

VOLCANS

ARTISTES DE LA TERRE

LES ÉRUPTIONS



LES GEYSERS



LES PAYSAGES



GILBERT
CHERRORET


delachaux
et niestlé

VOLCANS

ARTISTES DE LA TERRE

Conception graphique et mise en pages :

Monique Wender

Préparation de copie : Monika Gabbay

Correction : Claire Dauvel

Schémas : Monique Wender

Photogravure : IGS-CP (16)

Cet ouvrage ne peut être reproduit, même partiellement et sous quelque forme que ce soit (photocopie, décalque, microfilm, duplicateur ou tout autre procédé analogique ou numérique), sans une autorisation écrite de l'éditeur.

ISBN : 978-2-603-02574-1

© Delachaux et Niestlé SA, Paris, 2018

Dépôt légal : août 2018

Achevé d'imprimer en juin 2018 sur les presses de l'imprimerie Macrolibros, Espagne.

Tous droits d'adaptation, de traduction et de reproduction réservés pour tous pays.

Remerciements de l'auteur

Je remercie M. Philippe J. Dubois, directeur des éditions Delachaux et Niestlé et M. Michel Larrieu, éditeur, de m'avoir accordé leur confiance pour la rédaction de cet ouvrage. Je remercie également M. Larrieu pour avoir suivi sa progression, ainsi que Mme Jeanne Cochin, sa collaboratrice.

G I L B E R T C H E R R O R E T

VOLCANS

ARTISTES DE LA TERRE

CHARTRE Delachaux et Niestlé

- 1 L'éditeur nature de référence depuis 1885.
- 2 Le fonds éditorial le plus complet en langue française avec plus de 400 ouvrages consacrés à la nature et à l'environnement.
- 3 Des auteurs scientifiques et naturalistes reconnus.
- 4 Les meilleurs illustrateurs naturalistes, pour la précision et le réalisme.
- 5 Des ouvrages spécifiquement adaptés à l'utilisation sur le terrain.
- 6 Des contenus actualisés régulièrement pour relayer les avancées scientifiques les plus récentes.
- 7 Une démarche éco-responsable pour la conception et la fabrication de nos ouvrages.
- 8 Une approche pédagogique qui sensibilise les plus jeunes à l'écologie.
- 9 Une réflexion qui éclaire les grands débats sur l'environnement (biodiversité, changement climatique, écosystèmes).
- 10 Une implication aux côtés de tous ceux qui œuvrent en faveur de la protection de l'environnement et de la conservation de la biodiversité.

Retrouvez-nous sur www.delachauxetniestle.com et sur Facebook


delachaux
et niestlé

Sommaire

Avant-propos	7	Le dynamisme des volcans explosifs et extrusifs	71
L'origine du volcanisme	8	L'assimilation et la contamination – La cristallisation fractionnée – La différenciation magmatique	
La Terre a accumulé de la chaleur	10	Lorsque le magma rencontre de l'eau.....	76
L'évacuation de la chaleur	11	L'hydrovolcanisme en milieu marin – L'hydrovolcanisme en milieu continental	
La surface du globe se fragmente.....	13	Mesurer l'intensité d'une éruption explosive	79
Où trouve-t-on des volcans ?	14	Les produits émis par les éruptions	81
Des réservoirs de magma	18	Les gaz volcaniques	81
Les réservoirs magmatiques des dorsales océaniques – Les réservoirs magmatiques des volcans de subduction – Les réservoirs magmatiques des volcans de points chauds		Des émissions de soufre à l'état liquide.....	88
Pourquoi la roche fond-elle ?	22	Les laves	92
Les éruptions volcaniques	24	Les téphras	92
Des images d'éruptions volcaniques	26	Les blocs et les bombes – Les lapilli et les cendres	
Des éruptions effusives.....	26	Les écoulements pyroclastiques.....	96
Les lacs de magma en images – Les caractères des lacs de magma – Les coulées de lave – Des coulées de lave pahoehoe et des coulées de lave aa		Des éruptions aux conséquences dramatiques	98
Des éruptions explosives	48	1783 : l'émission de lave du Laki (Islande)	98
Des projections de lambeaux de lave – Des projections violentes de cendres et de blocs		1883 : l'explosion du Krakatoa (Indonésie)	100
Des dômes de lave	62	8 mai 1902 : la nuée ardente de la montagne Pelée (Martinique).....	104
Le dynamisme des éruptions volcaniques	68	13 novembre 1985 : les lahars du Nevado del Ruiz (Colombie)	105
La viscosité d'une lave	69	Comment prévoir une éruption volcanique ?	108
Les caractères des laves effusives.....	69	Détecter des vibrations	108
Le dynamisme des volcans mixtes	70	Détecter des déformations de l'édifice	109
		Détecter des modifications dans les gaz rejetés	110

Envisager toutes les conséquences possibles d'une éruption ...	111	La colonisation de volcans continentaux	168
Les régions hydrothermales continentales	114	Des pionniers s'installent – D'autres plantes bien adaptées au sol et au climat	
Des images de régions hydrothermales	116	Activités volcaniques anciennes et paysages	184
Yellowstone, le plus grand site hydrothermal du monde.....	116	La morphologie des volcans anciens trahit leur passé éruptif	185
Une particularité géologique – Un site hydrothermal exceptionnel		Des volcans de type mixte – Des volcans de type effusif – Des volcans explosifs – Des volcans extrusifs – Des maars	
Les sites hydrothermaux de Nouvelle-Zélande, du Chili, de Bolivie et d'Islande	128	La « face cachée » des volcans.....	211
La formation d'une caldeira – Au Chili et en Bolivie – En Islande		Où l'on recueille des indices d'un hydrovolcanisme profond – Où l'on découvre la structure profonde d'édifices volcaniques – Où l'on peut enfin connaître les « entrailles » des coulées épaisses – Où l'on apprend que certains dômes de lave sont montés discrètement dans les sédiments sans jamais atteindre la surface – Où l'histoire de certains volcans aboutit à des paysages atypiques – Le cas très particulier des îles Marquises	
Le site unique de Dallol (Éthiopie).....	142	Reconstitution du passé de quelques volcans	230
Une histoire géologique singulière – Des couleurs et des formes variées		La formation du puy de Dôme (Auvergne).....	230
Les caractères des régions hydrothermales continentales	156	La formation du puy de Pariou (Auvergne).....	232
Les bassins colorés.....	156	L'histoire du maar du Ray-Pic (Ardèche)	234
Les geysers.....	158	Chronologie des étapes ayant abouti au site actuel	
Les mares de boue	159	La formation du plateau de Gergovie (Auvergne).....	240
Les fumerolles et les solfatares	160	En guise de conclusion :	
Les paysages issus d'éruptions volcaniques passées	162	Les volcans, des « artistes » de la Terre	242
La colonisation des zones volcaniques par les végétaux	164	Annexes : Les roches volcaniques.....	244
Des végétaux exigeants sur le plan nutritif !.....	164	Glossaire	250
Des formes de dispersion sélectionnées	165	Orientation bibliographique.....	254
La colonisation des volcans isolés	167	Liste des volcans et des sites hydrothermaux cités	255

Avant-propos

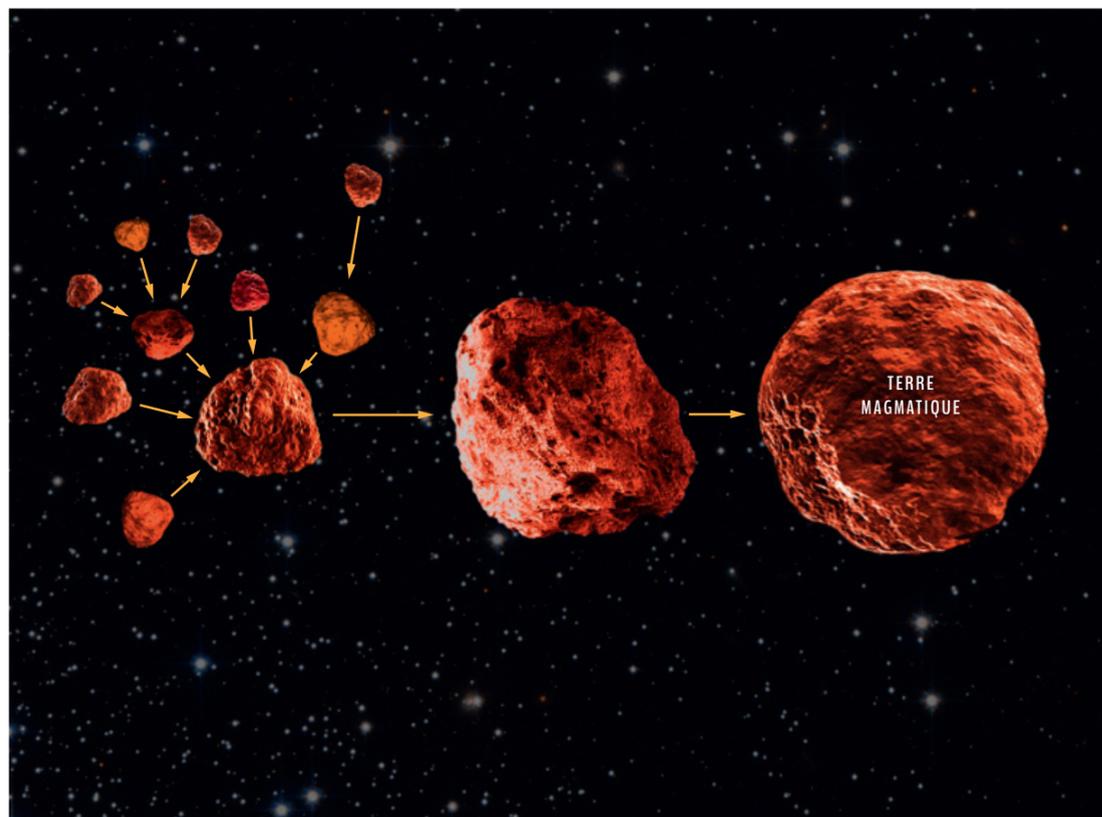
Volcan Ibu, Moluques (Indonésie)
 Cette violente explosion photographiée en 2013 est la conséquence d'une décompression brutale qui s'est produite dans le conduit éruptif du volcan. L'Ibu est un dôme de lave visqueuse qui se développe à l'intérieur d'un ancien cratère herbacé dont on aperçoit la lèvre en arrière-plan. L'explosion libère une grande quantité de gaz et de cendres. La hauteur du panache atteint une centaine de mètres.

Explosions soudaines et violentes, gerbes de lave incandescentes, coulées, panaches de cendres, évacuation de populations... Les volcans ont toujours fasciné et effrayé à la fois. Dans le passé, ils ont été l'objet de nombreuses légendes, et certaines croyances persistent encore dans beaucoup de régions. Cependant l'origine du volcanisme est maintenant bien comprise par les scientifiques. La première partie du présent ouvrage expose les principales connaissances sur ce sujet. Les deux parties suivantes sont consacrées aux volcans actifs. Un volcan est considéré comme actif s'il est entré en éruption au moins une fois durant les 10 000 dernières années. Avec cette définition, on dénombre environ 1 600 volcans actifs sur les terres émergées. Une douzaine seulement sont en éruption permanente. Certains autres émettent des fumerolles pendant de nombreuses années avant d'entrer en éruption, et un troisième groupe ne manifeste aucun signe « extérieur » d'activité. Les études de terrain complétées par les travaux effectués dans les laboratoires de recherche portant sur les caractères physico-chimiques du magma, sur ses relations avec l'eau, sur la dynamique des fluides, sur des modélisations ont permis de mieux comprendre les différents dynamismes éruptifs. Elles expliquent également la nature des différents éléments émis lors des éruptions. Les principaux acquis dans ces domaines sont présentés dans ces mêmes chapitres. Afin de mieux faire percevoir les caractères des éruptions volcaniques ainsi que leurs conséquences sur l'environnement et les activités humaines, quatre d'entre elles ayant eu un retentissement historique sont décrites en détail. La dernière partie est consacrée aux paysages volcaniques. L'observation d'un planisphère localisant les volcans actifs laisse penser que ceux-ci sont très nombreux dans certaines régions du monde, et proches les uns des autres. Cela n'est généralement pas le cas. Sur le terrain, à petite échelle, on s'aperçoit qu'un volcan actif est presque toujours entouré de nombreux volcans endormis ou éteints définitivement. Les volcans éteints constituent

l'essentiel du paysage ! Ils ont participé à son modelé durant leur période d'activité et celui-ci a continué à évoluer dès que les éruptions ont cessé, très lentement, sous l'effet de facteurs environnementaux. Cette géodynamique externe modifie leur aspect initial et finit par faire apparaître leur structure interne, souvent spectaculaire sur le plan esthétique et toujours enrichissante sur le plan scientifique. Un paysage volcanique résulte donc à la fois de l'activité interne de notre globe et de l'action ultérieure des agents externes. Son étude permet, comme toutes les études de terrain, de reconstituer son histoire. Les photographies présentées dans les différents chapitres ont été faites durant les quinze dernières années dans la plupart des zones du monde comportant des volcans en activité : Italie, Indonésie, Vanuatu, Nouvelle-Zélande, Hawaii, République démocratique du Congo, Éthiopie, Chili, Bolivie, Guatemala, Galápagos, Islande... Beaucoup d'entre elles ont été réalisées dans des conditions difficiles. En effet l'approche d'un volcan en éruption est toujours compliquée en raison de son ascension, des risques courus, de la chaleur, du bruit, des projections parfois imprévisibles dans leur survenue et leur durée, des gaz toxiques, des interdictions. Les photographies de nuit sont elles-mêmes difficiles à réussir car la vitesse et la luminosité varient sans cesse. À cela il faut ajouter les gaz qui, en plus d'agresser l'appareil avec la chaleur, masquent souvent la lave. Ces images ont été choisies pour leur caractère esthétique mais sont regroupées selon des critères scientifiques, à savoir le dynamisme des différentes éruptions, et servent de support pour l'expliquer. Elles permettent également de présenter les principaux volcans actifs de notre planète. Les connaissances scientifiques apportées sont suffisantes pour permettre de comprendre l'origine du volcanisme, la localisation des volcans dans le monde et leur dynamisme. Elles permettent aussi de comprendre les paysages qu'ils façonnent. Toutefois les lecteurs qui auront le souhait d'approfondir ces explications se reporteront à des livres plus spécialisés.

L'origine du **volcanisme**

La Terre a accumulé de la chaleur



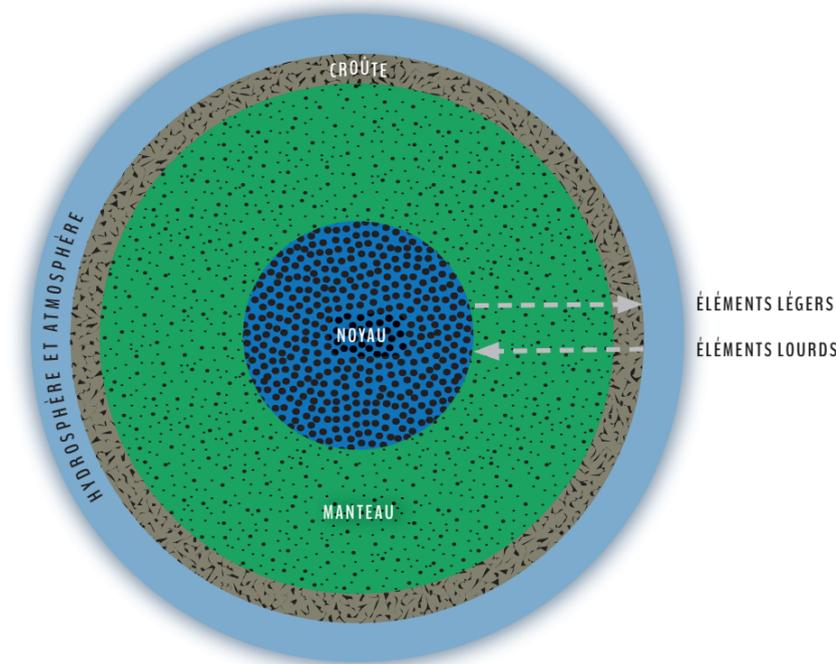
Assemblage (accrétion) de planétoïdes en éléments de plus en plus gros. La chaleur dégagée par les chocs entre eux est emprisonnée. La Terre initiale est entièrement magmatique.

D'une façon générale, le volcanisme est lié au refroidissement de la Terre. Sur Mars, par exemple, qui s'est formée en même temps que la Terre mais qui est deux fois plus petite, tous les volcans sont définitivement éteints car cette planète

est entièrement refroidie. La Terre s'est formée par assemblage ou accrétion d'astéroïdes (ou planétoïdes) et la chaleur produite par leurs collisions a été emprisonnée en son sein. Après cette étape, les éléments chimiques présents dans la terre

magmatique ont migré selon leur densité. Ainsi le fer, très dense, s'est déplacé vers le centre, alors que d'autres éléments plus légers sont remontés vers la surface. À la suite de ces déplacements, trois couches ont été formées : la croûte, le manteau et le noyau.

Cependant la chaleur d'accrétion ne représente qu'une faible partie de la chaleur du globe terrestre. La plus grande partie de son énergie interne provient de ses éléments radioactifs, principalement l'uranium, le thorium et le potassium. La chaleur issue des éléments radioactifs représente environ 80 % de la chaleur dégagée par la Terre.



La Terre s'est différenciée en trois couches à la suite de la migration des éléments lourds vers le centre et de celle des éléments légers vers la périphérie.

L'évacuation de la chaleur

La chaleur est évacuée grâce à deux phénomènes qui interviennent conjointement : la conduction et la convection.

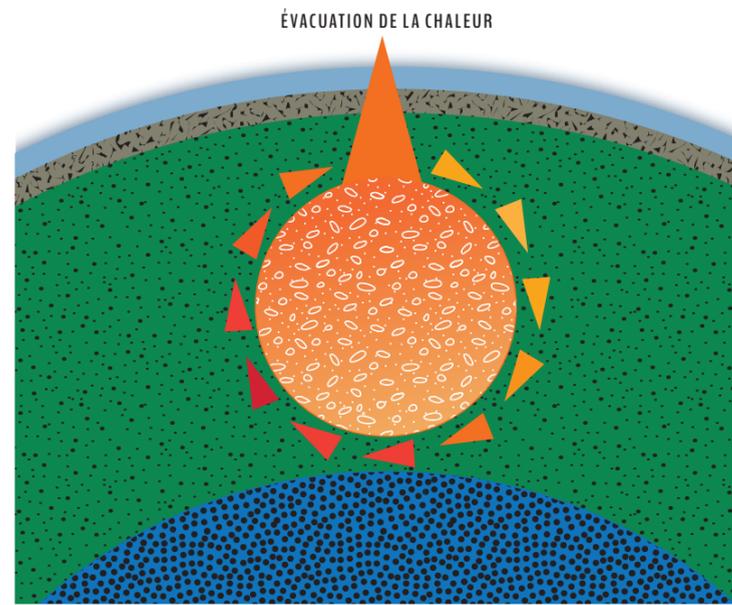
La conduction est l'évacuation de la chaleur de proche en proche par les couches successives, jusqu'à la plus externe.

La convection correspond à des mouvements de rotation de matière qui se mettent en place quand deux couches présentent une différence de température. Ils

transfèrent la chaleur depuis la partie inférieure d'une couche chaude jusqu'à sa partie supérieure plus proche de la surface et donc plus froide (ou moins chaude !). En effet, comme la base d'une couche terrestre est plus chaude, la matière qui la constitue est moins dense : elle remonte lentement (de quelques centimètres par an). Quand elle atteint la partie supérieure, elle évacue une partie de sa chaleur, s'alourdit et redescend. Ce phénomène de

convection est bien observable lorsqu'on fait chauffer une casserole d'eau. L'eau chauffée à sa base monte vers la surface, perd de la chaleur puis redescend en décrivant un mouvement de rotation. La convection est beaucoup plus efficace que la conduction pour transférer la chaleur.

Les volcans contribuent également à évacuer la chaleur de la Terre. Pendant très longtemps on a pensé que la lave provenait d'une couche de magma située quelque part à l'intérieur du globe. Les forages n'ont pas permis de confirmer cette hypothèse. Le forage le plus profond réalisé jusqu'à présent à la surface de la Terre a été effectué



Le phénomène de convection

dans la péninsule de Kola en Sibérie, entre 1970 et 1989. Il a atteint un peu plus de 12 kilomètres de profondeur. Nous sommes bien loin du centre de la Terre dont le rayon est de 6 400 kilomètres. Il a toutefois montré que la température augmente avec la profondeur. Cette augmentation est de 3 °C tous les 100 mètres en moyenne.

Ce sont les études de la propagation des ondes émises par les séismes qui ont apporté la réponse. Les séismes produisent des ondes dont certaines se déplacent à la surface du globe et d'autres se propagent à l'intérieur de celui-ci. Les ondes qui traversent le globe et qui arrivent en seconde position

aux stations d'enregistrement (les ondes S, comme seconde) sont arrêtées par les liquides.

Or ces ondes se propagent jusqu'à 2 900 kilomètres de profondeur prouvant que la Terre ne possède pas de couche magmatique sur cette épaisseur.

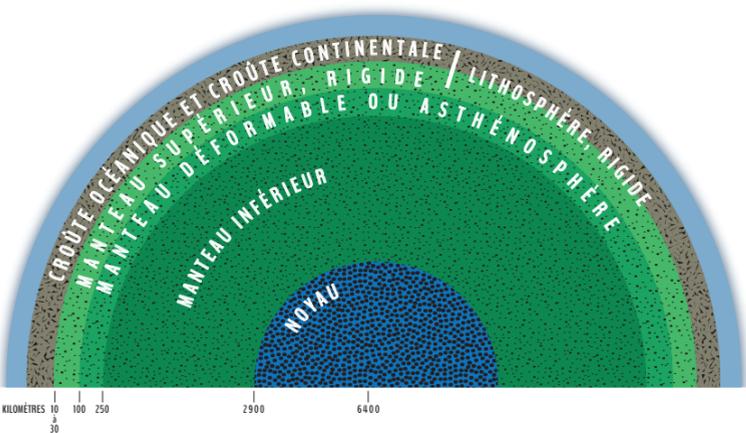
La vitesse des ondes change aussi selon la température, la pression, la nature des roches. Lorsqu'elles rencontrent une nouvelle couche, elles sont déviées et changent de vitesse. En étudiant la propagation de ces ondes, de nouvelles couches ont été découvertes dans le globe, en plus de celles formées initialement.

Ainsi la partie supérieure du manteau est associée à la croûte formée initialement, pour constituer une couche rigide externe plus épaisse, appelée lithosphère. Une autre couche située sous la lithosphère a également été identifiée. Elle a été appelée asthénosphère (du grec

asthenos, « sans résistance »); elle est déformable sans être liquide.

La composition de ces différentes couches a été trouvée de la façon suivante. On a récolté différentes roches à la surface de la Terre et on a comparé la vitesse des ondes au travers de barres constituées de ces roches avec les vitesses mesurées sur le terrain. Si par exemple la vitesse de l'onde qui a traversé une couche de terrain est la même que celle qui a traversé la barre de granite, c'est que le terrain est constitué de granite. On a ainsi prouvé que la croûte océanique a une composition basaltique et que la croûte continentale est formée de granite. Quant au manteau, il est formé d'une roche appelée péridotite.

La découverte de ces différentes couches qui ne sont donc pas magmatiques a néanmoins contribué à expliciter la formation du magma à l'origine des volcans.



Coupe du globe. Structure et composition du globe terrestre (les épaisseurs des couches ne sont pas respectées)

La surface du globe se fragmente

Les mouvements de convection qui ont lieu dans le manteau ainsi que certains volcans qui ont existé très tôt ont fragmenté la lithosphère en plaques. Les géologues débattent toujours pour reconstituer les étapes comprises entre la formation de la lithosphère et le début de sa fragmentation en plaques, mais ils s'accordent pour dire que celles-ci existaient au début de l'ère primaire il y a environ 600 millions d'années. Quoi qu'il

en soit, la lithosphère est maintenant constituée de plaques appelées plaques lithosphériques qui se déplacent les unes par rapport aux autres de quelques centimètres par an. Ces mouvements constituent la tectonique des plaques. On distingue une douzaine de grandes plaques, comme la plaque eurasiennne ou la plaque africaine, et un nombre aussi important de microplaques, comme celle située au niveau des îles Moluques en Indonésie ou

encore celle comportant les îles Marquises.

Les limites des plaques ne correspondent pas aux continents et aux océans. Certaines d'entre elles sont constituées de lithosphère continentale et de lithosphère océanique, d'autres ne sont constituées que de lithosphère océanique.

Les plaques s'écartent au niveau de zones de divergence, les dorsales, et convergent vers d'autres plaques. Les zones d'affrontement



Les grandes plaques lithosphériques

des plaques sont appelées zones de convergence. Lorsque deux lithosphères continentales s'affrontent, il s'agit d'une collision.

Lorsqu'une lithosphère océanique affronte une lithosphère continentale ou une autre lithosphère océanique, il s'agit d'une subduction.

Les zones d'écartement et d'affrontement des plaques sont l'objet de fortes contraintes qui génèrent les séismes.

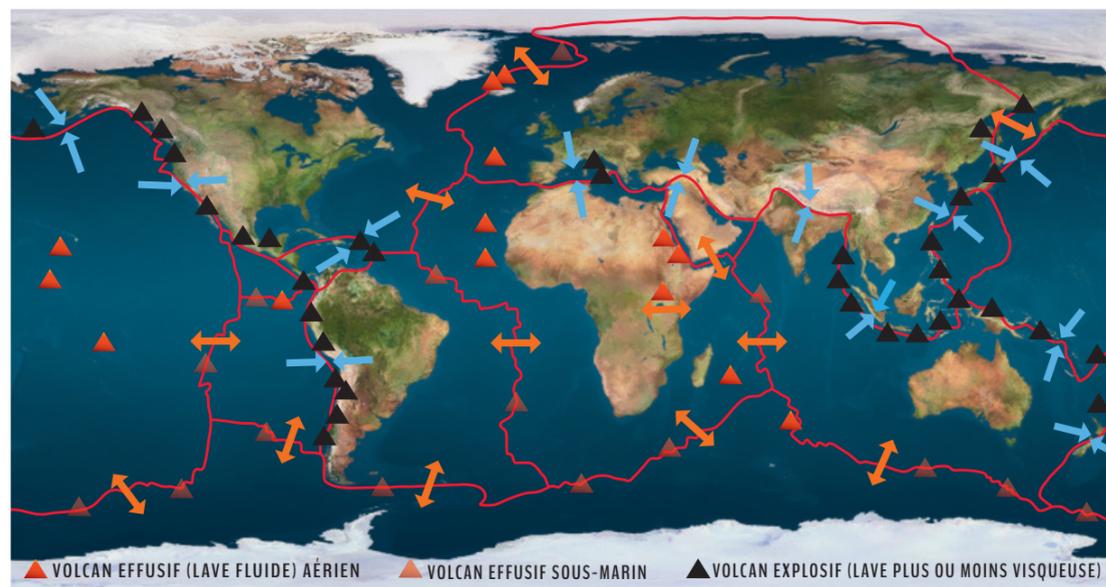
Où trouve-t-on des volcans ?

L'examen de la carte mondiale de répartition des volcans montre que la plupart d'entre eux sont localisés au niveau des zones de divergence et de convergence des plaques lithosphériques. D'autres volcans semblent répartis de façon aléatoire.

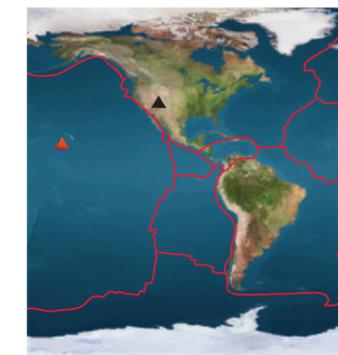
Les volcans localisés au niveau

des zones de divergence des plaques ou dorsales sont de très loin les plus nombreux. De la lave fluide qualifiée d'effusive sort par les fissures provoquées par l'écartement. Le magma émis au niveau des dorsales représente 75 % du volume de magma émis à la surface du globe, et la roche qui constitue le fond de tous les océans

est une roche volcanique ! Il s'agit du basalte. Cependant ces volcans sont presque tous sous-marins et n'ont été découverts que grâce à l'exploration du fond des océans. D'autres volcans se situent au niveau des zones de convergence des plaques, soit entre une lithosphère océanique et une lithosphère continentale (cas de l'Amérique



Position des volcans vis-à-vis des plaques lithosphériques



Des volcans effusifs et des volcans explosifs
 ▲ Volcan effusif de point chaud (Kilauea)
 ▲ Volcan explosif de convergence de plaques (Santiaguito)

Coulée effusive du Kilauea, Hawaii (États-Unis)

du Sud par exemple), soit entre deux lithosphères océaniques (cas de l'Indonésie par exemple). Dans ces deux cas, les volcans sont presque toujours explosifs. Ils sont nombreux autour de la plaque pacifique où ils constituent la fameuse ceinture de feu du Pacifique. Quarante-vingts pour cent des volcans émergés se trouvent sur le pourtour du Pacifique.

Enfin un nombre assez important de volcans occupent des positions qui semblent indépendantes des

mouvements des plaques et de leurs limites. Ils forment parfois des lacs de lave. Ces volcans correspondent à ce que l'on nomme des points chauds. Ils sont souvent qualifiés de volcans intra-plaques, mais cette expression n'est pas correcte car certains d'entre eux se trouvent au niveau des dorsales. Ainsi on trouve plusieurs points chauds dans l'axe de la dorsale atlantique, comme c'est le cas en Islande, aux Açores, à Sainte-Hélène. En Afrique de l'Est, les

volcans Erta Alé et Nyiragongo qui se situent au niveau d'une dorsale en formation sont des points chauds. Pour certains géologues, les points chauds alignés participent à la fragmentation des plaques. Les volcans de points chauds émettent de la lave effusive.

Il y a très peu de volcans dans les zones de collision entre deux plaques continentales. Citons l'exemple du mont Ararat en Turquie.

Explosion du Santiaguito
(Guatemala)



Des réservoirs de magma

Puisqu'il n'existe pas de couche de magma dans le globe terrestre, on doit admettre que du magma se forme spécifiquement sous les trois types de volcans (volcans de divergence de plaques effusifs, volcans de convergence de plaques explosifs, volcans de points chauds effusifs). Ceci a été confirmé par les ondes sismiques S qui sont arrêtées sous les volcans, témoignant ainsi de l'existence d'un réservoir liquide, encore appelé chambre magmatique. Dans tous les cas, le réservoir est lui-même alimenté par de la matière chaude, magmatique ou non. Les mesures de température (thermographie) ont montré qu'au niveau des réservoirs et de leur système d'alimentation les températures sont très élevées, souvent supérieures à 1000 °C. Les chambres magmatiques des trois types de volcans présentent des différences notables.

Les réservoirs magmatiques des dorsales océaniques

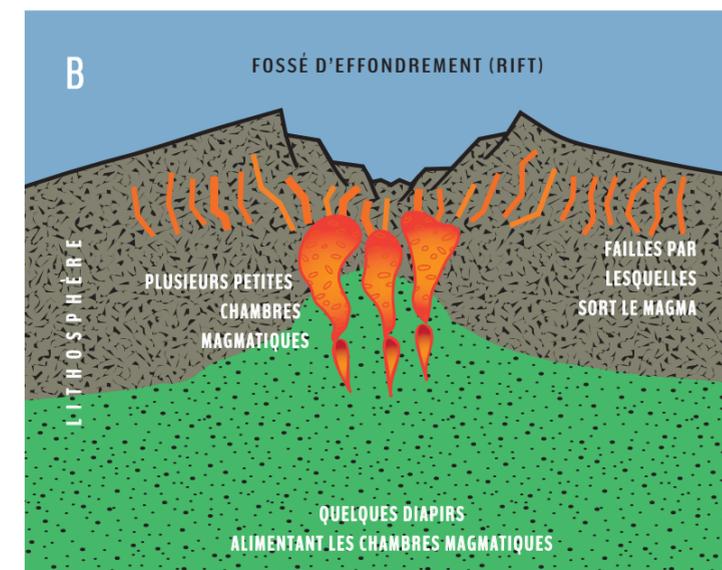
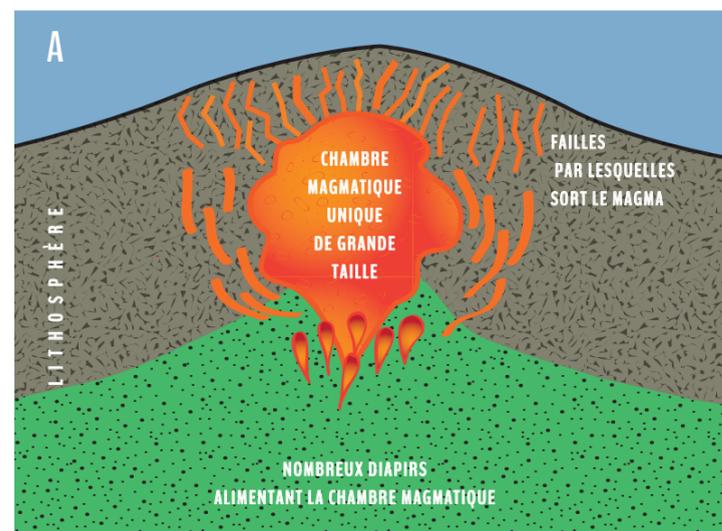
On distingue les dorsales lentes comme la dorsale atlantique qui écarte les plaques de quelques

centimètres par an, et les dorsales rapides telle que la dorsale pacifique au niveau de laquelle l'écartement est supérieur à 15 centimètres par an.

La chambre magmatique d'une dorsale rapide est unique et de grande taille. Son diamètre est de 4 à 5 kilomètres. Elle se situe dans la partie supérieure de la lithosphère et son toit est à seulement 3 ou 4 kilomètres de la surface, dans de la lithosphère amincie. Elle contient de 2 à 20 % de magma et celui-ci gagne la surface par des failles. Elle est alimentée

en permanence par de lentes remontées de péridotite très partiellement fondue, que l'on nomme diapirs.

Sous les dorsales lentes, l'étude de la propagation des ondes sismiques a permis de distinguer plusieurs petites chambres magmatiques de taille réduite dont chacune a un diamètre d'une centaine de mètres. Elles sont alimentées de façon intermittente par des diapirs beaucoup moins nombreux que dans le cas précédent. Le magma qu'elles contiennent cristallise entre deux phases d'ali-



mentation. De ce fait, l'écartement des plaques est environ trois fois plus lent que celui des dorsales rapides (3 à 4 cm/an contre 12 cm/an en moyenne) et se fait lui aussi de manière intermittente, à chaque montée de magma. D'autre part, l'axe de la dorsale comporte un fossé appelé rift, comprenant de multiples failles par lesquelles sort le magma.

Les éruptions émises par les dorsales sont fissurales. Au fond de l'océan, la lave peut s'épancher en petites coulées mais la plupart du temps elle prend l'aspect d'oreillers (ou pillow-lavas) sous l'effet de la pression de l'eau. Une photographie réalisée aux îles Galápagos p. 214 montre de telles

formations. Lorsque la dorsale émerge, ce qui est le cas en Islande, les éruptions qui se produisent dans le rift se caractérisent par la projection de grands pans de lave.

Les réservoirs magmatiques des volcans de subduction

Dans les zones de cordillères, en référence à la cordillère des Andes, la plaque constituée de lithosphère océanique qui « affronte » la lithosphère continentale passe sous celle-ci car elle est plus dense. Cette lithosphère océanique s'enfonce lentement selon un plan incliné, appelé plan de Wadati-Benioff, le long duquel se pro-

duisent de nombreux séismes en raison des contraintes qui s'exercent. Ce sont les foyers de ces séismes qui permettent de visualiser le trajet de cette plaque plongeante. Ce phénomène s'appelle la subduction, et plus précisément la subduction forcée.

Au cours de leur déplacement au fond de l'océan depuis la dorsale, les roches se sont refroidies et hydratées. Elles sont devenues très denses et leur densité augmente encore lors de leur enfoncement. Sous l'effet de la pression et de la température, elles se transforment et se déshydratent. Les molécules d'eau rejetées migrent vers la plaque chevauchante.

La péridotite de la plaque chevauchante fond partiellement à une

Éruption fissurale du volcan islandais Bardarbunga en 2015



Chambres magmatiques de dorsales.
A. Chambre magmatique de dorsale rapide
B. Chambre magmatique de dorsale lente