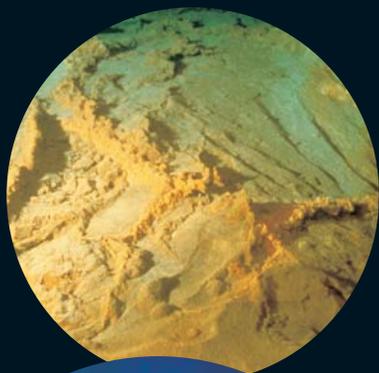


Roger Hekinian
Nicolas Binard

LE FEU DES ABYSSES



LE FEU
DES ABYSSES

Roger Hekinian

Nicolas Binard

**LE FEU
DES ABYSSES**

Éditions Quæ

Éditions Quæ
RD 10
F-78026 Versailles

© Éditions Quæ 2008
ISBN : 978-2-7592-0281-2

Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation des éditeurs ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris.

Préface

La Terre : « planète Océan » ! Nous commençons à peine à le réaliser. Notre horizon est encore pour l'essentiel confiné aux terres émergées et, durant l'été, à la mer qui couvre nos plages. Sans doute les passionnés d'histoire ou de légendes savent-ils que des régions maintenant inondées s'étendaient au-delà de nos rivages dans les temps préhistoriques, lorsque les glaciers avaient stocké une partie de l'eau de mer sur nos terres. Le déluge de la Bible et de nombreux autres mini-déluges comme celui de la ville d'Ys ont gardé le souvenir de cette montée des eaux qui a chassé nos ancêtres des terres qu'ils pensaient avoir colonisées de manière définitive.

Mais, pour beaucoup d'entre nous, la terre qui disparaît sous l'eau du rivage est le prolongement de celle sur laquelle nous vivons. Nous savons aujourd'hui que si ceci est vrai lorsque la profondeur reste inférieure à 2 000 ou 3 000 mètres, les bassins plus profonds que sont les abysses couvrant 60 % de la surface de notre planète sont radicalement différents des continents sur lesquels nous vivons. Il a fallu, comme le disait le géologue canadien Tuzo Wilson, que l'homme se décide à regarder au-delà du « pont » du bateau sur lequel il vogue pour découvrir que les continents étaient entourés par un monde tout autre, un monde volcanique, minéral, sans végétaux, noyé dans une obscurité totale. L'aventure qu'a représentée cette exploration de la « planète Océan » est très récente et s'inscrit pour l'essentiel dans les cinquante dernières années. Elle a été le fait de quelques géologues qui ont consacré leur vie à cette enquête difficile réclamant beaucoup de patience, de persévérance et parfois de courage tout court. Les auteurs de ce livre en font partie.

Car les fonds océaniques se cachent sous un autre monde, celui que Jacques-Yves Cousteau appelait le « monde du silence », un monde liquide, hostile à la pénétration humaine et qui se défend contre toute intrusion. Il n'était pas facile d'explorer ces abysses à partir de la surface, en se servant d'outils de prélèvement au bout de milliers de mètres de câble, puis d'ondes acoustiques et enfin de submersibles et de différents engins tractés ou autonomes. La seconde guerre mondiale fut à l'origine d'un formidable développement des moyens d'exploration dû à la guerre sous-marine. L'*US Navy* développa alors des liens étroits avec des scientifiques spécialistes de l'océan qu'elle avait recrutés. Elle continua à financer leurs recherches après la guerre. L'un de ceux-ci, Maurice Ewing, avait fondé le *Lamont Geological Observatory* (aujourd'hui *Lamont Doherty Geological Observatory*) qui joua un rôle clef dans la formidable aventure de l'exploration des fonds océaniques. C'est là que je fis la connaissance du premier auteur de cet ouvrage, Roger Hekinian, dans les années 1960. Tous les deux, nous allions participer à l'aventure de la création du Centre océanologique de

Bretagne où Roger travaille depuis. Il me semble que l'on peut dire que ce livre est comme le fruit privilégié, venu à l'automne de cette longue vie de travail de recherche acharné.

Car Roger est un passionné, un passionné de l'exploration scientifique des fonds de l'océan. Il s'y consacre depuis plus de quarante ans, mais non par goût de la mer. Celle-ci n'est pour lui que le passage obligé pour rejoindre son objet d'étude. Et il n'apprécie que modérément ce qu'elle lui fait subir à bord des navires et sous-marins. Mais il a une véritable histoire d'amour avec les roches volcaniques qui génèrent la croûte océanique et fabriquent ces paysages étranges qu'aucun être n'avait jamais contemplés avant que l'homme n'introduise la lumière dans les épaisses ténèbres qui les enveloppent en permanence.

Pour saisir un peu la force de cette passion de Roger pour ces roches, il faut l'avoir vu à la descente du submersible se précipiter sur le panier d'échantillons et saisir les roches une à une pour les faire parler. Car elles lui parlent. Elles lui racontent leur histoire. Elles lui disent comment elles sont nées, d'abord comme quelques perles de lave enserrées dans leur matrice mantellique, à quelques 60 kilomètres de profondeur dans la Terre, des perles qui se sont progressivement agglomérées puis qui ont atteint le premier réservoir, la chambre magmatique, véritable raffinerie où se préparent les laves qui vont former ce que l'on appelle la croûte océanique. Certaines seront expulsées de la chambre, lors des éruptions volcaniques, et donneront au contact de l'eau de mer ces formes étranges et souvent spectaculaires dont ce livre présente non seulement de magnifiques et très rares photos, mais nous apprend à lire l'histoire de leur formation. D'autres refroidiront plus lentement en profondeur, formant la partie profonde de la croûte qui ne pourra être observée que dans certaines grandes cassures.

Je suis personnellement très sensible à l'aspect dramatique et à l'étrange beauté de ces paysages volcaniques sous-marins, résultant de l'affrontement spectaculaire entre le feu jaillissant de l'intérieur de la Terre et l'eau des grandes profondeurs, noces violentes qui président depuis l'aube des temps géologiques à la formation de la nouvelle pellicule terrestre. J'ai eu la chance de faire la première plongée scientifique dans le rift Atlantique durant le programme FAMOUS et les souvenirs de cette plongée restent pour moi, 34 ans plus tard, un moment d'une intensité inoubliable. Mais je ne voudrais pas que le lecteur se méprenne sur ce livre. Il s'agit bien d'un livre scientifique qui fait le point de l'état actuel de nos connaissances sur ce milieu fascinant en le documentant avec un ensemble étonnant de photos, en grande partie inédites. Je le recommande à la fois comme un document scientifique pointu, un manuel d'initiation au volcanisme sous-marin, et un parcours dans le monde étrange des abysses. Les lecteurs apprécieront les nombreuses illustrations très pédagogiques, les cartes, le glossaire très complet et le texte précis qui « colle », grâce aux photos du fond qu'il commente, à la réalité du terrain.

Les auteurs réalisent ce dont j'ai souvent rêvé mais que je n'ai jamais mené à bien, un parcours sur les grands fonds à travers un océan, en commençant avec la naissance de la croûte, à l'axe des dorsales, et en suivant l'histoire de son vieillissement et de son approfondissement au fur et à mesure qu'elle s'enfonce, suite au refroidissement de la lithosphère nouvellement formée à laquelle elle appartient. Ce parcours débute à l'axe où se forment les nouveaux fonds marins, examine une faille transformante, cette grande cassure tectonique qui expose les roches les plus profondes de l'intérieur de la croûte et du manteau sous-jacent, puis explore les volcans des flancs, témoins du volcanisme tardif, avant de nous entraîner dans le monde impressionnant des immenses volcans produits par les points chauds qui ont formé les montagnes les plus hautes de notre globe, telle celle de Hawaii.

Je souhaite que le lecteur trouve dans ce livre autant de plaisir que j'en ai eu à le découvrir. Je souhaite tout particulièrement que ceux qui ont pour tâche d'initier des élèves ou des étudiants à la géographie et la géologie de la « planète Océan » profitent pleinement de ce remarquable outil pédagogique.

Xavier Le Pichon, membre de l'Académie des sciences
Professeur de géodynamique au Collège de France

Avant-propos

Sur Terre, comme sur les autres planètes, le volcanisme et les phénomènes associés sont l'expression en surface des grands mécanismes de transfert de chaleur par lesquels la planète évolue. Cette activité est en très grande partie due à la chaleur interne produite par la désintégration radioactive d'éléments à longue vie tels que le potassium, l'uranium ou le thorium. La dissipation épisodique de masses magmatiques et d'énergie dans la lithosphère, l'hydrosphère, la biosphère et l'atmosphère est contrôlée par de très nombreux processus. Ces derniers sont à l'origine de la genèse des croûtes océanique et continentale, de la production d'énergie géothermique, de la formation de dépôts minéraux, et d'échanges thermiques permanents entre la lithosphère et les eaux océaniques.

Les fonds marins regroupent le plus grand nombre de volcans qui soit à la surface du globe, essentiellement sur les dorsales et aux points chauds. Le volcanisme sous-marin est lié à l'interaction de nombreux facteurs dont l'intense fracturation tectonique de la lithosphère. Ainsi, trois domaines sont favorables à l'apparition du volcanisme océanique :

- les sites tectoniques actifs représentés par les dorsales océaniques ;
- les lignes de faiblesse préexistantes induites lors de la formation de la lithosphère, telles les failles transformantes ;
- les hétérogénéités thermiques du manteau, matérialisées en surface par les points chauds.

Ce volcanisme est une des conséquences de l'évolution physique et chimique de la Terre, qui consiste en un transfert permanent de matière et d'énergie entre les enveloppes internes et externes. Chaque épanchement de lave, par exemple, aussi modeste soit-il, contribue au dégazage du manteau en libérant des corps volatils, tels que l'hydrogène, le gaz carbonique, le méthane ou les gaz rares, qui se retrouvent dans l'atmosphère ou bien se dissolvent lentement dans l'eau de mer.

Le magmatisme des fonds océaniques contribue, au travers de la circulation hydrothermale, à la formation de minerais (fer, cuivre, zinc, cobalt, nickel, manganèse, etc.). Analogues aux minerais de cuivre que les Romains et d'autres avant eux exploitaient à Chypre, les dépôts métallifères actuels témoignent de la répétition et de la pérennité des processus volcaniques au cours des temps géologiques.

Enfin, la chaleur et les sels minéraux apportés par le magmatisme sous-marin, et transportés par les fluides hydrothermaux, créent au fond des océans des creusets propices au développement de la vie. Sous des pressions titanesques et par des températures infernales, la vie des abysses, qui n'a besoin ni d'oxygène ni de lumière pour apparaître, est sujet d'étude pour de nombreux bactériologistes et biologistes marins.

En 1973 et 1974, le projet FAMOUS (French American Mid-Ocean Undersea Survey) marquait le début de l'exploration du volcanisme océanique, grâce à l'utilisation des engins submersibles habités. Depuis cette première dans l'histoire des sciences géologiques, de très nombreuses campagnes océanographiques se sont succédé partout sur la planète, particulièrement sur les sites où règne une activité volcanique. La moisson de documents photographiques, obtenue par les submersibles *Cyana* et *Nautille* de l'Ifremer, est aujourd'hui considérable et permet de découvrir la fantastique palette des formes volcaniques et des phénomènes éruptifs qui prennent place sur le fond des océans.

Avec l'avènement de la théorie de la tectonique des plaques, il y a un peu plus de trente ans, et le progrès des techniques d'exploration des océans, les connaissances et la bibliographie relatives aux géosciences marines se sont considérablement renouvelées. Il n'est donc pas toujours aisé de comprendre le vocabulaire et les concepts utilisés pour décrire tel ou tel phénomène, et d'aboutir à une vue d'ensemble claire où les apports des différentes disciplines se complètent. Nous avons donc tenté de transposer des connaissances encore jeunes dans un ouvrage destiné à satisfaire la curiosité légitime du plus grand nombre de lecteurs afin de dévoiler ce visage caché de notre planète que constitue le monde abyssal.

La difficulté majeure fut le choix, en premier lieu, des illustrations, devant la masse des données accumulées depuis vingt-cinq ans, et, en second lieu, des aspects à développer. Il nous a paru important de privilégier la description simple des phénomènes et des formes en apportant, quand cela fut possible, des informations spécifiques afin que chacun puisse y trouver une base de documentation. Notre idée est de proposer un outil permettant de découvrir de nouveaux champs dont le lecteur poursuivra l'investigation à sa convenance, aidé en cela par quelques sources bibliographiques.

Ce volume n'aurait pas pu être réalisé sans le travail de recherche entrepris par Nicolas Binard lors de son séjour (1988-1991) en tant qu'étudiant en thèse à l'université de Bretagne occidentale et à l'Ifremer (Brest). Une première version de l'ouvrage avait été élaborée en 1995. Mais elle a été revue en 2007 pour y intégrer de nouvelles données. Malgré le temps écoulé, les données de cet ouvrage sont toujours d'actualité et permettent une meilleure compréhension des processus géologiques qui façonnent le fond des océans.

Remerciements

Les photographies sous-marines ont été prises par les submersibles *Cyana* et *Nautile* du Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO), devenu Ifremer (Institut français pour l'exploitation de la mer) en 1984. Les relevés bathymétriques et autres données ont été obtenus lors des campagnes océanographiques menées à bord des navires océanographiques *Jean Charcot*, *Le Suroît*, *Le Nadir*, *L'Atalante* (Gestion des navires, GENAVIR) et le *F.S. Sonne* (Allemagne). Le soutien technique et le suivi des plongées sous-marines par les équipes de GENAVIR de Brest et de Toulon (La Seyne-sur-Mer) ont été déterminant pour effectuer les échantillonnages et les prises de vue sous-marines. C'est grâce à l'expertise et au dévouement des pilotes, ingénieurs, techniciens, commandants, officiers et marins participant aux différentes missions à la mer que l'on a pu obtenir les documents qui nous ont permis de réaliser cet ouvrage. Nous sommes particulièrement reconnaissant à J. Roux, G. Sciarronne, N. Compagnot, G. Arnoux, J.-M. Nivaggioli, M. Normand, Y. Poitier, J.-J. Kaioun, J.-P. Triger, M. Dubois, O. Cipriani, J.-P. Justiniano, P. Guyavarch, T. Dubois, T. Edmond et S. Beraud qui ont participé aux missions de plongées en tant que responsables en surface, pilotes et co-pilotes et ingénieurs des sous-marins. Nous tenons à remercier le dévouement et la motivation des commandants G. Paquet†, M. Madec, H. Guidal, G. Thebaud, A. Gourmelon, J. Keranflech, G. Guesguen, A. Girard, G. Tredunit et H. Andresen qui ont assuré le suivi des manipulations des engins et le bon fonctionnement des navires lors des missions à la mer.

Les études des points chauds ont été entreprises dans le cadre de la collaboration internationale franco-allemande sur le volcanisme intraplaque sous la direction de Jean-Louis Cheminée† de l'Observatoire volcanologique de l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP, France) et de Peter Stoffers du département des sciences de la terre de l'université de Kiel (Allemagne).

Nous remercions le département des géosciences marines de l'Ifremer à Brest pour l'assistance technique concernant la reproduction de documents. Nous sommes particulièrement reconnaissants à Daniel Carré† et Jean-Pierre Mazé (Ifremer, Brest) pour avoir effectué les premiers croquis des figures et cartes bathymétriques utilisées dans cet ouvrage. Gilbert Floch et Ronan Apprioual sont aussi remerciés pour leur aide apportée au conditionnement des échantillons récupérés lors des campagnes océanographiques. Vic Chapron et Gérard Vincent (direction de la communication de l'Ifremer, Brest) ont contribué au développement des photographies prises pendant les campagnes de plongée des missions *Cyatherm* (1982) et *Geocyarise 1* et *3* (1984). Michel Guillou, Stéphane Lesbats et Olivier Dugornay de la direction de la communication Ifremer (Brest) ont apporté leur aide dans le choix de certains clichés.

Les photographies sous-marines nous ont été fournies par l'Ifremer (copyright Ifremer). Nous sommes reconnaissants à Danièle LeMercier de son aide pour la mise en forme des légendes photographiques.

Nous remercions les différents chefs de mission : Jean Francheteau (Institut universitaire européen de la mer, IEUM ; université de Bretagne occidentale), Peter Stoffers (université de Kiel, Allemagne), Jean-Louis Cheminée, Vincent Renard (Ifremer, Brest), Daniel Bideau† (Ifremer, Brest) et Jacques Dubois (IPGP, Paris), pour avoir organisé et dirigé les campagnes océanographiques. Ces campagnes sont désignées comme suit : *Sea Rise 2* de 1980, *F.S. Sonne 47* et *65* de 1987 et 1989, *Teahitia* (IPGP) de 1989, *Geocyarise 1* (Ifremer) de 1984, *Oceanaut* (Ifremer) de 1995 et *Polynaut* (IPGP) de 1999, respectivement. D'autre part, la photographie N° 9 a été prise lors de la campagne *Hero* de 1991 avec comme chef de mission Daniel Desbruyeres (Ifremer). Les photographies de l'île de Pitcairn ont été mises à notre disposition par Dietrich Ackermann.

Nous sommes très reconnaissants aux professeurs Pierre Vincent du département des sciences de la terre de l'université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand, René Maury du département de géologie de l'université de Bretagne occidentale et Xavier le Pichon, professeur de géodynamique au Collège de France, pour leurs commentaires et leurs encouragements pendant la rédaction de cet ouvrage. Nous remercions Nelly Courtay de nous avoir encouragé à remettre à jour cet ouvrage. Nous remercions vivement Rachel Vincent, Laurence Rodriguez, Joëlle Veltz et Martine Segulier-Guis pour la préparation éditoriale du texte et des figures.

(†Décédés)

Table des matières

Préface.....	5
Avant-propos.....	9
Remerciements.....	11
La planète océane.....	15
Naissance d'une planète.....	15
Une structure en pelure d'oignon.....	16
Une lithosphère en mouvement.....	18
Naissance d'un océan.....	18
Le renouvellement des fonds océaniques.....	21
La lithosphère océanique recyclée.....	22
Téthys, un océan disparu.....	22
Le cycle de Wilson.....	24
Une journée de plongée.....	27
Les submersibles <i>Cyana</i> et <i>Nautile</i>	27
Une longue préparation.....	29
Neuf heures d'intense émotion.....	29
La dorsale océanique.....	33
La dorsale du Pacifique est.....	33
Des fonds marins à ciel ouvert.....	41
L'accrétion océanique.....	45
Les sources chaudes du fond des mers.....	62
La faille transformante.....	71
San Andreas, la plus célèbre faille transformante.....	71
La faille transformante Garrett.....	72
Les volcans hors-axe.....	89
Les volcans hors-axe à 11° 30' N et 13° N.....	89
L'origine des volcans hors-axe.....	92

Une croissance par étapes	92
Du pahoehoe au « aa ».....	93
Une forme tronconique	94
La caldera	96
Formation de gisements hydrothermaux	97
Formation de gisements métallifères	98
L'abondance des monts sous-marins.....	100
Les points chauds	103
Les points chauds de la Société, des Australes et de Pitcairn	103
Le volcan sous-marin intraplaque.....	123
Le point chaud de Pitcairn.....	141
De Teahitia à Bora-Bora : la construction d'une île	143
Bibliographie	147
Glossaire	153
Campagnes photographiques	175

La planète océane

Des fonds marins en permanente mutation

Parmi les neuf planètes du système solaire, la Terre est la seule dont la température de surface permet l'existence de l'eau sous forme solide, liquide et gazeuse. Les océans recouvrent 71 % de la surface du globe et représentent un réservoir de plus de 1 300 millions de km³. Les eaux cachent en fait la région volcanique la plus étendue de la planète où une multitude de volcans, en activité permanente, participe chaque année à la création de 20 km³ de croûte océanique.

Naissance d'une planète

Il y a 4,7 milliards d'années, à la place de notre système solaire, se trouvait une vaste nébuleuse faite de gaz et de poussières. La transformation de cette nébuleuse vers le monde que l'on connaît aujourd'hui est loin d'avoir été simple. Sous l'action de la gravité, ce nuage s'est contracté progressivement en son centre où s'exerçaient de très fortes pressions. Le noyau ainsi formé s'est réchauffé rapidement. Les poussières gravitant autour se sont concentrées en boules de tailles variables ; l'une d'elles, située à environ 150 millions de kilomètres du centre, devint la Terre.

Lorsque la température au centre du noyau a atteint 11 millions de degrés, des réactions nucléaires ont débuté. Les atomes d'hydrogène entrèrent en fusion, le

noyau de notre nuage devint une étoile : le Soleil est né. Ce gigantesque réacteur nucléaire provoqua un souffle prodigieux, un terrible vent solaire qui chassa au loin les gaz et les poussières résiduelles. La Terre ainsi nettoyée n'était encore qu'un amas de blocs qui ont partiellement fondu sous l'effet des chocs pour former un « magma océan ». Une ségrégation progressive des matériaux s'est alors opérée sous l'effet de la gravité, les plus lourds migrant vers le centre pour former le noyau. Des blocs de roche et de glace circulèrent encore un peu partout au travers du système solaire. Participant à leur formation, ils bombardèrent les planètes, creusant alors de vastes cratères dont Mercure ou la Lune, par exemple, portent encore les cicatrices. Mais bien que la Terre fût aussi affectée par ce bombardement, l'érosion a effacé depuis la plupart des traces. Vers 3,8 milliards d'années les chutes de météorites devinrent moins fréquentes et la surface de la Terre commença à prendre consistance. Une mince couche de magma se solidifia progressivement pour donner le premier sol ferme.

Issue du même disque de matière que les autres planètes du système solaire, la Terre montre avec celles-ci de nombreuses similitudes. Elle se distingue cependant par une grande spécificité : la tectonique des plaques témoigne d'une lithosphère active, et l'atmosphère, l'hydrosphère ainsi qu'une évolution chimique particulière ont favorablement permis à la vie de s'y développer depuis plus de 3 milliards d'années.

Une structure en pelure d'oignon

Au moment de sa formation, la Terre est une boule de matière à très haute température. L'énergie interne provient principalement de deux sources : l'énergie de formation, due à la collision des petits corps et à la transformation de l'énergie cinétique en énergie thermique, et l'énergie dégagée par la désintégration des éléments radioactifs. La dissipation progressive de cette énergie vers la surface est à l'origine du volcanisme, du renouvellement permanent des fonds océaniques et des mouvements des plaques que l'on observe actuellement. Le flux d'énergie qui s'échappe à la surface du globe, encore appelé flux géothermique, est estimé à 1,4 microcalories par cm^2 et par seconde, en moyenne.

Grâce à cette très haute température, la planète va lentement se transformer sous l'effet de la gravité, par différenciation des éléments chimiques qui la constituent. Les éléments les plus lourds vont ainsi migrer vers le centre, alors que les plus légers sont refoulés vers les zones périphériques. La Terre acquiert alors une structure en pelure d'oignon, faite d'une succession d'enveloppes concentriques de densités croissantes vers l'intérieur du globe (figure 1).

C'est notamment l'étude géophysique des séismes qui a permis d'appréhender la structure du globe terrestre, en mettant en évidence les discontinuités majeures qui l'affectent. Celles-ci sont principalement : la discontinuité de Mohorovicic (ou Moho), à 30 km en moyenne, la discontinuité de Gutenberg, à 2 900 km, et

celle de Lehman, à environ 5 100 km de profondeur. Elles définissent trois enveloppes : la croûte qui peut être océanique ou continentale, le manteau divisé en manteaux supérieur et inférieur, et le noyau subdivisé en un noyau externe (liquide) et une graine (solide). Cependant, la complexité de la Terre oblige à prendre en compte un nombre plus important de divisions, en fonction des

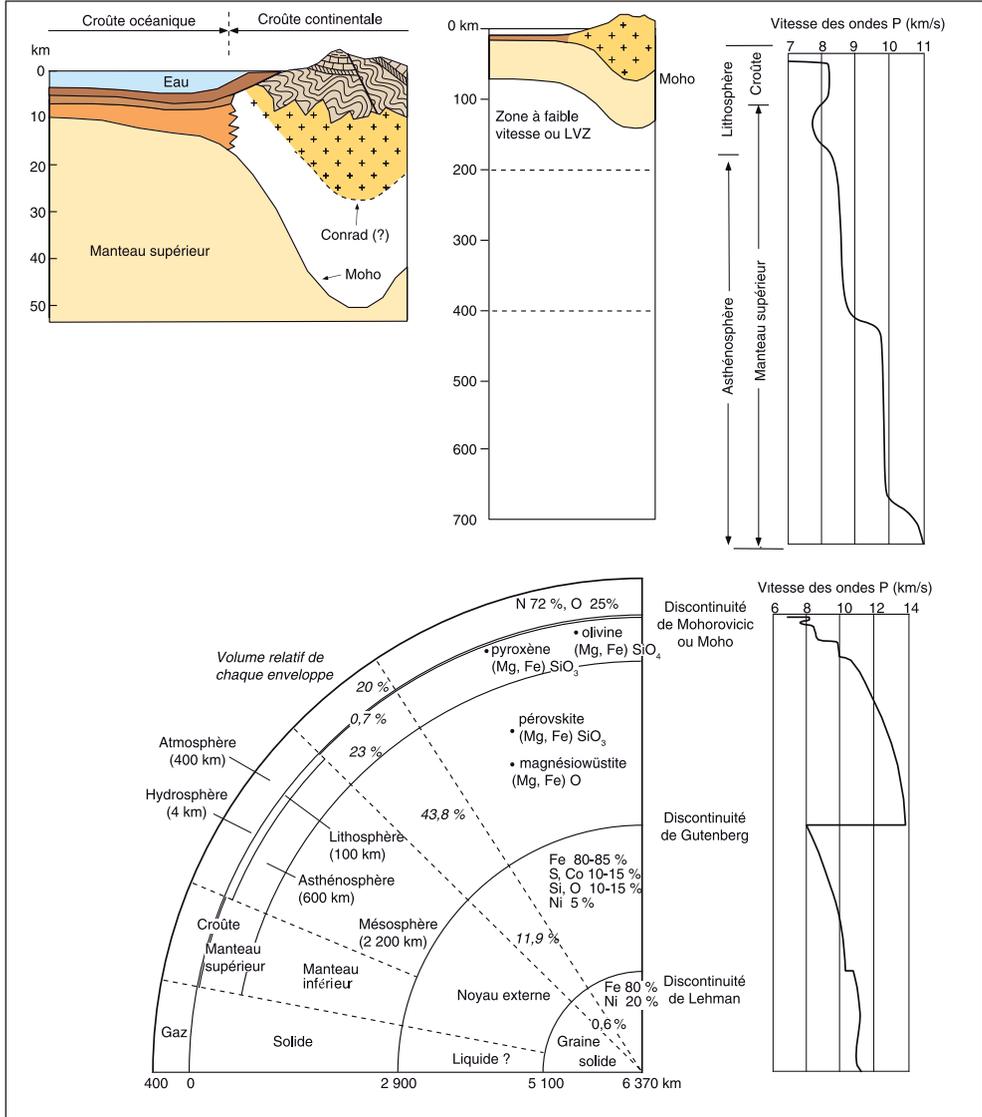


Figure 1. La structure interne du globe terrestre. L'étude géologique permet de connaître avec précision les premiers kilomètres à la surface de la Terre. L'étude des séismes naturels a permis de révéler la structure interne du globe avec ses nombreuses discontinuités, chacune soulignant la frontière entre deux enveloppes dont les propriétés chimiques, cristallographiques, physiques ou mécaniques évoluent sur une distance de quelques hectomètres à quelques kilomètres.

propriétés physiques et pétrologiques des enveloppes. Cela concerne principalement la partie externe du globe terrestre, la mieux connue car la plus proche de la surface d'où sont réalisées les observations.

Une lithosphère en mouvement

Très chaude au centre, mais froide à la périphérie, la Terre dissipe une énergie estimée à environ $4,2 \cdot 10^{13}$ W (watts) pour l'ensemble du globe. La perte de chaleur moyenne de $0,05$ W par m^2 n'est pas la même partout. Le flux thermique est sensiblement le même pour les continents et les océans. Très inégalement réparti à la surface de la planète, il masque en fait de grandes disparités, comme dans certaines zones volcaniques, telles que les dorsales océaniques, où il peut atteindre $0,4$ à $0,6$ W par m^2 . D'importants échanges thermiques s'effectuent donc depuis le centre vers la surface du globe grâce, en particulier, aux mouvements de convection qui agissent à l'intérieur du manteau. Ces mouvements sont à l'origine de la fracture de la lithosphère en une douzaine de plaques majeures, ainsi que du déplacement de ces dernières (figure 2).

L'ensemble des mouvements qui affectent la lithosphère est appelé tectonique des plaques (Le Pichon, 1968, 1969 ; Morgan, 1968). L'ascension de matériaux chauds dans le manteau provoque en surface l'apparition d'un volcanisme intense le long des dorsales médio-océaniques (dorsale du Pacifique est) où les plaques lithosphériques s'écartent. Par opposition, les matériaux formant l'enveloppe superficielle plongent vers l'intérieur du globe au niveau des zones de subduction, ou marges actives (ceinture de feu du Pacifique), où les plaques se rapprochent (figure 3). Lorsque les mouvements se font parallèlement aux frontières des plaques, apparaît alors une faille transformante, comme celle de San Andreas en Californie. L'ensemble de ces phénomènes planétaires peut être observé, à une échelle plus réduite et à une vitesse bien supérieure, à la surface des lacs de lave où le brassage thermique provoque son renouvellement permanent.

La somme de tous les mouvements qui ont affecté la lithosphère depuis sa création est à l'origine de son façonnement superficiel (mers, montagnes, etc.). S'ils sont lents, ils ne se font pas toujours sans bruits. C'est aux frontières des plaques que se concentre la majeure partie de l'activité volcanique et sismique de la planète, qui engendre éruptions et tremblements de terre destructeurs.

Naissance d'un océan

La naissance d'un océan sous-entend l'ouverture ou la prolongation d'une dorsale océanique à travers un continent. Lorsqu'une dorsale se crée au milieu d'une plaque océanique, on ne peut pas vraiment assimiler cela à l'ouverture