour du site d'excavation et les eaux souterraines sont surveillées pour détecter toute pollution		Surveillance des eaux souterraines, Coronado National Memorial, Arizona, États-Unis

Lorsqu'un site d'extraction est fermé, il doit être remis en état, ou nettoyé autant que possible, afin de le rendre apte à de futures utilisations. Parfois, il est possible de rendre le site à son usage initial, mais dans d'autres cas, il est cédé à de nouvelles utilisations, comme un parc de campagne ou un port de plaisance. Les processus de réhabilitation impliquent l'aménagement du site, la restitution de la terre arable qui a été enlevée et la plantation de plantes soigneusement choisies qui survivront dans les nouvelles conditions et aideront éventuellement à nettoyer le sol.

Dans les zones d'exploitation minière et de carrière, certaines des anciennes machines et d'autres objets historiques peuvent être exposés dans des musées du patrimoine. Certaines parois rocheuses peuvent être préservées pour leur valeur scientifique, éducative ou historique, ou en tant que sites pour la faune, notamment pour les oiseaux nicheurs ou les animaux qui aiment l'eau. Même après la réhabilitation, les sites peuvent nécessiter une surveillance régulière de la qualité des eaux souterraines et de l'écologie.

Tableau 5.8. Exemples de remédiation

Exemple de dépollution par extraction	Détails	Image	Source
Paysagisme (Aménagements paysagers)	Les carrières, les fosses, les mines et les déchets miniers sont aménagés pour réduire les pentes et plantés de végétation pour minimiser l'érosion		L'ancienne mine d'uranium de Jackpile-Paguate sur le Laguna Pueblo, à l'ouest d'Albuquerque, aux États-Unis.
Réhabilitation	Les mines à ciel ouvert peuvent être réhabilitées à des fins agricoles		Mine de charbon à ciel ouvert et terrain remis en état dans la mine de charbon de North Antelope Rochelle, Wyoming, États-Unis.

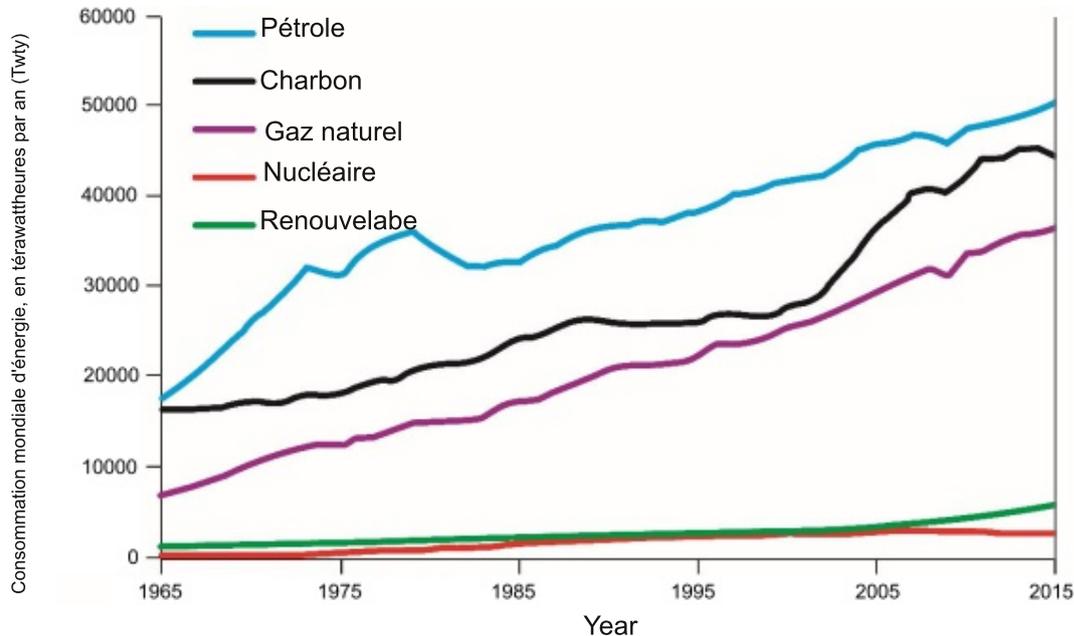
Tableau 5.8. Exemples de remédiation, suite

Exemple de dépollution par extraction	Détails	Image	Source
<p>Préservation</p>	<p>Certaines parties de l'ancien site d'extraction peuvent être préservées pour leur valeur historique</p>		<p>Bâtiment de four préservé sur une ancienne mine de zinc, de plomb et de soufre, Co. Tipperary, Irlande</p>
<p>Nouvelle utilisation</p>	<p>Les dômes du projet Eden, où poussent des plantes du monde entier, sont situés dans une ancienne carrière de kaolin.</p>		<p>Le projet Eden en Cornouailles, Angleterre.</p>
<p>Travail de terrain</p>	<p>Les parois rocheuses des anciennes carrières ont une série d'utilisations scientifiques et éducatives</p>		<p>Travail de terrain des étudiants à Apes Tor, une ancienne carrière de calcaire, Staffordshire, Angleterre</p>

5.2 Alimentation en énergie

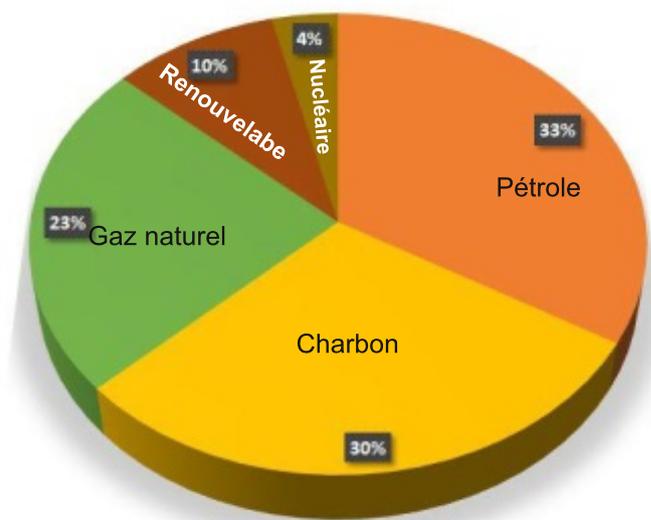
La figure 5.5 montre l'évolution de la consommation mondiale d'énergie à partir de différentes sources depuis les années 1960, avec une augmentation de l'énergie provenant du pétrole, du gaz et des sources renouvelables. Récemment, l'énergie nucléaire a connu un léger déclin et le charbon un déclin plus marqué.

Figure 5.5. Consommation mondiale d'énergie ; données de BP statistical review of world energy (revue statistique de l'énergie mondiale)



La figure 5.6 est un graphique circulaire des chiffres récents, qui montre que plus de 85 % de la consommation mondiale actuelle d'énergie provient de combustibles fossiles, 10 % de sources renouvelables et seulement 4 % d'énergie nucléaire.

Figure 5.6. Consommation mondiale d'énergie ; données tirées de l'étude statistique de BP sur l'énergie mondiale



Malgré les tentatives faites dans le monde entier pour réduire l'utilisation des combustibles fossiles et passer à des sources d'énergie renouvelables, les données récentes montrent encore l'importance et l'utilisation croissante des sources de combustibles fossiles. Dans les conditions actuelles, il faudra manifestement beaucoup de temps pour inverser ces tendances.

5.2.1 Énergie provenant de combustibles fossiles

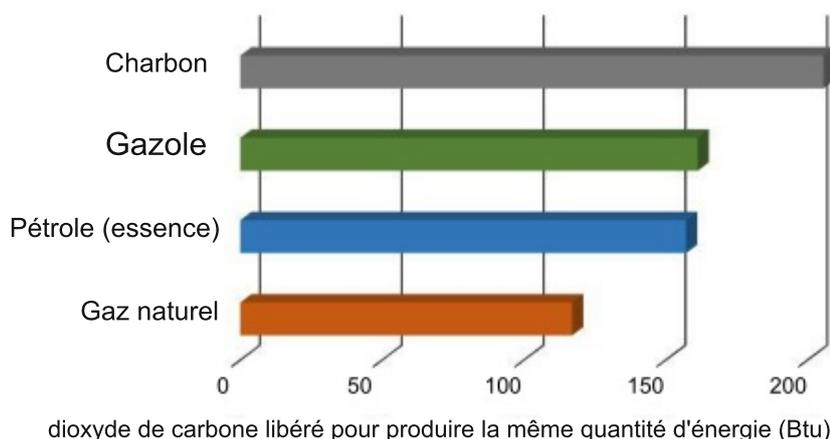
La plupart des centrales électriques produisent de l'électricité en brûlant des combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole ou le gaz naturel. Ces trois combustibles sont également utilisés pour fabriquer des produits chimiques et d'autres produits industriels, notamment des plastiques.

Le pétrole, une fois raffiné, est la principale source d'énergie pour les véhicules routiers et ferroviaires, et le seul carburant utilisé dans les transports commerciaux aériens et maritimes.

Une pression mondiale s'exerce pour réduire l'utilisation des combustibles fossiles et les remplacer par des énergies renouvelables en raison de l'influence de la combustion des combustibles fossiles sur le changement climatique. Les liens entre le dioxyde de carbone, l'effet de serre et le changement climatique ont été expliqués à la section 4.3.3.

Le graphique de la figure 5.7 montre que le combustible qui produit le plus de dioxyde de carbone lors de sa combustion est le charbon. La combustion du charbon libère également plus de polluants que les autres combustibles fossiles. Il s'agit notamment de gaz de dioxyde de soufre et d'oxyde nitrique, ainsi que de particules de fumée et de cendres. Dans le monde entier, des mesures sont prises pour fermer les centrales électriques au charbon et les remplacer par des centrales au gaz naturel, car la combustion de ce dernier ne rejette qu'un peu plus de la moitié de la quantité de dioxyde de carbone produite par le charbon, et des quantités très réduites d'autres polluants.

Figure 5.7. Les quantités de dioxyde de carbone libérées par la combustion de différents combustibles fossiles pour produire la même quantité d'énergie.



Les combustibles fossiles ne sont pas renouvelables. Cela signifie que, bien que les conditions nécessaires à l'accumulation de matières organiques et à leur transformation en combustibles fossiles au fil du temps existent bel et bien aujourd'hui, ce processus est beaucoup plus lent que l'extraction des combustibles fossiles. Par conséquent, il arrivera un moment où la plupart des combustibles fossiles sur Terre auront été extraits, ce qui signifie que toute nouvelle extraction deviendra beaucoup plus difficile et coûteuse.

C'est parce que les combustibles fossiles ne sont pas renouvelables et qu'ils sont également polluants qu'il existe un mouvement mondial en faveur des ressources énergétiques renouvelables.

5.2.2 Les énergies renouvelables

Les sources d'énergie renouvelables se renouvellent au moins aussi vite qu'elles sont utilisées et resteront donc disponibles à l'avenir. Elles ne dégagent pas non plus de polluants pendant leur utilisation, même si elles peuvent avoir d'autres effets sur l'environnement. Pour ces raisons, on assiste à une croissance mondiale du développement et de la croissance des sources d'énergie renouvelables. La figure 5.8 montre que la source d'énergie renouvelable la plus utilisée aujourd'hui est l'énergie hydroélectrique, suivie par l'énergie solaire, l'énergie biologique et l'énergie éolienne (tableau 5.9). Les sources géothermiques et marémotrices ne génèrent que de faibles quantités d'énergie au niveau mondial, tandis que l'énergie houlomotrice en est encore au stade expérimental.

Figure 5.8. Production récente d'énergie à partir de différentes sources renouvelables ; données tirées du rapport sur la situation mondiale de REN21, tableau R1.

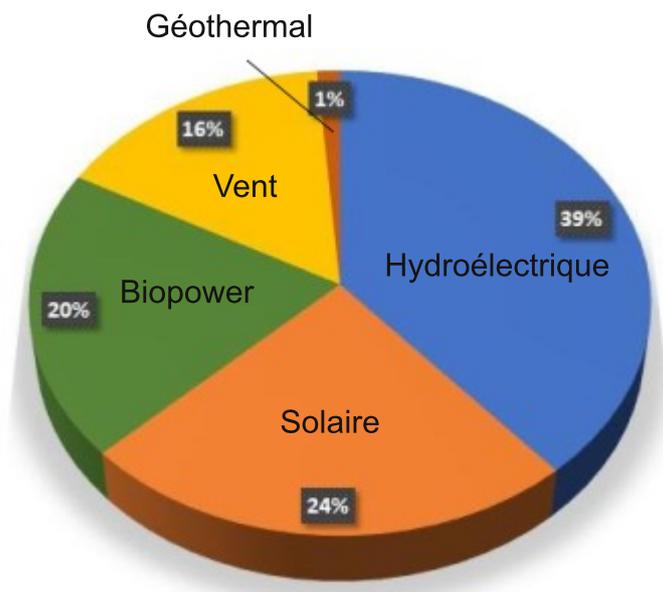


Tableau 5.9. Sources d'énergie renouvelables, de la source produisant le plus d'énergie au niveau mondial en haut du tableau, à la source produisant le moins d'énergie en bas.

Source d'énergie renouvelable	Détails	Image	Source
Hydro-électrique	L'hydroélectricité est produite en construisant des barrages pour créer des réservoirs et en canalisant l'eau dans des turbines pour produire de l'électricité lorsqu'elle s'écoule du réservoir		Nouvelle-Zélande, vers les turbines d'une centrale électrique
Solaire	Les réseaux de panneaux solaires sont orientés de manière à recueillir le maximum d'énergie solaire.		Les centrales solaires PS20 et PS10 en Andalousie, en Espagne.
Biopower (énergie biologique)	La plupart de l'énergie biologique est générée par la combustion de la biomasse (cultures spéciales ou déchets) pour produire de l'électricité, mais certaines cultures sont utilisées pour produire des biocarburants.		Centrale de chauffage urbain à la biomasse près de Steinfeld, Ternitz, Basse-Autriche - approvisionnement en bois de chauffage à l'arrière-plan

Tableau 5.9. Sources d'énergie renouvelables, de la source produisant le plus d'énergie au niveau mondial en haut du tableau, à la source produisant le moins d'énergie en bas, suite

Source d'énergie renouvelable	Détails	Image	Source
Éoliennes	Les parcs éoliens sont constitués de groupes d'éoliennes, soit sur terre, soit en mer		Un parc éolien en mer, Bạc Liêu, Vietnam
Géothermie	L'énergie géothermique est générée dans les régions volcaniques, où elle est généralement appelée énergie hydrothermique ; elle est également extraite de roches chaudes dans d'autres régions		La centrale hydrothermique de Nesjavellir à Thingvellir, Islande
L'énergie marémotrice	L'énergie marémotrice est produite à petite échelle dans plusieurs pays mais, à ce jour, il n'existe aucune centrale marémotrice commerciale à grande échelle		Modèle de l'usine marémotrice de Kislogubskaya sur la péninsule de Kola, dans le nord de la Russie.
L'énergie houlomotrice	L'énergie houlomotrice n'est pas encore utilisée commercialement à grande échelle, mais des générateurs à petite échelle sont testés		L'une des trois machines Pelamis fendant une vague au parc à vagues d'Aguçadoura, au Portugal

Deux des problèmes de certaines sources d'énergie renouvelables sont que leur production est variable et que nous ne disposons actuellement d'aucune méthode pour stocker leur énergie à grande échelle. Ainsi, les jours où l'ensoleillement est faible (énergie solaire), où les vents sont faibles ou trop forts (énergie éolienne), où les courants de marée sont réduits (pendant les marées de morte-eau) ou où les vagues sont petites (énergie houlomotrice), une autre source d'énergie est nécessaire pour fournir une "charge de base" régulière. L'approvisionnement en charge de base à grande échelle a traditionnellement été assuré par des combustibles fossiles et des sources nucléaires qui peuvent être activées et désactivées assez facilement en fonction des besoins.

Bien que les sources d'énergie renouvelables soient renouvelables et ne génèrent aucune pollution pendant leur utilisation, elles ont toutes un impact sur l'environnement, car elles utilisent des matières premières et de l'énergie pendant leur construction. Certaines sont également critiquées pour d'autres raisons : la

production d'énergie hydroélectrique nécessite la construction de grands barrages et l'inondation de vallées par des réservoirs ; les panneaux solaires utilisent des éléments de terre rare coûteux pour leur construction ; les biocarburants peuvent être cultivés sur des terres utiles à d'autres types d'agriculture ; les éoliennes sont coûteuses à construire ; certaines personnes pensent que les vues des éoliennes améliorent l'environnement, et d'autres le contraire

Encadré 5.5. L'énergie géothermique - est-elle renouvelable ?

L'énergie géothermique peut être obtenue à partir de trois situations géologiques différentes :

- Lorsque les roches ignées de grands plutons sont devenues chaudes en raison de la désintégration des minéraux radioactifs qu'elles contiennent : deux trous de forage sont creusés et la roche entre eux est fracturée ; l'eau est pompée dans un trou de forage, se réchauffe en passant par les fractures et est extraite du second trou ; la chaleur est prise dans l'eau chaude et elle est recyclée en étant pompée à nouveau. C'est l'énergie géothermique de la roche sèche chaude.

- Là où se trouvent des aquifères d'eau souterraine profondément enterrés : la chaleur des profondeurs de la Terre a réchauffé l'eau, qui est restée chaude grâce aux épaisses couches isolantes de sédiments situées au-dessus. Cette eau chaude est pompée et recyclée, de la même manière que celle décrite ci-dessus. C'est l'énergie géothermique de la roche humide chaude.

- Dans les zones d'activité volcanique : les eaux chauffées par les chambres magmatiques situées en dessous deviennent chaudes et peuvent s'élever dans des piscines chaudes et des geysers ; ces eaux chaudes peuvent être extraites par des forages et utilisées pour actionner des turbines dans des centrales hydrothermales. C'est l'énergie hydrothermale.

Dans les roches chaudes sèches comme dans les roches chaudes humides, la chaleur s'est accumulée au cours de plusieurs milliers d'années et est extraite beaucoup plus rapidement qu'elle ne peut être remplacée, de sorte que ces types d'énergie géothermique ne sont pas renouvelables. Lorsqu'il existe des centrales hydrothermales, la chaleur est généralement extraite plus rapidement qu'elle ne se renouvelle. Ces centrales doivent finalement être fermées et de nouvelles centrales doivent être ouvertes ailleurs dans le champ hydrothermal ; cette énergie n'est donc généralement pas non plus renouvelable.



Centrale hydrothermique et forage, Brühl, ouest de l'Allemagne

Remarque : l'énergie extraite du sol par des pompes à chaleur géothermiques locales est aussi parfois appelée énergie géothermique ; toutefois, la majeure partie de l'énergie extraite de cette manière provient du réchauffement de la surface terrestre par le soleil et non de sources de chaleur souterraines. Il s'agit d'une ressource renouvelable, même si elle nécessite un peu d'électricité pour faire fonctionner le système.

Sans les interactions du système terrestre, la vie sur Terre en général, et la vie humaine en particulier, ne pourraient exister. Ainsi, bien que de nombreuses interactions ci-dessous aient des effets négatifs, voire dévastateurs, nous ne devons pas oublier que sans la combinaison de l'atmosphère et de l'océan, des roches et des sols, des hautes et des basses terres, et des autres caractéristiques des systèmes terrestres, la vie telle que nous la connaissons serait impossible.

6.1 Les risques naturels

Les processus naturels ne deviennent des **risques** que lorsque la vie humaine et les biens sont en danger ; s'il y a un glissement de terrain dans une région éloignée, il s'agit simplement d'un glissement de terrain, pas d'un danger. La meilleure façon de faire face à un risque naturel est que les autorités chargées de la planification veillent à ce que les gens ne vivent pas dans des zones dangereuses. Lorsque cela n'est pas possible, d'autres moyens sont pris pour réduire ou **atténuer** le risque.

6.1.1 Éruption

Lorsque le magma ascendant atteint la surface de la Terre, il entre en éruption ; certaines éruptions sont relativement sûres et spectaculaires, mais d'autres sont catastrophiquement dangereuses. La gamme des différents types d'activité volcanique dépend principalement de la fluidité (viscosité) du magma. Lorsque le magma atteint la surface et entre en éruption, il n'est plus appelé magma : il s'écoule des volcans sous forme de lave, ou est projeté sous forme de cendres fines, de blocs solides plus gros ou de "bombes" de lave liquide (figure 6.1.).

Figure 6.1. Bombes de lave liquide éjectées la nuit par le volcan Stromboli, près de la Sicile, Italie, 2013



La viscosité du magma dépend de sa composition chimique, de sa température et de la quantité de gaz et de cristaux volcaniques qu'il contient. Les sections 4.1.2.3. (Processus ignés) et 4.1.4. (Tectonique des plaques) montrent que les différentes marges de plaques ont généralement des magmas de compositions différentes.

Les magmas les plus courants sur les marges des plaques constructives sont les magmas riches en fer et en magnésium qui produisent des basaltes. Dans les zones de subduction, ce sont les magmas moins riches en fer (intermédiaires) qui produisent les andésites qui sont le plus souvent en éruption, bien que les magmas riches en silicium y soient aussi parfois en éruption. L'équilibre entre la composition en fer/magnésium et en silicium modifie la fluidité : les magmas basaltiques riches en fer/magnésium sont les plus fluides (faible viscosité) à une extrémité de l'échelle et les magmas riches en silicium sont les moins fluides (très visqueux) à l'autre extrémité. Les magmas basaltiques sont aussi généralement les plus chauds, et plus le magma est chaud, moins il est visqueux. Les magmas basaltiques ont également tendance à contenir peu de cristaux, ce qui augmente leur fluidité. Lorsque les magmas contiennent

beaucoup de gaz, cela les rend également plus coulants, bien que les magmas basaltiques ne contiennent généralement pas beaucoup de gaz. En résumé, les magmas basaltiques riches en fer/magnésium sont fluides et peu visqueux, tandis que les magmas intermédiaires et riches en silicium sont très collants et très visqueux.

Lorsque le magma basaltique coulant fait éruption sous forme de lave, il se déverse du sol le long de longues fissures de surface ou par des événements volcaniques et peut être projeté dans l'air sous forme de fontaines de lave spectaculaires. Les rivières de lave peuvent couler sur le sol ou se déplacer plus lentement sous la forme de blocs qui se déplacent en bulldozer. Ce sont des éruptions spectaculaires qui sont généralement sans danger si l'on ne s'en approche pas trop.

L'éruption de magma intermédiaire et riche en silicium est très différente. Il entre en éruption par des événements, parfois sous forme de lave, mais généralement le magma devient solide dans l'événement volcanique, ce qui donne lieu à des éruptions beaucoup plus explosives, comme le montre le tableau 6.1.

Tableau 6.1. Processus volcaniques et leurs effets

Processus volcanique		Description	Image	Source
Eruption de lave	Généralement faible viscosité	La lave peut jaillir des fractures sous forme de fontaines de lave, avant de s'écouler sous forme de rivières de lave le long des pentes du volcan ; ces laves à écoulement rapide donnent naissance à des volcans aux flancs peu profonds ou, sous l'eau, à des laves en coussins.		Fontaines de lave et coulées de lave, Hawaii, 2004
Explosion latérale	Généralement haute viscosité ; Magma se solidifie dans l'événement conduisant à explosif	Lorsqu'une éruption se produit latéralement au lieu d'être dirigée vers le haut, elle peut produire une explosion latérale qui dévaste des centaines de kilomètres carrés dans la direction de l'explosion.		Grands arbres aplatis par l'explosion du Mont St Helens, 1980 (figures humaines pour l'échelle, en bas à droite)
Eruption de cendre/blocs	Généralement haute viscosité ; Magma se solidifie dans l'événement conduisant à explosif	Des panaches de cendres volcaniques sont éjectés dans l'atmosphère. Des blocs solides sont également expulsés et tombent en pluie, produisant un cône volcanique aux flancs abrupts. Les cendres peuvent être transportées par le vent très loin		Eruption de cendres du Mont St Helens, État de Washington, États-Unis, 1980
Nuée ardente/ Coulée pyroclastique		Les nuages de cendres volcaniques éruptives peuvent s'écouler à grande vitesse le long des flancs des volcans, sous la forme de tempêtes de cendres à haute température appelés nuées ardentes (nuages incandescents) ou coulées pyroclastiques		Nuées ardentes S'écoulant du volcan Mayon aux Philippines, 1984

Tableau 6.1. Processus volcanique et leur effets, suite

Processus volcanique	Description	Image	Source	
Ecoulement de lahar	Généralement haute viscosité ; Magma se solidifie dans l'évent conduisant à explosif	Lorsque les cendres volcaniques sont récupérées par l'eau d'un lac de cratère, la glace/neige fondue sur un pic volcanique ou un orage lié à une éruption, elles s'écoulent vers le bas comme du béton à grande vitesse parfois sur plusieurs kilomètres		Lahar ensevelit une maison près de Galunggung, Indonésie, 1983

L'indice d'explosivité volcanique mesure l'explosivité des éruptions volcaniques, allant de non-explosif à méga-colossal, comme le montre le tableau 6.2.

Tableau 6.2. Eruptions selon l'indice d'explosivité volcanique (IEV), montrant la hauteur du panache (m), le volume de matière éjectée (m³) et la fréquence approximative de ce type d'éruption (fréquence globale).

IEV	Description	Hauteur, volume, fréquence globale du panache	Image	Source
0	Non-explosif	< 100m de haut		Lave incandescente s'écoulant du cône volcanique du Pu'u 'Ō'ō. Kilauea, Hawaii, 1997
		1000s m ³ de volume		
		Continue		
1	Doux	100-1000m de haut		Eruption du Stromboli la nuit ; Bombes volcaniques tirées à plus de plus de 100 m dans les airs, Italie, 1980
		10 000s m ³ de volume		
		Quotidiennement		
2	Explosif	1-5 km de haut		Eruption du Mont Sinabung, Medan, Indonésie, qui a tué les vignes en premier plan, 2014
		Volume de 1 000 000s m ³		
		Hebdomadaire		

Tableau 6.2. Eruptions selon l'indice d'explosivité volcanique (IEV), montrant la hauteur du panache (m), le volume de matière éjectée (m³) et la fréquence approximative de ce type d'éruption (fréquence globale), suite

IEV	Description	Hauteur, volume, fréquence globale du panache		Image	Source
3	Sévère	3-15 km de haut	Mensuel		Nevado del Ruiz ; ce lahar de cendres éruptives a enseveli la ville d'Armero au centre, Colombie, 1985.
		0,01 km ³ de volume			
4	Cataclysmique	10-25 km de haut	2 ans		Panache d'éruption du volcan Calbuco près de Puerto Varas, Chili, 2015
		0,1 km ³ de volume			
5	Paroxystique	> 25 km de haut	10 ans		Vue satellite du panache de cendres de 800 km de long du volcan Puyehue-Cordón en 2011, Chili
		1 km ³ de volume			
6	Colossal	> 25 km de haut	50 à 100 ans		Panache de cendres du Pinatubo lors de l'éruption de 1991 aux Philippines
		10 Km ³ de volume			

Tableau 6.2. Eruptions selon l'indice d'explosivité volcanique (IEV), montrant la hauteur du panache (m), le volume de matière éjectée (m³) et la fréquence approximative de ce type d'éruption (fréquence globale), suite

IEV	Description	Hauteur, volume, fréquence globale du panache	Image	Source
7	Supercolossal	> 25 km de haut		Estimation de la superficie couverte par les retombées de cendres de l'éruption du Tambora en Indonésie, 1815
		Volume de 100 km ³		
		500 - 1000 ans		
8	Mégacolossal	> 25 km de haut		L'énorme volcanique Cratère (caldera) provenant de trois éruptions du Yellowstone, Wyoming, USA - le plus récent date de 630 000 ans
		1 000s km ³ de volume		
		> 50 000 ans		

Il peut être difficile de se représenter ce que de grandes éruptions peuvent signifier pour les personnes vivant à proximité, ou de comprendre comment elles peuvent affecter la Terre entière, mais des études de cas d'éruptions particulières en donnent une idée

Encadré 6.1. Une éruption colossale - Krakatoa, 1883

L'éruption IEV 6 du Krakatoa, en Indonésie, a été la première éruption colossale à être signalée dans le monde entier, grâce aux nouvelles liaisons télégraphiques mondiales de l'époque et aux nombreux reportages dans les journaux, comme le *Times* de Londres.

ERUPTIONS VOLCANIQUES EN JAVA,

BATAVIE 27 août

De terribles détonations provenant de l'île volcanique du Krakatoa ont été entendues la nuit dernière, et étaient audibles jusqu'à Soerakarta, des pluies de cendres tombant jusqu'à Cheribon. Les éclairs du volcan sont bien visibles d'ici. Serang est maintenant dans l'obscurité totale. Des pierres sont tombées à cet endroit. Batavia est aussi presque dans le noir. Toutes les lampes à gaz ont été éteintes pendant la nuit. Il est impossible de communiquer avec Anjer et l'on craint qu'une calamité ne s'y soit produite. Plusieurs ponts entre Anjer et Serang ont été détruits et un village près de l'ancien lieu a été emporté par les eaux, les rivières ayant débordé à cause de la ruée de la mer vers l'intérieur des terres.

Le reportage du *Times* du jour suivant montre comment l'ampleur de la tragédie a commencé à se dévoiler, alors que les nouvelles de différentes sources ont commencé à filtrer.



Impression d'artiste dessinée peu après l'éruption

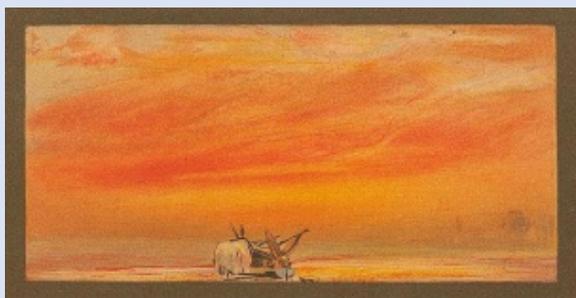
Encadré 6.1. Une éruption colossale - Krakatoa, 1883, suite

L'ampleur de la catastrophe n'est devenue plus claire que plus tard, lorsque de nombreux autres récits de l'éruption ont été recueillis localement, que des géologues ont examiné la zone et que des observations de scientifiques du monde entier ont été recueillies.

L'enquête a montré que :

- Près des trois quarts de la petite île du Krakatoa ont été détruits lors de l'éruption finale.
 - Près de 40 000 personnes ont été tuées par l'éruption et les tsunamis qu'elle a provoqués.
 - Un nuage de cendres a été vu s'élevant à 27 km dans les airs.
 - Des morceaux de pierre ponce de 10 cm de large sont tombés sur le pont de navires situés à plus de 20 km de distance.
 - D'énormes îles de pierre ponce flottent sur l'océan pendant des mois.
 - Environ 20 km³ de matière ont été éjectés.
 - Des personnes ont entendu l'explosion jusqu'à 4 800 km de distance, sur l'île Rodrigues dans l'océan Indien (où le gouverneur pensait qu'il devait y avoir une bataille navale au large) et dans les villes australiennes de Perth et Alice Springs.
 - cette explosion a été le son le plus fort entendu sur Terre au cours des deux derniers siècles ;
 - les tsunamis qui en ont résulté étaient d'une hauteur de plus de 30 m.
 - De petites vagues de tsunami ont été enregistrées dans la Manche, de l'autre côté du globe.
 - l'onde de choc atmosphérique a été enregistrée dans le monde entier, faisant plusieurs fois le tour de la terre
 - Les cendres se sont élevées à 80 km de hauteur dans l'atmosphère et ont affecté les modèles météorologiques mondiaux pendant des années.
- Les cendres ont été transportées dans la haute atmosphère par le courant-jet, ce qui n'avait jamais été observé auparavant.
- L'année suivante, les températures mondiales dans l'hémisphère nord ont baissé d'environ 1,2 °C, car la lumière du soleil était renvoyée dans l'espace par les nuages de haute altitude produits par les gaz volcaniques libérés ;
 - les cendres ont produit des couchers de soleil spectaculaires dans le monde entier pendant plusieurs mois et le Soleil et la Lune sont parfois apparus dans des couleurs étranges.
 - on pense que l'énergie libérée par l'éruption était environ quatre fois plus puissante que la plus grande bombe nucléaire jamais explosée.

Ces observations donnent une bonne idée de ce qu'est une éruption "colossale".



Peintures du ciel dans la "rémanence" causée par les cendres de l'éruption du Krakatoa en 1883, par William Ashcroft.

Encadré 6.2. Une éruption méga-colossale - éruption d'Oruanui, il y a environ 25 360 ans



Impression d'artiste de l'éruption Oruanui vue de l'espace

L'éruption méga-colossale Oruanui du volcan Taupo est l'éruption IEV 8 la plus récente à affecter la Terre. L'éruption s'est produite il y a environ 25 000 ans, bien avant que l'homme ne colonise la Nouvelle-Zélande. Ce n'est pas plus mal, car l'éruption a probablement dévasté toute la Nouvelle-Zélande. Comme nous ne disposons pas de récits de témoins oculaires de l'éruption, nous devons nous baser sur les preuves géologiques pour nous faire une idée de ce qu'était l'éruption.

Cela montre :

- 1170 km³ de matériaux riches en silicium ont été éjectés, près de 60 fois la quantité de matériaux éjectés par le

Krakatoa en 1883

- 430 km³ de cendres ont été éjectés dans le ciel, tombant sur la majeure partie de la Nouvelle-Zélande sous forme d'épais dépôts de cendres. Des dépôts de cendres de 18 cm d'épaisseur ont été enregistrés sur des îles situées à 1000 km de là.

- 320 km³ de cendres ont été éjectés latéralement dans les nuées ardentes, laissant des dépôts jusqu'à 200m d'épaisseur.

- la chambre magmatique s'est effondrée, formant un énorme cratère (caldeira) de plus de 30 km de diamètre, aujourd'hui rempli par le lac Taupo.

- le cours de la rivière Waikato a été déplacé de sorte qu'elle atteint maintenant la mer sur la côte ouest de l'île du Nord, au lieu de la côte nord.

- nord de l'île, au lieu de la côte nord.

C'est ainsi que la Nouvelle-Zélande a été touchée, mais il n'existe aucune trace des impacts sur le reste de la Terre, car l'éruption s'est produite bien avant l'invention de l'écriture. Étant située au centre de l'île du Nord, l'éruption n'a peut-être pas produit de tsunamis, mais l'éruption d'énormes quantités de cendres et de gaz volcaniques dans l'atmosphère a dû avoir des effets climatiques à l'échelle mondiale. Si l'éruption IEV 7 du Tambora en Indonésie en 1815 a pu provoquer une "année sans été" et la famine en Europe, on ne peut qu'imaginer les effets mondiaux de l'éruption IEV 8 de l'Oruanui, qui a rejeté dans l'atmosphère des quantités de cendres et de gaz volcaniques dix fois supérieures.

Les éruptions de volcans à forte explosivité peuvent être si dévastatrices que les scientifiques travaillent depuis de nombreuses années à les prévoir. Un large éventail de méthodes différentes de surveillance des volcans a été testé ; certaines d'entre elles sont décrites dans le tableau 6.3. Le problème de toutes ces méthodes est qu'elles peuvent indiquer qu'une éruption est probable, entraînant l'évacuation des zones environnantes, pour que les signes disparaissent à nouveau, sans qu'il y ait d'éruption.

Après cela, les gens sont moins susceptibles d'obéir à l'ordre d'évacuation suivant. Ainsi, bien que nous sachions que des éruptions de volcans actuellement actifs se produiront, prédire le moment exact et l'ampleur des éruptions reste une tâche très difficile.

Tableau 6.3. Méthodes utilisées pour surveiller les éruptions volcaniques

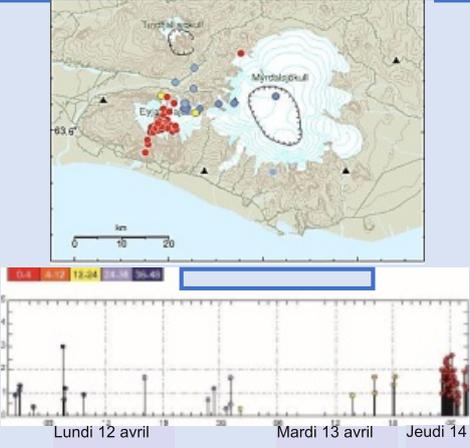
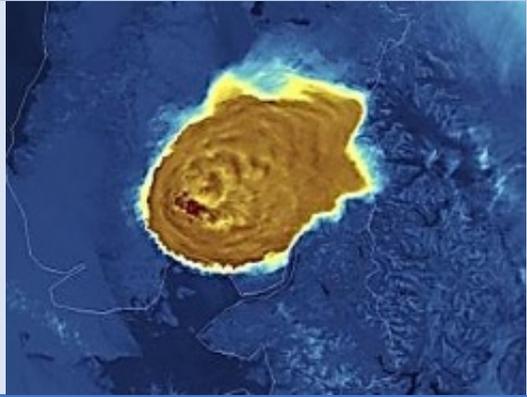
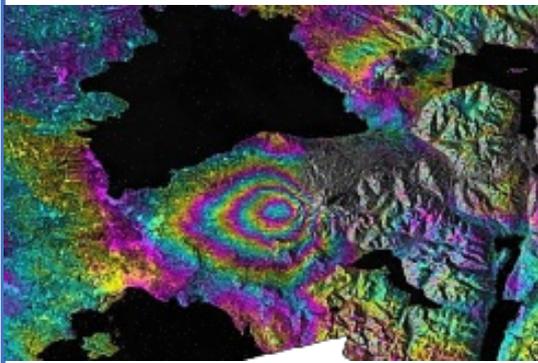
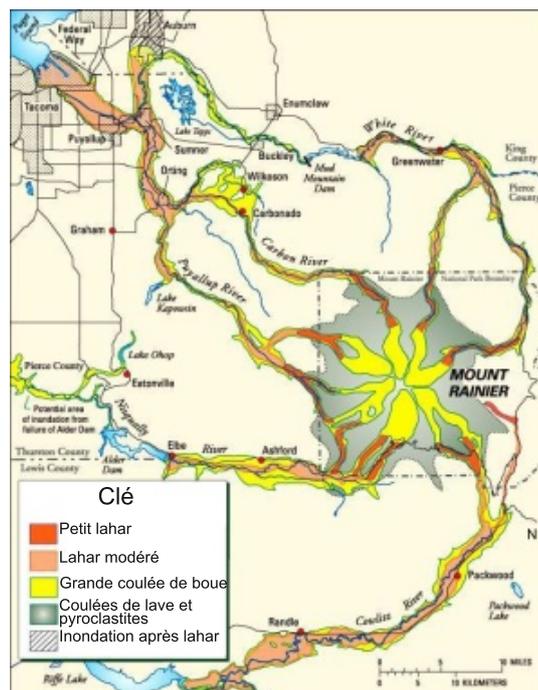
Méthode de surveillance des éruptions	Description	Image	Source
<p>Sismicité</p>	<p>Différents types de secousses telluriques peuvent être produits dans la préparation des éruptions volcaniques, y compris les secousses harmoniques que l'on pense être produites par l'écoulement du magma sous terre.</p>	 <p>Moment et taille des secousses sismiques avant l'éruption de l'Eyjafjallajökull à 01h55 le mercredi 14 avril 2010.</p>	<p>Tremblements de terre liés à l'éruption de l'Eyjafjallajökull en Islande en 2010</p>
<p>Émissions de gaz</p>	<p>L'évacuation des gaz peut augmenter ou diminuer avant les éruptions volcaniques, donnant des indices sur les futures éruptions</p>		<p>Soufre jaune dans un événement de gaz volcanique ; Le gaz surveillé par un capteur, White Island, Nouvelle-Zélande.</p>
<p>Déformation du sol</p>	<p>Le gonflement d'un volcan montre que le magma s'accumule près de la surface. Ce phénomène peut être surveillé en mesurant les changements de position d'une station, à l'aide du système de positionnement global (GPS), et aussi en mesurant les changements de pente, à l'aide d'inclinomètres, et de déformation, à l'aide de jauges de déformation</p>		<p>Station de surveillance GPS, volcan du Piton de la Fournaise, île de la Réunion, océan Indien</p>

Tableau 6.3. Méthode de surveillance des éruptions, suite

Méthode de surveillance des éruptions	Description	Image	Source
Contrôle thermique	Le mouvement du magma, le dégagement de gaz et l'activité hydrothermale peuvent réchauffer un volcan avant une éruption, ce qui peut être détecté par des satellites et au sol. Les mesures au sol permettent de mesurer directement la température de surface, ou de surveiller les changements dans les sources chaudes ou les puits d'eau		Image thermique ; flux de chaleur élevé (rouge, marron et jaune) dans le cratère de Calbuco au Chili, 2015, sur un fond bleu et froid de la terre
Téledétection	Les satellites peuvent surveiller la température, comme ci-dessus, mais aussi la déformation du sol, ainsi que l'émission de gaz volcaniques et l'éruption de nuages de cendres produits par les volcans.		Déformation du sol montrée sur une image satellite en fausses couleurs, liée à l'éruption du Calbuco au Chili en 2015.

Le moyen le plus efficace d'atténuer ou de réduire les risques liés aux éruptions volcaniques est que l'aménagement du territoire empêche les gens de construire dans les zones dangereuses. Les zones dangereuses peuvent être étudiées en effectuant des relevés géologiques pour détecter les signes d'éruptions dangereuses dans le passé, puis en produisant des cartes de risques (par exemple, figure 6.2).

Figure 6.2. Exemple de carte des risques volcaniques, Mont Rainier, État de Washington, États-Unis, prédisant ce qui pourrait se produire lors d'une éruption volcanique majeure.



Lorsqu'il n'est pas possible de construire en dehors des zones dangereuses, des mesures sont prises pour se préparer à des éruptions dommageables. Ces mesures comprennent la surveillance des volcans et la préparation des réactions d'urgence en cas d'alerte. La population est formée à ce qu'elle doit faire en cas d'urgence et des systèmes sont mis en place pour l'avertir. Les services d'urgence sont formés à l'évacuation des personnes et aux méthodes de recherche et de sauvetage. Des préparatifs sont effectués pour aider les gens à faire face à la catastrophe que représente la perte de leurs maisons et de leurs biens, et à reconstruire les établissements, au même endroit ou ailleurs.

Là où de tels systèmes ont été mis en place, ils ont été couronnés de succès. L'atténuation de l'éruption colossale du Pinatubo aux Philippines en 1991 (IEV 6) a permis de sauver 5 000 vies et d'épargner 250 millions de dollars US de biens. L'atténuation de l'éruption catastrophique de IEV 3 de 1995 sur l'île de Montserrat dans les Antilles a permis de sauver 11 000 vies.

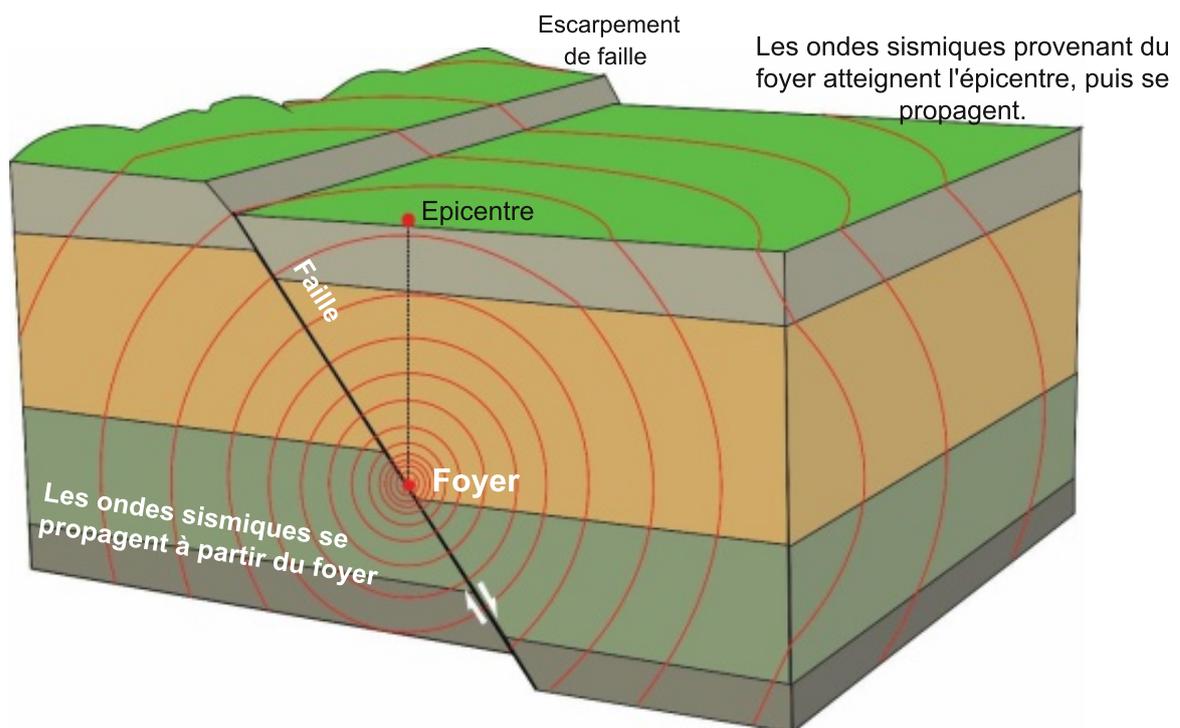
6.1.2 Tremblement de terre

Les grands tremblements de terre sont causés par des failles, mais cela n'est apparu clairement qu'avec les études de H.F. Reid en 1911. Auparavant, les gens avaient peu d'idées sur la cause des tremblements de terre, il n'est donc pas surprenant que de nombreux mythes et histoires se soient développés dans le monde entier pour expliquer ces événements catastrophiques.

Les pressions dans la Terre s'accumulent jusqu'à ce que les roches du sous-sol se brisent ou se fracturent le long d'une faille, lorsque les deux côtés se déplacent l'un par rapport à l'autre. Le point de fracture, où le mouvement est le plus important, est le **foyer** (ou hypocentre). La rupture soudaine produit des ondes de choc qui se propagent dans toutes les directions sous forme d'ondes sismiques. Les ondes de choc qui traversent la Terre sont appelées **ondes sismiques**.

L'endroit où les ondes de choc atteignent la surface de la Terre, directement au-dessus du foyer, est celui où le séisme est le plus fort et où les dégâts sont les plus importants ; c'est l'**épïcéntré** (figure 6.3). Les ondes de choc rayonnent à la surface de la Terre à partir de l'épïcéntré, comme des rides sur un étang, et leur puissance diminue au fur et à mesure. Normalement, la plupart des dommages causés par les tremblements de terre se produisent à l'épïcéntré, bien que d'autres facteurs, comme la résistance du sol et des fondations, puissent causer plus de dommages à certains endroits qu'à d'autres.

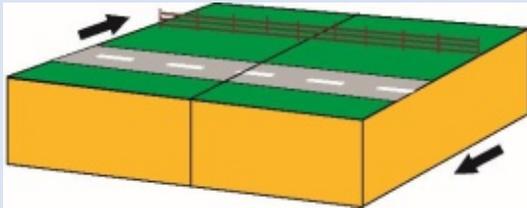
Figure 6.3. Un tremblement de terre produisant des ondes sismiques



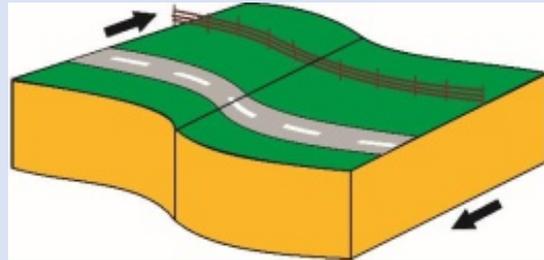
Encadré 6.3. La théorie du rebond élastique

Une théorie scientifique pour expliquer les tremblements de terre a été développée en 1911 par H.F. Reid, en étudiant certaines parties de la faille de San Andreas en Californie, aux Etats-Unis. Il a tracé le mouvement de points de part et d'autre de la faille et a réalisé que la terre se déplaçait dans des directions différentes de part et d'autre d'une faille avant le tremblement de terre. Au fur et à mesure que la pression augmentait, la terre de chaque côté se déformait. Finalement, il ne pouvait plus se plier davantage et la faille s'est rompue, envoyant des ondes de choc dans un tremblement de terre. Il a appelé cette théorie la "théorie du rebond élastique", car le sol rebondit de manière élastique lorsque la faille se déplace.

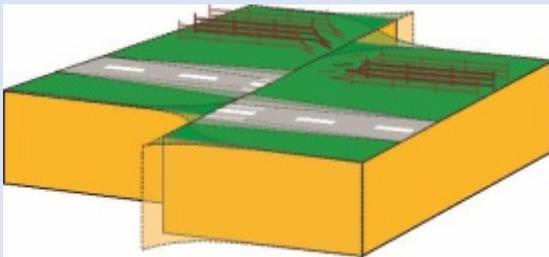
1. La clôture et la route sont construites sur une faille verrouillée



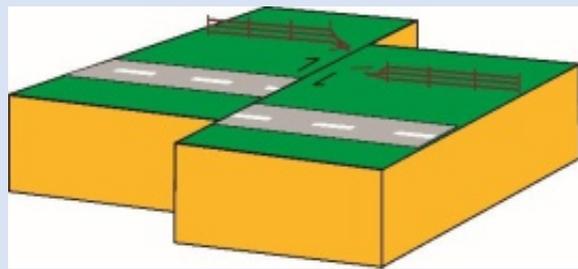
2. La pression s'accumule, la roche, la clôture et la route se courbent.



3. La faille se rompt soudainement, la roche rebondit de manière élastique (bo-ing !) provoquant un tremblement de terre.



4. Après le tremblement de terre, la faille s'est déplacée, la clôture et la route sont à nouveau droites, mais elles sont brisées par la faille.



Mouvement du sol dans la "théorie du rebond élastique" de H.F. Reid

Les petits tremblements de terre, généralement appelés secousses telluriques, sont si petits qu'ils ne peuvent être détectés que par des appareils de détection sismique appelés sismomètres. Les sismomètres sont si sensibles qu'ils peuvent détecter les vibrations des camions ou des trains lourds, les explosions des carrières et même les cris de la foule lorsqu'un but est marqué dans un stade de football. Des réseaux de sismomètres ont été installés dans le monde entier et indiquent non seulement la taille du tremblement de terre, mais aussi l'emplacement de son épicerie et la profondeur de son foyer. Ce travail a été utilisé pour cartographier les emplacements et les profondeurs des séismes dans le tableau 4.22, utilisé comme preuve de la théorie de la tectonique des plaques.

Encadré 6.4. Sismomètres

Les sismomètres ont une masse suspendue à l'intérieur, de sorte que lorsque la Terre déplace le sismomètre, la masse à l'intérieur se déplace plus lentement. La différence entre le mouvement du sismomètre et celui de la masse à l'intérieur est amplifiée et enregistrée par un stylo sur un tambour qui tourne dans le temps, ou sous forme d'enregistrement électronique. Les sismomètres extérieurs sont généralement placés dans des trous dans le sol avec l'équipement d'enregistrement à proximité, y compris l'équipement pour envoyer les données à un laboratoire d'enregistrement. Les sismomètres installés à l'intérieur doivent être montés sur des sols en béton ; les étages supérieurs des bâtiments vibrent trop. Les téléphones portables modernes possèdent un capteur de vibrations similaire, qui peut être utilisé comme sismomètre en téléchargeant l'application adéquate.

Encadré 6.4. Sismomètres, suite



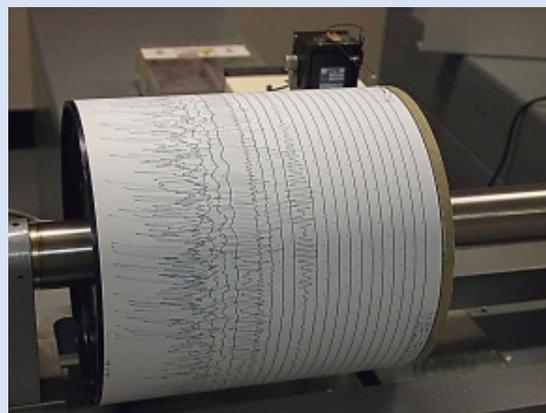
Équipement d'enregistrement pour l'un des sismomètres installés dans un trou à proximité, Golfe de Corinthe, Grèce



Équipement d'enregistrement et alimentation électrique de secours pour un sismomètre du golfe de Corinthe.



Deux sismomètres, le plus ancien à gauche, le plus moderne à droite, Laboratoire sismologique de Patras, Grèce



Enregistrement du tambour d'un sismomètre

Les sismomètres peuvent mesurer la puissance ou la magnitude d'un tremblement de terre à l'épicentre. Cette mesure était autrefois enregistrée sur l'échelle de Richter, mais on utilise aujourd'hui l'échelle de magnitude des moments. La puissance d'un séisme à chaque niveau est dix fois supérieure à la magnitude du séisme du niveau précédent (tableau 6.4).

Tableau 6.4. L'échelle de magnitude du moment

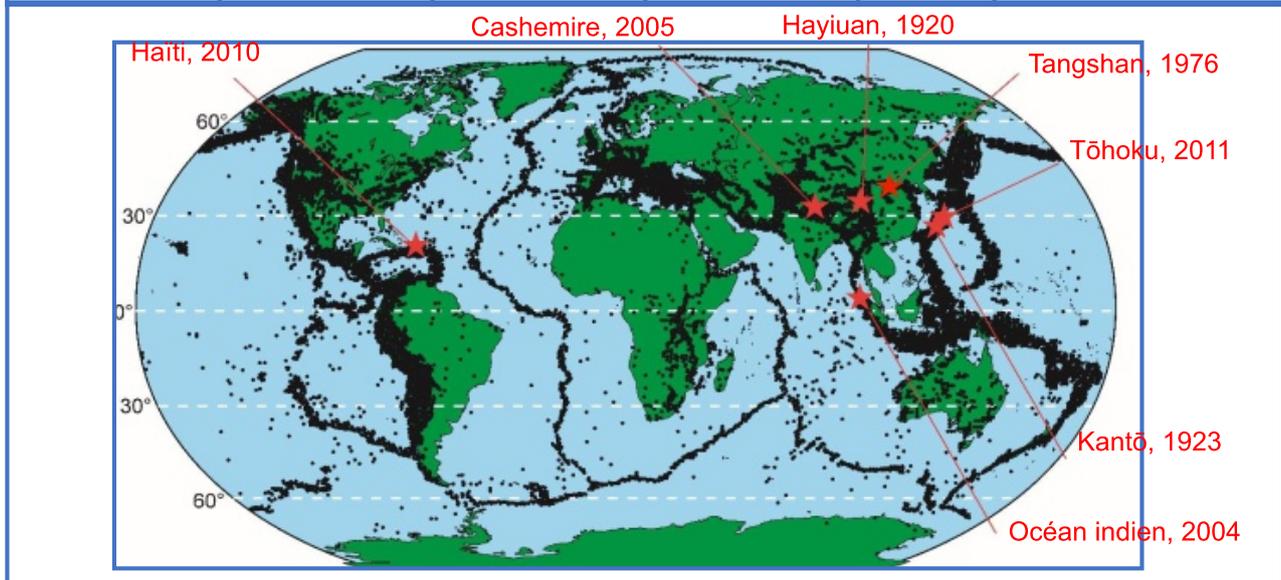
Moment de magnitude	Description	Dommage	Nombre approximatif par an
Moins de 3	Non ressenti par la population	Aucun	Grand nombre
3 à 5	Mineur	Peu nombreux	150 000
5 à 7	Modérée à forte	De légère à dommageable	150
7 à 8	Majeur	Grave	15
Plus de 8	Un "grand" séisme	Catastrophique	1

Le plus grand tremblement de terre jamais enregistré à ce jour est le séisme de magnitude 9,5 survenu au Chili en 1960. Un séisme de magnitude 10 n'a jamais été enregistré.

Le tableau 6.5 présente les détails de quelques séismes majeurs, enregistrés dans l'ordre du nombre approximatif de décès.

Tableau 6.5. Quelques-uns des séismes les plus dangereux, en fonction du nombre de morts

Tremblement de Terre	Date	Lieu	Décès	Magnitude	Commentaire
Haiyuan	16 décembre, 1920	Chine	Plus de 270 000	7,8	Secousses, fractures du sol et glissements de terrain
Tangshan	28 juillet 1976	Hebei, Chine	Plus de 240 000	7,8	Secousses amplifiées par un sol mou
Indien	26 décembre, 2004	Au large de Sumatra	Plus de 230 000	9,2	La plupart des décès ont été causés par un tsunami
Haïti	12 janvier, 2010	Haïti, Mer des Caraïbes	100 000 - 316 000	7,0	Une faible profondeur de foyer a provoqué de fortes secousses
Kantō	1 septembre, 1923	Kantō, Japon	Plus de 100 000	7,9	Tempêtes de feu provoquées par le tremblement de terre ont causé de nombreux décès
Cachemire	8 octobre, 2005	Muzaffarabad, Pakistan	Plus de 85 000	7,6	Secousses importantes
Tōhoku	11 mars, 2011	Au large de Sendai	Plus de 15.000	9,0	La plupart des décès ont été causés par le tsunami ; centrale nucléaire endommagée



Le tableau 6.5 montre certains des différents facteurs qui peuvent rendre les tremblements de terre si dangereux. Dans la plupart des tremblements de terre, la principale cause de décès est la secousse de la surface du sol qui provoque l'effondrement des bâtiments. Le lieutenant de police H.N. Powell a décrit ce phénomène lors du tremblement de terre de 1906 à San Francisco : "Valencia Street ... a commencé à danser, à se déplacer et à rouler en vagues comme une mer agitée. ... Il était impossible pour un homme de rester debout. ... Les maisons se fissuraient, se pliaient et se brisaient tout comme la rue elle-même." Les secousses et les destructions peuvent être bien pires lorsque le sol est mou, comme lorsque les bâtiments ont été construits sur d'anciens dépôts lacustres ou sur des terrains récupérés.

Il est bon de se rappeler le vieux dicton : "Ce ne sont pas les tremblements de terre qui tuent les gens, mais les bâtiments".

Les failles profondes peuvent parfois atteindre la surface sous forme de fractures, endommageant de grandes structures comme les ponts, les barrages et les centrales nucléaires. Les tremblements de terre déclenchent des glissements de terrain et des avalanches dans les zones à forte pente. Les fractures des conduites d'électricité et de gaz provoquent des incendies, qui ne peuvent être maîtrisés si les conduites d'eau ont également été rompues. Certains tremblements de terre provoquent des tsunamis, qui peuvent être très dommageables dans les zones côtières. Tous ces facteurs augmentent le risque de tremblement de terre.

Le tableau 6.5 montre que le nombre de décès peut ne pas être étroitement lié à la magnitude d'un tremblement de terre. Lorsque les tremblements de terre frappent des villes modernes qui s'y sont préparées, le nombre de morts est généralement bien inférieur à celui des tremblements de terre dans les régions moins développées. Dans les régions moins développées, les bâtiments peuvent avoir été mal construits et le rétablissement peut être lent en raison de l'effondrement des communications et de la mauvaise préparation. Par exemple, le bilan du séisme de magnitude 7,0 qui a frappé Haïti en 2010, présenté au tableau 6.5, était de plus de 100 000 morts car la plupart des bâtiments étaient en béton mal armé. Lorsqu'un séisme de magnitude 8,8, bien plus important, a frappé le Chili la même année, le bilan n'était que de 520 morts, car les codes de construction parasismiques avaient été fortement appliqués.

Encadré 6.5. Le tremblement de terre de Kobe, Japon, 1995 - magnitude 6,9

Elève du lycée d'Akatsukayama

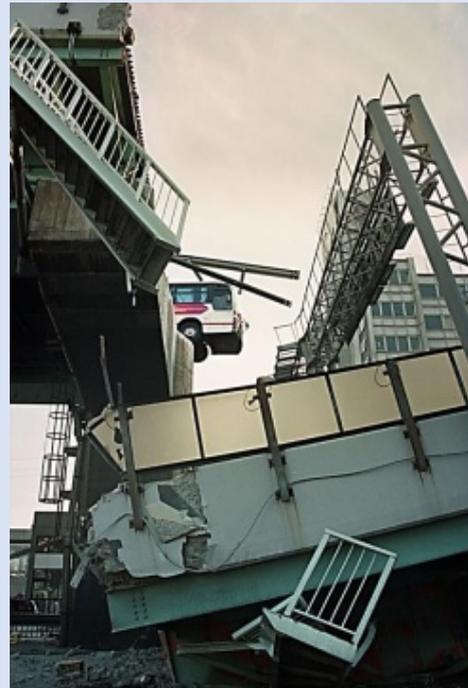
Yasuyo Morita (17 ans),

À ce moment-là, je dormais. J'ai d'abord cru que ma mère me réveillait, mais j'ai compris à son cri que c'était un tremblement de terre ! Je ne savais pas quoi faire dans le noir.

Les escaliers sont détruits, alors je suis descendue par une échelle, pieds nus et en pyjama. Je ne pouvais pas arrêter mes larmes à cause de l'obscurité et du froid. J'étais en panique. Il y a beaucoup de maisons en bois dans mon quartier. Maintenant, elles sont détruites sans pitié. Bientôt, il a fait plus clair et j'ai pu voir ce qui m'entourait.

Certains sont devenus fous. Je suis allé à l'hôpital avec ma grand-mère qui a été sauvée d'un tas de décombres. Son doigt était en train de s'arracher. Nous sommes arrivés à l'hôpital. C'était l'enfer sur terre. Un homme saignait de la tête, un enfant - violacé peut-être à cause de la suffocation. C'était rempli de gens. Ma grand-mère a été désinfectée, c'est tout. Sa blessure n'était pas grave par rapport aux autres. La maison de ma grand-mère et celle de mon grand-père, les deux ont brûlé. Nous n'avons rien pu sortir. La ville que j'aimais a changé en un instant. J'étais triste. Maintenant, je vis dans un des refuges et j'ai peur la nuit. Je veux que Kobe soit bientôt reconstruite.

De : <http://www.sln.org.uk/geography/7-11kobe.htm>



Le tremblement de terre a frappé la ville de Kobe au Japon à 5 h 46 du matin le 17 janvier 1995, alors que la plupart des gens étaient encore endormis. Le tremblement de terre mesurait 6,9 sur l'échelle de magnitude de Moment ; son foyer se trouvait sur une ligne de faille active à une profondeur de 17 km. Dans certaines zones, il y a eu jusqu'à trois minutes de violentes secousses. Le mouvement de la faille a été déclenché par la subduction de la plaque de la mer des Philippines sous la plaque eurasiennne, qui porte le Japon.

L'épicentre se trouvait à 20 km de la ville de Kobe, qui compte 1,5 million d'habitants. Environ 4 600 habitants de Kobe ont perdu la vie, principalement dans l'effondrement de bâtiments. De nombreux incendies ont fait rage dans la ville, causés par des ruptures de lignes de gaz et d'électricité. Les sols plus meubles de la zone portuaire se sont liquéfiés, si bien que des bâtiments se sont effondrés et que des grues sont tombées dans la mer. De nombreuses voies de communication ont été détruites et une autoroute surélevée traversant la ville s'est effondrée. Les câbles électriques, les canalisations de gaz, d'eau et d'égouts étaient tous rompus, ce qui ajoutait aux problèmes. Les services de secours n'ont pas pu atteindre facilement la ville et, une fois sur place, ont dû faire face à des routes bloquées et à des communications interrompues. La voie du train à grande vitesse (bullet train) et deux autres voies ferrées ont été brisées, coupant en deux les communications au Japon.

La plupart des bâtiments qui se sont effondrés avaient été construits selon les codes de construction de 1960 ; les bâtiments construits selon des codes de construction plus récents ont pour la plupart survécu. Après le tremblement de terre, de nombreux volontaires se sont rendus dans la région pour offrir leur aide, les plans de prévention des catastrophes du pays ont été améliorés et ont été beaucoup plus efficaces lors d'un tremblement de terre ultérieur, de nombreux abris antisismiques ont été construits, et l'économie de la région est revenue presque à la normale en un an.

Encadré 6.6. Le tremblement de terre du Cachemire, Pakistan, 2005 - magnitude 7,6

Shazia Ahmed - une mère

"J'ai faim !" Ce sont les premiers mots que ma fille m'a dits lorsque je l'ai sortie des décombres qui étaient autrefois notre maison. Je n'avais jamais ressenti autant de soulagement de toute ma vie. Bien qu'Umbreen soit poussiéreuse et meurtrie, elle était vivante, et à ce moment-là, il ne pouvait y avoir de plus grand miracle.

Il avait fallu trois jours de terreur agonisante avant que mon mari et les voisins ne parviennent à sauver notre bébé. Trois jours de torture que seule une mère pouvait comprendre. Je l'ai attrapée et j'ai vérifié frénétiquement qu'il ne manquait aucun membre, doigt ou orteil. Je l'ai emmenée à l'hôpital de campagne en bas de la montagne et, à part quelques coupures et contusions, les médecins lui ont donné un certificat de bonne santé. C'est un miracle qu'elle soit en vie et en bonne santé. ...

Notre "village" ne compte plus que 200 tentes environ, au pied de la montagne. La maison de chacun a été détruite. Heureusement, le personnel de Sungi (un partenaire local d'Oxfam) est venu nous aider. Ils ont non seulement fourni des tentes, des couvertures et de l'eau potable, mais aussi une épaule sur laquelle s'appuyer au moment où nous en avons le plus besoin.

Parfois, vous avez simplement besoin de quelqu'un pour vous écouter et partager votre chagrin".

De : <https://www.oxfam.org.nz/what-wedo/emergencies/previous-emergencies/kashmirearthquake-2005/stories-from-balakot>



Shazia et son bébé, qui a survécu pendant trois jours dans les décombres à Balakot avant d'être secouru.



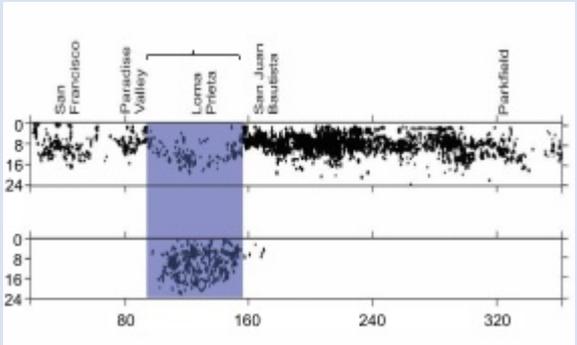
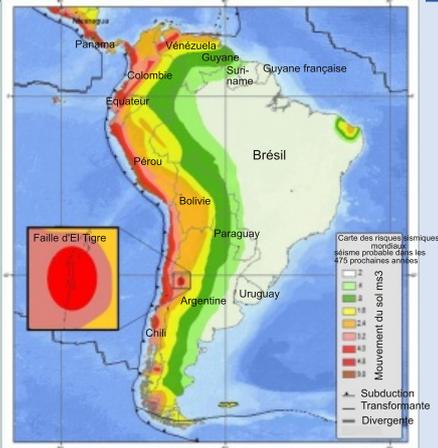
La ville de Balakot dévastée

Le tremblement de terre du Cachemire a frappé le nord du Pakistan à 8 h 50 le matin du 8 octobre 2005. Il s'est produit dans la zone de collision des plaques tectoniques eurasienne et indienne qui ont formé la chaîne de montagnes de l'Himalaya. Le tremblement de terre a été l'une des pires catastrophes naturelles jamais survenues en Asie du Sud. Le nombre de morts est estimé à plus de 85 000, la ville de Muzaffarabad étant la plus durement touchée. De nombreuses autres personnes ont été blessées et 3,5 millions de personnes se sont retrouvées sans abri. De nombreuses écoles se sont effondrées et les hôpitaux et les services de secours ont échoué. Des villes et des villages ont été complètement détruits dans des zones montagneuses reculées. Les routes bloquées par des glissements de terrain ont rendu la tâche des services de secours encore plus difficile. De nombreuses répliques sismiques violentes se sont produites. Des mesures satellitaires ultérieures ont montré que la terre au-dessus de l'épicentre s'était élevée de plusieurs mètres.

Immédiatement après, les secours nationaux et internationaux sont intervenus en masse, mais la reconstruction des installations dans la région au cours des mois et des années qui ont suivi a été lente.

Dans les pays susceptibles d'être frappés par d'importants tremblements de terre, la population doit être protégée. Les mesures de protection comprennent des tentatives de prévision (tableau 6.6) et de prédiction des tremblements de terre dommageables, la construction de bâtiments capables de résister aux tremblements de terre et la mise en place de plans pour faire face aux effets des tremblements de terre.

Tableau 6.6. Méthodes de prévision des tremblements de terre

Méthode de prévision des tremblements de terre	Description	Image	Source
<p>Lacune sismique dans l'espace</p>	<p>Le long des failles majeures, il y a souvent des zones avec de nombreux tremblements de terre et d'autres avec peu. Là où il y a eu peu de séismes, la tension peut s'accumuler, c'est donc là que le prochain tremblement de terre est attendu.</p>		<p>La faille de Loma Prieta sur la faille de San Andreas, Californie, États-Unis. Le diagramme supérieur montre qu'il y a eu peu de tremblements de terre dans la brèche jusqu'au "big one" et ses répliques en 1989 - diagramme inférieur</p>
<p>Lacune sismique dans le temps</p>	<p>Certains séismes ont un schéma temporel assez réguliers, ce qui permet de prévoir le moment du prochain tremblement de terre.</p>		<p>Les séismes de Tōkai au Japon ont frappé régulièrement, tous les 100-150 ans, en 1498, 1605, 1707 et 1854. Le prochain tremblement de terre est prévu pour bientôt</p>
<p>Cartographie des risques sismiques</p>	<p>Elle utilise toutes les données disponibles pour montrer les zones où le risque sismique est le plus élevé.</p>		<p>Carte des risques sismiques en Amérique du Sud, préparée par l'US Geological Survey.</p>

Les méthodes de prévision des tremblements de terre peuvent indiquer quand et où des tremblements de terre majeurs sont probables. Mais les méthodes de prévision des tremblements de terre tentent de déterminer avec plus de précision le lieu et le moment probables. Plusieurs de ces méthodes font l'objet d'études scientifiques, mais aucune ne s'est avérée fiable jusqu'à présent. Ces méthodes comprennent :

- la surveillance du soulèvement et de l'inclinaison du sol à proximité des failles
- la mesure de petits tremblements de terre à l'aide de sismomètres, au cas où il s'agirait de "pré-chocs" avant un gros tremblement de terre la surveillance des niveaux dans les puits d'eau, au cas où une

augmentation de la pression ferait monter les eaux souterraines ou une augmentation de la tension provoquerait davantage de fractures, lorsque les niveaux d'eau baissent

- vérifier l'émission de radon par le sol - à l'approche d'un tremblement de terre, de petites fractures peuvent libérer plus de radon que d'habitude, ce qui peut être détecté dans les eaux souterraines.
- la capacité des roches à transmettre l'électricité (leur résistivité électrique) peut changer avant un tremblement de terre. Plus une roche contient d'eau, mieux elle peut transmettre l'électricité, donc si davantage de fractures se forment avant un tremblement de terre, elles se remplissent d'eau et peuvent transmettre l'électricité plus efficacement (ce qui diminue leur résistivité aux courants électriques).

Lorsque les bâtiments sont construits pour résister aux tremblements de terre et que les codes de construction parasismiques sont appliqués, les dommages peuvent être considérablement réduits, tout comme le nombre de morts. Le tableau 6.7 présente différentes méthodes utilisées pour aider les bâtiments à résister aux dommages causés par les séismes.

Tableau 6.7. Méthodes de construction pour résister aux dommages causés par les séismes

Méthode de résistance aux tremblements de terre	Description	Image	Source
Résistance pendant l'agitation	Les murs de cisaillement sont faits de panneaux qui peuvent trembler sans se briser		Les murs de cisaillement construits pour donner une résistance supplémentaire à un bâtiment, Oregon, USA
	Les boulons de fondation fixent les murs de manière flexible aux fondations		Boulons et sangles de fondation, Napa, Californie, USA
Isolement pendant l'agitation	Un large éventail de méthodes peut être utilisé pour séparer les bâtiments du sol qui tremble, y compris des amortisseurs en caoutchouc, des ressorts, des roues et des roulements à billes		Méthodes d'isolation des bases testées sur une table vibrante. Le bâtiment normal non isolé, à gauche, s'effondre. Université de Californie, San Diego, États-Unis

Tableau 6.7. Méthodes de construction pour résister aux dommages causés par les séismes, suite

Méthode de résistance aux tremblements de terre	Description	Image	Source
Construction en béton armé	Les bâtiments en béton armé sont construits avec des réseaux de barres d'armature - des barres d'acier à l'intérieur du béton qui peuvent arrêter les secousses provoquant la rupture du béton fragile		Réseau de barres d'acier pour une fondation de pont en béton
Résistant à l'eau, au gaz et au réseau électrique	Les conduites de gaz et d'électricité peuvent être équipées de dispositifs qui les coupent automatiquement - pour éviter les incendies ; les conduites d'eau dotées de joints flexibles résistent aux dommages, de sorte que l'approvisionnement en eau n'est pas coupé lors d'incendies provoqués par un tremblement de terre		Vanne de coupure automatique installée sur une conduite de gaz, Seattle, États-Unis.

Dans les zones touchées par les tremblements de terre, des plans doivent être mis en place par les autorités pour protéger la population. Ces plans comportent souvent quatre phases : l'atténuation (réduction des effets probables, par exemple par les méthodes du tableau 6.7), la préparation (y compris la planification administrative, la préparation et la formation), la réponse (comment les services d'urgence doivent réagir pendant et peu après le tremblement de terre), et la récupération (commencer à préserver et à reconstruire la communauté).

Une partie de la préparation aux tremblements de terre consiste à former les élèves des écoles et le grand public à ce qu'il faut faire pendant et après un tremblement de terre. Le plus important est que chaque famille, école, usine, bureau, etc. développe son propre plan.

Encadré 6.7. Un plan antisismique

L'Earthquake Country Alliance en Californie, aux États-Unis, présente les "sept étapes de la sécurité en cas de tremblement de terre".

Préparez-vous

Étape 1 : sécurisez votre espace - assurez-vous que les meubles, etc. ne risquent pas de tomber dangereusement.

Étape 2 : Prévoyez d'être en sécurité - établissez votre propre plan d'urgence et assurez-vous que tout le monde en connaît le contenu.

Étape 3 : Organisez les fournitures de secours - à un endroit où elles peuvent être trouvées facilement.

Étape 4 : Limitez les difficultés financières - en organisant vos documents, en renforçant le bâtiment et en souscrivant une assurance.

Survivre et se rétablir

Étape 5 : Laissez tomber, couvrez et tenez bon - protégez-vous sous les meubles lourds pendant le tremblement de terre.

Étape 6 : Améliorez la sécurité - quittez le bâtiment si vous le pouvez, aidez les blessés et évitez d'autres blessures.

7e étape : rétablir les liens et restaurer - établir des liens avec d'autres personnes, réparer les dégâts et reconstruire la communauté.



Panneau d'avertissement de tremblement de terre, Vancouver, Canada

6.1.3 Tsunami

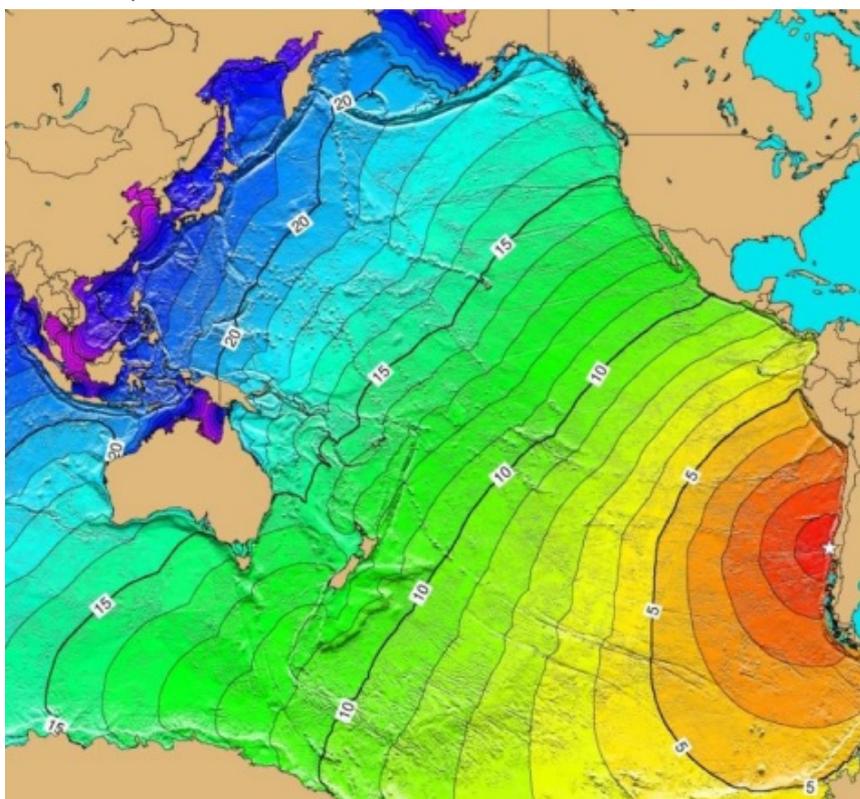
Les tsunamis sont de grandes vagues d'eau causées par des tremblements de terre, des éruptions volcaniques, des glissements de terrain tombant dans l'eau ou des impacts de météorites ; "tsunami" signifie "vague portuaire" en japonais. Les tsunamis étaient autrefois appelés "raz-de-marée", bien qu'ils n'aient rien à voir avec les marées.

La hauteur des vagues de tsunami atteignant la côte dépend de l'ampleur du processus de déclenchement et de la forme du littoral. En pleine mer, les vagues de tsunami sont faibles mais se déplacent à des vitesses pouvant atteindre 800 km/h^{-1} . Lorsqu'elles atteignent des eaux moins profondes près des côtes, le frottement ralentit la base de la vague, ce qui fait qu'elle devient de plus en plus haute. Les côtes à faible profondeur produisent des vagues plus hautes que les côtes à forte pente. Les plus grandes vagues de tsunami peuvent atteindre une hauteur de plus de 40 mètres, soit la hauteur d'un immeuble de 12 étages.

Ce n'est pas seulement la hauteur des vagues qui est dommageable, mais lorsque les tsunamis atteignent la terre, d'énormes volumes d'eau peuvent s'écouler sur la côte. Ceux-ci peuvent s'écouler jusqu'à 10 km à l'intérieur des terres, emportant avec eux tout ce qui n'est pas attaché. C'est pourquoi tant de personnes peuvent être tuées par les tsunamis.

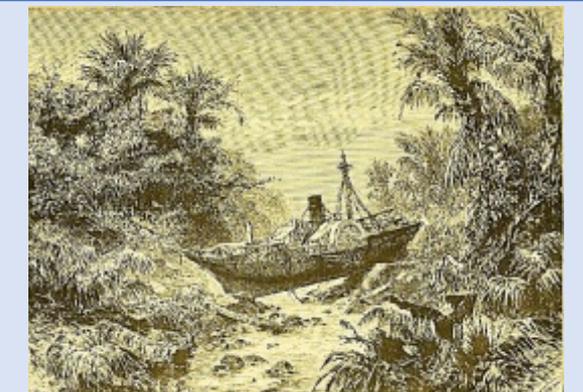
Les grandes vagues de tsunamis peuvent traverser de larges océans. Le tremblement de terre le plus puissant jamais enregistré, celui de Valdivia au Chili en 1960, a provoqué un tsunami qui a traversé l'océan Pacifique, dévastant au passage l'île d'Hawaï et atteignant la Nouvelle-Zélande, l'Australie, les Philippines, le Japon et la Chine (figure 6.4).

Figure 6.4. Le tsunami provoqué par le séisme de Valdivia en 1960, montrant les temps de parcours en heures à travers l'océan Pacifique.



Les détails de certains tsunamis importants et dévastateurs sont présentés dans le tableau 6.8.

Tableau 6.8. Grands tsunamis et leurs effets

Tsunami	Description	Image	Source
<p>Tsunami de 2011 à Tōhoku, Japon</p>	<p>Un tremblement de terre de magnitude 9.0 au large de la côte a provoqué le tsunami, qui a fait plus de 15 000 morts et entraîné la fusion de la centrale nucléaire de Fukushima, ainsi que l'évacuation de centaines de milliers de résidents (tableau 6.5 ci-dessus)</p>		<p>Le tsunami de Tōhoku, au Japon ; fumée noire provenant d'une raffinerie de pétrole endommagée</p>
<p>Tsunami de 2004 dans l'océan Indien</p>	<p>230 000 personnes ont été tuées en Indonésie et dans d'autres pays côtiers de l'océan Indien, dont le Sri Lanka, l'Inde et la Somalie (tableau 6.5 ci-dessus)</p>		<p>Le tsunami de 2004 à Ao Nang, Province de Krabi, Thaïlande</p>
<p>L'éruption de 1883 du Krakatoa</p>	<p>Plus de 36 000 décès ont été causés par le tsunami de l'éruption du Krakatoa</p>		<p>Le résultat du tsunami provoqué par l'éruption du Krakatoa de 1883</p>
<p>Séisme de 1755 Lisbonne, Portugal</p>	<p>Plus de 40 000 décès causés par le tremblement de terre, le tsunami et les incendies ; la Lisbonne, la capitale portugaise, a été presque entièrement détruite.</p>		<p>Vue d'artiste du tremblement de terre et du tsunami de 1755.</p>

Encadré 6.8. Le tsunami de 2011, Tōhoku, Japon

Le vendredi 11 mars 2011, le plus puissant séisme jamais enregistré au Japon (magnitude 9,0) a déclenché un tsunami majeur qui a atteint des hauteurs de 40 mètres et s'est écoulé sur 10 km dans les terres. C'est l'histoire des écoliers du district d'Unosumaicho, enregistrée par les reporters Sho Komine et Yasushi Kaneko du journal national Yomiuri Shimbun au Japon.

Hôpital public de Minamisanriku après le tsunami de 2011.



"Le tsunami a frappé le district d'Unosumaicho à Kamaishi, les eaux de crue atteignant le troisième étage de l'école intermédiaire Kamaishi-Hogashi et l'école primaire Unosumai voisine. Avant le dernier tremblement de terre, les deux écoles avaient effectué conjointement des exercices de catastrophe. À l'école secondaire, le système d'annonce a mal fonctionné juste après le tremblement de terre et n'a pas pu diffuser les appels à l'évacuation. Cependant, les élèves ont pu quitter rapidement le bâtiment et le gymnase comme ils s'étaient entraînés, et ont attrapé les mains des élèves de l'école primaire - qui étaient également sur le point de s'échapper du bâtiment - et ont couru ensemble vers les hauteurs." "Un élève de première année de collège, Dai Dote, 13 ans, tenait les mains de deux filles de troisième année d'école primaire [8 ans]. Sur leur chemin vers le haut de la colline, l'une des filles a pleuré et a commencé à faire de l'hyperventilation, tandis que l'autre est devenue incapable de parler. "Tout va bien", a dit Dote aux filles alors qu'elles couraient vers le sommet de la colline, à plus de deux kilomètres de leur école. Une fois qu'elles ont confirmé la sécurité de toutes leurs amies, les filles ont eu l'air soulagées, a dit Dote." Un enseignant a déclaré au Yomiuri Shimbun : "J'ai dit à plusieurs reprises aux enfants en classe que nous pourrions subir un tsunami plus important que prévu. C'est presque un miracle qu'autant d'enfants aient été sauvés. Je suis fier des enfants qui ont pris les décisions [de sauvetage] par eux-mêmes."

Encadré 6.9. Le tsunami de l'océan Indien, 2004

Le 26 décembre 2004 (le lendemain de Noël), Tilly Smith, une écolière anglaise de 11 ans, se trouvait sur la plage avec son père, sa mère et sa petite sœur à Phuket, en Thaïlande.

Plus tard, elle a raconté son histoire à un journaliste.

Vague de tsunami frappant la côte de Phuket.



Encadré 6.9. Le tsunami de l'océan Indien, 2004, suite

L'histoire de Tilly :

"Je me suis souvenue qu'on me l'avait enseigné dans une leçon de géographie. C'était exactement la même mousse, comme celle que l'on trouve sur une bière, c'était une sorte de grésillement. J'ai dit : 'Il va certainement y avoir un tsunami', et ma mère ne m'a pas cru, elle a continué à marcher. Mais mon père m'a cru et Holly, ma soeur, avait vraiment peur. Alors elle a couru jusqu'à la piscine [de l'hôtel] et mon père l'a suivie. Et puis j'ai dit, 'C'est bon maman, j'y vais, j'y vais vraiment, il va y avoir un tsunami'. Et elle a dit : "Hmmm - au revoir". J'y suis retournée et elle réagissait un peu plus quand je suis partie, alors elle y est retournée pour voir si j'allais bien. Et dans la minute où elle est revenue, l'eau a commencé à monter sur la plage.

"Je l'ai dit à mon père et mon père l'a dit à l'agent de sécurité et l'agent de sécurité l'a dit aux gens sur la plage. Il y avait pas mal de familles sur la plage, juste dans l'eau.

"Si ce n'était pas pour M. Kearney (mon professeur de géographie), je serais probablement mort et ma famille aussi. Je suis donc assez fier qu'il m'ait appris cela à temps.

"Ma mère ne s'en est pas rendu compte parce qu'on ne lui a pas parlé des tsunamis quand elle était plus jeune et qu'elle ne savait pas ce qu'était un tsunami. Elle ne savait même pas que ce mot existait. Je pense donc que c'est vraiment bien de connaître ce mot et de l'apprendre."

La famille de Tilly est montée à l'étage de l'hôtel et a regardé les vagues du tsunami remplir la piscine de débris. Tilly a peut-être sauvé près de 100 vies sur la plage ce jour-là, un jour où plus de 8 000 personnes sont mortes rien qu'en Thaïlande.

Le programme national d'atténuation des risques liés aux tsunamis aux États-Unis comporte les trois parties illustrées à la figure 6.5, à savoir les conseils en matière d'alerte, l'atténuation et l'évaluation des risques, comme le montre le tableau 6.9.

Figure 6.5. Le logo du Programme national d'atténuation des risques de tsunamis aux États-Unis

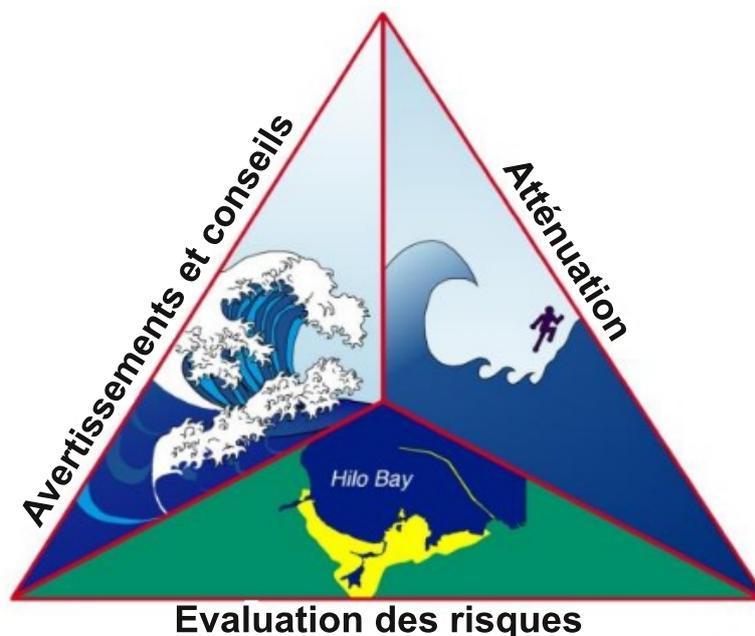
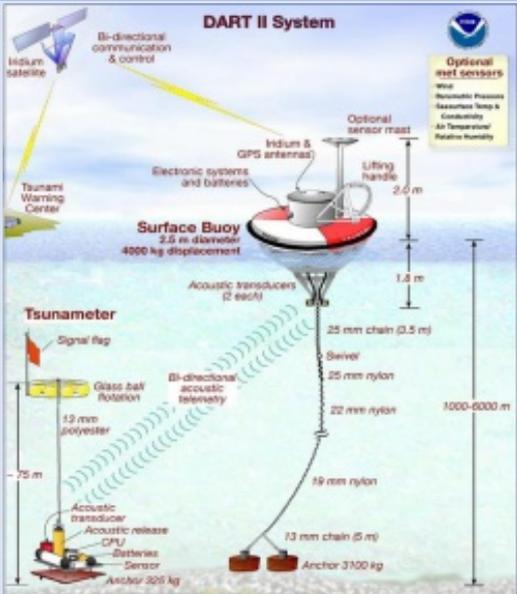


Tableau 6.9. Méthodes utilisées pour accroître la sécurité lors des tsunamis

Tsunami méthode de sécurité	Description	Image	Source
<p>Évaluation des risques</p>	<p>Les risques probables sont évalués et les résultats sont publiés pour aider la communauté. Cette brochure d'alerte chilienne contient des informations sur les zones à risque de tsunami, les points de rencontre, les zones de soins d'urgence et les itinéraires d'évacuation.</p>		<p>Dépliant d'alerte au risque de tsunami pour la ville côtière de Pichilemu dans le centre du Chili</p>
<p>Atténuation</p>	<p>Les risques de tsunami sont réduits par la construction de murs anti-tsunami</p>		<p>Un mur anti-tsunami à Tsushi Au Japon</p>
<p>Avertissement et conseils</p>	<p>Le système DART (Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis/ Le système d'évaluation et de notification des tsunamis en eaux profondes) est basé sur une série de bouées réparties dans les océans, qui détectent les changements de pression provoqués par les tsunamis, afin de pouvoir lancer des alertes rapides.</p>		<p>La bouée DART II et le réseau d'alerte</p>
	<p>Le public est formé à ce qu'il faut faire lorsque l'alerte, tandis que des informations sont publiées dans des brochures et sur des panneaux</p>		<p>Panneau d'alerte au tsunami, Okumatsushima, Japon, avec itinéraires d'évacuation.</p>

Encadré 6.10. Informations sur l'alerte aux tsunamis

Une fiche d'information sur l'atténuation des tsunamis, publiée en ligne aux États-Unis, contient ces conseils.

D'une manière générale, si vous pensez qu'un tsunami est en train de se produire, si le sol tremble sous vos pieds ou si vous entendez une alerte, prévenez vos proches et **vos amis et rejoignez rapidement un terrain plus élevé.**

Faits importants à connaître sur les tsunamis

- Les tsunamis qui frappent les zones côtières du bassin de l'océan Pacifique sont presque toujours causés par des tremblements de terre. Ces tremblements de terre peuvent se produire loin ou près de chez vous.
- Certains tsunamis peuvent être très importants. Dans les zones côtières, leur hauteur peut atteindre 9 mètres ou plus (30 mètres dans les cas extrêmes) et ils peuvent se déplacer vers l'intérieur des terres sur plusieurs centaines de mètres (10-100 mètres)
- Toutes les zones côtières de faible altitude peuvent être frappées par des tsunamis.
- Un tsunami se compose d'une série de vagues. Souvent, la première vague n'est pas forcément la plus importante. Le danger d'un tsunami peut durer plusieurs heures après l'arrivée de la première vague.
- Les tsunamis peuvent se déplacer plus vite qu'une personne ne peut courir.
- Parfois, un tsunami fait reculer l'eau près du rivage, exposant ainsi le fond de l'océan.
- La force de certains tsunamis est énorme. De gros rochers pesant plusieurs tonnes, ainsi que des bateaux et d'autres débris, peuvent être déplacés vers l'intérieur des terres sur des centaines de mètres par les vagues du tsunami. Des maisons et d'autres bâtiments sont détruits. Tous ces matériaux et cette eau se déplacent avec une grande force et peuvent tuer ou blesser des personnes.
- Les tsunamis peuvent se produire à tout moment, de jour comme de nuit.
- Les tsunamis peuvent remonter les rivières et les ruisseaux qui mènent à l'océan.

Si vous êtes sur terre :

- Soyez au courant des faits concernant les tsunamis. Ces connaissances pourraient vous sauver la vie ! Partagez ces connaissances avec vos proches et vos amis. Cela pourrait leur sauver la vie !
 - Si tu es à l'école et que tu entends qu'il y a une alerte au tsunami, tu dois suivre les conseils des enseignants et du personnel de l'école.
 - Si tu es à la maison et que tu entends qu'il y a une alerte au tsunami, tu dois t'assurer que toute ta famille est au courant de l'alerte. Votre famille doit évacuer votre maison si vous vivez dans une zone d'évacuation en cas de tsunami. Déplacez-vous de manière ordonnée, calme et sûre vers le site d'évacuation ou vers tout endroit sûr situé en dehors de votre zone d'évacuation. Suivez les conseils des autorités locales chargées des urgences et de l'application de la loi.
- Si vous êtes à la plage ou près de l'océan et que vous sentez la terre trembler, mettez-vous immédiatement sur un terrain plus élevé. N'attendez PAS qu'une alerte au tsunami soit annoncée. Restez à l'écart des rivières et des ruisseaux qui mènent à l'océan, tout comme vous resteriez à l'écart de la plage et de l'océan s'il y avait un tsunami. Un tsunami régional provoqué par un tremblement de terre local peut frapper certaines régions avant l'annonce d'une alerte au tsunami.
- Les tsunamis générés dans des endroits éloignés laissent généralement suffisamment de temps aux gens pour se déplacer vers des terrains plus élevés. Dans le cas des tsunamis locaux, où vous pouvez sentir le sol trembler, vous n'aurez peut-être que quelques minutes pour vous réfugier en hauteur.
 - Des hôtels élevés, à plusieurs étages et en béton armé, sont situés dans de nombreuses zones côtières de faible altitude. Les étages supérieurs de ces hôtels peuvent constituer un lieu de refuge sûr en cas d'alerte au tsunami et si vous ne pouvez pas vous déplacer rapidement vers l'intérieur des terres. Les procédures locales de défense civile peuvent toutefois ne pas autoriser ce type d'évacuation dans votre région. Les maisons et les petits bâtiments situés dans les zones côtières de faible altitude ne sont pas conçus pour résister aux tsunamis. Ne restez pas dans ces structures en cas d'alerte au tsunami.
 - Les récifs au large et les zones peu profondes peuvent contribuer à atténuer la force des vagues de tsunami, mais des vagues importantes et dangereuses peuvent tout de même constituer une menace pour les habitants des zones côtières. **Le conseil le plus sûr à suivre en cas d'alerte au tsunami est de s'éloigner de toutes les zones de basse altitude.**

6.1.4 Glissement de terrain

Les glissements de terrain se produisent lorsque la roche cède. La rupture de la roche peut être déclenchée par des tremblements de terre, des éruptions, des tempêtes ou parce que la roche a été affaiblie d'une manière ou d'une autre. Les glissements de terrain dans l'eau peuvent, à leur tour, déclencher des tsunamis.

Les glissements de terrain, également appelés **landslips**, comprennent plusieurs types différents de chutes, de glissements et d'écoulements qui peuvent se produire de manière catastrophique, rapidement mais aussi très lentement. Même les glissements de terrain lents sont dommageables (tableau 6.10). Ils peuvent se produire sur terre ou sous l'eau.

Tableau 6.10. Différents types de chutes, glissements et coulées

Type de défaillance rocheuse	Description	Image	Source
Chute de roches	Les roches basculent ou tombent sous l'effet de la gravité, à une vitesse catastrophique		Chute de roches au Colombie-Britannique, Canada, 2011
Glissement	Les roches s'effondrent en masse et non en blocs individuels, avec une rapidité catastrophique.		Glissement de terrain à Oddicombe, Devon, Angleterre, 2010
Affaissement	Les éboulements sont des mouvements de matériaux en une seule masse sur une pente. Certains effondrements sont catastrophiquement rapides tandis que d'autres ont une progression très lente ; certains effondrements sont rotatifs, lorsque la surface inclinée bascule vers l'arrière pendant que le bloc glisse le long d'une cicatrice courbe.		Affaissements rotatifs sur la plus grande zone d'effondrement de l'ancienne route, Mam Tor, Derbyshire, Angleterre.

Tableau 6.10. Différents types de chutes, glissements et coulées, suite

Type de défaillance de roche	Description	Image	Source
Coulée de roches	Les coulées de roches comprennent les coulées de débris et les avalanches de débris ; parce qu'elles contiennent beaucoup d'eau, elles s'écoulent à des vitesses élevées, jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres par heure, surtout le long de pentes et de vallées abruptes.		Vargas, Venezuela un mois après la coulée de débris de décembre 1999
Fluage	Les matériaux de surface, comme le sol, se déplacent lentement vers le bas de la pente, sous forme arrondie ou soit en formant des séries de petites terrasses, qui sont souvent utilisées plus tard comme chemins par les animaux de ferme		Lobes de reptation du sol dans le Wyoming, États-Unis
			Terracettes sous Morgan's Hill, Wiltshire, Angleterre

Le tableau 6.11 présente quelques-uns des glissements de terrain mondiaux les plus dommageables.

Tableau 6.11. Principaux glissements de terrain

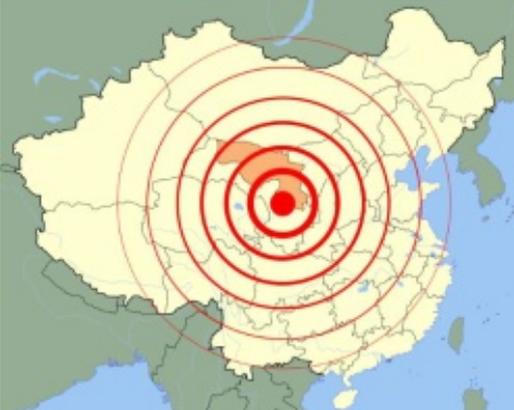
Principaux glissements de terrain	Description	Image	Source
Glissement de terrain de Haiyuan, décembre 1920	Les glissements de terrain ont été déclenchés par le tremblement de terre de Haiyuan de magnitude 7,8 (enregistré en Chine comme une magnitude de 8,5) le 16 décembre 1920 (tableau 6.5). Les pentes de limon fin instable (loess) se sont effondrées, provoquant plus de 600 glissements de terrain, avec un bilan total de plus de 100 000 morts.		Le tremblement de terre de Haiyuan de 1920 qui a déclenché les coulées de Haiyuan en Chine centrale.

Tableau 6.11. Principaux glissements de terrain, suite

Principaux glissements de terrain	Description	Image	Source
Coulées de Vargas, Venezuela, Décembre 1999	Le 15 décembre 1999, des pluies torrentielles ont déclenché une série de coulées de débris, tuant plus de 30 000 personnes, détruisant de nombreuses maisons et provoquant l'effondrement des installations de l'État ; des villes entières ont disparu et des maisons ont été emportées par la mer.		Caraba-lleda, causée par une coulée de débris de 6 m d'épaisseur
Chute de débris, Nevado Huascarán, Yungay, Pérou, mai 1970	Une inscription sur cette ruine dit : "Une ville où vivaient 35 000 personnes se trouvait ici ; sous l'effet d'un tremblement de terre et d'un glissement de terrain consécutif du Huascarán [le volcan, en arrière-plan], il ne reste plus que des débris de pierre [sic]. Tout s'est passé en quelques minutes le 31 mai 1970".		Photo prise à Yungay, dix ans après la tragédie - le bâtiment avec l'inscription
Glissements de terrain de Khait Tad-jikstan, juillet 1949	Des centaines de glissements de terrain ont été déclenchés par le tremblement de terre de Khait, d'une magnitude de 7,4 ; du limon à grain fin saturé d'eau s'est écoulé à une vitesse de plus de 30 m/s-1, tuant environ 4 000 personnes à Khait et quelque 28 000 personnes dans les zones environnantes.		La cicatrice sur la montagne de Chokrak et le glissement de terrain qui a détruit le village de Khait

Les glissements de terrain peuvent être catastrophiquement soudains, sans que les gens aient le temps d'évacuer leurs maisons, ce qui entraîne de nombreux décès.

Encadré 6.11. La coulée de boue d'Oso, 29 mars 2014

Le glissement de terrain le plus destructeur de l'histoire des États-Unis a détruit une cinquantaine d'habitations, tuant 43 personnes, près d'Oso, dans la région des Cascade Mountain de l'État de Washington, près de Seattle. Un flanc de colline saturé d'eau s'est effondré, produisant une coulée de boue massive. Des témoins ont décrit un mur de boue de huit mètres de haut traversant la vallée dans leur direction, avec le bruit de trains de marchandises, de crashes d'avions et de "dizaines de milliers de choses qui s'entrechoquent". Les fortes pluies des semaines précédentes ont pu déstabiliser la pente.



Un certain nombre de méthodes sont utilisées pour réduire les risques de glissement de terrain. Elles vont de la cartographie et de la surveillance des dangers, en passant par les systèmes d'alerte, jusqu'aux différents moyens de prévenir les glissements de terrain ou de réduire leurs effets, comme le montre le tableau 6.12.

Tableau 6.12. Méthodes de réduction des risques de glissement de terrain et d'éboulement

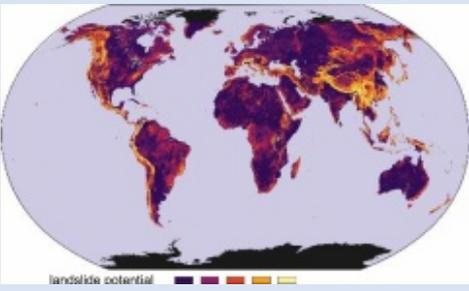
Réduction des risques de glissement de terrain	Description	Image	Source
Cartographie des risques	Les risques de glissement de terrain sont cartographiés à l'échelle locale et mondiale. La carte de la NASA montre que les régions les plus dangereuses se situent dans les zones climatiques et tectoniques actives, y compris les zones de montagne en marge des plaques		Carte mondiale des risques de glissement de terrain compilée par la National Aeronautics and Space Administration (NASA)
Surveillance	Les pentes susceptibles de céder sont surveillées par une série de dispositifs, dont des extensomètres filaires, des géophones sismiques et des pluviomètres, ainsi que par la mesure de la pression des eaux souterraines.		Un dispositif de surveillance par extensomètre filaire, relié par fil à une zone instable et transmettant des données à distance par radio
Codes de construction et panneaux d'avertissement	Les codes de construction (lorsqu'ils sont appliqués) empêchent la construction de bâtiments dans des zones très dangereuses, tandis que des panneaux d'avertissement préviennent la circulation et le grand public.		Les panneaux d'avertissement de circulation
Réduction des pentes et terrasses	Les risques sont réduits en rendant les pentes moins profondes et en creusant des séries de terrasses horizontales à intervalles réguliers ; les terrasses réduisent la hauteur des parois rocheuses et retiennent les débris		Terrassements rocheux sur la route 23, Pound Gap, Cumberland Mountains, Virginie, États-Unis.
Drainage	Les drains sont placés au sommet et au pied des pentes, ainsi qu'à l'intérieur des pentes, afin d'évacuer l'eau rapidement, réduisant ainsi le risque que l'augmentation de la pression de l'eau ne déclenche le processus de drainage		Un fossé de drainage français rempli de gravier pour retenir les sédiments, avec des tuyaux perforés (avec de petits trous en haut) pour évacuer l'eau.

Tableau 6.12. Méthodes de réduction des risques de glissement de terrain et d'éboulement, suite

Réduction des risques de glissement de terrain	Description	Image	Source
<p>Plantation</p>	<p>Des arbres ou d'autres plantes sont plantés de manière à ce que leurs racines lient les matériaux meubles entre eux et évacuent l'eau, contribuant ainsi à stabiliser les pentes</p>		<p>Mélèzes plantés pour contrôler l'érosion sur une pente raide d'éboulis meubles dans le domaine skiable de Broken River, en Nouvelle-Zélande.</p>
<p>Enlèvement des matériaux de surface meubles et boulonnage des roches</p>	<p>Les débris meubles sont enlevés et les grandes dalles et autres matériaux détachés sont fixés à la pente par de longs boulons d'ancrage</p>		<p>Boulons d'ancrage à Black Rock sur la côte du Sussex, Angleterre</p>
<p>Couverture par des grillages et des géotextiles</p>	<p>Ceux-ci sont fixés sur la pente pour empêcher la chute de débris</p> 		<p>Protection par grillage contre les chutes de pierres, Marine Drive, Llandudno, Pays de Galles</p>
<p>Couverture par béton projeté</p>	<p>Une couche de ciment est pulvérisée sur les parois rocheuses meubles pour les lier et les stabiliser</p>		<p>Une falaise stabilisée par du béton projeté, Auckland, Nouvelle-Zélande</p>

Tableau 6.12. Méthodes de réduction des risques de glissement de terrain et d'éboulement, suite

Réduction des risques de glissement de terrain	Description		Image	Source
<p>Déblais et faces protégés par des murs et gabions</p>	<p>Les fonds de pentes instables sont protégés pour réduire les possibilités de glissement et d'affaissement et pour prévenir l'érosion</p>	<p>Des murs sont construits en pierre naturelle ou en béton pour protéger les faces.</p>		<p>Une coupe de route stabilisée par un mur en pierre naturelle à la base avec un mur de soutènement en béton au-dessus, Rebernice, Slovénie</p>
		<p>Les gabions sont des boîtes en grillage métallique remplies de roches ; le grillage est galvanisé pour être protégé.</p>		<p>Une coupe stabilisée par des gabions en Allemagne</p>
<p>Barrières</p>	<p>Les barrières sont construites pour retenir les débris, en laissant de l'espace pour qu'ils s'accumulent derrière les barrières.</p>			<p>Filet de retenue des blocs rocheux sur un sentier de randonnée à Multnomah Falls, Oregon, États-Unis.</p>
<p>Protection abris</p>	<p>Les abris sont construits pour protéger les voies de transport et les zones publiques contre les chutes de débris.</p>			<p>Tunnel de protection contre les glissements de terrain et les chutes de pierres, route Narvik/Beisfjord 751 en Norvège</p>
<p>Contreforts en béton et enrochement</p>	<p>Des contreforts en béton sont construits et de gros blocs d'enrochement sont déposés au pied des pentes susceptibles de céder ou d'être érodées par les courants fluviaux ou côtiers</p>			<p>Blocs d'enrochement déposés sur la côte dans l'East Sussex, Angleterre, pour protéger le village de Fairlight au-dessus</p>

6.2 Questions environnementales

Les êtres humains affectent l'environnement à toutes les échelles, du local au mondial. Nous nous habituons souvent à ces changements et ne les considérons donc pas comme des problèmes pour l'environnement. Parmi les changements majeurs, citons la construction d'établissements humains et l'exploitation agricole de vastes régions. Ainsi, les environnements de nombreuses régions de la Terre sont aujourd'hui très différents de leur état sauvage d'origine. En effet, l'impact de l'activité humaine a été enregistré dans presque tous les environnements de la Terre, des mers les plus profondes aux plus hautes montagnes, et des pôles aux mers tropicales peu profondes.

6.2.1 L'érosion

Chaque fois que vous marchez le long d'un sentier, vous risquez de provoquer une érosion, surtout si de nombreuses autres personnes utilisent également ce sentier (figure 6.6).

Figure 6.6. Érosion d'un sentier, forêt de Fontainebleau près de Paris, France



Les seuls moyens d'empêcher cette érosion par le public sont de fermer ou de dévier le chemin ou de le renforcer en installant des passerelles en pierre ou en bois.

En attendant, lorsque les sols sont mis à nu par de mauvaises méthodes agricoles ou lorsque la végétation est brûlée, le sol peut facilement être érodé par l'eau et le vent (tableau 6.13).

Tableau 6.13. Érosion du sol

Erosion du sol	Description	Image	Source
Érosion du sol par l'eau	Dans les zones en pente non protégées par la végétation, l'érosion du sol peut former de profonds ravins qui sont très difficiles à récupérer une fois formés ces zones ravinées sont appelées badlands		Érosion du sol au premier plan, province de Huesco, Espagne ; le champ vert montre la différence que de bonnes méthodes d'agriculture peuvent faire.

Tableau 6.13. Érosion du sol, suite

Erosion du sol	Description	Image	Source
Érosion du sol par vent	L'érosion éolienne peut enlever d'énormes quantités de sol sous forme de poussière.		Une tempête de poussière dans le comté de Hamadan, Iran
	Dans les années 1930, de mauvaises méthodes agricoles dans la région des Grandes Plaines du centre des États-Unis ont entraîné une dégradation des sols; ainsi, en cas de sécheresse des années 1930, d'énormes quantités de sol ont été érodées dans les régions américaines du "dust bowl" (bol de poussière).		Farm machinery buried by windblown dust, Dallas, South Dakota, USA, 1936

Les bonnes pratiques agricoles pour préserver les sols sont les suivantes

- ne pas labourer de haut en bas des pentes, mais plutôt en travers des pentes dans le cadre du labourage en courbe de niveau ; cela empêche l'eau de dévaler les pentes en cas d'orage ; l'eau s'enfonce plutôt dans le sol
- planter des arbres dans les ravins, afin que leurs racines lient le sol ensemble
- veiller à ce que le sol soit recouvert de cultures pendant la plus grande partie de l'année possible, en particulier pendant les saisons venteuses ;
- planter des lignes d'arbres et des haies comme brise-vent pour réduire l'érosion éolienne
- ajouter des éléments nutritifs au sol sous forme d'engrais pour que les cultures continuent de croître
- veiller à ce que la végétation ne soit pas surpâturée et le sol trop compacté par les animaux.

Les côtes sont érodées naturellement par les marées qui font monter et descendre les vagues sur les plages, en particulier pendant les tempêtes. Ce phénomène n'est pas un problème à moins qu'il n'affecte des zones où vivent des personnes, où il y a des communications côtières, ou des plages utilisées par les touristes. Différentes méthodes de réduction de l'érosion côtière sont présentées dans le tableau 6.14.

Tableau 6.14. Méthodes de réduction de l'érosion côtière

Réduction de l'érosion côtière	Description	Image	Source
Epis	Les épis sont des barrières de bois, de rochers ou de béton construites en travers des plages pour réduire le mouvement des sédiments le long de la plage. Les sédiments s'accumulent d'un côté, produisant une série de courtes zones de plage incurvées.		Épi rocheux construit en travers de la plage "du Prévent" à Capbreton, Landes, France

Tableau 6.14. Méthodes de réduction de l'érosion côtière

Réduction des risques d'érosion côtière	Description	Image	Source
Murs de mer	Les murs de mer sont construits avec de gros blocs, des pierres taillées, qui peuvent être cimentées, ou du béton pour protéger les zones côtières		La vague heurte une digue à Plogoff, Finistère, Bretagne, France
Enrochement	Blocs d'enrochement déposés dans des zones en érosion		Enrochement et digue, Beesands, Devon, Angleterre
Tétrapodes	Grandes structures en béton spécialement conçues pour briser la force des vagues		Tétrapodes dans un brise-lames à Górký Wschodnie, Gdańsk, Pologne, sur la côte de la Baltique

L'un des problèmes de la réduction de l'érosion sur une partie de la côte est que cette zone peut avoir été la source de sédiments pour d'autres zones situées plus loin sur la côte. Ainsi, lorsqu'une zone de la côte est protégée, l'érosion peut augmenter dans d'autres zones proches. Cela montre comment, dans les zones côtières dynamiques, l'ingénierie côtière peut avoir des "conséquences imprévues" ailleurs.

6.2.2 Modifications du drainage

La plupart des bâtiments et autres constructions canalisent l'eau de pluie. Dès que l'eau de pluie atteint les canaux, elle s'écoule plus rapidement et est plus susceptible de provoquer une érosion. Les bâtiments ont donc besoin de caniveaux, les caniveaux nécessitent la construction de canaux spéciaux ou de collecteurs d'eaux pluviales, et les rivières dans lesquelles ils se déversent doivent être aménagées pour réduire l'érosion (figure 6.7). Tout cela a pour effet de canaliser l'eau de pluie loin des zones construites et de l'empêcher de s'enfoncer dans le sol pour recharger les aquifères. Mais cela peut aussi provoquer des inondations soudaines en aval. Dans certaines régions, on s'attaque à ce problème en évitant de tout bétonner ou de tout goudronner, mais en laissant délibérément des zones où l'eau de pluie peut s'infiltrer dans le sol.

Figure 6.7. Drain d'orage, Dobney Avenue, Wagga Wagga, Nouvelle-Galles du Sud, Australie



6.2.3 L'élimination des déchets

L'homme produit d'énormes quantités de déchets. La Banque mondiale a estimé qu'en moyenne sur la planète, chaque personne produit plus d'un kilo de déchets par jour, mais cette production est inégale, certaines régions produisant beaucoup plus de déchets que d'autres.

De nombreuses personnes mettent leurs déchets dans une poubelle et ne se préoccupent pas davantage de ce qu'il advient de ces déchets. Mais tous les déchets doivent être gérés. Les méthodes de gestion des déchets diffèrent d'une région à l'autre (figures 6.8 et 6.9) et ont évolué au fil du temps, mais les méthodes modernes font généralement appel aux "trois R" : "réduire, réutiliser et recycler".

Ces méthodes visent à extraire la plus grande valeur possible des déchets et à éliminer la plus petite quantité possible de matériaux.

Figure 6.8. Gestion des déchets à Katmandou, Népal



Figure 6.9. Gestion des déchets à Stockholm, Suisse



Quelle que soit la quantité de matériaux pouvant être réutilisés et recyclés, certains devront finalement être mis en décharge. Les principaux types de déchets qui doivent être mis en décharge sont présentés dans le tableau 6.15.

Tableau 6.15. Déchets devant être éliminés

Les déchets	Description	Image	Source
Déchets inertes	Les déchets inertes sont des déchets chimiquement non réactifs ; ils comprennent les gravats de construction et les matériaux provenant de bâtiments démolis. Ils peuvent toutefois contenir des matériaux chimiquement réactifs comme le papier, le bois et les plaques de plâtre, et des matériaux dangereux comme l'amiante.		Décombres d'un bâtiment démolé à Milovice, en République tchèque.
Déchets domestiques	Les déchets domestiques sont des déchets ménagers contenant un large éventail de matériaux ; en se décomposant, ils produisent un liquide toxique appelé lixiviat et libèrent des gaz, notamment du méthane		Déchets domestiques compactés dans une décharge australienne
Déchets toxiques	Les déchets toxiques sont des déchets solides ou liquides chimiquement réactifs qui peuvent être dangereux s'ils sont avalés, inhalés ou absorbés par la peau. Ils comprennent la peinture, les huiles et un large éventail de produits chimiques et sont le plus souvent éliminés dans des décharges imperméables.		Le site de déchets toxiques de la vallée des Tambours, Kentucky, États-Unis, dans les années 1980 ; des sites comme celui-ci ont modifié la législation environnementale aux États-Unis.
Déchets radioactifs	Les déchets radioactifs continuent à émettre des radiations nocives pendant des milliers d'années ou plus. Ils sont généralement divisés en déchets de faible, moyenne et haute activité ; les déchets de faible activité peuvent être enterrés près de la surface, mais les déchets de haute activité nécessitent un enfouissement profond.		Élimination de déchets radioactifs de faible activité au Nevada, États-Unis.

Les déchets domestiques et toxiques sont éliminés dans des sites spécialement préparés à cet effet. Les meilleurs sites sont les anciennes carrières et les fosses à briques dans des roches imperméables, bien que les creux dans des surfaces terrestres imperméables soient également utilisés. L'imperméabilité empêche le lixiviat liquide de s'écouler dans les eaux souterraines et les gaz de s'échapper dans les parois de la fosse. Dans les sites plus perméables, les roches peuvent être revêtues d'une membrane plastique imperméable coûteuse (figure 6.10). Dans les zones où il n'y a ni creux ni carrières, la décharge peut être construite dans des collines basses avant d'être aménagée et recouverte.

Figure 6.10. Décharge du sud-est des Nouveaux Territoires revêtue d'une membrane géotextile, Hong Kong



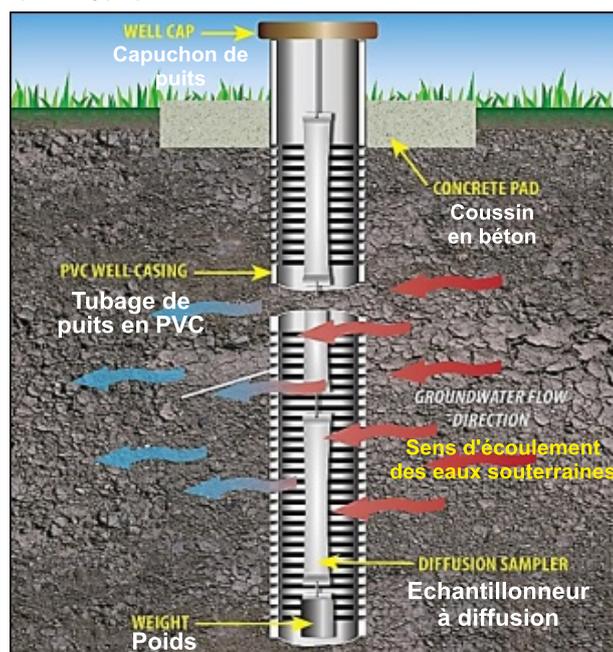
Lorsque les décharges sont pleines, elles sont soigneusement façonnées, puis recouvertes d'argile ou d'un autre matériau imperméable pour empêcher l'eau de pluie de s'infiltrer dans les lixiviats. Ensuite, elles sont recouvertes de terre végétale et des événements de méthane sont ajoutés, pour permettre au gaz de s'échapper. Enfin, ils sont plantés d'herbe ou d'autres végétaux pour aider le site à se fondre dans le paysage environnant. Sur certains sites, le méthane est collecté et utilisé pour produire de l'énergie, ce qui réduit sa contribution aux gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Figure 6.11. Série d'évents de méthane sur une ancienne décharge paysagée où l'on a extrait du schiste bitumineux par le passé, Seafield, West Lothian, Écosse



Enfin, dans les sites d'enfouissement bien gérés, des puits sont forés dans les roches environnantes et surveillent la pollution des eaux souterraines (Figure 6.12).

Figure 6.12. Diagramme d'un puits typique de surveillance des eaux souterraines



6.2.4 Pollution

Les polluants sont des déchets qui contaminent l'environnement. Trois facteurs influent sur leur pouvoir polluant : leur composition chimique, leur concentration et leur persistance (durée pendant laquelle ils restent toxiques).

Les eaux souterraines peuvent être polluées par les fuites des décharges, mais aussi par toute une série de processus industriels et agricoles, comme le montre la section 4.2.1.3. Dans ces situations, la surveillance par des puits d'eau souterraine comme celui de la figure 6.12 est très importante.

Des processus similaires peuvent également contaminer les eaux de surface, c'est pourquoi l'eau destinée à l'usage humain et industriel doit être traitée avant d'être utilisée.

Encadré 6.12. Drainage minier acide

Un problème dans les anciennes zones minières survient lorsque le pompage de l'eau des mines s'arrête, et que celles-ci se remplissent d'eau oxygénée. Celle-ci réagit avec les minéraux de la mine, les dissout et les ramène à la surface sous forme d'eau très acide, riche en fer, qui peut tuer toute vie dans les cours d'eau qu'elle atteint. Comme la mine n'est plus en activité, il n'y a souvent pas de fonds pour s'occuper de ce problème coûteux, qui doit être résolu par les autorités locales.

Drainage acide d'une ancienne mine, Rio Tinto, Espagne



Un large éventail d'autres types de pollution est reconnu, en plus de la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines. Il s'agit notamment de :

- la pollution de l'air - produits chimiques, gaz et particules comme la suie rejetés dans l'atmosphère
- la contamination du sol - les produits chimiques industriels et agricoles qui s'infiltrent dans le sol
- la pollution par les déchets - le public jette des déchets et les décharges illégales
- la pollution lumineuse, notamment par les lampadaires - les habitants des zones urbaines voient moins d'étoiles dans le ciel nocturne que dans les zones plus sombres

la pollution thermique - en particulier le liquide de refroidissement des centrales électriques qui réchauffe les eaux locales

-la pollution sonore, notamment le bruit des routes, des avions et des industries

la pollution visuelle - provenant des mines et des carrières (voir ci-dessous), mais aussi des lignes électriques, des panneaux publicitaires, des parcs éoliens, des décharges et des sites industriels abandonnés.

-la pollution marine - provenant des déchets traités et non traités déversés en mer.

Récemment, la pollution a été traitée selon le principe du "pollueur-payeur", selon lequel ceux qui polluent doivent payer pour les opérations de nettoyage. De nos jours, ce principe est généralement intégré dans les contrats des industries potentiellement polluantes et des exploitations minières et de carrières ; mais lorsque le pollueur est introuvable, cela n'est pas possible.

Il est très difficile de trouver le pollueur dans les zones marines, où il existe trois sources principales de pollution : le flux direct de pollution dans les océans, le ruissellement de la pluie par les ruisseaux et les rivières, et les polluants provenant de l'atmosphère. Les polluants peuvent s'écouler directement dans la mer sous forme d'eaux usées provenant des égouts ou de déchets industriels, y compris les déchets miniers. Le ruissellement apporte la pollution provenant de la construction de bâtiments, de routes et de ports, ainsi que des sols agricoles, des engrais et des pesticides. La pollution atmosphérique comprend la pollution des véhicules, la poussière transportée par le vent et les débris soufflés par les décharges. L'augmentation des niveaux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère semble acidifier les océans, ce qui a un impact particulier sur les communautés de récifs coralliens.

Le pétrole est un polluant majeur des océans, le plus connu étant les grandes marées noires. Cependant, la plupart des pollutions océaniques par le pétrole proviennent de pétroliers qui pompent des eaux usées, de pipelines qui fuient ou de pétrole jeté dans les égouts à terre.

Les débris de plastique constituent un problème majeur car le plastique se décompose très lentement. De minuscules billes de microplastique sont utilisées dans de nombreux gommages de cuisine, dentifrices et cosmétiques et on a découvert qu'elles polluaient les environnements marins, des zones côtières aux fosses marines profondes. Les animaux marins les incorporent à leur nourriture et on estime que plus d'un tiers des poissons de la Manche sont contaminés par ces billes. Elles sont désormais interdites dans plusieurs pays et on espère qu'elles seront très bientôt éliminées dans le monde entier.

Figure 6.13. Perles de microplastique libérées par une éponge à récurer dans un bol blanc ; la taille des microbilles varie d'un millimètre à un centième de millimètre.



6.2.5 Mines et carrières

Par le passé, les mines et les carrières ont visuellement pollué de nombreuses régions du monde, provoquant également une pollution de l'eau, de l'air et du bruit. Aujourd'hui, dans la plupart des régions du monde, les contrôles environnementaux sont stricts et diverses méthodes sont utilisées pour réduire la pollution, comme le montre le tableau 5.7. Entre-temps, de nombreuses anciennes zones minières ont été construites, tandis que les anciennes carrières sont devenues des parcs nationaux et des réserves naturelles. Les anciennes carrières peuvent offrir un large éventail de niches écologiques, comme des parois rocheuses et des étangs, qui ne sont normalement pas disponibles pour la faune de la région, ce qui les rend attrayantes pour la nature comme pour le public.

Figure 6.14. Réserve naturelle de Heeseberg dans une ancienne carrière, Basse-Saxe, Allemagne



6.2.6 La combustion de combustibles fossiles et l'effet de serre

De nombreux scientifiques pensent, comme nous l'avons vu à la section 4.3.3 sur le changement atmosphérique, que la combustion de combustibles fossiles contribue à l'augmentation des quantités de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, et que cela contribue à son tour au changement climatique. La combustion des combustibles libère effectivement du dioxyde de carbone, le charbon rejetant presque deux fois plus de dioxyde de carbone que le gaz naturel (voir figure 5.6). Cependant, d'autres processus industriels libèrent également du dioxyde de carbone, notamment la fabrication de ciment à partir de calcaire.

Des recherches sont actuellement menées pour déterminer si le dioxyde de carbone formé par ces processus peut être "capturé" et pompé dans d'anciens gisements de pétrole ou de gaz et ainsi ne pas être rejeté dans l'atmosphère. Les recherches montrent que la "**capture du carbone**" (ou "capture et stockage du carbone", CSC) est possible, mais qu'elle est également coûteuse.

C'est pourquoi, à ce jour, aucune opération de capture du carbone à grande échelle n'est en cours dans le monde (figure 6.15).

Figure 6.15. Technologie de capture du carbone testée dans une mine de charbon



6.3 Impact sur l'histoire de l'humanité

L'impact des géosciences sur le cours de l'histoire humaine est souvent difficile à percevoir car de nombreux autres facteurs agissaient au même moment. Néanmoins, il existe des exemples où les processus terrestres ont eu des effets critiques.

Encadré 6.13. La fin de la civilisation minoenne

La civilisation minoenne, basée sur l'île de Crète en mer Méditerranée, est peut-être la première grande civilisation d'Europe. Elle a duré de 6600 à 3400 ans environ et son effondrement pourrait avoir été causé par l'éruption de l'île volcanique voisine de Thera (appelée aujourd'hui Santorin).

L'éruption de Thera avait un indice d'explosivité volcanique (IEV) de 6 ou 7 et était l'une des plus grandes éruptions de l'histoire. Elle a détruit l'île de Théra (Santorin), laissant un énorme cratère et ensevelissant la cité minoenne d'Akrotiri sous des couches de cendres volcaniques. Un tsunami provoqué par l'éruption semble avoir détruit de nombreuses villes côtières minoennes, peut-être accompagné de tremblements de terre. Il se peut que l'éruption ait tellement affaibli les Minoens que les Mycéniens, qui sont arrivés par la suite, les ont facilement conquis.



Vue satellite du cratère de Thera (Santorin) aujourd'hui

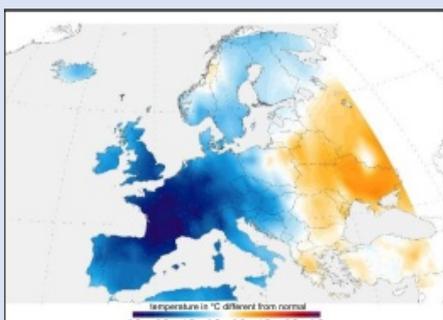
Encadré 6.14. L'année sans été", 1816

1816 a été une année catastrophique pour l'agriculture dans le monde entier, provoquant la mort de dizaines de milliers de personnes par la faim. On pense que cette catastrophe mondiale a été provoquée par l'éruption du mont Tambora en Indonésie en 1815. Outre les cendres, l'éruption a libéré d'énormes quantités de dioxyde de soufre dans l'atmosphère. En conséquence, les températures mondiales ont été réduites d'environ 0,5°C, ce qui a eu les effets suivants :

- des changements dans les moussons indiennes, entraînant trois mauvaises récoltes ;
- des températures froides et de fortes pluies entraînant de mauvaises récoltes en Europe ; des températures froides et de fortes pluies entraînant de mauvaises récoltes en Europe ; - du gel, de la neige et un brouillard important en été dans la ceinture agricole du centre des États-Unis, ce qui a poussé des milliers de personnes à migrer ailleurs ;
- le temps froid qui tue les arbres et les cultures de riz dans le nord de la Chine et provoque des inondations dans la vallée du fleuve Yangtse ;
- des peintres pour peindre des tableaux de magnifiques couchers de soleil, causés par les cendres dans l'atmosphère ;
- un groupe d'auteurs en vacances en Suisse est resté à l'intérieur et a organisé un concours pour écrire des histoires effrayantes, ce qui a conduit à la publication de Frankenstein et a inspiré Dracula.

La famine de 1816 a entraîné des émeutes et des maladies généralisées dans différentes parties du monde.

La forte concentration de dioxyde de soufre dans l'atmosphère de 1816 a été enregistrée dans les carottes de glace du Groenland.



Chute de température en Europe, 1816



Canal de Chichester, une scène de coucher de soleil, peut-être influencée par les cendres de l'éruption, peinte en Angleterre par J.M.W. Turner

6.3.1 Guerres pour les ressources

De nombreuses guerres ont été menées pour des ressources dans le passé. Parfois, les ressources sont le facteur principal du conflit, alors qu'elles jouent des rôles plus mineurs à d'autres moments, mais elles ont clairement été des éléments clés de la guerre et de la paix dans le passé.

Encadré 6.15. Les guerres de l'eau

La région du Moyen-Orient comprend les pays de la péninsule arabique et les zones environnantes de l'Égypte, de la Syrie, de l'Irak, de l'Iran et de la Turquie. Cette région est parfois appelée le "croissant fertile" car l'eau, en particulier celle du Nil, du Tigre et de l'Euphrate, était utilisée pour l'irrigation et la culture, formant ainsi la base de certaines des premières civilisations sur Terre, il y a environ 5000 ans. La longue histoire de cette région a été marquée par de nombreuses guerres, dont certaines concernaient l'approvisionnement en eau. Par exemple, l'empire assyrien reposait sur une irrigation très répandue, et on trouve des traces de rois assyriens détruisant les systèmes d'irrigation de leurs ennemis ou déversant des débris dans les canaux d'irrigation pour inonder les villes de leurs adversaires.

L'une des "guerres de l'eau" les plus récentes au Moyen-Orient a été le conflit autour du Jourdain au milieu des années 1960. L'eau du Jourdain est une source vitale pour l'irrigation en Israël. Sans elle, il serait impossible de subvenir aux besoins de la population. Cependant, le Jourdain prend sa source à l'extérieur d'Israël et les États arabes environnants ont décidé de détourner l'eau des sources du Jourdain afin d'empêcher 35 % de l'eau d'atteindre Israël. Les Israéliens ont résisté à cette décision lors de la

Les Israéliens s'y sont opposés lors de la guerre des Six-Jours de 1967, ce qui a conduit à l'abandon du plan.



Le fleuve Jourdain, qui apporte de l'eau à Israël depuis le nord.

Encadré 6.16. Les guerres du pétrole

De nombreuses guerres menées depuis les années 1930 ont été qualifiées de "guerres du pétrole", car les ressources pétrolières d'un pays étaient l'un des principaux facteurs à l'origine de la guerre.

La première guerre qualifiée de "guerre du pétrole" a opposé la Bolivie et le Paraguay en Amérique du Sud au milieu des années 1930. Bien que le Paraguay l'ait emporté, des dizaines de milliers de soldats sont morts et les deux pays ont été gravement touchés. Au cours des années suivantes, aucune quantité commerciale de pétrole n'a été découverte dans la région, bien que du pétrole et du gaz aient été découverts plus récemment.

La première guerre du Golfe, en 1990, a été déclenchée par l'invasion du Koweït par l'Irak ; les différends entre les pays au sujet du pétrole ont été une raison importante de cette invasion. Les champs pétrolifères koweïtiens ont été incendiés, ce qui les a fortement endommagés, envoyant d'énormes panaches de fumée dans l'atmosphère et provoquant une pollution généralisée. Il a fallu plusieurs mois après la fin de la guerre pour que tous les incendies soient éteints et que les puits de pétrole soient bouchés.

Une partie importante de la stratégie de la deuxième guerre d'Irak, qui a commencé en 2003, consistait à sécuriser les champs pétrolifères irakiens, ce qui a été fait sans dommage pour les champs pétrolifères.



Champs de pétrole en feu derrière un réservoir abandonné, Koweït

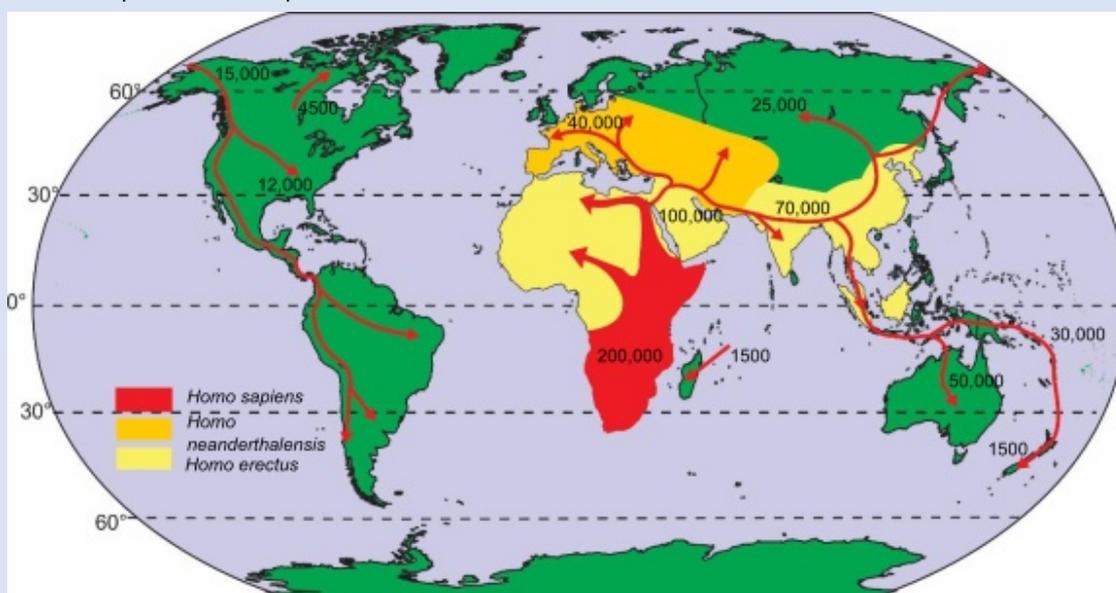
Il a été affirmé que de nombreux autres conflits dans le monde ont les ressources pétrolières comme l'un des principaux facteurs contributifs.

6.3.2 Migration due au changement climatique

Le changement climatique naturel a provoqué la migration d'animaux et d'humains dans le passé géologique en raison du changement de climat et des modifications du niveau de la mer qui y sont liées. Les changements du niveau de la mer et le déplacement des ceintures climatiques et des plaques tectoniques ont dû provoquer d'énormes changements d'habitats dans le passé géologique, mais nous disposons des preuves les plus détaillées des migrations provoquées au cours des temps géologiques plus récents.

Encadré 6.17. La migration des premiers humains hors d'Afrique

La migration des premiers humains et de nombreux autres groupes est liée au changement climatique. La théorie de la pompe du Sahara explique que pendant les périodes plus humides, l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient sont devenus des prairies, permettant à de nombreuses espèces différentes de migrer d'Afrique en Asie. Mais pendant les périodes plus sèches, ces régions sont redevenues désertiques, car la "pompe du Sahara" s'est arrêtée. La théorie de la pompe a été utilisée pour expliquer les vagues de migration de plusieurs mammifères différents, dont les chevaux, ainsi que de différents groupes d'hommes primitifs. La première migration humaine précoce d'Afrique vers l'Asie semble s'être produite il y a environ 1,75 million d'années. Au fur et à mesure que des groupes humains se sont développés en Afrique, l'un d'entre eux a également migré le long de la même route, il y a environ 70 000 ans, pour coloniser l'Asie et finalement l'Europe, les Amériques et le reste du monde.



La propagation des premiers groupes humains à travers le monde, avec les dates de propagation avant notre ère : premièrement - Homo erectus ; deuxièmement - Homo neanderthalensis ; troisièmement - Homo sapiens.

Encadré 6.18. L'assèchement du Sahara

Il y a seulement 6000 ans environ, la région que nous appelons aujourd'hui le désert du Sahara était une prairie où il pleuvait beaucoup.

Les peuples qui y vivaient ont alors enregistré des scènes dans l'art rupestre ; celles-ci montraient de nombreux animaux différents qui devaient vivre dans les prairies à cette époque. Sur le site de peinture ci-dessous, les chameaux sont peints par-dessus d'autres animaux et ont donc dû être ajoutés plus tard. Cela pourrait être le début du changement climatique qui a fait de nombreuses régions du Tchad l'une des régions les plus sèches de la planète, avec très peu d'eau, de végétation et de faune.

Aujourd'hui, l'air descendant de la cellule de circulation de Hadley dans l'atmosphère produit des conditions très sèches dans le Sahara. Mais les preuves montrent que, les conditions équatoriales pluvieuses peuvent s'éloigner de l'équateur plus qu'elles ne le font aujourd'hui. Cela semble expliquer pourquoi certaines parties de la région du Sahara étaient tellement plus humides dans le passé. Les scientifiques continuent d'étudier pourquoi certaines parties des ceintures climatiques peuvent se déplacer de cette manière.

Encadré 6.18. L'assèchement du Sahara, suite



Grotte de Manda Guéli, Montagnes de l'Ennedi, Tchad



Formation rocheuse érodée par le vent, Monts Ennedi, Tchad

Encadré 6.19. Le "Doggerland" dans la région de la mer du Nord

Le Doggerland est le nom donné à une zone, aujourd'hui sous la mer du Nord, qui était autrefois une terre ferme reliant le Royaume-Uni à l'Europe.

Il s'agissait d'une large vallée peu profonde, avec des collines basses et des marécages, une végétation et une faune riches, habitée par des bandes de chasseurs/cueilleurs. C'est ce qu'ont montré les découvertes de dragues sous-marines, qui ont ramené des outils et des armes préhistoriques, ainsi que des ossements de mammouths, de lions et d'autres animaux. Lorsque les calottes glaciaires ont fondu à la fin de la dernière période glaciaire, le niveau de la mer a augmenté et a progressivement inondé la région. Un tsunami lié à un glissement sous-marin soudain dans le nord de la mer du Nord, il y a environ 8200 ans, pourrait avoir inondé certaines zones. L'élévation du niveau de la mer semble avoir définitivement noyé le Doggerland il y a environ 6 000 ans.

Les données des études sismiques des compagnies d'exploration pétrolière ont été utilisées pour reconstruire des modèles de ce à quoi ressemblait le Doggerland dans le passé avant que les hommes et les autres animaux sauvages ne soient chassés par la montée des eaux. L'inondation du Doggerland a coupé le Royaume-Uni du continent européen, faisant de l'Angleterre, du Pays de Galles et de l'Écosse une île.



Carte du Doggerland vers 10 000 avant J.-C.

Si le changement climatique actuel entraîne des modifications majeures du niveau des mers ou des mouvements importants des ceintures climatiques, nous pouvons nous attendre à voir davantage de migrations de différents types d'animaux à l'avenir.

Les géoscientifiques étudient la Terre, de l'échelle atomique à l'échelle mondiale, de nombreuses manières différentes. Cela va de la collecte de données par observation et mesure pendant le travail de terrain à l'utilisation de techniques de télédétection, de la modélisation des processus géologiques en laboratoire à leur modélisation sur ordinateur, et de l'utilisation d'appareils d'observation et de mesure de haute technologie en laboratoire à des programmes de surveillance globale impliquant la géosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère.

Les géoscientifiques sont tous ceux qui travaillent sur le système terrestre, et ont un large éventail de spécialités, dont certaines sont présentées dans le tableau 7.1.

Tableau 7.1. Quelques-unes des nombreuses spécialisations en géosciences

Spécialité en géosciences	Description	Image	Source
Climatologue	Les climatologues étudient les schémas météorologiques à long terme dans une région, généralement sur des cycles de 30 ans. Leur travail va du prélèvement d'échantillons de carottes d'eau, de sol, de glace ou de sédiments à l'utilisation de données satellitaires.		L'enregistrement de données glaciaires, Parc national des Glaciers, Montana, États-Unis.
Ingénieur Géologue	Les ingénieurs géologues contribuent aux grands projets de construction par la cartographie géologique, en dirigeant et en interprétant les opérations de forage, en analysant les données et en préparant des recommandations et des rapports.		Noyau d'exploitation forestière en Australie occidentale
Géologue de l'environnement	Les géologues de l'environnement surveillent l'environnement lors de l'extraction des matières premières ou de l'élimination des déchets, et assainissent l'environnement par la suite, en utilisant un large éventail de données recueillies sur le site et ailleurs.		Examen d'une zone minière abandonnée aux États-Unis
Géologue d'exploration	Les géologues d'exploration recueillent des données sur le terrain et les relient aux données cartographiques, géochimiques, géophysiques et de forage pour cartographier les structures rocheuses souterraines lors de l'exploration des gisements de pétrole, de gaz et de minéraux.		Examen d'une carotte de forage fraîche, Chili

Tableau 7.1. Quelques-unes des nombreuses spécialisations en géosciences, Suite

Spécialité en géosciences	Description	Image	Source
<p>Géochimiste</p>	<p>Les géochimistes étudient la composition géochimique de la Terre, de l'échelle atomique à l'échelle mondiale. La géochimie est utilisée pour la prospection de pétrole, de gaz et de minéraux et pour la surveillance de la pollution environnementale.</p>		<p>Etude géochimique de gaz volcaniques, Mont Baker, Washington, États-Unis</p>
<p>Géomorphologue</p>	<p>Les géomorphologues étudient la façon dont la surface de la Terre se forme et est modifiée par les processus terrestres ; ils étudient les paysages liés à la météorisation, à l'érosion, aux rivières, aux côtes et à la glaciation.</p>		<p>Étude de la glaciation, glacier central Rongbuk, Everest, Népal.</p>
<p>Géophysicien</p>	<p>Les géophysiciens étudient les tremblements de terre et évaluent les risques sismiques ; ils interprètent les données sismiques recueillies lors de l'exploration du pétrole, du gaz et des minéraux, effectuent des investigations sur le terrain et étudient la structure de la Terre, de la surface au noyau</p>		<p>Déploiement d'un sismomètre du fond de l'océan sismomètre au large de la Barbade</p>
<p>Hydrogéologue</p>	<p>Les hydrogéologues ne se contentent pas de prospecter et d'évaluer les perspectives en matière d'eau, ils surveillent également les eaux souterraines pour détecter les risques de pollution et de santé, participent à l'assainissement des sites et étudient l'assèchement des mines et des carrières.</p>		<p>Échantillonnage des eaux souterraines en Allemagne</p>

Tableau 7.1. Quelques-unes des nombreuses spécialisations des géosciences, suite

Spécialité en géosciences	Description	Image	Source
Météorologue	Les météorologues utilisent un large éventail de méthodes scientifiques pour mesurer, comprendre, modéliser et prévoir le temps, sa physique et sa chimie.		Mesure de l'épaisseur de la neige en Iran
Géologue minier	Les géologues miniers étudient les liens entre la géologie et les gisements de minerai pour suivre les gisements connus et en trouver de nouveaux. Ils donnent des conseils sur les plans d'exploitation minière à court et à long terme grâce à une série de méthodes d'enquête.		Filon de fluorine dans une mine, Peak District, Angleterre
Océanographe	Les océanographes comprennent des spécialités biologiques, chimiques, géologiques et physiques. Les océanographes géologues examinent les processus océaniques actuels et passés, y compris la tectonique des plaques, la circulation océanique et le changement climatique		Mise en place d'équipements de surveillance du fond marin
Paléontologue	Les paléontologues étudient la vie fossile, des microfossiles aux dinosaures, en étudiant l'évolution de la vie et les paléoenvironnements où les plantes et les animaux ont vécu autrefois ; les fossiles sont utilisés pour dater et corréler les roches et pour donner des informations sur les températures et les climats du passé.		Paléontologue avec l'os de la cuisse d'un grand dinosaure, Zimbabwe

Tableau 7.1. Quelques-unes des nombreuses spécialisations des géosciences, suite

Spécialité en géosciences	Description	Image	Source
Géologue de Recherche	<p>Les géologues de recherche travaillent généralement dans des universités, des musées ou des services gouvernementaux. Les géoscientifiques universitaires donnent des cours aux étudiants de premier cycle, dirigent des programmes de doctorat et publient leurs propres recherches.</p>		<p>Examen des expositions granitiques dans les monts Fosdick, Antarctique</p>
Sédimentologue	<p>Les sédimentologues étudient les sédiments modernes et les roches sédimentaires anciennes afin d'explorer leurs caractéristiques et de comprendre les processus qui les ont formés, en travaillant sur le terrain et en laboratoire et en construisant des modèles physiques et informatiques.</p>		<p>Analyse de la taille des sédiments en laboratoire, Naval Oceanographic Office, Mississippi, USA</p>
Scientifique du sol /Pédologue	<p>Les scientifiques du sol classent et cartographient les sols, en testant leurs propriétés physiques, chimiques, biologiques et de fertilité sur le terrain et en laboratoire ; ils gèrent les sols pour l'agriculture et remettent en état les sols dans les zones endommagées par l'environnement.</p>		<p>Relevé des croûtes du sol à l'aide d'un quadrat, Tucson, Arizona, USA</p>
Enseignant	<p>Les enseignants enseignent les géosciences aux élèves et aux étudiants, de l'école primaire (élémentaire) au lycée (secondaire), à l'université et au-delà, à l'intérieur et à l'extérieur</p>		<p>Un enseignant discute du travail sur le terrain avec un groupe d'élèves près d'Ingleton, Yorkshire, Royaume-Uni</p>
Volcanologue	<p>Les volcanologues étudient tous les processus ignés, y compris ceux des volcans actifs, en étudiant les éruptions, l'écoulement de la lave et la libération des gaz volcaniques pour comprendre comment ils pourraient se comporter à l'avenir</p>		<p>Analyse d'échantillons dans le cratère du volcan Mutnovsky, Kamchatka, Russie orientale.</p>

Les géoscientifiques doivent respecter la promesse géoéthique à tout moment de leur travail.

Encadré 7.1. La promesse géoéthique

Je promets...

- Je pratiquerai les géosciences en étant pleinement conscient des implications sociétales, et je ferai de mon mieux pour protéger le système terrestre au profit de l'humanité.
- Je comprends mes responsabilités envers la société, les générations futures et la Terre pour un développement durable.
- Je mettrai l'intérêt de la société au premier plan dans mon travail.
- Je ne ferai jamais un mauvais usage de mes connaissances géoscientifiques, en résistant à la contrainte ou à la coercition.
- Je serai toujours prêt à apporter mon aide professionnelle en cas de besoin, et je ferai preuve d'impartialité en mettant mon expertise à la disposition des décideurs.
- Je continuerai à développer mes connaissances géoscientifiques tout au long de ma vie.
- Je ferai toujours preuve d'honnêteté intellectuelle dans mon travail, en étant conscient des limites de mes compétences et de mes aptitudes.
- J'agirai pour favoriser le progrès des géosciences, le partage des connaissances géoscientifiques et la diffusion de l'approche géoéthique.
- Je serai toujours pleinement respectueux des processus terrestres dans mon travail de géoscientifique. Je promets !



Cette promesse importante devrait être faite par toute personne étudiant les géosciences, et peut être simplifiée comme suit :

Je promets...

- Je travaillerai dans les géosciences pour protéger au mieux les habitants de la Terre et tous les systèmes terrestres.
- Je comprends que c'est mon travail de contribuer à protéger la Terre pour l'avenir, par le biais du développement durable.
- Je donnerai la priorité à l'intérêt de tous les peuples dans mon travail.
- Je n'utiliserai jamais à mauvais escient mes connaissances géoscientifiques, quoi que les autres puissent dire ou faire.
- Je serai toujours prêt à utiliser mes connaissances géoscientifiques de manière utile et j'essaierai de fournir un point de vue équilibré aux personnes qui prennent des décisions.
- Je développerai mes connaissances géoscientifiques tout au long de ma vie.
- Je serai toujours aussi honnête que possible.
- J'essaierai de faire progresser l'étude des géosciences, de partager les connaissances géoscientifiques et d'aider tout le monde à adopter un comportement géoéthique.
- Je respecterai toujours les processus terrestres dans mes études géoscientifiques. C'est promis !



Les géoscientifiques en formation et au cours de leur vie professionnelle utilisent un large éventail de compétences pour observer, mesurer et surveiller l'environnement, pour rassembler leurs observations afin d'expliquer le fonctionnement des environnements aujourd'hui et dans le passé géologique, et pour étudier les questions et problèmes géologiques.

Les travaux sur le terrain ne doivent être entrepris qu'après avoir soigneusement évalué les risques, en respectant les codes de conduite en matière de santé et de sécurité et de géologie. Des détails sur tous ces domaines sont disponibles gratuitement sur Internet.

7.1 Observation, mesure et enregistrement

L'observation, la mesure et l'enregistrement géoscientifiques sont entrepris à différentes échelles, du microscopique à l'échelle du paysage et plus encore. De nombreuses méthodes utilisées sont présentées dans le tableau 7.2.

Tableau 7.2. Méthodes utilisées pour observer et enregistrer l'environnement, enregistrer les caractéristiques géoscientifiques

Méthode	Description	Image	Source
Observation au microscope	Utilisation d'un microscope à oculaire unique ou binoculaire pour observer de près les matériaux terrestres		Observation de diamants microscopiques au Swaziland.
Observation à la loupe à main	Pour utiliser une lentille à main en laboratoire ou sur le terrain, il faut la placer près de l'œil et approcher le matériau pour obtenir la meilleure vue. Cela ne peut pas être montré dans une image de caméra, comme ci-contre		Observation d'un fossile avec une loupe à main
Observation du paysage	Observation du paysage Observer le paysage pour faciliter la cartographie géologique, en se concentrant sur les ruptures et les angles de pente et les changements de végétation.		Observation du paysage dans les Yorkshire Dales, Angleterre
Observation par utilisation du Système d'Information Géographique (SIG)	Les caractéristiques géologiques peuvent être mises en évidence sur le SIG, de même que les photographies aériennes et les images satellites.		Image satellite de séquences rocheuses plissées dans le désert algérien
Mesures sur le terrain et en laboratoire	Mesure du pendage et de la direction d'un lit ; l'angle d'inclinaison est mesuré à l'aide d'un clinomètre pour donner l'angle de la plus forte pente descendante entre 0 et 90° ; la direction de l'inclinaison est la direction de la plus forte pente descendante et est un relèvement de compas de 0 à 360°.		Mesure du pendage d'une couche, UK

Tableau 7.2. Méthodes utilisées pour observer et enregistrer l'environnement, enregistrement des caractéristiques géoscientifiques, suite

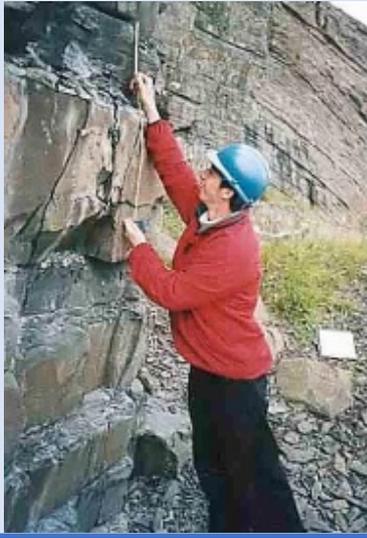
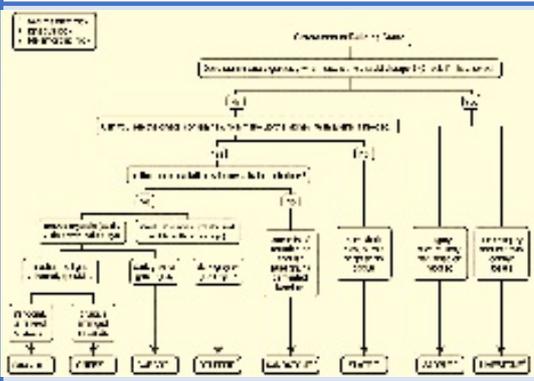
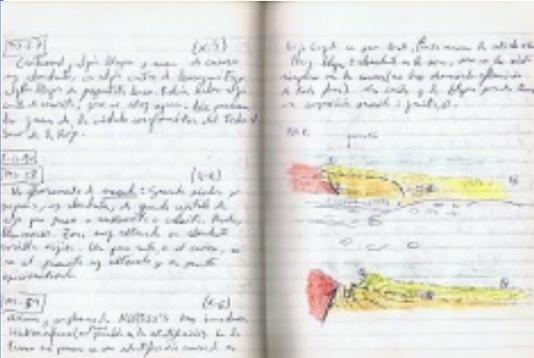
Méthode	Description	Image	Source
Mesures sur le terrain et en laboratoire, suite	Mesure des différences d'épaisseur des lits		Mesure de l'épaisseur des lits dans les grès d'Aberystwyth au Pays de Galles
Tests sur le terrain et en laboratoire	Les roches et les minéraux peuvent être testés pour une série de propriétés en laboratoire et sur le terrain		La strie des échantillons d'hématite
Application des systèmes de classification	Les systèmes de classification des minéraux, des roches, des fossiles, des textures rocheuses, des structures rocheuses, des compositions rocheuses, etc. peuvent être utilisés, avec des livres de référence comme guide.		Clé de description de la roche de l'unité d'enseignement des sciences de la Terre
Notes d'enregistrement	Les notes des caractéristiques géologiques sont soigneusement enregistrées, avec des détails sur la date, les localités visitées, les caractéristiques trouvées et leurs orientations, dans des carnets ou sur des tablettes.		Notes de terrain en Géologie

Tableau 7.2. Méthodes utilisées pour observer et enregistrer l'environnement, enregistrement des caractéristiques géoscientifiques, suite

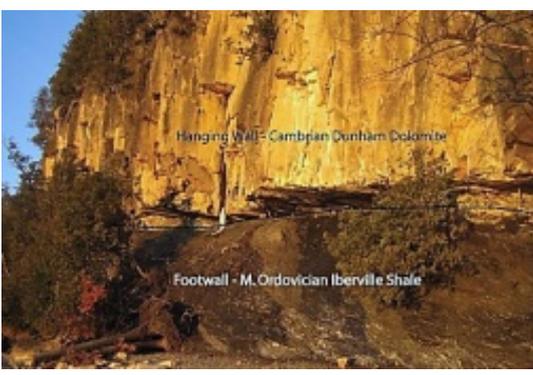
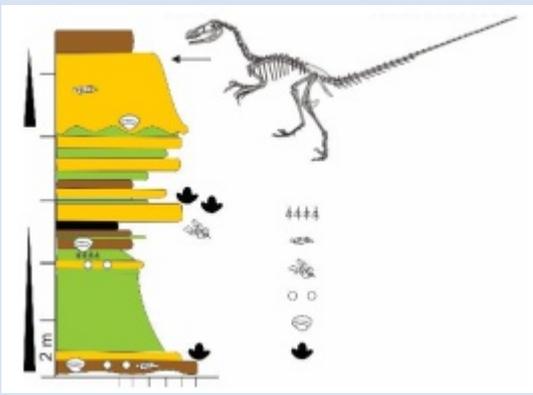
Méthode	Description	Image	Source
<p>Enregistrement par diagrammes en laboratoire et sur le terrain</p>	<p>Les diagrammes sont dessinés à l'échelle et étiquetés, et leurs localisations et orientations sont notées</p>		<p>Enregistrement d'un diagramme de terrain à Strumble Head au Pays de Galles</p>
<p>Enregistrement photographique</p>	<p>Les photographies constituent des enregistrements précieux, en particulier lorsqu'elles sont annotées ou accompagnées de diagrammes de terrain.</p>		<p>Photo annotée; Chevauchement de Champlain, Lone Rock Point, Burlington, Vermont, USA</p>
<p>Dessiner un log graphique</p>	<p>Les logs graphiques ou stratigraphiques sont dessinés à l'échelle verticale, montrant la granulométrie par la largeur du log, et les types de roches sédimentaires par la couleur ou l'ombrage ; d'autres caractéristiques telles que les structures sédimentaires ou les horizons fossiles sont ajoutées</p>		<p>Log stratigraphique du Crétacé inférieur riche en fossiles, près de la ville de Katsuyama, au Japon.</p>
<p>Observation météorologique</p>	<p>Des mesures régulières sont effectuées à un écran Stevenson</p>		<p>Écran Stevenson protégeant des instruments météorologiques, avec un pluviomètre à droite</p>

Tableau 7.2. Méthodes utilisées pour observer et enregistrer l'environnement, enregistrement des caractéristiques géoscientifiques, suite

Méthode	Description	Image	Source
<p>Prélèvement de la qualité d'air</p>	<p>La qualité de l'air est surveillée, notamment en ville</p>		<p>Prélèvement d'échantillons de la qualité de l'air en France</p>
<p>Creusement de fosses de sol</p>	<p>Les profils pédologiques à travers les couches horizontales des sols sont mesurés en creusant des fosses</p>		<p>Fosse pédologique dans les Carpates, Pologne</p>
<p>Pélèvement de la qualité de l'eau</p>	<p>La qualité de l'eau est surveillée à l'aide d'une série de tests</p>		<p>Test de la qualité de l'eau, Port Macquarie, Nouvelle-Galles du Sud, Australie</p>
<p>Prélèvement océanographique</p>	<p>Des mesures régulières sont effectuées en mer à l'aide d'un large éventail d'appareils</p>		<p>Échantillonnage de la colonne d'eau dans l'océan au large de l'Australie</p>

7.2 Synthèse des observations

Au fur et à mesure que les observations de terrain sont collectées, elles sont rassemblées dans des modèles flexibles du processus géologique, de l'histoire ou de la distribution spatiale étudiés, comme le montre le tableau 7.3. Ces images s'assemblent pour aider l'observateur à savoir quelles observations supplémentaires sont nécessaires et comment les collecter au mieux.

Tableau 7.3. Intégration des observations géoscientifiques dans des modèles et des cartes

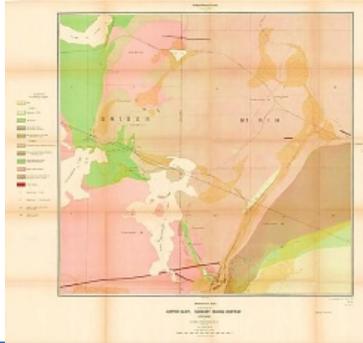
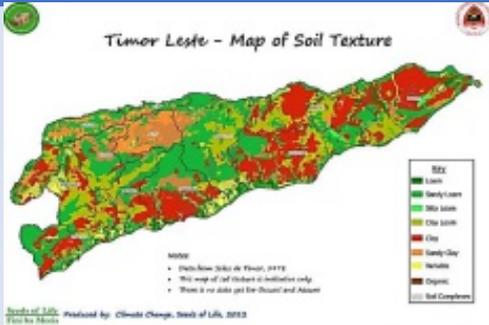
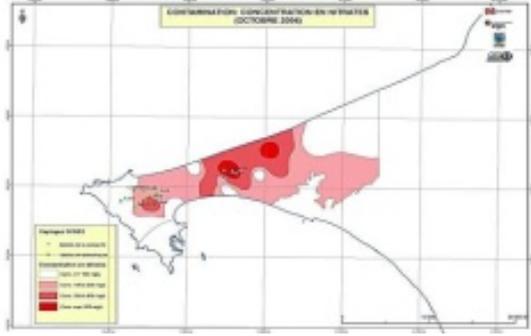
Méthode	Description	Image	Source
Interprétation paléoenvironnementale	Les géoscientifiques utilisent les indices qu'ils ont observés dans les roches sédimentaires pour construire une image de ce à quoi ressemblait la région lorsque les sédiments se sont déposés		Diorama du Jurassique. Musée Smithsonian d'histoire naturelle, Washington DC, ÉTATS-UNIS
Histoire du refroidissement d'une roche ignée	Dans les roches ignées présentant de grands cristaux distincts, ces cristaux ont commencé à se développer plus tôt dans l'histoire du magma avant qu'il ne fasse intrusion dans une zone plus froide et ne se refroidisse plus rapidement, formant un minéral à grain fin.		Grands cristaux de feldspath dans un fond à grain plus fin de Roche ignée - montrant un refroidissement en deux étapes, près de Porto, au Portugal.
Construire une Histoire géologique	Ici, les sédiments inférieurs ont été déposés, formés en roches, puis basculés verticalement par un épisode de formation de montagne ; après l'érosion, les roches inclinées ont été déposées à plat sur le dessus avant d'être inclinées et érodées elles-mêmes		La discordance découverte par James Hutton à Siccar Point en Écosse (marquée d'une ligne orange)
Dessiner une carte géologique	Observations de surface des expositions de roches, les schémas de drainage et les changements de pente marquant les limites géologiques sont rassemblées pour dessiner une carte géologique – une vue à vol d'oiseau des roches de la région si l'on enlevait tout le sol sus-jacent		Carte géologique de Copper Cliff, district minier de Sudbury, Ontario, Canada
Construction d'une coupe géologique	La construction d'une coupe transversale montre la structure géologique souterraine.		La coupe transversale de la carte de carte de Copper Cliff ci-dessus

Tableau 7.3. Construire des modèles et des cartes à partir d'observations géoscientifiques

Méthode	Description	Image	Source
Dessiner une carte des sols	Les pédologues cartographient les sols de surface selon leurs caractéristiques ; les cartes pédologiques sont utilisées pour planification agricole		Carte des sols de l'île de Timor
Dessiner une carte de contamination	Les hydrogéologues cartographient la contamination des eaux souterraines		Carte de la contamination des eaux souterraines par les nitrates des eaux souterraines de la péninsule du Cap-Vert, Sénégal

7.3 Investigation et vérification des hypothèses

Les géoscientifiques mènent des enquêtes en cherchant des preuves pour répondre à des questions géoscientifiques.

- Tout d'abord, on leur donne, ou ils identifient par eux-mêmes, une question à laquelle il faut répondre ou une hypothèse ou une idée à tester.
- L'étape suivante consiste à élaborer un plan pour étudier l'hypothèse ou tester l'idée, qui sera suffisamment souple pour être modifié au cours de l'enquête si les premiers résultats ne sont pas ceux escomptés ou donnent des informations peu utiles.
- Un processus d'évaluation des risques est réalisé et noté.
- Puis le plan est exécuté, changeant et évoluant au fur et à mesure que des informations sont recueillies.
- A mesure que les données sont collectées, elles sont traitées de différentes manières, par exemple en établissant des cartes, en dessinant des sections transversales, en effectuant des calculs, en traçant les données par différents moyens ou en construisant des modèles, notamment des modèles physiques, des modèles informatiques et des modèles mathématiques.
- Au fur et à mesure que les résultats sont collectés, ils sont évalués pour construire une image globale en réponse à la question initiale, pour repérer les informations inhabituelles qui peuvent être ou non importantes, et pour guider la collecte de plus de données.
- Pendant ce processus, les résultats doivent être transmis à ceux qui ont besoin de l'information, par le biais d'une série de méthodes comprenant des rapports, des présentations et des publications universitaires.

Lorsque tout cela est réussi, les résultats montrent clairement l'issue de l'enquête, les réponses aux questions ont été suggérées et les hypothèses et les idées ont été testées avec succès. Toutefois, il se peut qu'aucun résultat ne soit possible en raison du manque de preuves.

Encadré 7.2. Enquêtes de cartographie géologique

Pour répondre à la question "Où se trouvent les formations géologiques et leurs limites dans cette région ?", un géologue produira une carte géologique. Les cartes géologiques sont des vues en plan (vues de dessus) d'une zone montrant où l'on pourrait voir les limites entre les formations géologiques, si l'on enlevait tout le sol, les bâtiments et autres matériaux de recouvrement.

Les cartes géologiques sont complexes car les limites entre les formations doivent d'abord être identifiées, puis leurs positions doivent être reportées sur des cartes topographiques, en tenant compte du relief de la topographie. Pour ce faire, les géologues doivent savoir à tout moment où ils se trouvent exactement sur la carte topographique, en mesurant des relèvements, en utilisant des photos aériennes ou satellitaires ou en utilisant des systèmes de positionnement global (GPS).

Encadré 7.2. Enquêtes de cartographie géologique, suite

Une ligne indiquant une limite géologique est assez facile à tracer sur une carte si la différence entre les deux formations est claire, si la limite est bien exposée et si elle est presque verticale. Lorsque les limites sont presque horizontales, la forme de la limite est étroitement contrôlée par la forme du sol (la topographie) et peut donc être complexe.

Sur le terrain, les géologues tracent des cartes sur des cartes de base topographiques. D'abord, ils identifient la limite qu'ils veulent cartographier, puis ils reportent la position de la limite sur leurs cartes de base à l'aide de repères, de photos ou de systèmes GPS. Ils suivent ensuite la limite, le pendage de la roche et d'autres informations, en traçant la position de la limite au fur et à mesure. Lorsque la frontière disparaît sous le sol, ils utilisent les caractéristiques de surface telles que les changements de pente, la végétation, le drainage ou les changements de couleur du sol ou les fragments de roche excavés par les animaux fouisseurs, pour les aider à trouver le chemin le plus probable pour la frontière. Lorsque la frontière est à nouveau exposée, ils peuvent ajuster leur "cartographie des caractéristiques" si nécessaire. Les limites géologiques tracées comprennent les limites de la formation, les failles et le décalage des limites par les failles, ainsi que d'autres caractéristiques telles que les discordances ou les marges d'intrusions ; les directions du mouvement des failles sont également enregistrées.

Pendant la cartographie, les géologues enregistrent et tracent les pendages et les directions de pendage de tous les plans de litage, car ils donnent un guide de l'histoire structurale de la séquence - par exemple, en montrant où se trouvent les roches inclinées, les anticlinaux, les synclinaux et les failles.



Limite géologique entre le grès gris et le granite pâle à grain fin, Sea Point, Cape Town, Afrique du Sud.



Changement important de la pente à la limite géologique entre les roches ignées résistantes d'un filon-couche à droite et les roches sédimentaires plus fragiles à gauche, mur d'Hadrien dans le nord de l'Angleterre.

Encadré 7.3. Une enquête de prospection pour les diamants

Les diamants proviennent de roches volcaniques appelées kimberlites que l'on trouve normalement dans des cheminées volcaniques verticales, mais qui peuvent aussi former des dykes et des filons-couches. Les diamants sont rares dans les kimberlites ; d'autres minéraux kimberlitiques comme les grenats sont beaucoup plus fréquents. Les prospecteurs ne cherchent donc pas des diamants mais des grenats kimberlitiques.

L'échantillonnage des cours d'eau et des sols d'une région d'Afrique australe a permis de découvrir une étroite zone de sol orientée nord-sud d'environ 1 km de long, riche en minéraux kimberlitiques, et trois diamants microscopiques. L'hypothèse de travail était que ceux-ci devaient provenir d'un dyke kimberlitique orienté nord-sud contenant des diamants. Une série de tranchées est-ouest a donc été creusée jusqu'au socle rocheux jurassique, à la recherche du dyke - mais aucun dyke n'a été trouvé.

L'assise rocheuse jurassique était principalement constituée de grès, avec quelques lits de mudstone, et descendait vers l'ouest. C'est un lit de mudstone qui était riche en grenats kimberlitiques et en quelques diamants, et son affleurement nord-sud avait produit la zone de sol riche en grenats. C'était très inhabituel : jamais auparavant on n'avait trouvé en Afrique d'anciennes roches sédimentaires contenant de grandes quantités de minéraux kimberlitiques et de diamants.

L'enquête devait alors progresser dans deux directions. Le gisement devait être testé pour découvrir s'il était suffisamment riche en diamants pour être exploité. Parallèlement, la prospection doit se poursuivre pour trouver la source originale des diamants, en espérant qu'elle soit également exploitable.

Des mesures ont été effectuées sur le litage transversal du grès, ce qui a montré que la rivière qui a déposé les grès à l'époque jurassique avait coulé depuis l'ouest. C'était une bonne nouvelle car, si la source originale des minéraux et des diamants était une cheminée de kimberlite, elle pouvait encore être exposée. Si la source s'était trouvée à l'est, elle aurait été enfouie sous d'autres grès jurassiques ; si elle s'était trouvée au sud ou au nord, elle aurait également pu être enfouie.

Un autre vaste programme d'échantillonnage des cours d'eau et du sol a donc été mené à l'ouest, et une zone circulaire de sol riche en grenats a finalement été découverte. Lorsqu'on l'a excavée, on a découvert qu'il s'agissait d'une kimberlite suffisamment riche en diamants pour être exploitée. La mine a exploité les diamants avec succès pendant plus de quinze ans. Entre-temps, il s'est avéré que le gisement d'origine ne contenait pas suffisamment de diamants pour qu'il vaille la peine de l'exploiter au prix des diamants de l'époque, bien qu'il puisse encore être exploité à l'avenir.



Excavation de tranchées jusqu'à la roche-mère (avant les réglementations modernes en matière de santé et de sécurité).



Une couche de mudstone riche en diamants



Grès jurassique à lits croisés, montrant l'écoulement de l'ancienne rivière depuis l'ouest (à gauche).

Glossaire

Chacun de ces termes est indiqué en gras à l'endroit ou à proximité de sa première apparition, puis est défini dans le texte. Veuillez utiliser votre "chercheur" pour trouver la première utilisation du terme et sa définition.

Agrégat	Effet de serre	Mécanisme de poussée de crête
Albédo	Effet de serre renforcé	Mécanisme de traction de la dalle
Anticlinal	Énergie renouvelable	Membre plié
Aquifère	Épicentre	Métamorphisme
Aquifère confiné	Érosion	Métamorphisme régional
Arc insulaire	État de la glacière	Métamorphisme thermique
Assainissement	Évaporation	Météorologie
Astéroïde	Extinction de masse	Minéral
Atmosphère		
Atténuation	Faïlle	Nappe phréatique
Auréole métamorphique	Faïlle coulissante	
	Faïlle de chevauchement	Ondes sismiques
Basse pression	Faïlle de transformation	
Batholith	Faïlle inversée	Permafrost
Big bang (théorie)	Faïlle normale	Perméabilité
Biosphère	Foyer	Pipe volcanique
Bouchon volcanique	Fossile	Plan de faille
	Fusion partielle	Pli étroit
Capture du carbone		Pli isoclinal
Chambre magmatique	Géosphère	Pliage
Charnière de pliage	Glissement de terrain	Pluton
Cimentation		Point de basculement
Comète	Haute pression	Polarité magnétique normale
Compaction	Hydrosphère	Polluant
Condensation	Hypothèse nébulaire	Porosité
Condition de serre		Printemps
Convection du manteau	Imperméable	Prisme d'accrétion
Corps fossile	Infiltration	Processus
Corrélation	Inversion de la polarité magnétique	Produit
Courbe de décroissance radioactive		Puits
Cycle court du carbone	Jointure	Puits d'écoulement
Cycle de l'eau		
Cycle de Wilson (ou J. Tuzo cycle de Wilson)	Lamination	Racines de montagne
Cycle des supercontinents	Lit	Retour d'information
	Lithification	Rétroaction négative
Dangers	Lithosphère	Rétroaction positive
Datation absolue	Lixiviat	Risques naturels (voir risques)
Datation radiométrique		Roche
Datation relative	Magma	Roche ignée
Demi-vie	Marée de Naples	Roche ignée extrusive
Développement durable	Marée de printemps	Roche ignée intrusive
Dyke	Marge cuite	Roche plutonique
	Marges convergentes	Roche sédimentaire
	Marges de plaques conservatrices	Roche volcanique
Eau artésienne	Marges de plaques divergentes	Roches métamorphiques
Eaux souterraines	Mécanisme	
Eclipse lunaire		Sélection naturelle
Eclipse solaire		Sill
		Sismomètre

Sol
 Subduction
 Synclinal
 Système
 Système fermé
 Système ouvert

Terre de boule de neige
 Terre de boules de neige
 Théorie de la dérive des continents

Théorie de la tectonique des plaques
 Théorie de l'étalement du plancher océanique
 Trace fossile
 Transpiration

Temps de séjour

Zone saturée

Glossaire des éléments, composés et ions

Eléments	Composés	Ions
Al - aluminium	CaO - oxyde de calcium, chaux	Cl ⁻ - ion chlore
Au - or	Ca(OH) ₂ - hydroxyde de calcium, chaux	HCO ₃ ⁻ - ion hydrogénocarbonate
Ca - calcium	CaCO ₃ - carbonate de calcium, calcite	K ⁺ - ion potassium
Cl - chlore	CaSO ₄ · 2H ₂ O - sulfate de calcium, gypse	Mg ²⁺ - ion magnésium
Fe - fer	CH ₄ - méthane	Na ⁺ - ion sodium
H - hydrogène	CO ₂ - dioxyde de carbone gazeux	SO ₄ ²⁻ - ion sulfate
K - potassium	CuFeS ₂ - pyrites de cuivre et de fer, chalcopryrite	
Mg - magnésium	Fe ₃ O ₄ - oxyde de fer, hématite	
Na - sodium	FeS - sulfure de fer, pyrite	
O - oxygène	KCl - chlorure de potassium, potasse	
Pb - plomb	NaCl - chlorure de sodium, halite	
S - soufre	PbS - sulfure de plomb, galène	
	SiO ₂ - dioxyde de silicium, quartz	

Annexe

Programme international d'enseignement des géosciences, que tous les élèves doivent connaître avant l'âge de 16 ans.

Préparé en tant que rapport interne au nom de l'Organisation internationale pour l'enseignement des géosciences (IGEO) et de la Commission de l'Union internationale des sciences géologiques pour l'enseignement des géosciences (IUGS-COGE) par :

Chris King - Royaume-Uni

Avec les contributions clés de :

Ian Clark - Australie

Rosely Imbernon - Brésil

Luis Marques - Portugal

Ian McKay - Afrique du Sud

Bronte Nichols - Australie

Glenn Vallender - Nouvelle-Zélande

Clara Vasconcelos - Portugal

Ashvin Wickramasooriya - Sri Lanka

Michael Wyssession - États-Unis d'Amérique

Programme international d'enseignement des géosciences, que tous les élèves doivent connaître avant l'âge de 16 ans.

Ce programme a été préparé par l'Organisation internationale pour l'enseignement des géosciences (IGEO) et la Commission de l'Union internationale des sciences géologiques pour l'enseignement des géosciences (IUGS-COGE).

Le syllabus est basé sur les principes suivants :

- il est basé sur les programmes d'études existants dans le monde entier, car un programme d'études basé sur des programmes d'études existants a plus de chances d'être accepté dans le monde entier - la matrice de la couverture par les programmes d'études existants commence à la page 7 ;
- la structure du syllabus international est clairement apparente, même si cette structure ne l'est pas dans de nombreux curricula existants ;
- le programme est présenté de manière concise sur une seule page, car un programme concis est plus susceptible d'être accepté par les éducateurs et les enseignants qui ne sont pas spécialisés dans les sciences de la Terre ; des détails supplémentaires sont fournis par le biais d'exemples dans les pages suivantes pour indiquer l'étendue de la couverture, bien qu'il soit prévu que les détails varient d'un pays à l'autre ;
- le programme ne vise pas à indiquer une progression.

Programme international de géosciences, que tous les élèves doivent connaître avant l'âge de 16 ans - programme de base

À l'âge de 16 ans, les élèves devraient avoir acquis les connaissances suivantes

La Terre en tant que système en évolution

Attributs	ouverts à l'énergie, presque fermés à la matière, changeant au fil du temps, au sein du système solaire, comprenant la géosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère.
Interactions	Interaction entre la géosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère
Rétroaction	positive et négative
Processus et produits	cycle de l'eau, cycle des roches, cycle du carbone
Sources d'énergie	solaire, interne

La Terre est un système au sein du système solaire, au sein de l'univers.

Origines	Big bang ; accréation de la poussière ; étoiles ; planètes
Le soleil	La seule source d'énergie externe ; fluctuations
Effets de rotation	Jour/nuit, saisons, phases de la Lune, éclipses

La Terre est un système qui a changé au fil du temps

Temps géologique	Portée, événements majeurs, méthodes de datation relative et absolue, vitesse des processus.
------------------	--

Le système de la Terre comprend des sphères en interaction

Géosphère

Matériaux et propriétés de la Terre	Minéraux, fossiles, roches sédimentaires, ignées et métamorphiques, sol.
Processus terrestres et caractéristiques préservées	Processus de surface, processus sédimentaires, ignés et métamorphiques, déformation (AW)
Structure de la Terre et preuves	Croûte, manteau, noyau, lithosphère
Tectonique des plaques et preuves	Théorie unificatrice, construction des plaques et subduction, caractéristiques des marges des plaques, mécanisme, vitesses de mouvement ; preuves

Hydrosphère

Eau continentale	Emplacement, processus de mouvement, utilisations
Eau océanique	Composition, processus de mouvement

Atmosphère

Composition	Evolution, composition actuelle
Débit	Processus de mouvement
Changement	effet de serre, influences planétaires, influence humaine, impact sur le niveau de la mer

Biosphère

Évolution	Sélection naturelle, preuves fossiles, extinction de masse
Impact sur les autres systèmes	Rôle de la biosphère dans les systèmes terrestres

Le système terrestre produit des ressources

Matières premières et combustibles fossiles	Fossiles naturellement concentrés, non renouvelables, utilisations, doivent être gérées avec soin (développement durable), potentiellement polluantes.
---	--

Energies renouvelables	Enjeux
------------------------	--------

Interactions homme/système terrestre

Risques naturels	Impact humain, prévision, atténuation
Problèmes environnementaux	Locaux à mondiaux, atténuation

Impact sur l'histoire de l'humanité	Guerres de ressources ; migrations dues au changement climatique.
-------------------------------------	---

Le système terrestre est exploré par le biais de travaux sur le terrain et de travaux pratiques.

Observation	Observation, mesure et enregistrement
Synthèse des observations	Interprétation
Investigation et test d'hypothèses	conception et mise en œuvre de plans, traitement des données, formulation de conclusions, évaluation des résultats et communication des résultats.

Programme international de géosciences, que tous les élèves doivent connaître à l'âge de 16 ans - programme de base avec exemples.

À l'âge de 16 ans, les élèves devraient avoir acquis une compréhension des éléments suivants : Exemple du tronc commun pour indiquer l'étendue de la couverture (il est prévu que cela varie d'un pays à l'autre).

La Terre en tant que système changeant

Attributs ouverts à l'énergie, presque fermés à la matière, changeant au fil du temps, au sein du système solaire, comprenant la géosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère

Interactions interaction de la géosphère, de l'hydrosphère, de l'atmosphère et de la biosphère

Rétroaction positive et négative

Processus et produits Cycle de l'eau, cycle des roches, cycle du carbone

Sources d'énergie Solaire, interne

L'interaction lithosphère/hydrosphère provoque des processus côtiers ; l'interaction hydrosphère/atmosphère provoque des vagues et un réchauffement de l'atmosphère ; l'interaction atmosphère/biosphère contrôle la végétation du point de vue climatique ; l'interaction lithosphère/biosphère affecte la qualité du sol ; les taux varient de rapides à lents

positive - l'augmentation de la superficie des calottes glaciaires polaires entraîne une réflexion accrue de l'énergie solaire, ce qui entraîne un refroidissement accru ; négative - plus la quantité de dioxyde de carbone libérée dans l'atmosphère est importante, plus les océans en absorbent. Propriétés uniques de l'eau, évaporation, transpiration, condensation, précipitation ; altération/érosion, sédimentation, métamorphisme, fusion, activité ignée ; photosynthèse, respiration, enfouissement sous forme de calcaire/combustible fossile, libération par combustion/altération. énergie interne provenant de la radioactivité et énergie provenant de la formation de la Terre.

La Terre est un système dans le système solaire, dans l'univers.

Les origines Big bang ; accréation de la poussière ; étoiles ; planètes

Le Soleil Seule source d'énergie externe ; les fluctuations

Effets de rotation Jour/nuit, saisons, phases de la lune, éclipses.

La Terre est un système qui a changé au fil du temps

Temps géologiques Evénements majeurs, méthodes de datation relative et absolue, taux des processus

L'énergie solaire détermine le cycle de l'eau et la météo ; les fluctuations à long terme de l'énergie solaire sont liées au changement climatique

Evénements majeurs : 4600 millions d'années (Ma) - formation de la Terre ; 3600Ma - débuts de la vie ; 550Ma - animaux à parties dures ; 250Ma - extinction majeure, y compris les trilobites ; 65Ma - extinction majeure, y compris les dinosaures ; ère glaciaire de 1Ma ; principes de datation : superposition, relations transversales, corrélation des fossiles ; datation radiométrique ; les processus se déroulent sur un spectre de fréquence-magnitude allant de continu à catastrophique

Le système de la Terre comprend des sphères en interaction

Géosphère

Matériaux et propriétés de la Terre Minéraux, fossiles, roches sédimentaires, ignées et métamorphiques, sol

Définitions de : minéral, fossile, roche, roche sédimentaire, roche ignée, roche métamorphique, sol ; minéraux dont : quartz, feldspath, mica, grenat, calcite, halite, gypse, pyrite, galène ; fossiles dont : trilobite, ammonite, dinosaure ; processus de fossilisation dont : enfouissement, remplacement, moules et moulages, traces de fossiles ; texture des roches, porosité, perméabilité ; roches sédimentaires dont : calcaire, craie, conglomérat, grès, argile, schiste, sel gemme ; caractéristiques sédimentaires dont : stratification (litage), litage croisé, marques d'ondulation ; roches ignées dont : granite, basalte, andésite, gabbro, cendres volcaniques ; roches métamorphiques dont : ardoise, schiste, gneiss, marbre, métaquartzite (quartzite).

Processus terrestres et caractéristiques préservées Processus de surface, processus sédimentaires, ignés et métamorphiques, déformation (AW)

Altération (physique/chimique), érosion, transport, dépôt, lithification, métamorphisme, intrusion, extrusion, pliage, faille, jointure

Structure de la Terre et preuves croûte, manteau, noyau, lithosphère

Preuves sismiques

Tectonique des plaques et preuves Théorie unificatrice, construction des plaques et subduction, caractéristiques des marges des plaques, mécanisme, vitesse de déplacement ; preuves

Marges constructives, destructives et conservatrices ; preuves passées et présentes.

Hydrosphère

Eau continental Emplacement, processus de mouvement, utilisations

Eaux de surface, des eaux souterraines, des calottes glaciaires/glaciers ; infiltration, écoulement descendant ; gestion des ressources en eau

Eau océanique Composition, processus de mouvement

Salinité ; écoulement de surface et vagues causés par le vent ; écoulement en profondeur dû aux différences de densité causées par la température et la salinité

Atmosphère

Composition Evolution, composition actuelle

Dégazage par activité volcanique précoce ; azote, oxygène, gaz à l'état de traces dont la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone.

Flux Processus de mouvement

Chauffage inégal de la Terre, flux dû aux différences de densité causées par la température, source de chaleur océanique

Changement Effets de serre, influence planétaire, influence humaine, impact sur le niveau de la mer

Graphiques de température sur différentes périodes ; lien entre le changement de température et le niveau de la mer

Biosphère

Evolution Sélection naturelle, preuves fossiles, extinction de masse

Impact sur d'autres systèmes Rôle de la biosphère dans les systèmes terrestres

Le système terrestre produit des ressources

Matières premières et combustibles fossiles Naturellement concentrés, non renouvelables, utilisations, nécessité d'une gestion prudente (développement durable), potentiellement polluants

Energie renouvelable Enjeux

Interactions entre l'homme et le système terrestre

Risques naturels Impact humain, prévision, atténuation

Problèmes environnementaux Locaux aux mondiaux, atténuation

Impact sur l'histoire de l'humanité Guerre de ressources, migration due au changement climatique

Le système terrestre est exploré par le biais de travaux sur le terrain et de travaux pratiques.

Observations Observation, mesures et enregistrements

Synthèse des observations Interprétations

Investigation et test des hypothèses Conception et mise en œuvre de plans, traitement des données, conclusions, évaluation des résultats et communication des résultats.

Effets paléogéographiques sur l'évolution ; extinction massive par activité et impact volcaniques

Altération biologique ; dépôt biologique

Pétrole/gaz ; minerais métalliques ; matières premières en vrac ; exemples locaux d'exploitation minière/carrière

faible pollution, coût et régularité de l'approvisionnement

Eruption ; tremblement de terre ; tsunami ; glissement de terrain

L'impact mondial de l'homme (érosion, pollution, modification du drainage, extraction minière) ; combustion de combustibles fossiles et effet de serre

Environnement de la formation des roches ; histoire géologique ; questions environnementales.

Images et crédits d'images

CCA-SA	Creative Commons Attribution-Share Alike
ESEU	Earth Science Education Unit
GNUFDL	GNU Free Documentation Licence (Version 1.2)
ipd	in/into the public domain
ISAL	Image Science and Analysis Laboratory
NASA	National Aeronautics and Space Administration
USGS	United States Geological Survey
USNOAA	United States National Oceanic and Atmospheric Administration

Figures

Figure 0.1. Cailloux et formes de sable intéressants

- Cailloux. Publié par David Bleasdale sous licence générique CCA A 2.0
- Formes de sable. Publié par vastateparksstaff sous la licence CCA 2.0 Generic.

Figure 1.1. Systèmes ouverts et fermés

- Un lavabo. Publié par Chris McKenna sous licence ipd
- Ballon sous vide. Autorisé par Termolar S.A. sous licence CCA-SA 4.0 International.

Figure 1.2. La Terre - un système très complexe. Ce fichier est ipd car il a été créé uniquement par la NASA.

Figure 1.3. Extraction du sel d'une lagune salée côtière en Tunisie. Publié par Kalechnizar sous CCASA 3.0 Unported licence

Figure 1.4. La calotte glaciaire de l'Arctique en 1984 et 2012. Publié par <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=79256> et ipd car elle a été créée uniquement par la NASA

Figure 1.5. Une démonstration simple du cycle de l'eau. Photo : Chris King

Figure 1.6. Processus et produits du cycle de l'eau. Redessiné à partir de Sigried sous licence CCA-SA A 3.0 Unported. licence

Figure 1.7. Processus et produits du cycle de la roche

Figure 1.8. Processus et produits du cycle du carbone

Figure 2.1. Galaxies photographiées par le télescope Hubble

- Messier 96, une galaxie spirale. Publié par la NASA ipd
- Galaxies spirales en forme de rose. Publié par la NASA ipd
- Centre de NGC 1097. Publié par la NASA ipd

Figure 2.2. Le Soleil - notre principale source d'énergie. Publié par HalloweenNight sous licence CCA-SA 4.0 International licence

Figure 2.3. L'effet chauffant de l'angle du Soleil dans le ciel

Figure 2.4. Les phases de la Lune

Figure 2.5. La Lune devenant pleine. Publié par MKcray sous les termes de GNUFDL

Figure 2.6. Un collage de photographies d'une éclipse solaire partielle, vue d'Allemagne. Publié par Sgbeer selon les termes de la GNUFDL Version 1.2.

Figure 2.7. Un collage de photos d'une éclipse lunaire, vue de Californie, USA. Publié par Jason Snell sous licence générique CCA 2.0

Figure 3.1. La courbe de décroissance radioactive pour la décomposition de toutes les matières radioactives.

Figure 4.1. Porosité et perméabilité dans les roches.

Figure 4.2. Argentinosaurus d'Argentine, le plus grand type de dinosaure connu à ce jour et images au microscope électronique à balayage de minuscules microfossiles marins.

- Reconstitution d'Argentinosaurus dans une exposition spéciale du Naturmuseum Senckenberg, Francfort,

Francfort, Allemagne. Publié par Eva Kröcher dans le cadre du GNUFDL.

- Images SEM de microfossiles marins. Publiées par Hannes Grobe/AWI sous licence CCAA 3.0 Unported.

Figure 4.3. Fossilisation

Figure 4.4. Séquence pédologique à Altenberg, Allemagne. Publié par Failbub sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

Figure 4.5. Le refroidissement et la cristallisation des roches ignées

Figure 4.6. Corps ignés dans les océans

Figure 4.7. Les corps ignés sur les continents

Figure 4.8. Effets du métamorphisme thermique

Figure 4.9. Coupe transversale de la Terre

Figure 4.10. La géologie de la croûte terrestre. Publié par l'USGS et l'ipd car il ne contient que des matériaux qui proviennent de l'USGS

Figure 4.11. Les roches les plus courantes de la croûte continentale

- Granite. ESEU. Photo : Peter Kennett

- Gneiss. ESEU. Comme ci-dessus

- Mudstone. ESEU. Comme ci-dessus

Figure 4.12. La partie extérieure de la Terre

Figure 4.13. Le fond de l'océan Pacifique ; la dorsale océanique près du centre et les fosses à l'est et à l'ouest.

Publié par <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html> et dans le domaine public

Figure 4.14. Anomalies magnétiques au-dessus de la dorsale de Reykjanes, au sud-ouest de l'Islande. © Geoscience, redessiné par ESEU et utilisé avec la permission de ESEU.

Figure 4.15. La formation de bandes magnétiques par les basaltes des fonds océaniques. Modifié à partir de This Dynamic Earth :

The Story of Plate Tectonics (édition en ligne), par W. Jacquelyne Kious et Robert I. Tilling et ipd car il contient des éléments provenant de l'USGS.

Figure 4.16. La chaîne d'îles volcaniques et les monts sous-marins volcaniques liés au point chaud d'Hawaï dans l'océan Pacifique. Publié par le National Geophysical Data Center/USGS et ipd car il contient des matériaux provenant de l'USNOAA.

Figure 4.17. Failles transformantes décalant la dorsale océanique de l'océan Atlantique. Publié par <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html> et l'ipd parce qu'il contient des matériaux qui proviennent à l'origine de l'USNOAA

Figure 4.18. Nouvelle lithosphère océanique en cours de création sur la dorsale océanique au milieu de l'océan Atlantique. © Press & Siever, redessiné par ESEU, modifié et utilisé avec permission

Figure 4.19. La vallée du rift au centre d'une dorsale océanique

Figure 4.20. Une petite vallée de rift en Islande, liée au rifting de la dorsale océanique. Pont entre les continents dans péninsule de Reykjanes, dans le sud-ouest de l'Islande, à travers la vallée du rift d'Alfagja, la limite entre les plaques tectoniques continentales eurasienne et nord-américaine. Publié par Chris 73 sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

Figure 4.21. Une série de failles transformantes décalant une crête océanique et une vallée de rift. Dessiné par D. King

Figure 4.22. La faille de San Andreas en Californie, États-Unis. Publié par Robert E. Wallace et ipd car il contient des matériaux provenant de l'USGS.

Figure 4.23. Tremblements de terre enregistrés dans la zone de subduction des îles Kouriles ; les tremblements de terre sont codés par couleur en fonction de leur profondeur. Publié par l'USGS et l'ipd car il contient des matériaux provenant de l'USGS.

Figure 4.24. Subduction lors de la collision de deux plaques océaniques. Zone de collision de plaques océaniques. Reproduit avec permission de l'USGS, redessiné par l'ESEU et utilisé avec permission.

Figure 4.25. L'arc insulaire des Caraïbes. Publié par <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html> et l'ipd car il contient des matériaux provenant à l'origine de l'USNOAA

Figure 4.26. Le volcan Soufriere Hills en éruption sur l'île Monserrat dans l'arc insulaire des Caraïbes. Image prise par l'équipage de l'Expédition 21 de la NASA et diffusée ipd car elle a été créée uniquement par la NASA

Figure 4.27. Subduction d'une plaque océanique sous une plaque continentale. Reproduit avec l'autorisation de USGS, redessiné par ESEU et utilisé avec modification et autorisation

Figure 4.28. La zone de collision lors de la subduction de la plaque Nazca sous la plaque sud-américaine. Publié par <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html> et l'ipd parce qu'il contient des matériaux provenant de l'USNOAA

Figure 4.29. La chaîne de montagnes des Andes entre le Chili et l'Argentine. Publié par Jorge Morales Piderit et publié par ipd

Figure 4.30. Une zone de collision entre deux plaques continentales. Reproduit avec l'autorisation de l'USGS, redessiné par l'ESEU et modifiée, avec autorisation

Figure 4.31. La collision de la plaque indienne avec la plaque eurasienne, produisant la chaîne de l'Himalaya. Publié par <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html> et l'ipd parce qu'il contient des matériaux provenant de l'USNOAA

Figure 4.32. La chaîne de l'Himalaya vue depuis la Station spatiale internationale. Tiré de http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_152.html et ipd car elle a été créée par ISAL du Centre spatial Johnson de la NASA

Figure 4.33. Taux de déplacement des plaques. Redessiné à partir d'un diagramme publié par la NASA à l'adresse <https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html> et ipd car il a été créé uniquement par la NASA

Figure 4.34. Mécanismes de mouvement des plaques

Figure 4.35. Les principales plaques tectoniques de la Terre. Publié par l'USGS et l'ipd parce qu'il contient uniquement des matériaux provenant de l'USGS

Figure 4.36. Les aquifères

Figure 4.37. Essais de puits

Figure 4.38. Un panache de pollution des eaux souterraines. Redessiné à partir de <http://pbisotopes.ess.sunysb.edu/classes/geo101-notes-07/ex-2-5.htm>

Figure 4.39. Marée haute et marée basse, le pont Humber, Angleterre. Les deux images ont été publiées par David Wright sur le site Geograph et autorisées à être réutilisées sous licence CCA-SA 2.0.

Figure 4.40. La Lune à l'origine des bourrelets de marée

Figure 4.41. Changements de marée, un exemple à Bridgeport, Connecticut, USA. Publié par NickyMcLean et publié par ipd

Figure 4.42. Vagues - grandes et petites
 - Surf, Californie. Publié par 2010_mavericks_competition.jpg : Shalom Jacobovitz sous CC A-SA 2.0 Generic licence
 - Brise-vagues, Shingleton Beach, Australie occidentale. Publié par Orderinchaos sous CCA-SA 3.0 Unported licence

Figure 4.43. Courant chaud de couleur rouge circulant à la surface ; courant froid de couleur bleue circulant au fond Photos : Chris King

Figure 4.44. Circulation des masses d'air sur Terre. D'après un nouveau dessin de <http://www.bbc.co.uk/education/guides/zym77ty/revision/2>

Figure 4.45. Configuration généralisée des vents de surface sur la Terre. D'après un nouveau dessin de https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_circulation#/media/File:AtmosphCirc2.png

Figure 4.46. Circulations océaniques de surface. D'après un nouveau dessin de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/Corrientes-oceanicas.png>

Figure 4.47. Le schéma de circulation de la Terre, de la surface à la profondeur. D'après un nouveau dessin de https://en.wikipedia.org/wiki/Thermohaline_circulation#/media/File:Thermohaline_Circulation_2.png

Figure 4.48. Les meilleures zones de pêche, produites par la remontée des eaux froides des profondeurs océaniques. Publié par USNOAA et ipd parce qu'il contient des matériaux qui proviennent à l'origine de l'USNOAA.

Figure 4.49. La Terre "bille bleue" montrant la très fine couche d'atmosphère en violet autour de l'extérieur. Image ipd car elle a été créée uniquement par la NASA

Figure 4.50. La navette spatiale Endeavour en orbite dans l'atmosphère extérieure, montrant la couche orange de la troposphère et la couche blanche qui contient l'ozone. Image ipd car elle a été créée par ISAL du le Centre spatial Johnson de la NASA

Figure 4.51. Bactéries océaniques microscopiques qui font de la photosynthèse, absorbant le dioxyde de carbone et libérant de l'oxygène. Publié par le Doc. RNDr. Josef Reischig, CSc. sous licence CCA -SA 3.0 Unported

Figure.4.52. Les nuages en spirale d'un cyclone près de l'Islande le 4 septembre 2003. Image ipd car elle a été uniquement créée par la NASA

Figure 4.53. L'ouragan Isabel dans l'océan Atlantique Nord en 2003, avec l'œil caractéristique au centre. Image ipd car elle a été créée uniquement par la NASA.

Figure 4.54. Un anticyclone près du sud de l'Australie. Image ipd car elle a été créée uniquement par la NASA

Figure 4.55. Smog de pollution à Shanghai, en Chine, piégé sous de l'air frais descendant. Publié par DL5MDA sous les termes de la GNUFDL, Version 1.2

Figure 4.56. Un parapentiste utilisant les thermiques sur le bord d'une pente pour s'élever. Publié par Peter Greis, Stäfa, Suisse sous la licence générique CCA 2.0

Figure 4.57. La température passée de la surface de la Terre telle qu'elle ressort de plusieurs indicateurs. Redessiné à partir d'une image publiée par Glen Fergus sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

Figure 4.58. Extraction d'une carotte de glace à partir d'un tube de carotte prélevé dans un forage de glace. Publié par Lonnie Thompson, Byrd Polar Research Center, Ohio State University et ipd parce qu'il contient des matériaux provenant de l'USNOAA.

Figure 4.59. Graphiques de l'évolution de la température et de la variation du CO₂ de l'atmosphère au cours des 42 000 dernières années enregistrés dans la carotte de glace Vostok en Antarctique. Redessiné à partir d'une image publiée par l'USNOAA sous les termes de la GNUFDL, version 1.2.

Figure 4.60. L'effet de serre

Figure 4.61. Le changement des niveaux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, mesuré à partir de Moana Loa, Hawaii. Données du Dr Pieter Tans, USNOAA/ESRL et du Dr Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography. Redessiné à partir d'une image publiée par Delorme sous licence CCA-SA 4.0 International.

Figure 4.62. Changement de la température à la surface de la Terre, d'après des données compilées par la NASA. Redessiné à partir de données ipd car elles ont été créées uniquement par la NASA

Figure 4.63. Carte des continents 280Ma produite grâce à une collaboration entre l'Unité d'enseignement des sciences de la Terre et Cambridge Paleomap. Education Unit et Cambridge Paleomap Services Ltd, qui a produit les images cartographiques utilisées. ESEU remercie Alan Smith et Lawrence Rush du CPSL pour leur expertise et leur aide. L'image utilisée avec l'autorisation de l'ESEU.

Figure 4.64. Carte des continents 85Ma produite grâce à une collaboration entre l'Earth Science Education Unit et Cambridge Paleomap Services Ltd, qui a produit les images de la carte utilisée. L'ESEU remercie vivement reconnaît l'expertise et l'assistance d'Alan Smith et de Lawrence Rush du CPSL. Image utilisée avec permission de l'ESEU.

Figure 4.65. La tendance à long terme de la vie sur Terre et les principales extinctions, comme le montre le nombre de genres (groupements biologiques contenant le nombre d'espèces). Redessiné à partir d'une image publiée par Référence : Rohde, R.A., et Muller, R.A. (2005-03). Cycles in Fossil Diversity. Nature 434 : 208-210, version SVG version par Albert Mestre sous licence CCA-SA 3.0 Unported

Figure 5.1. Coupe commerciale de tourbe, Ljungby, Suède. Publié par Masse et diffusé par ipd

Figure 5.2. Une mine de charbon à ciel ouvert dans une veine de charbon à fort pendage, révélant une ancienne galerie d'extraction profonde, Foord dans la formation carbonifère de Stellarton, Stellarton, Nouvelle-Écosse, Canada. Publié par Michael C. Rygel sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

Figure 5.3. Deux dalles de grès dans de l'huile de moteur - montrant comment différents grès peuvent absorber différentes quantités d'huile dans leurs pores. Peter Craig dans King C. (2017) Scottish 'Bring and Share'. Tiré de la conférence ESTA de St Andrews, septembre 2016. Teaching Earth Sciences 41.2. pp 24-5

Figure 5.4. Un piège formé de roches repliées (et d'anticlinaux) - ceux-ci peuvent contenir du pétrole ou du gaz ou les deux ensemble. Modifié pour inclure l'eau dans la roche réservoir. Publié par MagentaGreen sous licence CCA-SA 3.0 Unported licence

Figure 5.5. Consommation énergétique mondiale. Publié par Martinburo à partir de Bp_world_energy_consumption_2016.gif sous licence CCA-SA 4.0 International Figure 5.6. Consommation d'énergie récente. Données extraites de <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energyeconomics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>

Figure 5.7. Quantités de dioxyde de carbone libérées par la combustion de différents combustibles fossiles pour produire la même quantité d'énergie. Données de l'administration américaine d'information sur l'énergie (USEIA) à l'adresse suivante <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=73&t=11>

Figure 5.8. Production récente d'énergie à partir de différentes sources renouvelables. Données tirées du rapport sur la situation mondiale de REN21 tableau R1 extrait de http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf

Figure 6.1. " Bombes " de lave liquide en éruption la nuit par Stromboli, près de la Sicile, en Italie, 2013. Publié par Drtrotsky sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

Figure 6.2. Exemple de carte des risques volcaniques, Mont Rainier, État de Washington, États-Unis. Publié par Sémhur et ipd car elle ne contient que des matériaux provenant à l'origine de l'USGS ; clé modifiée

Figure 6.3. Tremblement de terre et ondes sismiques. Redessiné à partir d'une image de Dollynarak et publié par l'ipd

Figure 6.4. Le tsunami provoqué par le séisme de Valdivia en 1960, montrant les temps de parcours dans l'océan Pacifique. Publié par http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1960_05_22_tsunami.php et ipd parce qu'il contient des matériaux qui proviennent à l'origine de l'USNOAA.

Figure 6.5. Le logo du programme national américain d'atténuation des risques liés aux tsunamis. Tiré de <http://nws.weather.gov/nthmp/documents/NTHMPStrategicPlan.pdf>. Publié par USNOAA/National Science Foundation et ipd parce qu'il contient des matériaux qui proviennent à l'origine de l'USNOAA.

Figure 6.6. Érosion d'un sentier pédestre, forêt de Fontainebleau près de Paris, France. Publié par Romary sous les termes du GNUFDL

Figure 6.7. Drain d'orage, Dobney Avenue, Wagga Wagga, Nouvelle-Galles du Sud, Australie. Publié par Bidgee sous les termes de la licence CCA-SA 3.0 Unported

Figure 6.8. Gestion des déchets à Katmandou, Népal. Publiée par Sigismund von Dobschütz sous les termes de la licence GNUFDL

Figure 6.9. Gestion des déchets à Stockholm, Suède. Publié par Holger.Ellgaard sous les termes de la licence CCA-SA 3.0 Unported licence

Figure 6.10. Décharge de South East New Territories revêtue d'une membrane géotextile, Hong Kong. Publié par Minghong sous les termes de la licence GNUFDL, Version 1.2

Figure 6.11. Série d'événements de méthane sur un ancien site d'enfouissement paysager où des schistes bitumineux ont été excavés dans le passé, à Seafield, à l'ouest de Londres. Publié par Paul Birrell dans le cadre de la collection du projet Geograph sous la licence CCA-SA 2.0 Generic.

Figure 6.12. Diagramme d'un puits de surveillance des eaux souterraines typique. Publié par AuntSpray sous la licence CCA-SA 3.0 Unported licence

Figure 6.13. Sphérules de microplastique s'écoulant d'une éponge à récuser dans un bol blanc. Publié par Hungchaka sous la licence CCA-SA 4.0 International

Figure 6.14. Réserve naturelle de Heeseberg dans une ancienne carrière, Basse-Saxe, Allemagne. Publié par Manomaari sous la licence CCA-SA 3.0 Unported

Figure 6.15. Technologie de capture du carbone testée dans une mine de charbon. Publié par Peabody Energy, Inc sous licence CCA 3.0 Unported

.....
Encadrés

Encadré 1.1. Le système solaire. Diffusé par Planets2008.jpg sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

Encadré 1.2.

- Pluie près de Lunde, Funen, Danemark. Publié par Malene Thyssen sous licence GNUFDL
- Sol. Publié par Ichor202 sous GNUFDL
- Une source prise dans une auge en pierre, Owlcots Lane près de Bradford, Angleterre. Publié par Betty Longbottom dans le cadre de la collection du projet Geograph, sous licence CCA-SA 2.0 Generic.

Encadré 1.3.

- Gouttes de pluie tombant sur l'eau. Publié par Juni de Kyoto, Japon, sous la licence CCA-SA 2.0 Generic.
- Caniveau de rue dans la vieille ville de Stockholm, en Suède. Publié par Bengt Nyman sous la licence CCA 2.0 Generic
- Étang de Dasher Bari. Publié par Syed Aminul sous la licence CCA-SA 4.0 International

Encadré 1.4. Motif de sable, Barton on Sea, Hampshire, Angleterre. Publiée par Clive Perrin dans le cadre du Geograph project et publié sous licence CCA-SA 2.0 Generic.

Encadré 1.5. Randonneur se reposant sur la toundra près d'Onion Portage en Alaska. Publié par Western Arctic National Parklands sous licence CCA 2.0 Generic.

Encadré 2.1. L'univers depuis votre propre jardin

- La chapelle Savault par une nuit claire et étoilée, à Ouroux-en-Morvan, en Bourgogne, France. Publié par Benh Lieu Song sous licence internationale CCA-SA 4.0
- Un paysage d'étoiles tourbillonnant au-dessus de l'Observatoire de La Silla au Chili. Publié par l'Observatoire européen austral Southern sous licence CCA 4.0 International

Encadré 2.2. La ceinture d'astéroïdes

- La ceinture principale d'astéroïdes. Libéré ipd par son auteur, Mdf à English Wikipedia
- L'astéroïde Gaspra pris par le vaisseau spatial Galileo. Ipd parce qu'il a été créé uniquement par la NASA.

Encadré 2.3. Comètes

- La comète Hale-Bopp vue de Croatie en 1997. Publié par Philipp Salzgeber sous licence CCA-SA 2.0 Licence Autriche
- La comète Churyumov-Gerasimenko en septembre 2014, telle qu'imagée par Rosetta. Publié par ESA/Rosetta/NAVCAM, CC BY-SA IGO 3.0 sous licence CCA-SA 3.0 IGO.

Encadré 2.4. Géologie planétaire - Mars

- Carte géologique de Mars. Tirée de http://pubs.usgs.gov/sim/3292/pdf/sim3292_map.pdf. Publié par USGS et ipd car il s'agit d'un travail préparé par un agent ou un employé du gouvernement américain dans le cadre des fonctions officielles de cette personne.
- Le système de canyons faillés près de l'équateur. Publié par NASA/JPL/USGS et l'ipd parce qu'il contient des documents provenant de l'USGS
- Canal d'écoulement de Kasei Valles. Publié par Areong selon les termes de la GNUFDL.
- Image de la NASA modifiée par Jim Secosky. Image reproduite avec l'aimable autorisation de la NASA/USGS et de l'ipd car elle ne contient que des éléments provenant de l'USGS.
- Vue du site Pathfinder sur Mars. De <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02405> et ipd car elle a été créée uniquement par la NASA

Encadré 2.5. Modification des ombres en fonction de l'heure de la journée

- Photos : Chris King

Encadré 3.1. Utilisation de méthodes de datation relative pour déterminer l'histoire géologique des roches

- Formation rocheuse à Machtsh Ramon, Israël. Publié sous les termes du GNUFDL

Encadré 3.2. Un exemple de période géologique - le Trias

- Le " pic doré " à la limite globale du stratotype, de la section et du point (GSSP) de l'étage ladinien (Trias moyen supérieur), dans la région de l'île de la Réunion. Publié par Xavier Caré sous CCA-SA 3.0

Unported licence

Encadré 3.3. La marge d'erreur donnée par les dates absolues radiométriques

- Vue d'Édimbourg sous les roches volcaniques d'Arthur's Seat en Écosse. Publié par Andrew Bell sous licence CCA-SA 3.0 Unported et 2.5, 2.0 et 1.0 Générique

Encadré 3.4. Des processus très, très rapides aux processus très, très lents

- Carottes de sédiments profonds provenant de la mer profonde près du Groenland. Publié par Hannes Grobe sous licence CCA 3.0 Unported

- Couche grise d'un dépôt de tsunami vieux de 8 000 ans, déposé en quelques minutes, avec des couches de tourbe foncée au-dessus et au-dessous, provenant du Storegga dans le bassin de Montrose, Maryton, Écosse. Publié par Stozzy10 sous la licence CCA-SA 3.0 Unported.

Encadré 3.5. Événements d'impact catastrophiques

- Formes courantes de la tektite. Publié par Brocken Inaglory sous les termes de la licence GNUFDL

- Quartz choqué sous le microscope en lumière polarisée croisée. Publié par Glen A. Izett et ipd car il ne contient que des matériaux provenant de l'USGS.

- Cratère météoritique de Lonar en Inde. Publié par Nagwani sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

- Le cratère Manicouagan, d'une largeur de 100 km, dans la région de la Côte-Nord du Québec, au Canada. Publié sur <http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/station/crew-30/html/iss030e031663.html> et ipd car elle a été créé par ISAL du Centre spatial Johnson de la NASA.

- Cratère météorique près de Flagstaff en Arizona, aux États-Unis, montrant la dépression typique avec un centre surélevé, entourée par le bord du cratère. Publié par Neil à www.nabber.org sous licence CCA 3.0 Unported.

- Étapes de l'impact. Redessiné à partir de : <http://www.impact-structures.com/understanding-the-impact-crateringprocess-a-simple-approach/>

Encadré 4.1. Un minéral inhabituel : le diamant

- La cheminée de diamant "big hole", Kimberley, Afrique du Sud. Publié par Lubor Ferenc sous licence CCA-SA 4.0 Licence internationale

- Diamant dans la kimberlite. Cette image est ipd car elle ne contient que des matériaux qui proviennent à l'origine de USGS

- Diamants taillés. Publié par Mario Sarto selon les termes de la GNUFDL, version 1.2.

Encadré 4.2. Une roche sédimentaire inhabituelle - le chert (ou silex)

- Silex dans la craie du Crétacé à St Margaret-at-Cliffe près de Douvres, Kent, Angleterre. Publié par Clem Rutter, Rochester, Kent, UK sous GNUFDL

- Pointe de flèche en silex. Publié par Adrian Michael sous GNUFDL.

- Chert dans du calcaire. Publié par Acar54 et Benzer Fotoğraflar sous licence CCA-SA 4.0 International.

Encadré 4.3. Une roche ignée inhabituelle - le verre volcanique

- Coulée de lave de verre volcanique, Paulina Lake, Newberry National Volcanic Monument, Oregon, États-Unis. Le site détenteur du droit d'auteur de ce fichier permet à quiconque de l'utiliser à n'importe quelle fin - Gary Halvorson, Oregon State Archives, USA.

- Spécimen d'obsidienne, pays des lacs, Oregon. Publié par PAR~commonswiki qui a libéré le travail ipd

- Couteau en obsidienne. Publié par Birmingham Museums Trust, Tom Brindle sous CCA-SA 2.0 Licence générique

Encadré 4.4. Charles Darwin et les vers

- Photos du ver de terre : Peter Kennett, Earthlearningidea

Encadré 4.5. Le forage superprofond de Kola. Publié par Andre Belozeroff sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

Encadré 4.6. Formation sous-marine de laves en coussins

- Une langue de lave sous l'eau. Publié par USNOAA/National Science Foundation et dans le domaine public car il contient des documents provenant de l'USNOAA.
- Des oreillers sur le fond marin près d'Hawaï. Publié par OAR/National Undersea Research Program (NURP) et ipd parce qu'il contient des matériaux provenant de l'USNOAA.
- Ancienne lave en coussin, coupe transversale. Peter Kennett, ESEU

Encadré 4.7. De quoi est fait le manteau ?

- Xénolites de péridotite dans une roche volcanique, basalte ; xénolites d'herzolite à base d'olivine. Publié par Khruner sous licence internationale CCA-SA 4.0
- Roche obductée, vraisemblablement issue du manteau, serpentinite chromitique du complexe de Kraubath (Complexe de Speik) dans les Alpes orientales d'Autriche. Publié par James St John sous licence CCA 2.0 Licence générique
- Météorite pierreuse de la météorite NWA 869. Publiée par H. Raab (User:Vesta) sous les termes de la GNUFDL

Encadré 4.8. De quoi est fait le noyau ?

- Une météorite individuelle de 1,7 kg provenant de la pluie de météorites Sikhote Alin. Publié par H. Raab (User:Vesta) selon les termes de la GNUFDL, version 1.2.

Encadré 4.9. La découverte de fumeurs noirs sur les dorsales océaniques

- Alvin. Publié par l'USNOAA et l'ipd car il contient des matériaux qui proviennent à l'origine de l'USNOAA.
- Fumeur noir dans une cheminée hydrothermale de dorsale océanique moyenne. Publié par l'USNOAA et l'ipd car il contient des matériaux provenant de l'USNOAA.
- Fumeurs blancs, Arc des Mariannes, océan Pacifique. Publié par l'USNOAA et l'ipd car il contient des matériaux provenant de l'USNOAA.

Encadré 4.10. Nappes de chevauchement produites par des collisions de plaques

- Le chevauchement de Glaris dans les Alpes suisses, Martinsloch, Tschingelhörner. Publié par Sunna sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Le pli de la Dent de Morcles. Publié par Lysippos sous les termes de la licence GNUFDL

Encadré 4.11. Eaux de source vendues dans le commerce

- Evian. Publié par Arroser sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Geysir de cristal. Publié par Cgroxane et ipd
- Sasal. Publié par Vincent de Groot à <http://www.videgro.net> sous les termes de la licence GNUFDL
- Evergrande. Publié par WKDx417 sous licence CCA-SA 4.0 International.
- Fontaine à eau Cre Cla au Japon. Publié par Pedia-City et diffusé ipd

Encadré 4.12. Méthodes de pompage des eaux souterraines

- Station de pompage victorienne, Londres, Angleterre. Publiée par R Sones pour le projet Geograph et sous licence de réutilisation CCA-SA 2.0.
- Pompes à vent, Namaqualand, Afrique du Sud. Publié par Caroline Auzias (voir Delphine Ménard pour plus de détails) sous licence CCA-SA 2.0. France
- Pompe à eau souterraine moderne. Publié par John Poyser pour le projet Geograph et autorisé à être réutilisé sous licence CCA-SA 2.0
- Une pompe à main moderne, gare ferroviaire de Pindial, Inde. Publié par Nikhilb239 sous licence CCA-SA 4.0 Licence internationale

Boîte. 4.13. Les courants océaniques et l'île la plus polluée de la planète. Paroles de la scientifique Jennifer Lavers tirées de <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4507612/World-s-polluted-island-revealed.html>

- Courants océaniques de surface circulant dans le nord et le sud de l'océan Pacifique. Ipd car il contient du matériel provenant de l'USNOAA
- La plage polluée de l'île Henderson dans l'océan Pacifique sud. Publié par American sous les termes du GNUFDL

Encadré 4.14. Terre boule de neige ou Terre boule de glisse ?

- Une simulation informatique de la couverture de glace pendant la "Terre boule de neige". Publié par Linda Sohl et Mark Chandler sur http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/sohl_01/ et ipd car elle a été créée uniquement par la NASA.

Encadré 4.15. La Terre pendant le maximum thermique du Paléocène/Eocène.

- Graphique de l'évolution de la température du Paléocène à nos jours. Publié par Robert A. Rohde pour Global Warming Art sous licence CC-SA 3.0 Unported.

Encadré 4.16. Charles Darwin et l'évolution

- Le parcours du voyage du Beagle. Publié par Sémhur sous licence CCA-SA 4.0 International generic internationale générique
- Les pinsons de Darwin de l'île des Galápagos. Dessiné par John Gould et ipd car la durée du droit d'auteur est de la vie de l'auteur plus 100 ans ou moins

Encadré 4.17. La ligne Wallace

- Carte de l'Asie du Sud-Est publiée par <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html> et par l'ipd parce qu'elle contient des matériaux qui proviennent à l'origine de l'USNOAA

Encadré 4.18. L'extinction massive du " grand mourant

- Glossopteris du Musée des sciences naturelles de Houston, Houston, Texas, États-Unis. Publié par Daderot sous licence CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication.

Encadré 4.19. L'extinction de masse K-Pg

- Tyrannosaurus rex, l'un des derniers groupes de dinosaures découverts avant l'extinction de masse K-Pg, Museum of les Rocheuses. Publié par FunkMonk sous licence CCA-SA 2.0 Generic.
- Collecte de cendres à la limite K-Pg. Publié par Dcondon sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

Encadré. 4.20. L'hypothèse Gaia de James Lovelock

- StandardDaisyWorldRun2color.gif Redessiné à partir d'une image de Ginger Booth et publié par ipd

Encadré 5.1. Valves de puits de pétrole

- Arbre de Noël, Dakota du Nord, États-Unis. Publié par Tim Evanson sous licence CCA-SA A 2.0 Generic.
- Gusher - Gusher de Lakeview aux Etats-Unis, vers 1911. Publié sur <http://www.sjvgeology.org/history/lakeview/lakeview09.jpg> et ipd

Encadré 5.2. Fracking du schiste

- Redessiné à partir d'une image de MagentaGreen publiée sous licence internationale CCA-SA 4.0

Encadré 5.3. Prospection sismique

- Profil sismique et interprétation. Publié par l'USGS et l'ipd car il ne contient que des matériaux provenant de l'USGS.

Encadré 5.4. Comment trouver une mine de diamants

- Échantillonnage de minéraux lourds, concentré de jig et concentré de minéraux lourds. Photo : Chris King
- Mine de diamant Premier, Cullinan, Afrique du Sud. Publié par Paul Parsons (paul.parsons@hyphen.co.za) sous licence CCA-SA 3.0 Unported

Encadré 5.5. L'énergie géothermique - est-elle renouvelable ?

- Forage d'une centrale géothermique, Brühl, ouest de l'Allemagne. Publié par AnRo0002 sous Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication

Encadré 6.1. Une éruption colossale - le Krakatoa en 1883

- Lithographie tirée de The Eruption of Krakatoa, and Subsequent Phenomena, 1888. Édité par George James Symonds (1838-1900). Publié par la Royal Society (Royaume-Uni). Comité Krakatoa, 71-1250, Houghton Library, Harvard University, USA. Library, Harvard University, USA. Ipd car la durée du droit d'auteur est la durée de vie de l'auteur plus 100 ans ou moins

- Peintures du ciel à la lueur de l'éruption du Krakatoa en 1888, réalisées par William Ashcroft et incluses dans The Eruption of Krakatoa, and Subsequent Phenomena (1888), édité par George James Symonds 71-1250, Houghton Library, Harvard University et ipd car il a été produit il y a plus de 100 ans.

Encadré 6.2. Une éruption méga-colossale - l'éruption Oruanui du volcan Taupo, il y a environ 25 360 ans

- Impression d'artiste de l'éruption de l'Oruanui. Publié par Anynobody, d'après une photographie de la NASA, publié sous CCA-SA

Encadré 6.3. La théorie du rebond élastique

- Mouvement du sol dans la théorie du rebond élastique de H.F. Reid.

Encadré 6.4. Sismomètres

- Équipement d'enregistrement sismique, golfe de Corinthe, Grèce. Photos : Chris King

- Deux sismomètres, Laboratoire sismologique de Patras, Grèce. Photo : Chris King

- Enregistrement du tambour d'un sismomètre. Publié par Z22 sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

Encadré 6.5. Le tremblement de terre de Kobe, Japon, 1995

- Reportage de Yasuyo Morita sur <http://www.sln.org.uk/geography/7-11kobe.htm>

- Dommages causés à un viaduc à Kobe. Diffusé par ! ! ! ! sous licence CCA-SA 4.0 International.

Encadré 6.6. Le tremblement de terre du Cachemire, Pakistan, 2005 - magnitude 7,6

- L'histoire de la mère Shazia Ahmed. Tiré de <https://www.oxfam.org.nz/what-we-do/emergencies/previousemergencies/kashmir-earthquake-2005/stories-from-balakot>

- Shazia avec son bébé qui a survécu pendant trois jours dans les décombres avant d'être secouru.

Oxfam à partir de <https://www.oxfam.org.nz/what-we-do/emergencies/previous-emergencies/kashmir-earthquake-2005/stories-from-balakot>

La ville dévastée de Balakot. Publiée par l'US Air Force et ipd - préparée par un officier ou un employé du gouvernement américain

Encadré 6.7. Un plan antisismique

- Panneau de préparation aux tremblements de terre à Vancouver, Canada. Publié par Wikiemon sous licence CCA-SA 3.0 Unported license

- L'Earthquake Country Alliance en Californie met en avant les "Sept étapes pour la sécurité en cas de tremblement de terre" <http://www.earthquakecountry.org/sevensteps/>

Encadré 6.8. Tsunami de 2011, Tōhoku, Japon

- Récit d'un témoin oculaire tiré de <http://factsanddetails.com/japan/cat26/sub161/item1674.html#chapter-10>

- Hôpital public de Minamisanriku après le tsunami de 2011 à Tōhoku, Japon. Publié par Christopher Johnson sous licence CCA-SA 2.0 Generic.

Encadré 6.9. Le tsunami de l'océan Indien, 2004

- Interview transcrite à partir de la vidéo de l'UNISDR publiée sur Youtube à l'adresse

<https://www.youtube.com/watch?v=V0s2i7Cc7wA>

- Vague de tsunami frappant la côte de Phuket. Publié par FlyAkwa sous licence CCA-SA 4.0 International.

Encadré 6.10. Informations sur l'alerte aux tsunamis

- Fiche publiée en ligne par le service météorologique national du département du commerce de l'USNOAA, la Commission océanographique intergouvernementale et le Centre international d'information sur les tsunamis à l'adresse suivante
<https://earthweb.ess.washington.edu/tsunami/general/mitigation/mitigation.html>

Encadré 6.11. La coulée de boue d'Oso, Espagne, 29 mars 2014

- Récit d'un témoin oculaire sur <https://www.earthmagazine.org/article/oso-landslide-report-yields-someanswers>
- La coulée de boue d'Oso et sa cicatrice. Publié par Samantha Ciaramitaro et ipd.

Encadré 6.12. Drainage minier acide

- Drainage d'une ancienne mine, Rio Tinto, Espagne. Publié par Carol Stoker, NASA et ipd parce qu'il a été exclusivement créé par la NASA

Encadré 6.13. La fin de la civilisation minoenne

- Vue satellite du cratère de Santorin (Thera) aujourd'hui. Publié par la NASA et l'ipd

Encadré 6.14. L'année sans été ", 1816

- Chute de température en Europe en 1816. Tiré de http://www.giub.unibe.ch/klimet/docs/luterbacheretal_science.pdf. Publié par Giorgiopp2 sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Chichester Canal, une scène de coucher de soleil peinte au Royaume-Uni par J.M.W. Turner. IpD car la durée du droit d'auteur est la vie de l'auteur plus 100 ans ou moins

Encadré 6.15. Les guerres de l'eau

- Le fleuve Jourdain, qui apporte de l'eau à Israël depuis le nord. Publié par Jean Housen sous les termes de GNUFDL

Encadré 6.16. Guerres du pétrole

- Champs de pétrole en feu derrière un réservoir abandonné, Koweït, 1991. Publié par JO1 Gawlowicz de l'US Navy et donc ipd

Encadré 6.17. La migration des premiers humains hors d'Afrique

- La propagation des premiers groupes humains à travers le monde, avec les dates de propagation : Premièrement, Homo erectus ; Deuxièmement, Homo neanderthalensis ; Troisièmement, Homo sapiens. Redessiné à partir d'une image publiée par NordNordWest et publié par l'ipd

Encadré 6.18. L'assèchement du Sahara

- Grotte de Manda Guéli, montagnes de l'Ennedi, nord-est du Tchad. Publié par David Stanley de Nanaimo, Canada sous licence CCA-SA2.0 Generic.
- Formation rocheuse, monts Ennedi, Tchad. Publiée par David Stanley de Nanaimo, Canada sous la licence générique CCA 2.0

Encadré 6.19. Le "Doggerland" dans la région de la mer du Nord

- Carte du Doggerland. Redessinée à partir d'une image publiée par Max Naylor sous licence CCA-SA 3.0 Unported licence

Encadré 7.1. La promesse géoéthique. Tiré de <http://www.geoethics.org/geopromise>

- Prestation de serment à Yuma, Arizona. Publiée par un employé de l'armée américaine ou du ministère de la Défense, prise ou réalisée dans le cadre des fonctions officielles de cette personne. En tant qu'œuvre du gouvernement fédéral américain, l'image est ipd.
- Enfants afghans. Publiée par un soldat ou un employé de l'armée américaine, comme ci-dessus.

Encadré 7.2. Enquêtes de cartographie géologique

- Limite géologique entre le grès gris et le granite pâle à grain fin, contact de Sea Point, Le Cap. Town. Photo : Chris King
- Un changement important de la pente à la limite géologique entre les roches ignées dures d'un filon-couche à droite et les roches sédimentaires plus faibles à gauche. Vue le long du seuil de Whin vers Crag Lough, depuis le sommet de Milecastle 39 sur le mur d'Hadrien, dans le nord de l'Angleterre. Publié par Nilfanion sous licence CCA-SA 3.0 Unported Licence

Encadré 7.3. Une enquête de prospection pour des diamants

- Photos : Chris King

Tableaux

Tableau 2.1. Planètes du système solaire

- Mercure d'après le survol de Messenger. Publié par la NASA et l'ipd
- Vénus d'après les images de Mariner 10. Publié par la NASA et l'ipd ; traitement d'image par R. Nunes sur <http://www.astrosurf.com/nunes>
- Terre suivant le tutoriel de BlenderGuru.com. Publié par Jason Harwell sous licence CCA-SA 3.0 Unported licence
- Mars vue par le télescope Hubble. Publié par la NASA et ipd
- Jupiter à partir des images de Voyager 1. Comme ci-dessus
- Saturne vue par Voyager 2. Comme ci-dessus
- Uranus d'après Voyager 2. Comme ci-dessus
- Neptune depuis Voyager 2. Comme ci-dessus

Tableau 2.2. L'inclinaison de la Terre à l'origine des saisons

Tableau 3.1. Méthodes de datation relative

- Craie inclinée à Chypre. Libéré ipd par son auteur, MeanStreets, sur English Wikipedia
- Roche plissée au Groenland. Publié par Håvard Berland sous les termes de GNUFDL
- Dykes au Colorado, États-Unis. Publié par Wing-Chi Poon sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Xénolites dans le granit, Herm, îles Anglo-Normandes, Royaume-Uni. Publié par Kevin Walsh sous la licence CCA 2.0 Licence générique
- Le dessin de William Smith. IpD car la durée du droit d'auteur est la vie de l'auteur plus 70 ans ou moins
- Discordance à Bochum, en Allemagne, où la roche crétacée la plus jeune recouvre la roche carbonifère inclinée située en dessous. Publié par Hermann A. Wiese selon les termes du GNUFDL.

Tableau 3.2. Principes de mise en place des sédiments, des laves et des cendres volcaniques

- Sédiments miocènes déposés horizontalement, Drahomyrchany, Ukraine. Publié par Gretarsson sous Licence internationale CCA-SA 4.0
- Sables à lits croisés, Estonie. Publié par Hannu et diffusé sous ipd
- Grand Canyon, Arizona, États-Unis. Publié par selbst gemacht sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Dépôts fluviaux en tresse en Islande. Publié par Christopher Michel sous licence CCA 2.0 Generic

Tableau 3.3. La méthode de William Smith appliquant la "loi de la succession faunistique". Tous les dessins de William Smith sont protégés par le droit d'auteur puisque la durée du droit d'auteur est la vie de l'auteur plus 70 ans ou moins.

Tableau 3.4. Fossiles typiques trouvés dans des roches d'âges différents

- Pétoncle gibbeux *Argopecten*. Publié par le FWC Fish and Wildlife Research Institute sous licence CCA 2.0 Licence générique
- Huître *Crassostrea titan*. Publié par Kevmin sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Dents fossiles de *Carcharias tingitana* du Maroc. Publié par Hectonichus sous CCA-SA 3.0 Licence libre
- Échinoderme *Micraster leskei*. Publié par Didier Descouens sous licence CCA-SA 4.0 International
- Ammonite *Calliphylloceras*. Libéré ipd par Antonov
- Ammonoïde *Ceratites ceratite*. Publié par BerndH sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Goniatite. Publié par Ghedoghedo sous licence CCA-SA 4.0 International
- Phacops. Publié par Dwergenpaartje sous la licence CCA-SA 3.0 Unported
- Monograptus. Publié par porshunta sous les termes de la licence GNUFDL
- Tetragraptus. Publié par James St John sous la licence CCA 2.0 Generic.
- Paradoxides. Publié par Sam Gon III pour une utilisation à toutes fins utiles.

Tableau 3.5. Les principales subdivisions des temps géologiques

Tableau 4.1. Les minéraux courants, leur chimie, leur forme et leurs propriétés physiques

- Quartz. Publié par Luis Miguel Bugallo Sánchez sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Feldspath - cristaux de feldspath potassique dans du granite, Sierra Nevada orientale, Rock Creek Canyon, Californie, USA. Libéré par Wilson44691, ipd
- Mica. Publié par Pascal Terjan sous la licence CCA-SA 2.0 Générique
- Calcite - un amas de cristaux de calcite jaunâtre en dents de chien provenant de la mine de Nkana en Zambie. Publié par Rob Lavinsky, iRocks.com - CC-BY-SA-3.0
- Halite, provenant de la mine de sel de Wieliczka en Pologne. Publié par Lech Darski sous CCA-SA 4.0 Licence internationale
- Gypse - sous sa forme de "rose du désert". Publié par Rama sous licence CCA-SA 2.0 France
- Pyrite. Publié par Mauro Cateb sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Galène sur calcite, provenant de la mine Gibraltar, Naica, Municipio de Saucillo, Chihuahua, Mexique. Publié sur par Rob Lavinsky, iRocks.com - CC-BY-SA-3.0

Tableau 4.3. Processus importants de fossilisation

- Mammifère fossile à fourrure - le fossile Eomaia scansoria exposé au Musée des sciences de Hong Kong, en Chine. Publié par Laikayiu sous GNUFDL
- Un trilobite Calymene - recueilli dans la formation Henryhouse près d'Ada, Oklahoma, USA, du Silurien. Publié par Dwergenpaartje sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Ammonite remplacée par de la pyrite, Bully Calvados, France. Publié par Didier Descouens sous CCA 3.0 Licence non publiée
- Moule interne et externe de gastéropode, Formation de Galena, Ordovicien, Iowa, USA. Publié par James St John sous licence générique CCA 2.0
- Moulage d'une empreinte de dinosaure, Fairlight, Sussex, Angleterre. Publié par Sandpiper sous licence CC0 1.0 Universelle Dédicace du domaine public
- Terriers et lieu de repos des trilobites - Rusophycus et autres traces fossiles de la formation de Gog (Cambrien moyen), Lake Louise, Alberta. Publié par Wilson44691 et diffusé sur ipd
- Racine et radicules de Lepidodendron - Carbonifère supérieur du nord-est de l'Ohio, États-Unis. Publié par Wilson44691 sous licence CCA-SA 3.0 Unported Licence

Tableau 4.5. Roches sédimentaires communes

Images des spécimens

- Conglomérat. ESEU. Photo : Peter Kennett
- Grès crème. ESEU, comme ci-dessus
- Grès rouge. ESEU, comme ci-dessus
- Grès boueux, ESEU, comme ci-dessus
- Schiste. Publié par Amcyrus2012 sous licence CCA 4.0 International
- Argile de San Julian, Santa Cruz, Argentine. Publié par Beatrice Murch sous CCA 2.0 Licence générique
- Calcaire fossilifère. ESEU, comme ci-dessus
- Calcaire oolithique. ESEU, comme ci-dessus
- Craie. Publié par Superagent001 sous licence internationale CCA 4.0
- Sel gemme - Sel gemme mongol du bassin d'Uvs Nuur, Mongolie. Publié par GFDL (Auteur Mizu Basyo) sous GNUFDL
- Charbon. ESEU, comme ci-dessus

Images d'exposition

- Exposition de conglomérat, montagne Adarra, San Sebastian, Espagne. Publié par Joxemai sous CCA-SA 3.0 Unported licence
- Grès crème à lits croisés, île de Bressay, îles Shetland, Royaume-Uni. Le droit d'auteur est détenu par Anne Burgess et dont la réutilisation est autorisée sous licence CCA-SA 2.0.
- Grès rouge de Navajo, Antelope Canyon, Arizona, États-Unis. Publié par Meckimac sous les termes de la GNUFDL
- Argilite rouge permienne avec des lits de siltstone plus pâles, Bassin de Lodève, Hérault, la Lieude, Mérifons, France. Publié par Pinpin sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Schiste. Publié par Lvklock sous CCA-SA 3.0 Unported licence
- Argile. Publié par Siim Sepp sous GNUFDL

- Calcaire fossilifère, arche et cheminée du Green Bridge of Wales, Pembrokeshire, Pays de Galles. Publié par JKMMX sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Calcaire oolithique du Jura, carrière de Rothenstein III, région du Jura, France. Publié par J. Stiegler sous CCASA 3.0 Unported licence
- Craie, la falaise de craie de Møn, Danemark. Publié par Chad K sous licence CCA 2.0 Generic
- Sel gemme, grotte de sel Colonel, Israël. Publié par Bukvoed sous licence CCA 3.0 Unported.
- Filon de charbon plongeant avec un ancien puits de mine, Formation de Stellarton, Nouvelle-Écosse, Canada. Publié par Michael C. Rygel sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

Tableau 4.7. Roches ignées communes

Images de spécimens

- Granite. ESEU. Photo : Peter Kennett
- Gabbro. Comme ci-dessus
- Dolérite. Collection du Musée national, Prague, République tchèque. Publié par Karelj et diffusé par ipd
- Basalte. Comme ci-dessus
- Andésite. Publié par Michael C. Rygel sous licence CCA-SA 3.0 Unported licence
- Cendres volcaniques. Source : <http://resourcescommittee.house.gov/subcommittees/emr/usgsweb/photogallery/> ; English Wikipedia, téléchargement original le 3 août 2004 par Chris 73. En tant qu'œuvre du gouvernement fédéral américain, l'image est ipd

Images d'exposition

- Expositions de granit, Mount Hope, Victoria, Australie. Publié par Melburnian sous CCA-SA 3.0 Unported licence
- Gabbro d'Ukraine, dans un mur géologique du parc botanique populaire, Blankenfelde, Pankow, Berlin, Allemagne. Publié par Sebastian Wallroth sous licence CCA 3.0 Unported.
- Dyke de dolérite au bord d'une rivière, Agwa Rock, parc provincial du lac Supérieur, Canada. Publié par Fungus Guy sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Colonnes de basalte, Chaussée des Géants, Irlande du Nord. Publié par Sebd sous les termes de la licence GNUFDL
- Couléés de lave andésitique, volcan Stewart Peak, Colorado, États-Unis. Publié par P.W. Lipman ; ipd parce qu'il contient des éléments provenant de l'USGS
- Cendres volcaniques déposées sous forme de couches de tuf dans les îles Éoliennes, près de la Sicile, en Italie. Publié par stefan fotos de Leipzig, Allemagne sous licence CCA-SA 2.0 Générique

Tableau 4.9. Roches métamorphiques communes

Images de spécimens

- Ardoise. ESEU. Photo : Peter Kennett
- Schiste. Comme ci-dessus
- Gneiss. Comme ci-dessus
- Marbre. Comme ci-dessus
- Métaquartzite (quartzite). Comme ci-dessus

Images d'exposition

- Ardoise, dans une coupe de route protégée par des ancrages de roche et du grillage, Monts Rothaar, Rhin Nord, Allemagne. Publié par Elop sous licence CCA-SA3.0 Unported.
- Mica schisteux, La Pierre Blanche, île de Groix, Bretagne, France. Publié par Lyokoï88 sous CCA-SA 4.0 International licence
- Le gneiss du mont Sugarloaf, Rio de Janeiro, Brésil. Publié par Raphael de Siqueira Ferreira sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Bloc de marbre, carrière de Carrara, Italie. Publié par Lucarelli sous GNUFDL
- Exposition de métaquartzite, El Castellar, Zaragoza, Espagne. Publié par PePeEfe sous CCA-SA 4.0 Licence internationale

Tableau 4.10. Processus d'altération courants

- Bloc rocheux cassé, sud de l'Islande. Publié par Till Niermann sous licence GNUFDL, version 1.2.
- Feuilles de granit se détachant sous l'effet de la chaleur et du froid, Half Dome, parc national de Yosemite, États-Unis. Publié par HylgeriaK sous licence CCA-SA 3.0 Unported licence

- Pavage de calcaire carbonifère avec des joints élargis (grykes), Doolin Quay, Irlande. Publié par Bob Jones sous licence CCA-SA 2.0 Générique
- Altération chimique le long d'un joint dans la formation Khondalite Rock à Rushikonda Beach, Visakhapatnam, Inde. Publié par Adityamadhav83 sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Lichens poussant sur une roche nue, États-Unis. Publié par Sarah Murray de South Bend, Indiana, USA sous licence CCA-SA 2.0 Generic licence
- Couches de sol dans la vallée du Rhin près de Rastatt, Allemagne. Publié par U. Burkhardt sous CCA-SA 3.0 Unported licence

Tableau 4.11. Processus d'érosion importants

- Cônes d'éboulis, lac Bow près de Crowfoot Mountain, Alberta, Canada. Publié par Florian Fuchs sous CCA 3.0 Unported licence
- Érosion par la rivière Tista, Sundarganj Thana, Bangladesh. Publié par Ibrahim Husain Meraj sous la licence CCA-SA 3.0 Unported licence
- Un nuage de tempête de sable soufflant sur Al Asad, Irak. Publié par Alicia M. Garcia et ipd car il provient à l'origine de l'US Marine Corps.
- Roche rayée (stries) par le mouvement glaciaire, glacier du Gorner, Zermatt, Suisse. Publié par Michael C. Rygel sous licence CCA-SA 3.0 Unported

Tableau 4.12. Formes de terrain formées par des couches de roches résistantes

- Plateau de la Montagne de la Table, Le Cap, Afrique du Sud. Publié par Harvey Barrison de Massapequa, NY, USA, sous licence CCA-SA 2.0 Generic.
- Cuesta vue depuis le ferry de l'île Victoria, Vancouver, Canada. Photo, Chris King
- Crête, Mont Rundle, près de Bamff, Alberta, Canada. Publié par Stevan Marcus Stevanm1 sous CCASA 3.0 Unported licence
- Escarpement de faille d'Abert Rim, Oregon - l'un des plus hauts des États-Unis. Publié par Abert Rim ACEC sous licence CCA-SA 2.0 Generic
- Des falaises abruptes et une arche, Island Archway, Victoria, Australie. Publié par Diliff sous CCA-SA 3.0 Licence libre
- Une baie entre des promontoires, Cabo de la Vela, Colombie. Publié par Tanenhaus sous CCA 2.0 Licence générique
- Falaises côtières affaissées, Shippards Chine, île de Wight, Angleterre. Publié par Graham Horn sous CCASA 2.0 Licence générique

Tableau 4.13. Caractéristiques paysagères formées principalement par érosion et dépôt

- Vallée fluviale en forme de V, Goriot, Pakistan. Publié par Khakan Ibrahim sous licence CCA-SA 3.0 Unported licence
- Vallée glaciaire du Prapic en forme de U près d'Orcières, Hautes-Alpes, France. Publié par Fr.Latreille sous GNUFDL
- Les méandres des canaux de la plaine d'inondation du Zambèze en Namibie, vus du ciel. Publié par la NASA Earth Observatory : zambezi_ali_2010128_lrg.jpg. Ipdc car elle a été créée uniquement par la NASA.
- Le delta de l'éventail de Silvaplana se développant dans le lac de Silvaplana, en Suisse. Publié par Onchan sous licence CCA-SA 3.0 Unported licence
- Le glacier Isunnguata Sermia en arrière-plan a déposé la moraine au premier plan, Kangerlussuaq, Groenland. Publié par Chmee2/Valtameri sous licence CCA 3.0 Unported.

Tableau 4.14. Structures sédimentaires importantes

- Grès et siltstones lités, Quebrada das Conchas, Salta, Argentine. Publié par <http://www.flickr.com/photos/travelwayoflife/6164348161/in/photostream/> sous licence CCA-SA 2.0 Générique générique
- Argilite stratifiée, Hesselberg, Allemagne ; Jurassique inférieur. Publié par Oswald Engelhardt sous CCA-SA 3.0 Licence libre
- Grès à lit croisé à grande échelle (formé par le vent), sentier d'Angel's Landing, parc national de Zion, Utah, ÉTATS-UNIS. Publié par Roy Luck <http://www.flickr.com/people/royluck/> sous licence CCA-SA
- Grès cambrien marqué par des ondulations asymétriques, Wiśniówka Duża, Pologne. Publié par Robert Niedźwiedzki sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Grès fin marqué par des ondulations symétriques, Sierras Bayas, Olavarria, Argentine. Publié par Beatrice Murch, Buenos Aires, Argentine sous licence CCA 2.0 Generic

- Grain de sable éocène dans un mur de jardin près de Besalú en Catalogne, Espagne. Photo : Pete Loader
- Fissures de dessiccation autour d'une empreinte de dinosaure dans une argile, Loulle, Franche-Compte, France. Publié sur par PePeEfe sous licence CCA-SA 3.0 Unported

Tableau 4.15. Caractéristiques ignées importantes

- Laves en coussins modernes au fond de l'océan, prises lors de l'expédition Galapagos Rift dans l'ouest du Pacifique, 2002. Publié par la photothèque USNOAA : sur Flickr : expl1528 sous licence CCA 2.0 Generic.
- Basaltes en coussins inversés de l'Ordovicien, Crozon, Bretagne, France. Publié par zarmel <http://www.geodiversite.net/auteur2> sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Le bouchon volcanique Devil's Tower dans le Wyoming, aux États-Unis. Publié par Chris Light, sous CCA-SA 3.0 Unported licence
- Seuil du rocher Kilt, Skye, Écosse. Publié par arjecahn sur flickr sous la licence CCA 2.0 Generic.
- Dykes précambriens de dolérite sombre (1100Ma), traversant des roches plus pâles de 1800Ma, îles Koster, Suède. Publié par Thomas Eliasson du Service géologique de Suède : <http://www.flickr.com/people/geologicalsurveyofsweden/> sous licence générique CCA 2.0
- Image satellite de l'intrusion granitique du massif de Brandberg qui a cuit les roches environnantes en une auréole métamorphique sombre, Namibie. Ipd parce qu'il contient des matériaux provenant de l'USGS.

Tableau 4.16. Roches métamorphiques formées par le métamorphisme régional

- Mudstone. ESEU. Photo : Peter Kennett
- Ardoise. Comme ci-dessus
- Schiste. Comme ci-dessus
- Gneiss. Comme ci-dessus
- Granit. Comme ci-dessus
- Grès. Comme ci-dessus
- Métaquartzite (quartzite). Comme ci-dessus
- Calcaire fossilifère. Comme ci-dessus
- Marbre. Publié par Beatrice Murch sous licence générique CCA 2.0

Tableau 4.17. Fractures causées par une rupture fragile - joints et failles

- Lit de siltstone jointif dans un schiste ordovicien, Fort Plain, New York, États-Unis. Publié par Michael C. Rygel sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Faille normale dans les parois du canal de Corinthe, en Grèce. Photo : Chris King
- Vue du dessus de la faille de Piquiang, monts Tein Shan, Chine. Publié par la NASA Earth Observatory par Robert Simmon et Jesse Allen, et ipd tel qu'il a été créé par la NASA
- Faille inversée. Extrait de la banque d'images mondiale AGI, hfo30, Marli Miller, Université de l'Oregon, États-Unis.
- Faille de chevauchement, Lilstock Bay, Somerset, Angleterre. Publié par Mikenorton sous licence CCA-SA Licence internationale

Tableau 4.18. Types de plis

- Anticlinal dans du gneiss précambrien le long de la NJ Route 23 près de Butley, New Jersey, USA. Publié par Vsmith et ipd car il provient à l'origine de l'USGS
- Calcaire à lit plissé dans la gorge de Glasenbachklamm en Autriche. Publié par Viva La Ren sous CCA-SA 3.0 Unported 2.5 Generic, 2.0 Generic et 1.0 Generic.
- Plis serrés près d'Ágios Pávlos, dans le sud de la Crète. Publié par Dieter Mueller sous GNUFDL
- Formation ferrugineuse précambrienne à plis serrés, vieille de 2,6 milliards d'années, près de Soudan, Minnesota, États-Unis. Publié par James St John sous licence CCA 2.0 Generic.
- Pli isoclinal d'environ 10 cm de diamètre dans les Monts d'Arrée près de Commana, France. Publié par zarmel <http://www.geodiversite.net/auteur2> sous licence CCA-SA

Tableau 4.19. Roches crustales océaniques

- Carotte sédimentaire de l'Atlantique Sud. Publié par Hannes Grobe/AWI sous licence CCA Unported.
- Gabbro. ESEU, photo : Peter Kennett
- Dolérite. Publié par Karelj sous licence ipd
- Basalte. Comme ci-dessus

Tableau 4.20. Caractéristiques des couches de la Terre

Tableau 4.21. Processus du cycle interne des roches maintenant expliqués par la théorie de la tectonique des plaques

Tableau 4.22. Les principales preuves à l'appui de la théorie de la tectonique des plaques

- Forme de puzzle - le puzzle continental, plateau continental. © Andrew McLeish dans Geological Science, redessiné par l'ESEU et utilisé avec permission.
- Preuve géologique du "puzzle" - répartition des roches anciennes en Amérique du Sud et en Afrique. © Andrew McLeish en sciences géologiques, redessiné par l'ESEU et utilisé avec permission.
- Preuve fossile du "puzzle" - répartition des animaux et des plantes terrestres et d'eau douce sur les continents du "Gondwana". Reproduit avec la permission de l'USGS, redessiné par l'ESEU et utilisé avec permission.
- Preuves paléoclimatiques - les puzzles continentaux (ancienne distribution de la glace sur les continents du Gondwana). Andrew McLeish in Geological Science, redessiné par l'ESEU et utilisé avec permission.
- Relief terrestre. Publié par <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html> et ipd car il contient des éléments provenant de l'USNOAA
- Carte de distribution des volcans. Publié par http://vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/PlateTectonics/Maps/map_plate_tectonics_world.html et ipd car elle contient des matériaux provenant à l'origine de l'USGS
- Distribution de cartes sur les tremblements de terre. Publiée par la NASA et ipd car elle a été créée uniquement par la NASA
- Profondeurs des séismes - séismes enregistrés dans la zone de subduction des îles Kouriles, en Russie. Publié par l'USGS et l'ipd car elle contient des matériaux provenant de l'USGS.
- Bandes magnétiques. © Geoscience, redessiné par ESEU et utilisé avec l'autorisation de ESEU. Failles transformantes dans l'Atlantique Sud. Publié par le Centre national de données géophysiques/USGS et ipd car il contient des matériaux provenant à l'origine de l'USNOAA.
- Hotspots ", Hawaii, États-Unis. ESEU, comme ci-dessus
- Âge du plancher océanique. Publiée par l'USNOAA et l'ipd car elle contient des matériaux provenant à l'origine de l'USNOAA
- Flux de chaleur - le schéma du flux de chaleur provenant du plancher océanique et de la partie supérieure du manteau et de la croûte. © Chris King et Dee Edwards, redessiné par l'ESEU et utilisé avec autorisation
- Composition du magma - Stromboli, Italie, éruption de lave. Publié par Wolfgang Beyer sous les termes de la GNUFDL
- Composition du magma, Mont St Helens, Washington, USA. Publié par USGS et ipd car il contient des matériaux qui proviennent à l'origine de l'USGS
- Mesures du mouvement des plaques. Publié par la NASA et l'ipd car il a été créé uniquement par la NASA

Tableau 4.23. L'eau continentale sur Terre

Données en pourcentage provenant de <http://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html>. Source : Chapitre d'Igor Shiklomanov "World Fresh Water Resources" dans Peter H. Gleick (éditeur), 1993, Water in Crisis : A Guide to the World's Fresh Water Resources (Oxford University Press, 1993).

Fresh Water Resources (Oxford University Press, New York).

- La calotte glaciaire recouvrant l'île Saunder dans la baie de Baffin, près du Groenland. Publié par la NASA et non protégé par le droit d'auteur
- Une source d'eau minérale dans la région du Caucase. Publié par Ivtorov sous licence CCA-SA Licence internationale
- Un "sol structuré" produit par le pergélisol dans la tundra gelée des Western Arctic National Parklands, Alaska, USA. Publié par le Western Arctic National Parklands sous CCA. licence générique
- Le lac Satpara, l'un des plus hauts lacs du Pakistan. Publié par Waqas Usman sous CCA-SA Licence générique
- Sol humide du Lüningsburg en Basse-Saxe, en Allemagne. Publié par Ukko.de sous les conditions de GNUFDL
- Nuages au Muelle de El Quisco, Valparaíso, Chili, 1997. Publié par Jorge Barrios et diffusé par ipd
- Le marais d'eau douce de Ratargul, forêt de Sylhet, Bangladesh. Publié par Md Habibur Rahman Salman sous licence
- Fleuve Yukon, nord du Canada. Publié par Jessie Hey sous licence CAA-SA 2.0 Générique
- Feuille de Tradescantia zebrina vue au microscope, montrant les stomates verts qui libèrent l'eau dans l'atmosphère lors de la transpiration. Publié par AioftheStorm sous CC0 1.0 Domaine public universel dédicace

Tableau 4.24. Caractéristiques côtières produites par les vagues et les marées

- Une plage de tempête à l'arrière de la plage de Veluga à Batanes aux Philippines. Publié par anne_jimenez sous licence générique CCA
- Vasières à marée près de Palau Melaka, Malacca City, Malaisie. Publié par Vmenkov sous les termes de GNUFDL
- The Spit, Bruny Island, Tasmanie, Australie. Publié par J.J. Harrison (jjharrison89@facebook.com) sous licence générique CCA-SA 2.5

Tableau 4.25. Problèmes susceptibles d'être causés par un réchauffement de la Terre

Tableau 4.26. La contribution de la vie à la formation des roches

- Formation du charbon - fossiles de feuilles dans le charbon du Carbonifère. Extrait de la bibliothèque du Natural History Museum, Londres, et ipd puisque la durée du droit d'auteur est la vie de l'auteur plus 70 ans ou moins
- Reef-formation - corail fossile dans le Windley Key Fossil Reef, Geological State Park, Floride, USA. Publié par Fredlyfish4 sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Pierre de construction altérée : calcaire formé de bivalves et de gastéropodes cénozoïques brisés au temple de Zeus, Olympie, Grèce de Zeus, Olympie, Grèce. Publié par Koelle selon les termes de la licence GNUFDL.
- Image au microscope électronique à balayage de coccolithes. Publiée par Hannes Grobe/AWI sous licence CCA
- Terriers d'animaux ressemblant à des crabes dans des argiles du Jurassique, Makhtesh Qatan, sud d'Israël. Publié par Mark A. Wilson (Department of Geology, The College of Wooster), et publié sur ipd par son auteur, Wilson4469, 1 à la Wikipédia anglaise

Tableau 5.1. Ressources naturelles de la Terre

- Jardins Butchart, Victoria, Colombie-Britannique, Canada, situés dans une carrière de calcaire récupérée. Publié à l'adresse par Mitzi.humphrey sous licence internationale CCA-SA 4.0
- Bassins d'évaporation du sel, La Palma, îles Canaries. Publié par Bernhard Hecke sous CCA- SA 2.0 Licence pour l'Allemagne
- Usine à oxygène à membrane, utilisée pour extraire l'oxygène de l'air. Publié par grasys.com sous les termes de GNUFDL
- Culture d'algues en Indonésie. Publié par Hassan Abdel-Rahman sous licence générique CCA 2.0

Tableau 5.2. Exemples de matières premières en vrac

- La super-carrière de granit de Glensanda en Écosse, l'une des plus grandes d'Europe. Publié par Donald MacDonald dans le cadre du projet Geograph, sous licence CCA-SA 2.0 Generic.
- Carrière de calcaire de Nagara, Toyohashi, Japon. Publié par Alpsdake sous CCA-SA 4.0 Licence internationale
- Sablière et gravière près de Lisbonne, Portugal. Publié par Hansueli Krapf sous licence CCA-SA 3.0 Unported licence

Tableau 5.3. Exemples de matières premières en vrac utilisées dans la fabrication de matériaux de construction et dans les industries céramiques et chimiques.

- Cimenterie, Holcim, Eclépens, Suisse. Publié par Roland Zumbühl, www.picswiss.ch selon les termes du GNUFDL
- Un four à chaux rotatif moderne, Wyoming, États-Unis. Publié par P.D. Tillman et Greg Goebel de Loveland, Colorado, États-Unis, sous licence CCA-SA 2.0 Generic.
- Cristaux cubiques du minéral halite, mine de sel de Merkers, Allemagne. Publié par Wampi sous CCA-SA 3.0 Unported licence
- L'eau pompée dans le minerai de potasse soluble est ensuite pompée sous forme de saumure dans des bassins d'évaporation pour récupérer la potasse, Utah, USA. Publié par un pilote inconnu et ipd car il a été créé uniquement par la NASA
- Une carrière de gypse dans des roches triasiques près de Nottingham, Angleterre. Publié par Jim Thornton dans le cadre du Geograph project sous la licence CCA-SA 2.0 Generic.
- Excavation d'argile à briques, Baduria, Bengale occidentale, Inde. Publié par Biswarup Ganguly sous les termes de la GNUFDL
- Fosse d'argile chinoise près de Kaznějov, République tchèque. Publié par Petr Kinšt sous licence CCA-SA 3.0 Unported licence
- Vue aérienne de l'énorme fosse de sable siliceux près de Frechen, dans l'ouest de l'Allemagne. Publié par Frank Herz et publié par l'ipd

Tableau 5.4. Exemples d'extraction de minerais métalliques

- Mine de fer de Tom Price, Australie occidentale. Publié par Bãras sous les termes du GNUFDL
- Mine de cuivre de Bingham Canyon, Utah, États-Unis. Publié par Spencer Musick et diffusé par ipd
- Mine Mt Isa, Queensland, Australie. Publié par Tennis expert sous licence CCA-SA 2.5 Générique
- L'orpaillage commercial par le peuple Sakalava à Madagascar. Publié par Heinsonlein sous CCASA 4.0 Licence internationale

Tableau 5.5. Exemples d'extraction minérale industrielle

- Mine de terres rares à Bayan Obo, en Chine. Publié par la NASA et l'ipd
- La mine de Mir, Mirny, Russie. Publié par Staselnik sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

Tableau 5.6. Les cinq conditions requises pour former un champ pétrolier et/ou gazier

- Anticlinal au col de Pang La au Tibet. Publié par Einar Fredriksen sous licence CCA-SA 2.0 Generic.
- Mudstone dans l'anticlinal de Deakin de la formation silurienne de Yarralumla, Canberra, Australie. Publié par Graeme Bartlett sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Grès contenant naturellement du pétrole, provenant du champ pétrolier de Hutton en mer du Nord. Peter Craig dans King C. (2017) Scottish 'Bring and Share', from the St Andrews ESTA Conference, September 2016, Teaching. Earth Sciences', 41.2. pp 25
- Schiste bitumineux du gisement éocène de la fosse de Messel, près de Francfort, en Allemagne. Publié par Fafner sous CCA-SA 3.0 Unported licence

Tableau 5.7. Méthodes de protection de l'environnement lors de l'exploitation des ressources naturelles

- Plantation d'arbres de dépistage, carrière de basalte en activité, Hühnerberg, Bavière, Allemagne. Publié par Wolkenkratzer sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Banc construit autour du sommet de la carrière de basalte près de Hohenfels-Essingen, Allemagne. Publié par Beckstet sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Bassins de décantation de la mine de fer de la Cagdianao Mining Corporation aux Philippines. Publié par Edgardo Caringal sous les termes de la Free Art Licence
- Traitement des eaux usées d'une mine pour éliminer la pollution métallique en Australie. Publié par CSIRO sous licence CCA 3.0 Unported licence
- Système de lavage des roues d'un camion en Allemagne. Publié par FRUTIGER Company AG sous CCA-SA 3.0 Licence non publiée
- Terrasses d'argile à chine recouvertes d'herbe, Higher Coldvreath, Cornouailles, Angleterre - publié par Tony Atkin pour le projet Geograph sous licence générique CCA-SA 2.0
- Surveillance des eaux souterraines, Coronado National Memorial, Arizona, États-Unis. Publié par SonoranDesertNPS de Tucson, Arizona, USA sous licence CCA 2.0 Generic.

Tableau 5.8. Exemples de remédiation

- L'ancienne mine d'uranium Jackpile-Paguete sur le Laguna Pueblo, à l'ouest d'Albuquerque, États-Unis. Publié par Mary Gant, NIEHS, et ipd car il s'agit d'un travail préparé par un agent ou un employé du gouvernement américain
- Mine de charbon à ciel ouvert et terrain récupéré à la mine de charbon North Antelope Rochelle dans le Wyoming, aux États-Unis. Publié par Peabody Energy sous licence CCA 3.0 Unported.
- Bâtiment de four préservé dans une ancienne mine de zinc, de plomb et de soufre, Co. Tipperary, Irlande. Publié par John Gibson pour le projet Geograph sous licence générique CCA-SA 2.0
- Le projet Eden en Cornouailles, Angleterre. Publié par Richard Johns pour le projet Geograph sous la licence CCA-SA 2.0 Generic. CCA-SA 2.0 Generic licence
- Travail de terrain des étudiants à Apes Tor, une ancienne carrière de calcaire, Staffordshire, Angleterre. Photo : Chris King

Tableau 5.9. Sources d'énergie renouvelables

- Un canal hydroélectrique partant du réservoir du lac Pukaki, en Nouvelle-Zélande, vers les turbines de la centrale. Publié par Mark Oliver Dittrich et diffusé par ipd
- Les centrales solaires PS20 et PS10 en Andalousie, Espagne. Publié par Koza1983 sous CCA-SA 3.0 Licence non publiée
- Centrale de chauffage urbain à la biomasse près de Steinfeld, Ternitz, Basse-Autriche - approvisionnement en bois en arrière-plan. Publié par Herzi Pinki sous la licence CCA-SA 4.0 International.
- Un parc éolien offshore, Bạc Liêu, Vietnam. Publié par Tycho sous la licence CCA-SA 3.0 Unported

- La centrale hydrothermale de Nesjavellir à Thingvellir, en Islande. Publiée par Gretar Ívarsson, géologue à Nesjavellir, et publié par ipd
- Modèle de la centrale marémotrice de Kislogubskaya dans la péninsule de Kola, en Russie. Publié par Galin Vladimir Petrović et publié sur ipd
- L'une des trois machines Pelamis fendant une vague au parc à vagues d'Aguçadoura, au Portugal. Publié par P123 et diffusé ipd

Tableau 6.1. Processus volcaniques et leurs effets

- Fontaines de lave et coulée de lave, Hawaii, États-Unis, 2004. Ipd parce qu'il s'agit d'un travail préparé par un officier ou un employé du gouvernement américain
- Grands arbres aplatis par l'explosion du Mt St Helens, État de Washington, États-Unis, 1980. Publié par l'USGS Cascades Volcano Observatory et ipd parce qu'il contient des matériaux qui proviennent à l'origine de l'USGS
- Éruption de cendres du Mt St Helens, 1980. Publié par la photothèque de la Federal Emergency Management Agency Library and released ipd
- Nuée ardente s'écoulant du volcan Mayon, aux Philippines, 1984. Publié par C.G. Newhall et ipd parce qu'il contient des matériaux qui proviennent à l'origine de l'USGS
- Lahar ensevelissant des maisons près du volcan Galunggung, Indonésie, 1983. Publié par Robin Holcomb, USGS, et ipd car elle contient des matériaux provenant de l'USGS.

Tableau 6.2. Éruptions selon l'indice d'explosivité volcanique (VEI)

- Lave du Pu'u 'Ō'ō du cône volcanique Kilauea, Hawaii, États-Unis, 1997. Publié par Brian Snelson (exfordy sur Flickr) à <http://www.flickr.com/people/exfordy/> sous licence CCA 2.0 Generic.
- Éruption du Stromboli de nuit, Italie 1980 - bombes volcaniques tirées à plus de 100 m dans les airs. Publié par Wolfgang Beyer sous les termes de la licence GNUFDL
- Éruption du Mt Sinabung, Medan, Indonésie qui a détruit les vignes, 2014. Publié par Rendy Cipta Muliawan sous licence CCA 2.0 Generic
- Lahar de l'éruption du Nevado del Ruiz, Colombie, en 1985, avec la ville d'Armero ensevelie au centre. Publié par Jeffrey Marso, géologue de l'USGS, et ipd car il contient des éléments provenant à l'origine de l'USGS
- Panache d'éruption du volcan Calbuco, près de Puerto Varas, au Chili, en 2015. Publié par Aeveraal sous licence internationale CCA-SA 4.0
- Vue satellite du panache de cendres de 800 km de long issu de l'éruption de Puyehue-Cordón en 2011, au Chili. Publié à l'adresse par Jeff Schmaltz et ipd car elle a été créée uniquement par la NASA
- Panache de cendres du Pinatubo lors de l'éruption de 1991 aux Philippines. Publié par D. Harlow et ipd parce qu'il contient des matériaux provenant à l'origine de l'USGS
- Estimation de la superficie couverte par les retombées de cendres de l'éruption du Tambora en 1815, en Indonésie. Carte de base tirée de l'image de la NASA Image:Indonesia_BMNG.png, et cartes isopachiques tracées à partir de Oppenheimer (2003). Publié par Indon~commonswiki sous licence CCA-SA3.0 Unported.
- L'immense cratère volcanique (caldera) des trois éruptions de Yellowstone, Wyoming, USA. Publié par Ed Austin/Herb Jones et, ipd comme œuvre d'un employé du National Park Service du gouvernement fédéral américain

Tableau 6.3. Méthodes utilisées pour tenter de prédire les éruptions volcaniques

- Tremblements de terre liés à l'éruption de l'Eyjafjallajökull en Islande en 2010. Publié par Veðurstofa Íslands sous licence CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication
- Station de surveillance GPS, volcan du Piton de la Fournaise, île de la Réunion, océan Indien. Publié par B.navez sous les termes du GNUFDL
- Flux thermique élevé rouge de Calbuco au Chili, 2015, sur fond bleu froid de terre et de mer. Publié par la NASA et l'ipd
- Déformation du sol montrée par satellite, liée à l'éruption de 2015 du Calbuco, au Chili. Publié par ESA/NASA/JPL-Caltech et ipd

Tableau 6.4. L'échelle de magnitude des moments

Tableau 6.5. Quelques-uns des séismes les plus dangereux, en fonction du nombre de morts

- Distribution de la carte des tremblements de terre. Publiée par la NASA et l'ipd car elle a été créée uniquement par la NASA

Tableau 6.6. Méthodes de prévision des tremblements de terre

- La faille de Loma Prieta sur la faille de San Andreas, Californie, États-Unis. Ipd car il ne contient que des matériaux provenant de l'USGS.
- Carte du Japon. Publié par Alexrk2 sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Carte des risques sismiques en Amérique du Sud préparée par l'USGS. Publiée par USGS Department of the Interior/USGS et diffusée ipd

Tableau 6.7. Méthodes de construction pour résister aux dommages causés par les séismes

- Murs de cisaillement construits pour donner une résistance supplémentaire à un bâtiment. Publié par l'Oregon Department of Transportation, USA, sous licence générique CCA 2.0
- Boulons et sangles de fondation, Napa, Californie, États-Unis. Publié par Adam Dubrowa de la Federal Emergency Management Agency et so ipd
- Une table vibrante testant des méthodes d'isolation des bases - le bâtiment ordinaire à gauche s'effondre. Université de Californie, San Diego, États-Unis. Publié par Shustov selon les termes de la GNUFDL.
- Réseau d'armatures pour la fondation d'un pont en béton. Publié par Wonaw sous les termes de la licence CCA-SA 3.0 Unported
- Vanne de coupure automatique installée sur une conduite de gaz, Seattle, USA. Publié par John Shea de la Federal Emergency Management Agency et so ipd

Tableau 6.8. Les grands tsunamis et leurs effets

- Les effets du tsunami de Tōhoku, au Japon. Publié par l'US Navy et so ipd
- Le tsunami de 2004 à Ao Nang, province de Krabi, Thaïlande. Publiée par Bild:Davidsvågfoto.JPG et peut être utilisée par quiconque, à quelque fin que ce soit.
- Le résultat du tsunami provoqué par l'éruption du Krakatoa en 1883. Extrait des Anales de la Sociedad Espala de Historia Natural, source : <https://www.flickr.com/photos/internetarchivebookimages/18162559072/> ; ipd car elle a plus de 100 ans.
- Une vue d'artiste du tremblement de terre et du tsunami de 1755 à Lisbonne, au Portugal. L'ipd tel qu'il est depuis plus de 100 ans

Tableau 6.9. Méthodes utilisées pour accroître la sécurité lors des tsunamis

- Le dépliant d'alerte aux tsunamis préparé pour la ville côtière de Pichilemu, dans le centre du Chili. Publié par Gobierno de Chile, ONEMI sous licence CCA 3.0 Chile.
- Un mur anti-tsunami à Tsu-shi au Japon. Publié par Rudolf Ammann sous licence CCA 2.0 Generic.
- La bouée du système d'alerte du réseau DART II. Cette image est ipd car elle contient des matériaux provenant à l'origine de l'USNOAA.
- Panneau d'alerte au tsunami, Okumatsushima, Japon. Publiée par David.Monniaux selon les termes de la licence GNUFDL

Tableau 6.10. Différents types de glissements de terrain et de coulées

- Chute de rochers dans les montagnes de la Colombie britannique, Canada, 2011. Image fournie par Ressources naturelles Canada, Geoscape Vancouver, selon les termes du GNUFDL.
- Le glissement de Ferguson sur la route nationale 140 de Californie, États-Unis, 2008. Image publiée par Eeekster sous licence CCA 3.0 Unported.
- Glissements rotationnels sur la zone d'effondrement plus importante de l'ancienne route, Mam Tor, Derbyshire, Angleterre. Publié par Mike Peel (www.mikepeel.net) sous licence internationale CCA-SA 4.0
- Vargas, Venezuela, un mois après la coulée de débris de décembre 1999. Publié par Veronidae sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Lobes de reptation du sol dans le Wyoming, aux États-Unis. Publié par Jack Flanagan sous licence CCA-SA 2.0 Générique
- Terracettes sous Morgan's Hill, Wiltshire, Angleterre. Publié dans le cadre du projet Geograph par Derek Harper sous licence CCA-SA 2.0 Generic.

Tableau 6.11. Principaux glissements de terrain

- Séisme de 1920 à Haiyuan, qui a déclenché les coulées de Haiyuan en Chine centrale. Publié par User:PhiLiP et diffusé par ipd
- Destruction généralisée dans la région de Caraballeda, au Venezuela, causée par une coulée de débris de 6 m d'épaisseur. Publié par Smith, Lawson, US ACE et ipd car il contient des matériaux provenant de l'USGS.
- Photo prise à Yungay, Pérou, 10 ans après la tragédie - le bâtiment avec l'inscription. Publié par DB et diffusé par l'Ipd
- La cicatrice sur le mont Chokrak, au Tadjikistan, et le glissement de terrain qui a détruit le village de Khait. Publié par R.L. Wesson (USGS) et ipd

Tableau 6.12. Méthodes de réduction des risques de glissement de terrain et d'éboulement

- Carte mondiale des risques de glissement de terrain compilée par la NASA. Tirée de <https://earthobservatory.nasa.gov/images/89937/a-global-view-of-landslide-susceptibility>. Dispositif de motorisation d'un extensomètre filaire - relié par fil à une zone instable, transmettant les données à distance par radio. Publié par Jfoster7991 sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Panneau de signalisation routière. Publié par Oimee sous la licence CCA-SA 2.0 Generic
- Terrassements rocheux sur la route 23, Pound Gap, Cumberland Mountains, Virginie, États-Unis. Publié par Nyttend et diffusé sous ipd
- Fossé de drainage français rempli de gravier pour retenir les sédiments, avec des tuyaux perforés pour évacuer l'eau. Publié par Scooter133 et publié sur ipd
- Mélèzes plantés sur une pente raide d'éboulis meubles dans le domaine skiable de Broken River en Nouvelle-Zélande pour contrôler l'érosion. Publié par Alan Liefing et publié sur ipd
- Boulons de roche à Black Rock sur la côte du Sussex, en Angleterre. Publié dans le cadre du projet Geograph par Simon Carey sous licence CCA-SA 2.0 Generic.
- Géotextiles. Publié par Marilyn475 et ipd
- Protection en treillis métallique contre les chutes de pierres, Marine Drive, Llandudno, Pays de Galles. Publié dans le cadre du projet Geograph par Eric Jones sous la licence CCA-SA 2.0 Generic.
- Falaise stabilisée par du béton projeté, Auckland, Nouvelle-Zélande. Publié par Uploader et diffusé ipd
- Coupe de route stabilisée par un mur en pierre naturelle à la base et un mur de soutènement en béton au-dessus, Rebernice, Slovénie. Publié par Ljuba brank sous les termes de GNUFDL
- Coupe stabilisée par des gabions en Allemagne. Publié par Geolina163 sous les termes de CCA-SA Licence internationale
- Filet attrape-boules sur un sentier de randonnée à Multnomah Falls, Oregon, USA. Publié par Dar-Ape et publié ipd
- Tunnel de protection contre les glissements de terrain, route 751 Narvik/Beisfjord en Norvège. Publié par TorbjørnS sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Blocs d'enrochement largués sur la côte de l'East Sussex, en Angleterre, pour protéger le village de Fairlight situé au-dessus. Publié dans le cadre du projet Geograph par Nigel Chadwick sous licence CCA-SA 2.0 Generic.

Tableau 6.13. Érosion des sols

- Érosion du sol, province de Huesco, Espagne ; le champ vert montre la différence que peuvent faire de bonnes méthodes agricoles. Publié par Rockwurm sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Une tempête de poussière dans le comté de Hamadan, en Iran. Publié par Saman-1984 sous CCA-SA 4.0 Licence internationale
- Machines agricoles ensevelies par la poussière soulevée par le vent à Dallas, Dakota du Sud, États-Unis, en 1936. Publié par Sloan, un employé du ministère américain de l'Agriculture, et donc ipd

Tableau 6.14. Méthodes de réduction de l'érosion côtière

- Épi rocheux construit en travers de la plage "du Prévent" à Capbreton, Landes, France. Publié par Tangopaso et diffusé ipd
- Vague frappant une digue, Plogoff, Finistère, Bretagne, France. Publié par Henri Camus sous licence CCA 1.0 Generic.
- Enrochement et digue, Beesands, Devon, Angleterre. Publié par Nigel Chadwick dans le cadre du projet Geograph sous licence CCA-SA 2.0 Generic.
- Tétrapodes dans un brise-lames à Górký Wschodnie, Gdańsk, Pologne, sur la côte baltique. Publié par Andrzej Otrębski sous licence CCA-SA 3.0 Unported

Tableau 6.15. Déchets nécessitant une élimination

- Décombres d'un bâtiment démolé à Milovice, République tchèque. Publié par Tia Monto sous licence internationale CCA-SA 4.0
- Déchets domestiques en train d'être compactés dans un site d'enfouissement en Australie. Publié par Ropable et diffusé sous ipd
- Le site de déchets toxiques de la Vallée des Tambours, Kentucky, États-Unis, dans les années 1980. Publié par l'Agence américaine Environmental Protection Agency (EPA) et publié sur ipd
- L'élimination des déchets radioactifs de faible activité dans le Nevada, aux États-Unis. Publié par ENERGY.GOV et diffusé ipd

Tableau 7.1. Quelques-unes des nombreuses spécialités des géosciences

- Climatologues enregistrant des données glaciaires, Parc national des Glaciers, États-Unis. Publié par AlbertHerring de l'USGS sous licence générique CCA 2.0
- Géologue d'ingénierie effectuant des carottages en Australie occidentale. Publié par Jlawrencegeo sous licence CCA-SA4.0 International.
- Scientifique de l'environnement examinant une zone minière abandonnée aux États-Unis. Publié par My Public Lands Roadtrip : Behind the Scenes with BLM Nevada Abandoned Mines and Lands Program Lead sous licence CCA 2.0 Generic.
- Examen d'une carotte de forage fraîche, Chili. Publié par Geoz et diffusé par ipd
- Étude de la géochimie des gaz volcaniques, Mont Baker, Washington, États-Unis. Publié par W. Chadwick de l'USGS et diffusé ipd
- Étude de la glaciation, glacier central de Rongbuk, Everest, Tibet. Publié par Matthias Kuhle sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Déploiement d'un sismomètre du plancher océanique au large de la Barbade, Antilles. Publié par John Whitehead de Ocean Instruments et ipd car elle a été créée uniquement par la NASA
- Échantillonnage des eaux souterraines en Allemagne. Publié par kreidefossilien.de sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Mesure de l'épaisseur de la neige en Iran. Publié par Mirisa56 sur la Wikipédia persane sous les termes de la licence GNUFDL
- Filon de fluorine dans une mine, Peak District, Angleterre. Publié par Neilwalker sur Wikipédia en anglais selon les termes de la licence GNUFDL.
- Mise en place d'un équipement de surveillance des fonds marins. Publié par USNOAA et ipd parce qu'il contient des éléments provenant de USNOAA.
- Paléontologue avec l'os de la cuisse d'un grand dinosaure, Zimbabwe. Publié par Kevin Walsh sous licence CCA 2.0 Generic
- Chercheurs examinant des expositions de granit dans les Monts Fostick, Antarctique. Publié par Csiddoway sous licence internationale CCA-SA 4.0
- Analyse de la taille des sédiments dans le laboratoire du Naval Oceanographic Office, Mississippi, États-Unis. Ce fichier est l'œuvre d'un marin ou d'un employé de la marine américaine, prise ou réalisée dans le cadre des fonctions officielles de cette personne. En tant qu'œuvre du gouvernement fédéral américain, l'image est ipd.
- Relevé des croûtes du sol à l'aide d'un quadrat. Publié par 08Biocrust sous la licence CCA 2.0 Generic.
- Analyse d'échantillons dans le cratère du volcan Mutnovsky, Kamshatka, Russie orientale. Publié par le Dr Jake

Tableau 7.2. Méthodes utilisées pour observer et enregistrer l'environnement pour observer et enregistrer les caractéristiques géoscientifiques

- Observation de diamants microscopiques. Photo : Chris King
- Observation d'un fossile avec une lentille à main. Publié par Catherine Christopoulou sous licence CCA-SA 4.0 Licence internationale
- Observation du paysage dans le Peak District, en Angleterre. Photo : Peter Kennett
- Séquences de roches plissées dans le désert algérien. Google Earth™
- Mesure du pendage d'un lit. Photo : Peter Kennett
- Mesure de l'épaisseur d'un lit. Comme ci-dessus
- Trainée d'échantillons d'hématite. Publié par KarlaPanchuk sous licence internationale CCA-SA 4.0
- Clé de description des roches de l'Unité d'enseignement des sciences de la Terre. Avec la permission de l'ESEU
- Notes de terrain sur la géologie. Publié par PePeEfe sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Enregistrement d'un diagramme de terrain. Photo : James Speed
- Photographie annotée, Chevauchement de Champlain, Lone Rock Point, Burlington, Vermont, États-Unis. Publié par Ed Meyer et diffusé sur ipd
- Diagramme stratigraphique de la formation Kitadani du Crétacé inférieur, près de la ville de Katsuyama, Japon. Redessiné à partir d'une image publiée par Yoichi Azuma, Xing Xu, Masateru Shibata, Soichiro Kawabe, Kazunori Miyata et Takuya Imai sous licence CCA 4.0 International.

- Écran Stevenson protégeant des instruments météorologiques et un pluviomètre. Publié par Famartin sous licence CCA-SA 3.0 Unported
- Des mesures régulières sont effectuées sur un écran Stevenson. Publié par J-H. Janßen sous les termes de GNUFDL
- Échantillonnage de la qualité de l'air en France. Publié par Cjp24 sous licence CCA-SA 4.0 International
- Fosse pédologique dans le piémont des Carpates, en Pologne. Publié par Plogeo sous licence internationale CCA-SA 4.0
- Analyse de la qualité de l'eau, Port Macquarie, Nouvelle-Galles du Sud, Australie. Publié par Brian Tolagson sous licence internationale CCA-SA 4.0
- Dispositif d'échantillonnage de la colonne d'eau dans l'océan. Publié à <http://www.scienceimage.csiro.au/pages/about/> sous licence CCA 3.0 Unported

Tableau 7.3. Intégration des observations géoscientifiques dans les modèles et les cartes

- Diorama du Jurassique, Smithsonian Museum of Natural History, Washington DC, USA. Publié par Carl Malamud sous licence générique CCA 2.0
- Grands cristaux de feldspath dans une roche ignée de fond à grain plus fin - montrant un refroidissement en deux étapes.
Publié par Chmee2 sous les termes de la licence GNUFDL
- La discordance découverte par James Hutton à Siccar Point en Écosse. Publié par Stuart Sutherland sous licence internationale CCA-SA 4.0
- Carte géologique de Copper Cliff, district minier de Sudbury, Ontario, Canada. Publiée par la Commission géologique du Canada sous la licence Gouvernement ouvert, Canada 2.0.
- Carte pédologique du Timor. Publiée par Seeds of Life sous licence CCA-SA 3.0 Unported.
- Carte de la contamination des eaux souterraines par les nitrates dans la péninsule du Cap-Vert, Sénégal. Publiée par J-C. Comte, O. Banton & Y. Travi sous licence CCA-SA 3.0 Unported.

.....

