

Chapitre 3 LA DIVERGENCE LITHOSPHERIQUE

OBSERVATION DIRECTE MEDIO-OCEANIQUE DE TERRAIN

observation sous-marine directe de terrain à l'axe des dorsales médio-océaniques : lorsque le plancher océanique n'est pas recouvert de sédiments, des basaltes (à olivine, pyroxènes et feldspaths en baguette + un verre, pâte amorphe noire montrant que les cristaux n'ont pas eu le temps de se former par refroidissement) peuvent être directement observés à leur sortie à l'axe de la dorsale lors de leur refroidissement rapide, il sort à plus de 1000°C dans de l'eau de mer à 4°C environ. Son refroidissement rapide génère des formes en boules sombres qui craquent d'où peut ressortir de la lave qui recristallise vite en boules : cette forme en coussin (pillow lavas en anglais = oreillers de lave) est un indice de refroidissement rapide de la lave chaude sous l'eau

preuve vidéo : [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=I9RNIP2OYU0](https://www.youtube.com/watch?v=I9RNIP2OYU0)

olivine + pyroxène + H₂O => minéral hydraté verdâtre (comme une peau de serpent) d'une péridotite dite serpentinisée (Mg,Fe,Ni)₃Si₂O₅(OH)₄ (+ brucite)

OÙ SAVOIR DE QUOI EST COMPOSÉE LA LITHOSPHERE OCÉANIQUE ?

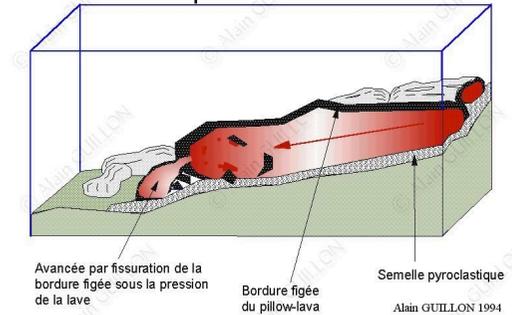
- failles transformantes médio-atlantique: ex : faille VEMA : 1988
- ophiolites en montagne (Chenaillet, Alpes // Oman (Himalaya))
- observation directe en submersible comme dit avant

[HTTPS://TP-SVT.PAGESPERSO-ORANGE.FR/OPHIOLITE.HTM](https://tp-svt.pagesperso-orange.fr/ophiolite.htm)

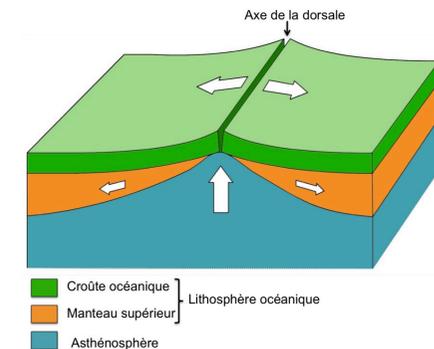
COMMENT DÉTERMINER UNE VITESSE D'ACCRÉTION ?

[HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=8GQCE8Y09IG](https://www.youtube.com/watch?v=8GQCE8Y09IG)

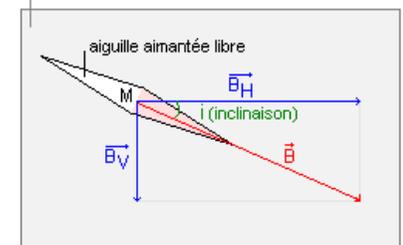
Formation des pillow-lavas



La divergence a lieu au niveau des dorsales océaniques qui sont des reliefs caractérisés par une activité magmatique. Elle est matérialisée par l'écartement en sens opposé de deux points situés chacun sur une plaque.



plan du méridien magnétique (plan contenant l'axe sud-nord de l'aiguille et le point M)



**- 1/ PAR
PALÉOMAGNÉTISME**

En tout point du globe, dans l'air ou sous terre, une aiguille aimantée s'oriente selon une direction bien définie : il existe donc un champ magnétique terrestre, de direction parallèle aux longitudes, ces lignes immatérielles reliant pôle Nord et Sud. La Terre se comporte comme un aimant gigantesque. Dans la nature, le champ magnétique terrestre peut être assimilé à celui produit par un barreau aimanté géant placé au centre de la Terre et, présentant deux pôles magnétiques. On appelle dipôle l'axe de ce barreau.

Dans le cas de la Terre, le dipôle forme un angle de 11° avec l'axe de rotation de la Terre : les pôles magnétiques ne sont donc pas superposés aux pôles géographiques, qui, eux, correspondent à l'axe de rotation de la Terre. (Coordonnées du pôle nord magnétique : $75^\circ \text{N } 101^\circ \text{W}$; coordonnées du pôle sud magnétique : $67^\circ \text{S } 143^\circ \text{E}$.)

En conséquence une boussole n'indique pas le Nord géographique mais magnétique.

Certains animaux, en particulier les oiseaux migrateurs ont des récepteurs contenant de la magnétite (oxyde de fer complexe Fe_3O_4) qui agit comme un corps magnétique et leur permet de s'orienter et d'ainsi retrouver leur aire de vie. L'intensité de ce champ est exprimée en Tesla ou son sous-multiple le nanotesla ($1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$).

Ce champ est positif dans l'hémisphère Nord où les lignes de champ rentrent dans la Terre, il est négatif dans l'hémisphère Sud où les lignes de champ en sortent. La valeur moyenne actuelle en France : 46000 nT . L'hypothèse actuelle sur l'origine du champ magnétique est la suivante :

Le noyau externe, liquide métallique serait le siège actuel de courants hydrodynamiques engendrant des courants électriques provoquant à leur tour un champ magnétique.

Le magnétisme rémanent des roches. Certaines roches contiennent des minéraux ferromagnésiens (hématite Fe_2O_3 et magnétite Fe_3O_4) s'aimantent dans un champ magnétique et en conservent la mémoire.

S'il s'agit de roches magmatiques, l'aimantation s'est faite lors du refroidissement au-dessous d'une température nommée point de Curie (500 à 700° selon les minéraux), nettement inférieure à la température de fusion de la roche (900 à 1000°C).

Le plancher océanique est formé de basalte qui s'aimante au moment de leur formation et conservent ainsi la mémoire du champ magnétique terrestre du moment de leur mise en place. Les minéraux ont fossilisé l'intensité, la déclinaison et l'inclinaison de ce champ.

Depuis le début du siècle, on sait que le champ magnétique s'inverse à des intervalles plutôt réguliers.

On définit :

- des époques normales : pendant lesquelles le sens du champ est identique au sens actuel (une boussole indique le Nord)
 - des époques inverses : pendant lesquelles le sens du champ magnétique est contraire à l'actuel (une boussole indiquerait le Sud comme il y a 1 Ma) Une échelle magnétostratigraphique a été établie du Jurassique (-201 Ma) à l'actuel. Elle a valeur mondiale.
- A l'intérieur des époques, les changements très courts sont appelés événements, on leur donne le nom d'une région : l'enregistrement en continu de ce champ révèle des anomalies par rapport au champ actuel.

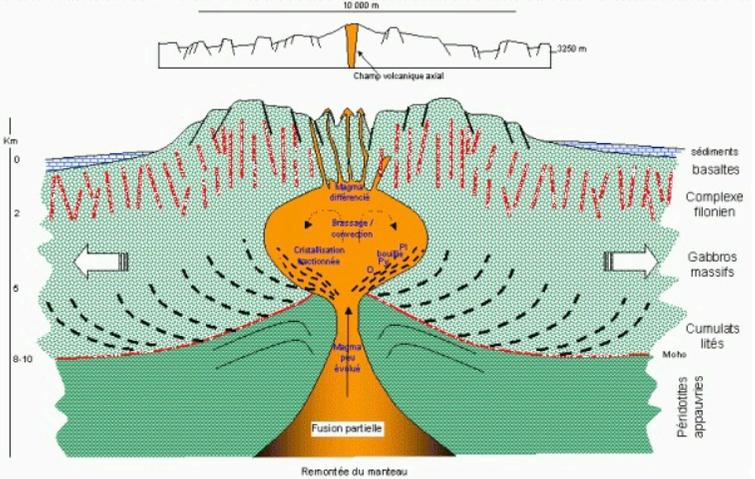
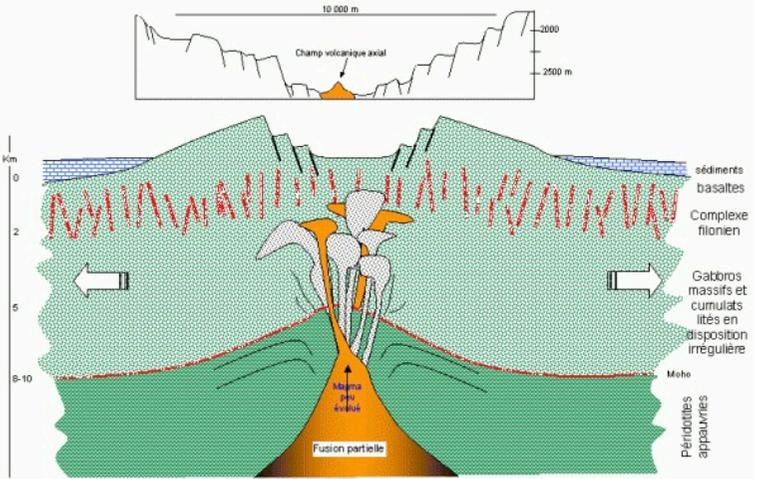
On définit alors :

- des anomalies positives (>0) : champ réel supérieur au champ théorique (en noir) :
une anomalie positive signifie que le basalte a fossilisé un champ de même sens que le champ actuel donc l'aimantation rémanente s'ajoute au champ actuel
- des anomalies négatives (<0) : champ réel inférieur au champ théorique (en blanc)
Une anomalie négative signifie que le basalte a fossilisé un champ magnétique de sens inverse de celui du champ actuel donc l'aimantation rémanente se soustrait au champ actuel. Les résultats sont cartographiés : ce n'est pas le champ qui est cartographié mais ses anomalies

**- 2/ PAR L'ÂGE
DES SÉDIMENTS
DE PLANCHER**

la connaissance de l'âge des sédiments se fait par principe de superposition des couches et des fossiles connus retrouvés

La tomographie sismique révèle que le manteau inférieur est moins hétérogène que le manteau supérieur, et les anomalies observées n'ont pas de lien avec la tectonique lithosphérique actuelle. On observe cependant des zones anormalement froides, qui correspondraient aux zones où de la lithosphère océanique a été subduite dans le passé : les zones de fusion partielle des péridotites sous l'axe des dorsales est matérialisé par une anomalie négative indiquant un matériau moins dense que prévu interprété comme plus chaud et on y note l'absence de séismes (hypocentres)

TYPE DE DORSALE	DORSALE RAPIDE : PACIFIQUE EST	DORSALE LENTE : ATLANTIQUE NORD
<p>VITESSE D'ACCRETION (EXPANSION) ÉVALUÉE PAR LES ANOMALIES PALÉOMAGNÉTIQUES OU LE PLANCHER DATÉ PAR E 1ER DÉPÔT SÉDIMENTAIRE DATÉ PAR LES FOSSILES</p>	<p>2 à 5 cm.an-1</p> <p>https://www.youtube.com/watch?v=EAAM9bPzh-o https://www.youtube.com/watch?v=cfEIJ5nCON8</p>	<p>8 à 15 cm.an-1</p>
<p>MORPHOLOGIE PAR SISMIQUE RÉFLEXION / RÉFRACTION / TOMOGRAPHIE SISMIQUE</p>		<p>MUSH = sommet de l'asthénosphère</p> 

connue par les ophiolites continentales : type Chenaillet (Alpes)
<http://christian.nicollet.free.fr/page/Alpes/chenaillet/chenaillet.html>

ou faille transformante (VEMA, 1988 par ex)

type Oman
<http://christian.nicollet.free.fr/page/oman/oman.html>

STRUCTURE LITHOLOGIQUE (PÉTROLOGIQUE)

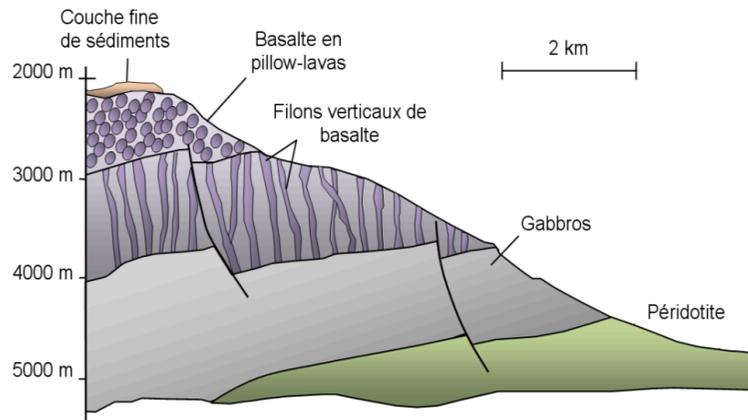
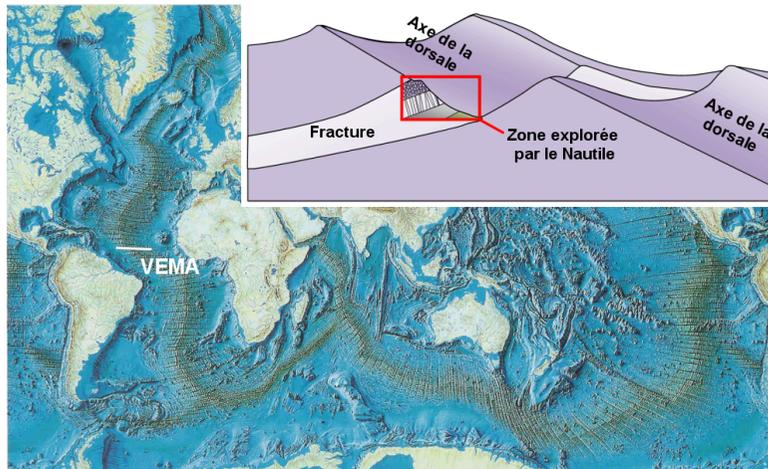
CONNUE PAR 4 MÉTHODES :

1/ OPHIOLITE CONTINENTALE
(LAMBEAU D'EX-OcéAN =
PALÉO-OcéAN COINCÉ SUR
DANS UNE CHAÎNE DE
MONTAGNE) : FRAGMENTS DE
LITHOSPHERE OcéANIQUE
PRÉSERVÉS À TERRE, ET
REPOSANT SUR DE LA
LITHOSPHERE CONTINENTALE.
IL S'AGIT DE VESTIGES
D'OcéANS DISPARUS

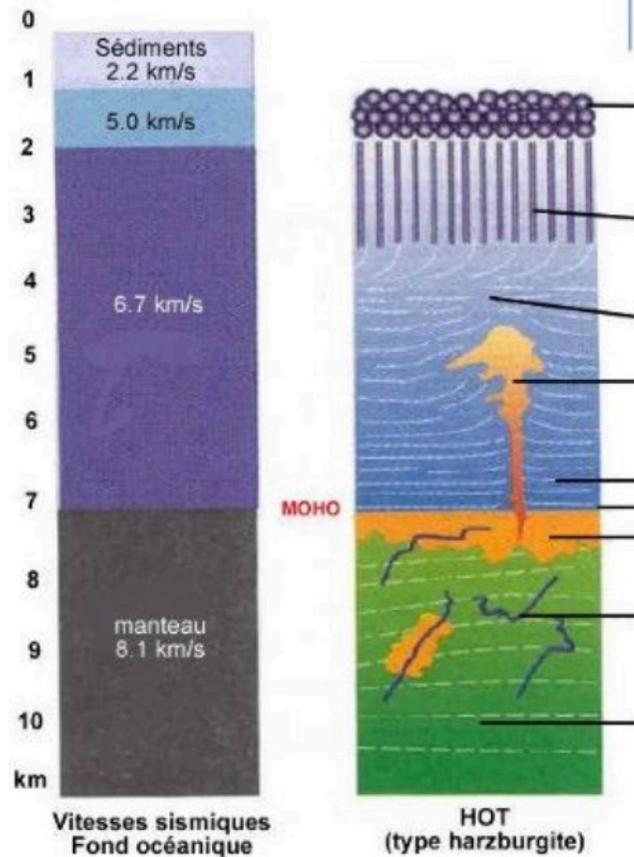
2/ DONNÉES SISMIQUES (4
COUCHES)

3/ FORAGE (PROGRAMME
INTERNATIONAL IODP
(INTERNATIONAL OCEAN
DRILLING PROGRAM)

4/ DRAGAGE DES ZONES DE
FRACTURE (VEMA PAR EX) =
OPÉRATION D'EXTRACTION DE
ROCHES DE FOND DE L'EAU

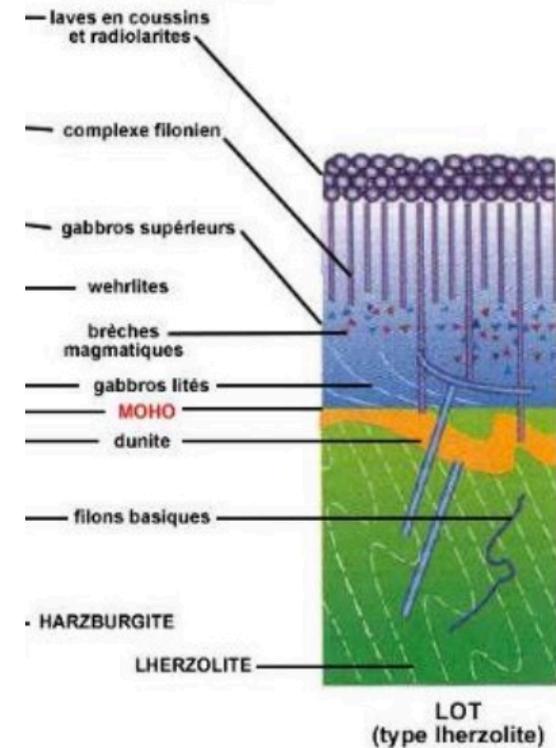


DANS LE CAS DES OPHIOLITES D'OMAN, QUI SONT ISSUES D'UNE DORSALE RAPIDE, TYPE PACIFIQUE, ON RECONNAIT LA SUCCESSION CLASSIQUE DE PILLOW LAVA SURMONTANT UN IMPORTANT COMPLEXE FILONNIEN, PUIS DES GABBROS ET ENFIN DES PÉRIDOTITES À LA BASE DU SYSTÈME.



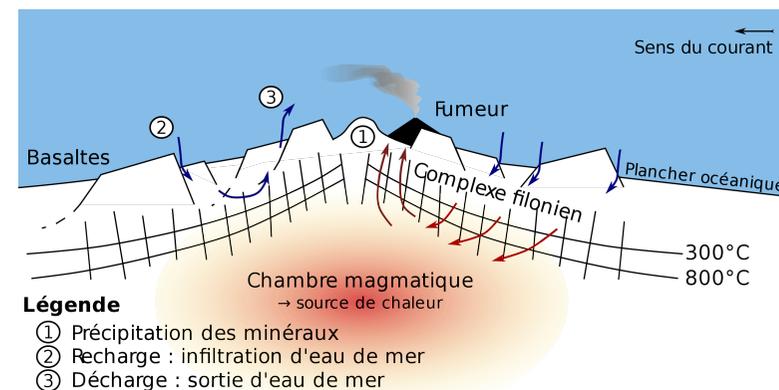
DANS LE CAS DES DORSALES LENTES, ON NE TROUVE JAMAIS CETTE SUCCESSION. EN EFFET, LE COMPLEXE FILONNIEN EST TRÈS RÉDUIT IL CORRESPOND À QUELQUES DYKES ÉPARGES TRAVERSANT DES GABBROS OU DES PILLOW LAVA. DE PLUS LES GABBROS SONT LE PLUS SOUVENT SOUS LA FORME DE POCHES PLURI-DÉCAMÉTRIQUES À L'INTÉRIEUR DE PÉRIDOTITE SERPENTINISÉE, QUI AFFLEURENT DIRECTEMENT SUR LE FOND OCÉANIQUE.

LE MASSIF DU CHENAILLET (2600 M) REPRÉSENTE AINSI UNE PORTION DE LITHOSPHERE OCÉANIQUE À EXPANSION LENTE



[HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=EICZJH_BCXG](https://www.youtube.com/watch?v=EICZJH_BCXG)
[HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=5STQCHLT0YA](https://www.youtube.com/watch?v=5STQCHLT0YA)

HYDROTHERMALISME



1977 : on découvre à l'axe (ride) des dorsales medio-océaniques des monts hydrothermaux encore appelés cheminées ou sources hydrothermales ou fumeurs ou événements hydrothermaux, ainsi qu'à proximité des bassins arrière-arc, évacuant une partie de la chaleur interne de la Terre, avec une vie sous-marine luxuriante associée ont été découverts aux Galapagos par le submersible américain Alvin (1978), ce qui a étonné les chercheurs d'observer une telle diversité à proximité de ces milieux aussi chauds : cet écosystème est basé sur une production primaire (matière organique d'origine chlorophyllienne par photosynthèse) assurée par des bactéries libres dites chimiosynthétiques ou en symbiose avec les organismes.

NB : certains chercheurs postulement l'appairon de la vie dans de tels milieux, riches en matière minérale, chauds, aqueux

L'ensemble des phénomènes hydrothermaux océaniques, sont une conséquence indirecte des phénomènes d'accrétion et d'extension <— —> observés au niveau des frontières inter-plaques en mouvement de divergence (écartement).

observations : remontées de magma et formation des chambres magmatiques à quelques km de profondeur. Lors de son refroidissement, il se rétracte et forme des anfractuosités (cavités) dans la croûte océanique : l'eau de mer, froide (environ 2 °C), s'y infiltre jusqu'en profondeur et se réchauffe à proximité du magma chaud à près de 1200 °C comme on l'a vu.

Sous l'effet de la pression décroissante (décompression adiabatique, c'est-à-dire remontée rapide sans échange de chaleur), cette eau chaude remonte vers le plancher océanique en lessivant les roches rencontrées (transport de leurs éléments extraits par contact) ; cet effet est accentué par les forts couples (pression P, température θ) croissants, augmentant le pouvoir de solubilisation de l'eau. Elle s'acidifie (baisse de pH) et s'enrichit en éléments métalliques. La composition du fluide hydrothermal émis varie avec la température et la nature des roches rencontrées lors de la remontée vers le plancher océanique et diffère de celle de l'eau de mer, oxygénée et faiblement alcaline (pH entre 7 et 8). À la sortie, le fluide est caractérisé par sa température élevée (350 à 400 °C), son pH acide, de fortes concentrations en gaz dissous (H_2S , CH_4 , CO , CO_2 , H_2) et ions métalliques (Si^+ , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+}) ainsi qu'une anoxie (absence d'oxygène) marquée. En revanche, il a de faibles concentrations en ions phosphate (PO_4^{3-}), magnésium (Mg^{2+}), nitrate (NO_3^-) et sulfate (SO_4^{2-}), de salinité très variable (entre 0,1 et 2 fois celle de l'eau de mer). Lors de leur découverte en 1977, ces fluides de structures hydrothermales étaient considérés comme à composition relativement constante et stable. Depuis, il est établi grâce à la découverte de nouveaux sites, que cette composition du fluide est très variable comme sa température et son débit avec le niveau de dilution de l'eau de mer avant la sortie ; elle diffère donc entre les sites, ou plusieurs sources d'un même site. Sur le temps, le fluide peut conserver la même composition jusqu'à environ 10 ans ou évoluer lentement ou rapidement.

En fonction de la composition du fluide hydrothermal, on distingue 2 types différents de fumeurs : les fumeurs noirs, au fluide hydrothermal chaud et riche en soufre S, et les fumeurs blancs, de fluide moins chaud et sans particules. Les cheminées hydrothermales alimentent les océans en fer, et si ce fer remonte à la surface, il favorise alors la croissance du phytoplancton. Ainsi elles participent au pompage biologique du carbone sous forme de CO_2 dissous dans l'eau de mer. Mais seuls 0,2 % du fer apporté par les sources sous-marines reste soluble. Les fumeurs, et en particulier les noirs, sont de véritables oasis de vies des fonds océaniques. Des organismes se sont adaptés, exploitant la chaleur et le soufre émis par ces sources hydrothermales.

Dans les couches supérieures du plancher océanique, les basaltes, gabbros et les péridotites présentent des minéraux altérés en raison du lessivage et de la dissolution par l'eau de mer : les feldspaths plagioclases (vous vous rappelez en lames mince, les minéraux gris/noirs en lames de parquets, allongés) sont transformés en argiles, les pyroxènes et les olivines par de la serpentine. Ils sont hydratés, c'est-à-dire à radicaux hydroxydes (OH^-) apportés par l'eau.

En outre, la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique a pour effet l'évacuation de la chaleur du plancher océanique, et donc celle de la Terre, issue de la désintégration d'éléments radioactifs du manteau et de l'accrétion originelle de planétoïdes et de petits grains de matière de la nébuleuse solaire il y a 4,6 milliards d'années.

Les fumeurs noirs

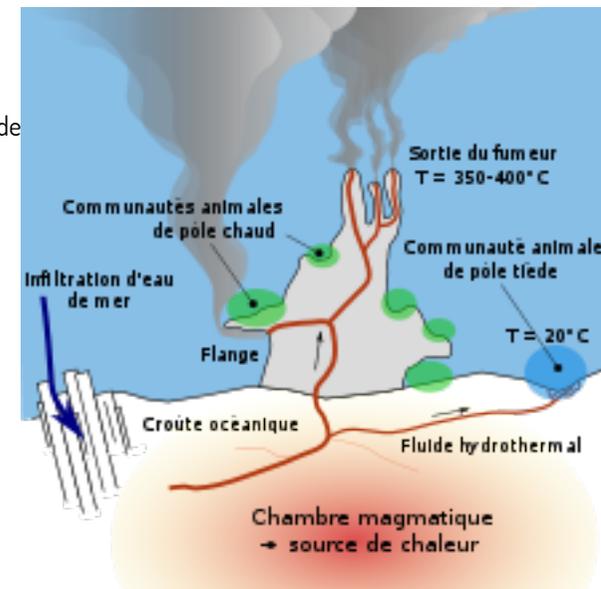
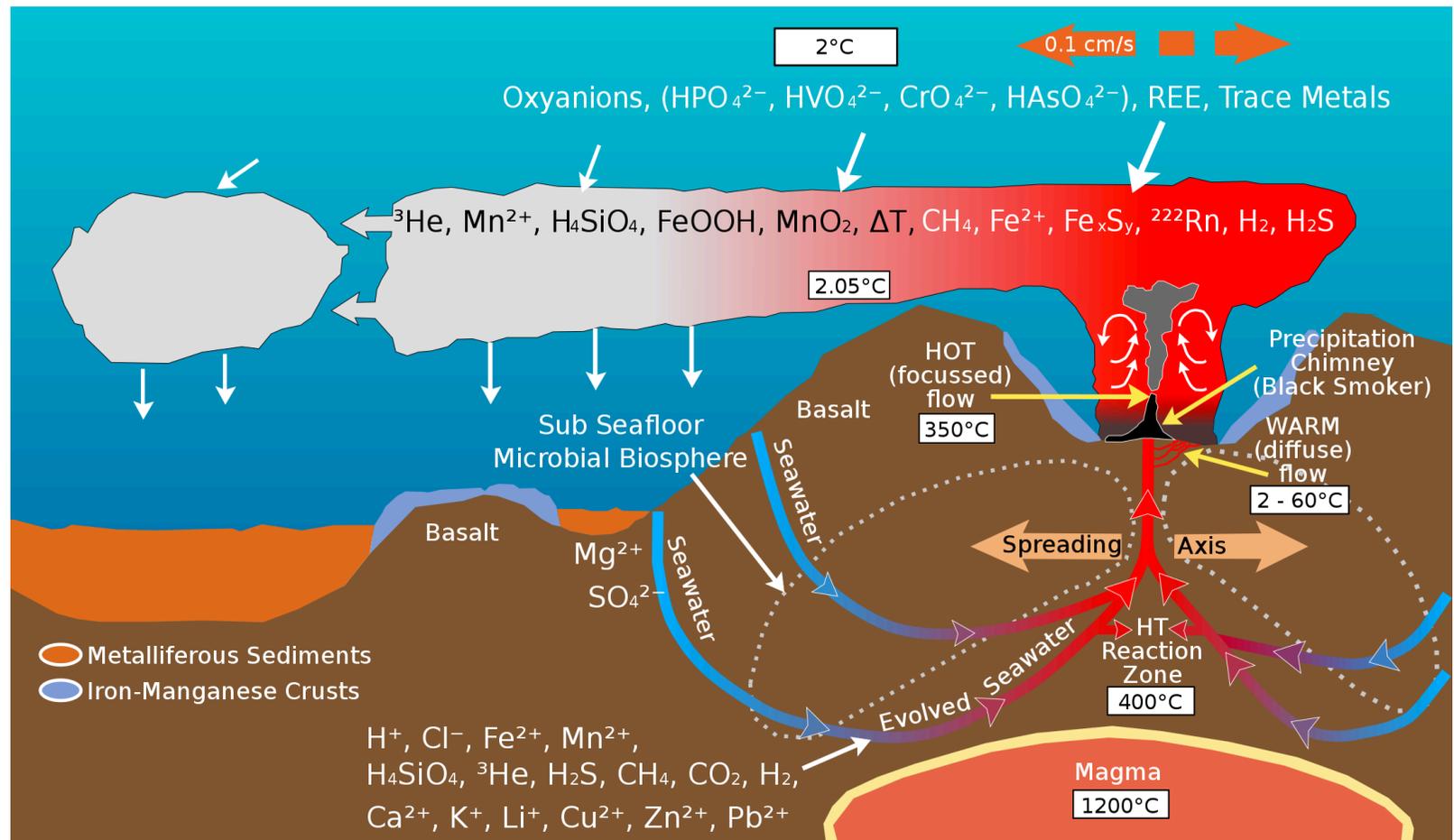
The Brothers, situés au niveau de la Nouvelle-Zélande, observés en 2007 par le robot américain Quest 718

fumeur noir : émet de l'eau sulfureuse (sulfure métallique) à très haute température (350 °C). Le fluide ne subit pas de dilution par l'eau de mer avant l'émission. La coloration noire du fluide hydrothermal émis vient de sa forte teneur en fer et en manganèse.

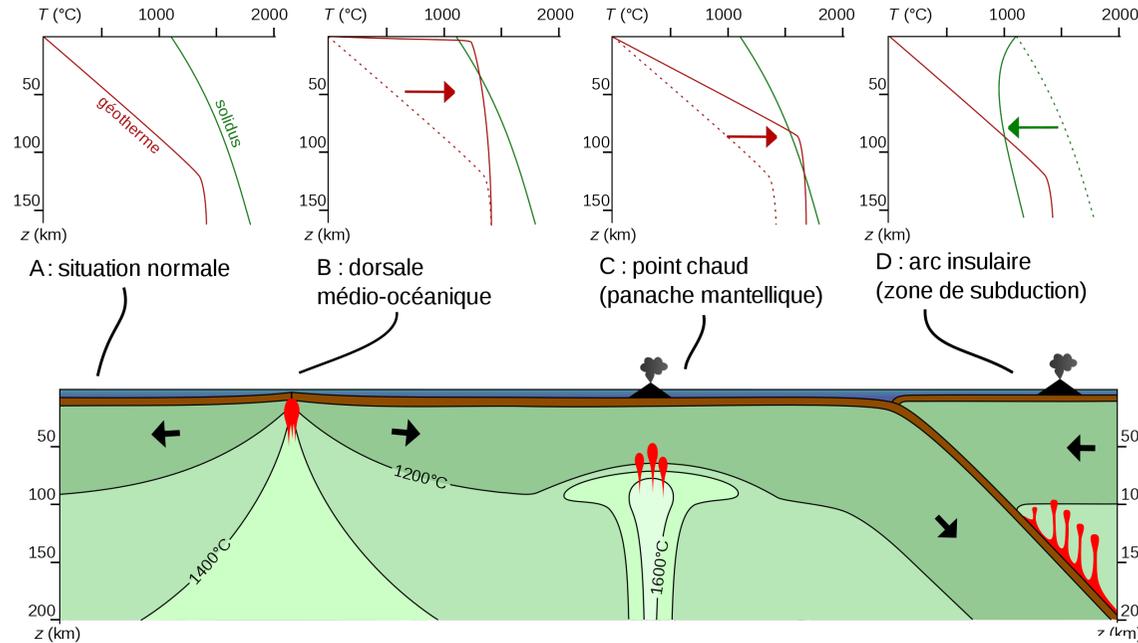
fumeurs blancs : ou « diffuseurs »

se forment lorsque le fluide hydrothermal rencontre lors de sa remontée vers le plateau continental de l'eau plus froide, c'est-à-dire lorsqu'il est dilué par l'eau de mer avant son émission ; les minéraux précipitent à ce moment. Ils émettent de l'eau contenant du baryum et du sulfate de calcium. La température en sortie est moins importante que pour les fumeurs noirs (inférieure à 280 °C), tout comme la vitesse de diffusion (entre 0,1 et 0,5 m/s) qui s'effectue au travers de nombreux petits canaux, en raison de l'absence de conduit central sur ce type de fumeurs. Le fluide peut être blanc ou translucide ; dans cette dernière situation, il présente 20 % de salinité mais ne contient pas de particules. L'édifice final est riche en zinc ; sa matrice est composée en majeure partie de sulfures de zinc et de fer, sans d'anhydrite et avec de faibles concentrations en fer. Écosystème des sources hydrothermales

Dans un environnement abyssal à < 2 °C, à pression hydrostatique élevée (entre 100 et 500 bars), paradoxalement, on a une vie luxuriante : d'importantes communautés alors qu'en l'absence de lumière, aucune production primaire photosynthétique, base de tout écosystème, n'est envisageable. La découverte de l'écosystème associé aux sources hydrothermales a bouleversé les connaissances en biologie de l'époque et notamment la conviction que la vie macroscopique était impossible sans lumière : la production primaire est assurée par des micro-



organismes chimiosynthétiques utilisant non les photons de la lumière comme source d'énergie mais des sels dissous pour remplir la fonction de la photosynthèse chez les végétaux, 1er maillon de chaîne alimentaire, dont se nourrissent les consommateurs primaires (maillons = espèces en positions 2). On trouve aussi des associations symbiotiques dans lesquels le symbiote apporte l'énergie à l'hôte. La vie est localisée autour des points d'émission des fluides hydrothermaux qui se mélangent à l'eau de mer. Il existe un gradient de température au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'émission des fluides, et l'on peut trouver des communautés animales de pôle chaud et d'autres de pôle tiède.



à gauche : situation de fusion partielle des péridotites à l'axe des dorsales dorsales = le cas B = décompression adiabatique (sans échange de chaleur) : le solidus des péridotites est recoupé par le géotherme vers - 5 à -10 km à l'axe de la dorsale

BILAN

La dynamique des zones de divergence

Connaissances

La divergence des plaques de part et d'autre des dorsales permet la mise en place d'une nouvelle lithosphère.

Celle-ci se met en place par apport de magmas mantelliques à l'origine d'une nouvelle croûte océanique. Ce magmatisme à l'aplomb des dorsales s'explique par la décompression du manteau.

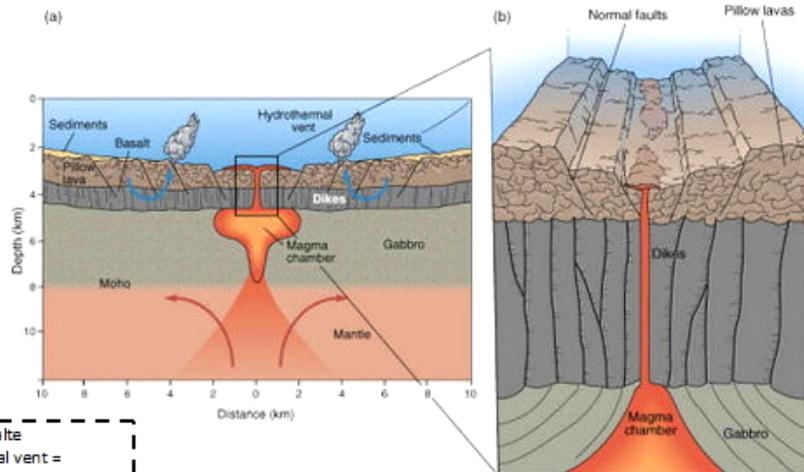
Dans certaines dorsales (dorsales lentes) l'activité magmatique est plus réduite et la divergence met directement à l'affleurement des zones du manteau.

La nouvelle lithosphère formée se refroidit en s'éloignant de l'axe et s'épaissit. Cet épaississement induit une augmentation progressive de la densité de la lithosphère.

La croûte océanique et les niveaux superficiels du manteau sont le siège d'une circulation d'eau qui modifie les minéraux.

Capacités

- Études de l'affleurement à la roche des basaltes/gabbros/péridotites et leurs équivalents hydratés (serpentinite, gabbros à hornblende, etc.).
- Calcul de la densité moyenne de l'ensemble croûte – manteau lithosphérique en fonction de son épaisseur, puis de son âge en utilisant une loi empirique reliant épaisseur et âge.



Basalt = basalte
Hydrothermal vent =
cheminée hydrothermale
Dikes = filons
Mantle = manteau

Coupe d'une chambre magmatique sous une dorsale