

Les Océans

« C'est le Pacifique qui servit au premier test publié de la théorie de la tectonique des plaques. Dan McKenzie et Robert L. Parker montrèrent en 1967 que tous les mécanismes à la source des séismes sur le pourtour de la partie nord du Pacifique possédaient une propriété remarquable (...) : Sur un total de quatre-vingts séismes superficiels survenus dans la période de 1957 à 1967, environ 80 p. 100 avaient des vecteurs mouvement à 20° de la direction prédite par un modèle d'interaction entre deux ensembles rigides à la surface d'une sphère... »¹

PRÉAMBULE

La qualité de la rédaction, la précision des schémas et la concision des réponses seront prises en compte dans l'évaluation. Même si les différentes parties sont indépendantes, on conseille au candidat de traiter le sujet dans son ordre chronologique.

Les candidats devront rendre la figure Annexe (page 18) complétée en répondant à la question II.2.4c. L'usage de la calculatrice est autorisé.

¹ Jean FRANCHETEAU (professeur des Universités en géophysique, université de Brest), histoire plaquiste de l'océan Pacifique, Encyclopédie Universalis

Partie I. L'âge de la Terre et de ses océans

Avec l'essor de la géologie et de la stratigraphie vers le milieu du XVIIIème siècle, l'âge de la Terre est très vite devenu l'objet d'un débat scientifique vigoureux. Au XIXème siècle, comme nous le verrons dans cette première partie, de nombreuses théories ont été proposées.

Temps conseillé : 2 heures

I.1 Origine de la salinité océanique et calcul de l'âge de la Terre

En 1900 John Joly supposait que, lors de leur formation, les océans étaient initialement composés d'eau non salée et que, petit à petit, l'eau des rivières avait apporté le sel. Pour ce géologue anglais, la salinité actuelle de nos océans traduisait le temps écoulé depuis leur formation.

1. Pouvez-vous, en utilisant vos connaissances sur le cycle de l'eau, expliquer ce paradoxe que l'eau douce des rivières sale les océans ?
2. Les lacs de montagne ne sont pas salés et les lacs endoréiques (les lacs sans exutoire) le sont. Proposez une hypothèse pour expliquer ce constat.
3. John Joly a évalué à $3,6 \times 10^{16}$ tonnes la quantité de chlorure de sodium contenue dans les océans et à $1,57 \times 10^8$ tonnes la quantité de sodium apportée annuellement par les rivières. Calculez un âge minimum de la Terre si l'on fait l'hypothèse de John Joly que tout le sodium des océans provient des rivières. On prendra comme valeur de masse molaire atomique pour le chlore 35,5 et pour le sodium 23. Qu'en concluez vous ?

I.2 Lord Kelvin et l'océan de magma primitif.

Au milieu du XIXème siècle, Lord Kelvin a modélisé le refroidissement pour en déduire l'âge de la Terre. Lord Kelvin a imaginé que la Terre avait été formée à une température élevée T_0 uniforme à la date $t = 0$ (condition initiale). Il a proposé d'autre part qu'à cette même date, sa surface ait été soumise instantanément à une température T_s (condition initiale). Depuis ce temps-là, la planète se refroidirait lentement, mais son cœur resterait à la température T_0 .

On admet que la température dépend de temps t et de la profondeur z , comptée positivement. Le flux de chaleur q [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] vérifie l'équation de diffusion :

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \quad (1)$$

où D est la diffusivité thermique [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

1. Lord Kelvin montre alors que cette équation admet pour solution une équation de la forme suivante :

$$q(z,t) = \frac{-A}{\sqrt{Dt}} \exp\left(-\frac{z^2}{4Dt}\right) \quad (2)$$

Montrer que cette solution est bien une solution de (1). En tracer approximativement la forme, en fonction de z et ce pour t_1 et t_2 , $t_2 > t_1$.

2. On suppose que $A = a(T_o - T_s)^\alpha \lambda^\beta \rho^\gamma C^\delta$ où a est un facteur numérique, et où λ , ρ , et C sont la conductivité thermique [$\text{kg.m.s}^{-3}.\text{K}^{-1}$], la masse volumique et la capacité calorifique [$\text{m}^2.\text{s}^{-2}.\text{K}^{-1}$] respectivement. α , β , γ , et δ sont des nombres entiers, éventuellement égaux à 0. Par analyse dimensionnelle, calculer α , β , γ , et δ .
3. On montre que $a = 1/\sqrt{\pi}$. En rappelant la loi de Fourier, montrer que :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{T_o - T_s}{\sqrt{\pi Dt}} \quad (3)$$

4. A l'époque, Lord Kelvin a pris pour hypothèse que $T_o - T_s = 1500\text{K}$ (point de fusion des roches ultrabasiqes à pression ambiante) et $D = 10^{-6} \text{m}^2.\text{s}^{-1}$. En rappelant le géotherme moyen dans la croûte continentale, déduire l'âge de la Terre que Lord Kelvin a trouvé ? Commentez votre résultat en rappelant l'âge réel de la planète. Pourquoi cette différence ?
5. En quelques lignes, expliquez la ou les méthodes modernes qui ont permis de dater la planète et la formation du système solaire.
6. Quel est l'âge des plus anciennes roches sur Terre ? Où ont elles été trouvées ? Expliquer la différence entre cet âge et celui de la formation de la planète ?

I.3 L'âge et la topographie des océans

1. La figure 1 présente une coupe bathymétrique de l'océan Atlantique.
 - a. A l'aide d'un schéma, expliquer le fonctionnement d'une dorsale océanique. On insistera sur les structures tectoniques et la composition des roches du plancher.
 - b. Décrire en quelques lignes l'évolution de la bathymétrie atlantique de la côte nord américaine à la côte africaine.
 - a. A quoi correspond la pente continentale ? Expliquer l'origine de ce relief.
2. La figure 2 présente une carte bathymétrique des fonds océaniques de la planète. Quelles différences fondamentales voyez-vous sur cette carte entre la bathymétrie de l'océan Pacifique et celle de l'océan Atlantique ?
3. La figure 3 est une carte de l'âge des planchers océaniques.
 - a. Quel est l'âge du plus vieux plancher océanique sur Terre ? Où le trouve-t-on et pourquoi n'y en a-t-il pas de plus vieux ?
 - b. A quelle époque s'est ouvert l'Atlantique Nord ? L'Atlantique Sud ? Le Pacifique ?
 - c. En observant cette carte, quelle différence voyez vous en terme de vitesse d'expansion océanique entre le Pacifique et l'Atlantique ?

4. En s'éloignant de la dorsale, le plancher océanique se refroidit.
 - a. A votre avis, comment évolue la densité des roches du plancher océanique en se refroidissant ? Pourquoi ?
 - b. A l'aide d'un schéma, rappeler et expliciter la notion d'isostasie.
 - c. En observant les deux cartes ensembles, (Figures 2 et 3), émettez alors une hypothèse qui expliquerait les différences bathymétriques observées.
5. Un développement mathématique, qui s'appuie à la fois sur l'hypothèse d'isostasie et sur la loi de Fourier, a montré dans les années 70 que la profondeur du plancher océanique dépendait à la fois de la distance à l'axe de la dorsale et de la vitesse d'expansion océanique. La profondeur du plancher océanique d , par rapport à la dorsale, s'écrit ainsi :

$$d = \frac{2\rho_m \alpha_v (T_m - T_o)}{\rho_m - \rho_w} \left(\frac{Dx}{\pi u} \right)^{1/2} \quad (4)$$

où ρ_m , ρ_w , α_v , T_m , T_o , D , x , u sont respectivement la densité du manteau, la densité de l'eau, le coefficient d'expansion thermique moyen des roches, la température à la base de la lithosphère océanique, la température au niveau du plancher océanique, la diffusivité thermique moyenne des roches, la distance à l'axe de la dorsale, et la vitesse d'expansion océanique.

- a. Au vu de cette équation, comment évolue la profondeur du plancher océanique en fonction de l'âge de sa mise en place ?
 - b. Commenter la figure 4 et conclure.
6. On suppose maintenant que le volume total des océans a été constant à travers les âges géologiques.
 - a. En vous rappelant du résultat de la question précédente, que se passerait-il si les vitesses d'expansion océanique se mettaient à augmenter ? A diminuer ?
 - b. On considère maintenant un océan donné dont le plancher qui subducte sur ses marges a un âge τ . En vous aidant de l'équation (4), donner l'expression de la profondeur moyenne de cet océan et montrer qu'elle dépend de l'âge de la lithosphère océanique qui entre en subduction.
 - c. Le niveau moyen de la mer au cours des 500 derniers millions d'années est bien connu grâce aux enregistrements sédimentaires. Au vu des deux questions précédentes, émettez des hypothèses qui permettraient d'expliquer les variations à longue période ($> \text{Ma}$) du niveau de la mer présentées sur la figure 5.
7. La figure 6 présente la bathymétrie autour de deux failles transformantes qui décalent la dorsale Pacifique.
 - a. A l'aide d'un schéma, expliquez le fonctionnement de ces failles, en précisant laquelle est dextre et laquelle est senestre.
 - b. Comme on le voit sur cette image et sur la figure 1, les failles transformantes correspondent à des sauts topographiques importants qui s'estompent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la dorsale océanique. Pourquoi ?
8. Le seuil de compensation des carbonates (CCD) est la profondeur à laquelle le taux de solubilité du carbonate de calcium devient plus important que le taux de

sédimentation. A l'époque actuelle, il est de 4500m dans l'océan Pacifique (sauf à l'équateur où il est de 5000m) et de 5000m dans l'océan Atlantique. Sous ce seuil, les tests de carbonate de calcium sont entièrement dissous par les eaux océaniques.

- a. Rappeler les différentes formes cristallines du carbonate de calcium que vous connaissez?
- b. Ecrire l'équation de solubilité du carbonate de calcium avec l'eau. Pourquoi est-ce que la solubilité du carbonate de calcium augmente avec la profondeur?
- c. La figure 7 présente une carte de la lithologie des boues sédimentaires que l'on trouve actuellement au fond des océans de la planète. Commentez cette carte en vous aidant des résultats précédents. (nb : le seuil de compensation des silicates est généralement inférieur ou égal à celui des carbonates)
- d. Pourquoi retrouve-t-on des boues siliceuses à l'équateur ? Quelle(s) roche(s) sédimentaire en est (sont) issue(s) ?
- e. Quelle est l'origine des argiles océaniques ?

Partie II. Géodynamique océanique

Dans cette seconde partie, on étudiera quelques cas simples de la géodynamique océanique, aussi bien au niveau de la cinématique que du contexte tectonique.

Temps conseillé : 1 heure et quarante cinq minutes

II.1 Hawaï et la chaîne de l'Empereur

1. La figure 8 montre un profil bathymétrique de l'océan Pacifique autour de chaîne de l'Empereur et la chaîne Hawaïenne. L'hypothèse la plus couramment acceptée est que ces deux chaînes de monts sous-marins ont une origine commune.
 - a. Quelle est l'origine de Hawaï et de la chaîne de l'Empereur ? A quel type de volcanisme correspondent les îles Hawaïennes ? Rappeler la série et la composition de ces laves.
 - b. Les monts sous-marins de ces deux chaînes sont d'anciens volcans qui émergeaient lorsqu'ils étaient actifs et qui depuis leur extinction se sont enfoncés sous les mers. Pourquoi se sont-ils enfoncés ?
 - c. Puisque leur origine est commune, émettez une hypothèse qui pourrait expliquer le coude qui relie ces deux chaînes de monts sous-marins.
 - d. Les monts sous-marins qui se trouvent à la jonction entre les deux chaînes ont été datés à environ 50 millions d'années. Calculer approximativement la vitesse moyenne et la direction de mouvement de la plaque Pacifique depuis 50Ma. Faites de même pour la période 200-50Ma.
 - e. A votre avis, que s'est-il passé il y a environ 50Ma qui puisse expliquer le changement brutal qui est intervenu dans la géodynamique de l'océan Pacifique.
2. Les îles hawaïennes ne sont pas toutes des volcans actifs, mais sont par contre pour la plupart entourées de récifs coralliens.
 - a. En poursuivant la réflexion initiée dans la première partie (figure 4), expliquer comment se forme un atoll, comme illustré sur la figure 9.
 - b. Expliquer en quelques lignes de quoi sont fait les coraux et comment les paléoclimatologues s'en servent pour connaître le climat passé de la planète.
3. Au vu de toutes ces informations, faites un schéma récapitulatif sur la mise en place, le fonctionnement et l'évolution des volcans Hawaïens.

II.2 Le séisme du 11 Mars 2011 au Japon

1. La Figure 10 montre une image tomographique des vitesses d'ondes P obtenue au large des côtes japonaises, là même où a lieu le séisme de Tohoku, le 11 mars 2011. Sur ces coupes, la sismicité est représentée par les points blancs.
 - a. Par quel principe sont obtenues de telles images tomographiques ?
 - b. À quoi correspond l'échelle de couleur sur cette figure ?

- c. En quelques lignes, décrivez l'évolution des vitesses d'onde P que l'on observe sur ces coupes.
 - d. De la même manière, décrivez la distribution spatiale des séismes sur cette coupe.
2. La figure 11 montre le mécanisme au foyer ainsi qu'une carte du glissement lié au tremblement de Terre de Tohoku qui a eu lieu le 11 mars 2011. Le glissement sur la faille est ici projeté en surface.
 - a. En faisant appel à vos connaissances sur la rhéologie et le comportement mécanique des roches, expliquez ce qu'est un séisme.
 - b. En comparant avec la coupe précédente, à quelle profondeur se situait l'hypocentre?
 - c. Qu'est ce qu'un mécanisme au foyer et comment est-il obtenu?
 - d. En rappelant le contexte tectonique, explicitez le mécanisme au foyer du séisme de Tohoku (pendage de la faille et direction du mouvement mouvement). Comment dénomme t-on ce type de faille communément ?
 3. La magnitude d'un séisme est calculée de la manière suivante. On calcule d'abord le moment sismique $M_0 = \mu DS$, où μ est le module élastique de cisaillement (30 GPa), D la magnitude du glissement (m) et S la surface totale de la faille (m²). On calcule alors la magnitude $M_w = 2/3 \log_{10} M_0 - 6.0$.
 - a. Quelle est l'unité du moment sismique ? A quoi est ce que cela correspond et comment appelle t-on plus communément ce type d'unité en physique?
 - b. Calculez approximativement la magnitude de ce séisme.
 - c. Le plus grand séisme jamais enregistré est celui de Valdivia (Chili) et a eu lieu le 22 mai 1960. On lui a attribué une magnitude de 9,5. Calculez le rapport énergétique entre ces deux séismes.
 - d. La bombe atomique d'Hiroshima était de 13 kT (équivalent TNT). Sachant qu'1kT de TNT libère environ $4,2 \times 10^{12}$ J, à combien de fois la bombe d'Hiroshima était environ égal le séisme de Tohoku. Commentez brièvement.
 4. La figure Annexe (page 18) montre la composante verticale du sismogramme enregistré par l'Université de Berkeley en Californie.
 - a. Quelles sont les ondes, qui suite à un séisme, se propagent à l'intérieur de la Terre ? On précisera la formule qui donne leur vitesse de propagation, en explicitant les paramètres et leur unité, et leur sens de polarisation et de mouvement. Laquelle de ces deux ondes ne se propage pas dans les liquides, et pourquoi ?
 - b. Quelles sont les ondes qui, suite à un séisme, se propagent le long de la surface de la planète? Comment évolue leur temps d'arrivée sur un sismogramme en fonction de la distance épacentrale ? Pourquoi ?
 - c. Suite à ces deux questions, identifiez au moins trois arrivées d'ondes différentes sur ce sismogramme, que vous rendrez complété avec votre copie.
 5. La figure 12 représente ce qu'on appelle communément les hodochrones terrestres.
 - a. Comment cette figure a t-elle été obtenue? A quoi correspond-elle?

- b. Déterminer l'expression de la distance d entre l'épicentre et une station sismique en fonction de la différence de temps d'arrivée des ondes directes t_p et t_s . En déduire la distance épicentre-station (en degré, puis en km) dans le cas de l'enregistrement de la figure Annexe.
 - c. En déduire alors une méthode simple de localisation de l'épicentre d'un séisme? Combien de stations sismiques faut-il au minimum?
 - d. A votre avis, comment faire pour localiser l'hypocentre ?
6. Un tsunami est un phénomène d'origine géologique qui prend naissance à la suite d'un séisme sous-marin. Une masse d'eau énorme est alors brusquement déplacée sur toute la hauteur de l'océan. Les vagues créées dont la longueur d'onde peut atteindre 200 km contiennent une énergie considérable. La célérité des ondes périodiques à la surface de la mer obéit à des lois différentes selon la profondeur h de l'eau :
- En eau peu profonde, c'est à dire lorsque la hauteur d'eau h est très inférieure à la longueur d'onde, $v = \sqrt{gh}$
 - En eau profonde, $v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$
- a. Peut-on considérer que la propagation du tsunami à la surface de l'océan Pacifique a eu lieu en eau profonde? A quelle célérité le tsunami a traversé l'océan Pacifique?
 - b. Combien de temps a mis le tsunami pour arriver sur les côtes de Californie, aux environ de Berkeley. En conclure quant aux possibilités de prévision de l'arrivée du tsunami.
 - c. Comment la célérité du tsunami évolue-t-elle quand il s'approche de la côte ?
 - d. Sous quelles formes l'énergie mécanique transportée par le tsunami existe-t-elle ? En déduire pourquoi la hauteur de la vague passe de quelques dizaines de centimètres en pleine mer, à une dizaine de mètres le long de la côte ?

II.3 Les points triples

1. La figure 13 montre une carte géologique du rift d'Asal. Le rift d'Asal se situe en Ethiopie, à l'intersection entre le golfe d'Aden, la vallée du Rift et la mer Rouge. A près de -120m, le lac Asal est le point continental le plus bas de la planète.
 - a. Quelles sont les plaques tectoniques en présence sur cette carte ?
 - b. Commentez en quelques lignes seulement cette carte géologique. On expliquera notamment le contexte tectonique, le ou les types de volcanisme et les dépôts sédimentaires que l'on observe sur cette carte.
 - c. De quelle série sédimentaire le gypse fait-il partie ? Si vous le pouvez, rappeler les autres roches qui en font partie. Comment se dépose t-elle?
 - d. A partir d'un ensemble de schémas, expliquez la formation du Rift d'Asal et son évolution future.
2. La figure 14 présente d'autres types de point triples. Sachant que si un point triple est stable dans le temps, alors la somme géométrique des vecteurs vitesses des trois plaques qu'il sépare est nulle.

- a. Dans le cas d'un point triple à trois dorsales (a), calculez la vitesse et la direction du mouvement de la plaque C par rapport à la plaque A. On considérera que les vitesses V_{BA} et V_{CB} valent respectivement 100 mm/an et 80 mm/an. On fera l'hypothèse que l'expansion océanique est toujours perpendiculaire à la dorsale. (nb : On définit V_{BA} comme la vitesse de la plaque B par rapport à la plaque A, considérée comme fixe.)
- b. On considère maintenant un point triple fosse/fosse/fosse (b). Donner un exemple de point triple fosse/fosse/fosse sur la planète.
Ici, la vitesse $V_{AB} = 50$ mm/an avec un azimut de 225° . La vitesse $V_{BC} = 50$ mm/an avec un azimut de 270° . Déterminer la vitesse et la direction du mouvement de la plaque C par rapport à la plaque A.
- c. On considère enfin un point triple dorsale/fosse/faille transformante (c). Donner un exemple de point triple dorsale/fosse/faille transformante sur la planète.
Ici, la vitesse $V_{BA} = 50$ mm/an. La dorsale a un azimut de 225° et $V_{AC} = 40$ mm/an. Déterminer la vitesse et la direction du mouvement de la plaque C par rapport à la plaque B.
- d. Pourquoi ne peut-il pas exister de point triple à trois failles transformantes ?

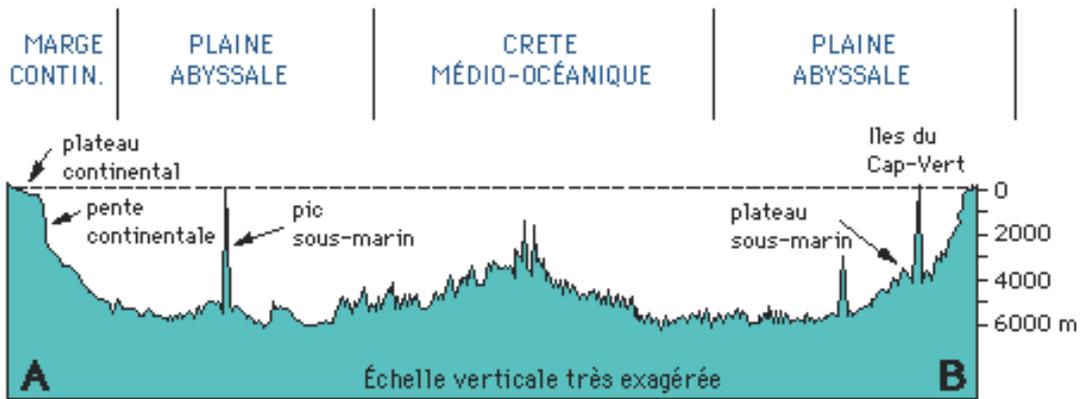
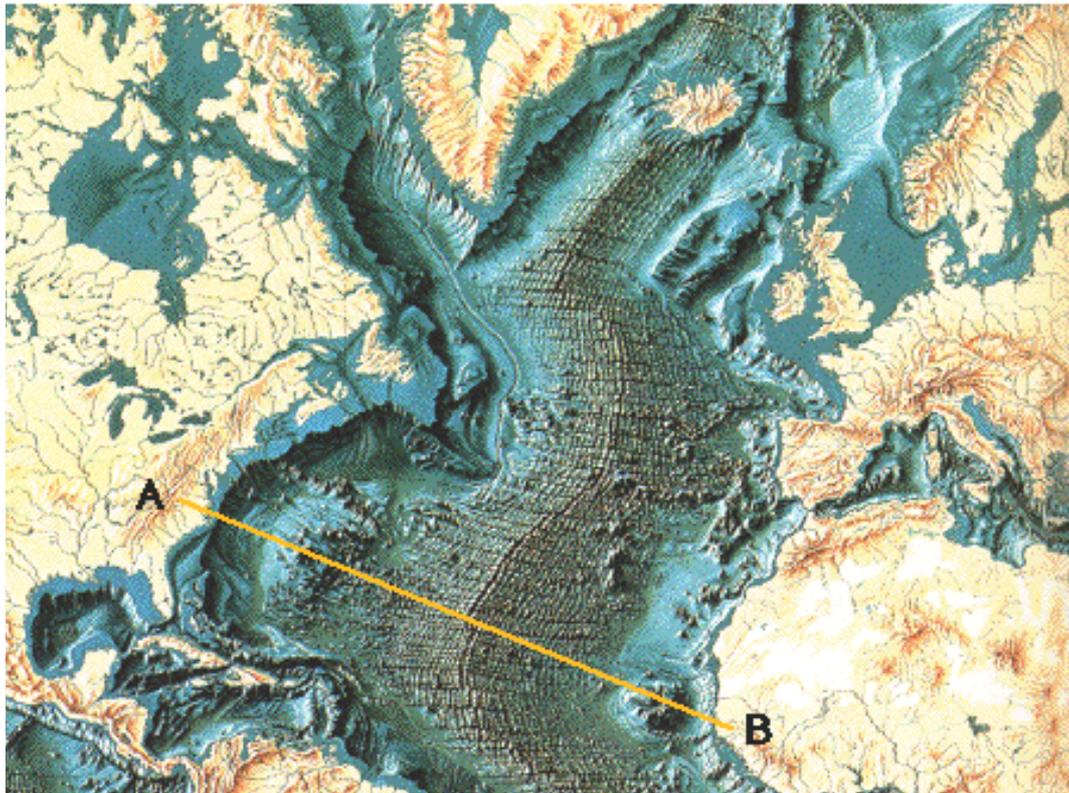


Figure 1. Carte bathymétrique et coupe topographique de l'Océan Atlantique entre les îles du Cap Vert et la Géorgie (USA).

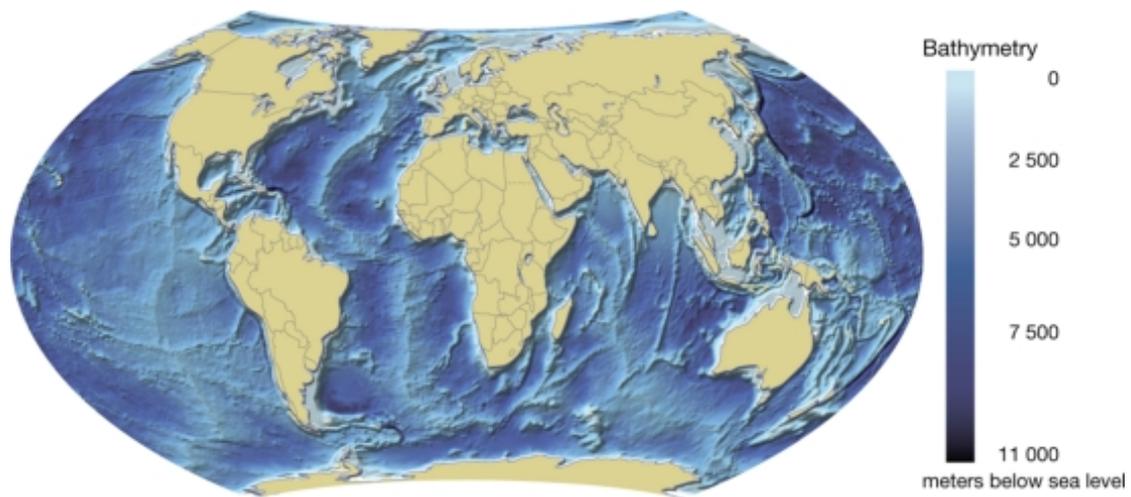


Figure 2. Bathymétrie des fonds océaniques. L'échelle de couleur est en mètres à partir du niveau de la mer.

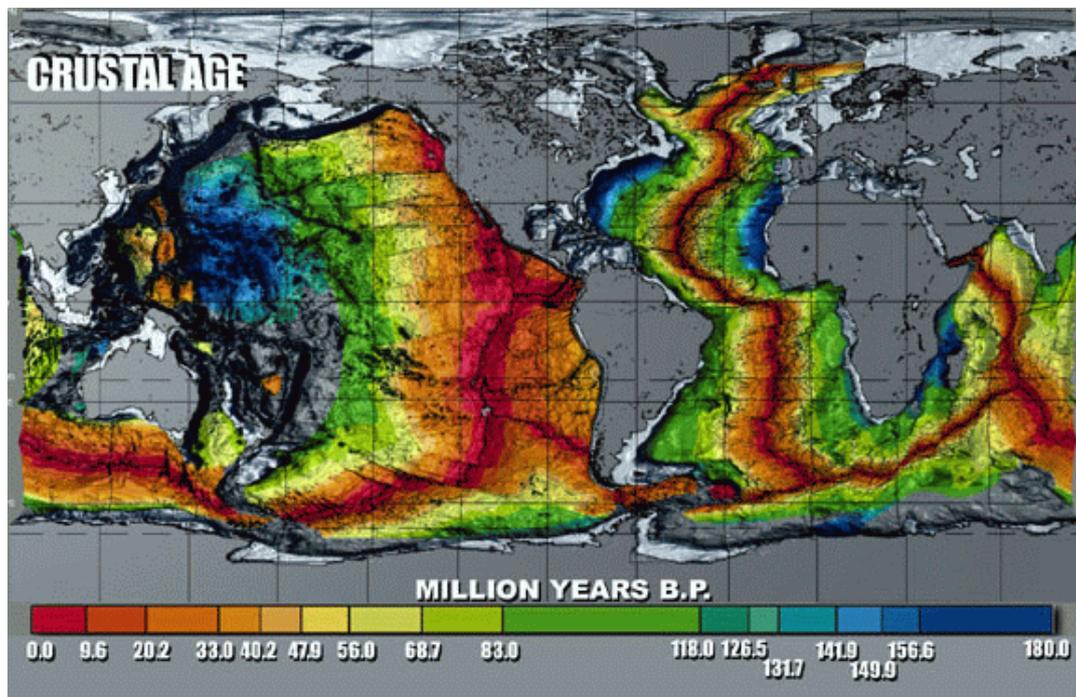


Figure 3. Carte des âges de la croûte océanique. L'échelle de couleur est en million d'années.

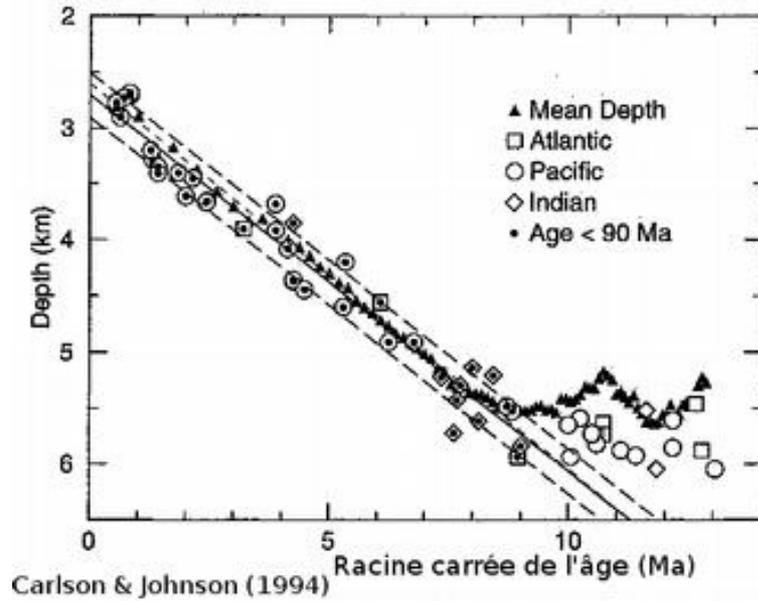


Figure 4. Profondeur des planchers océaniques Pacifique, Atlantique, Indien et moyen en fonction de la racine carrée de l'âge de sa mise en place.

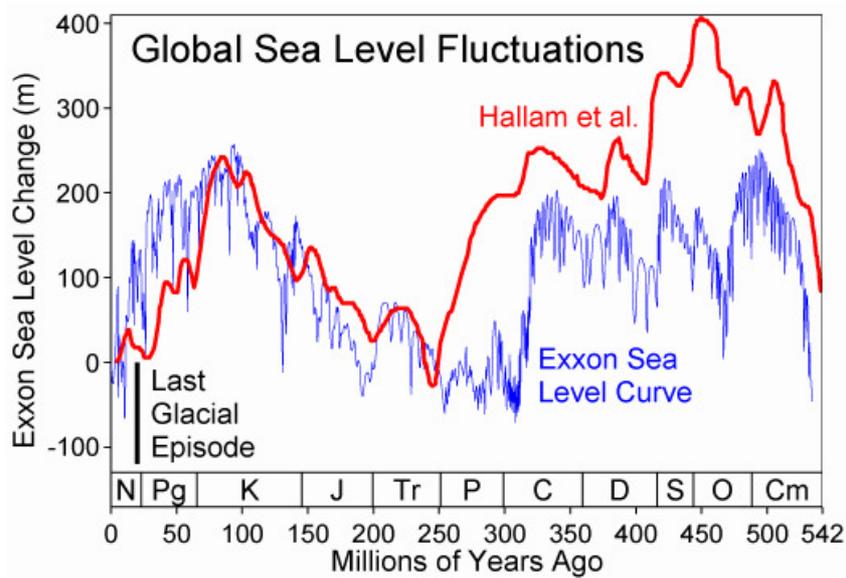


Figure 5. Variations globales du niveau de la mer, en mètres, déterminées par les enregistrements sédimentaires au cours des derniers 542 millions d'années.

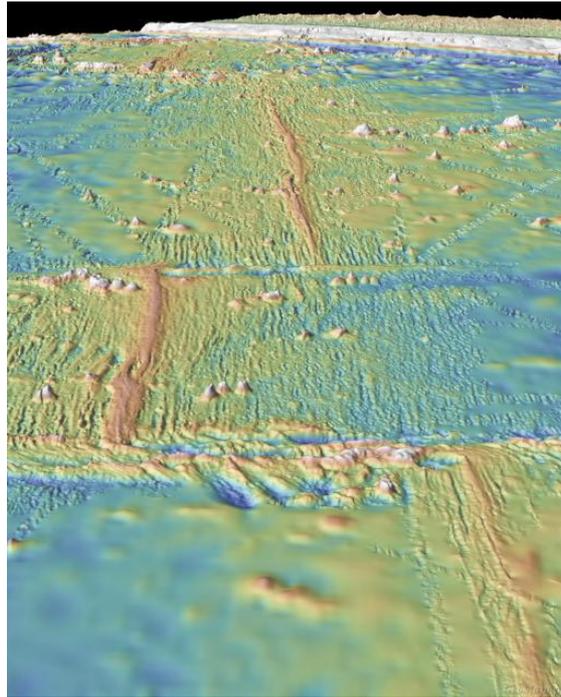


Figure 6. Vue en perspective, vers le Nord, de la topographie autour de la dorsale Est-Pacifique. En haut de l'image, l'Amérique centrale. Au centre de l'image, la dorsale est décalée par les failles transformantes de Siqueiros (en haut) et de Clipperton (en bas).

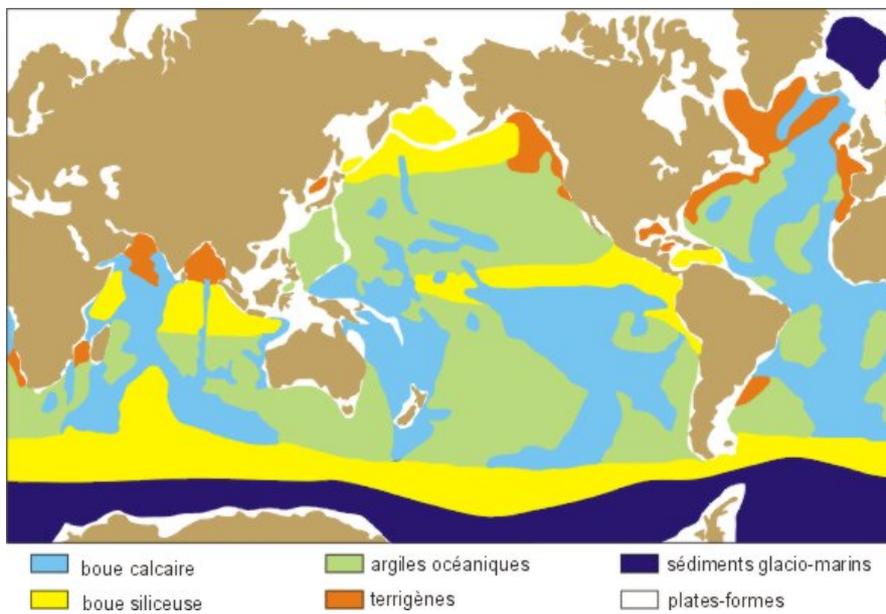


Figure 7. Carte de la lithologie des boues sédimentaires que l'on trouve actuellement au fond des océans de la planète

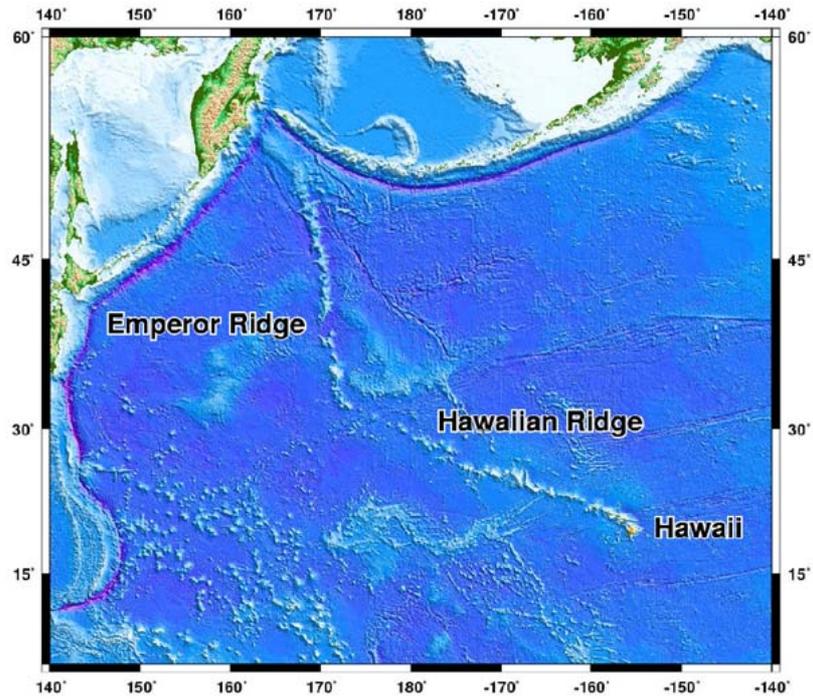


Figure 8. Carte bathymétrique de l'océan pacifique nord ouest. On distingue les chaînes de monts sous-marins de Hawaï et de l'Empereur.

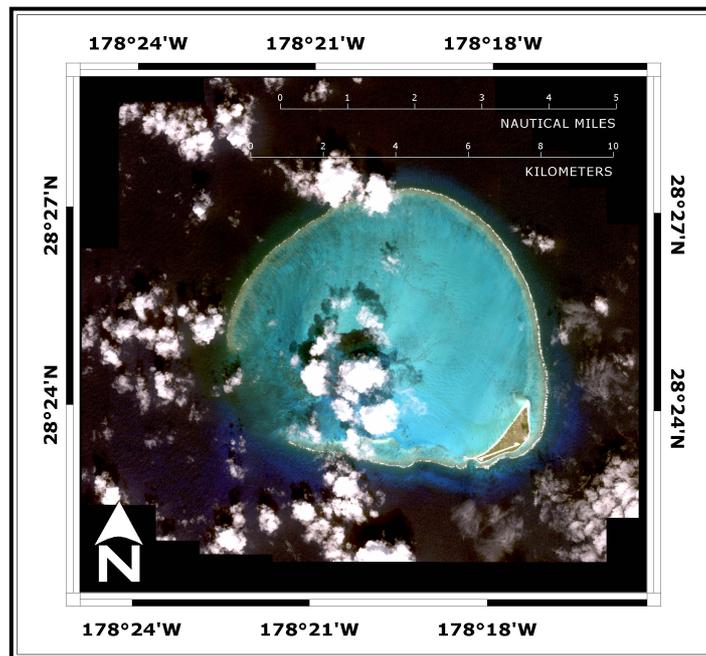


Figure 9. Vue satellitaire d'un atoll de la chaîne Hawaïenne.

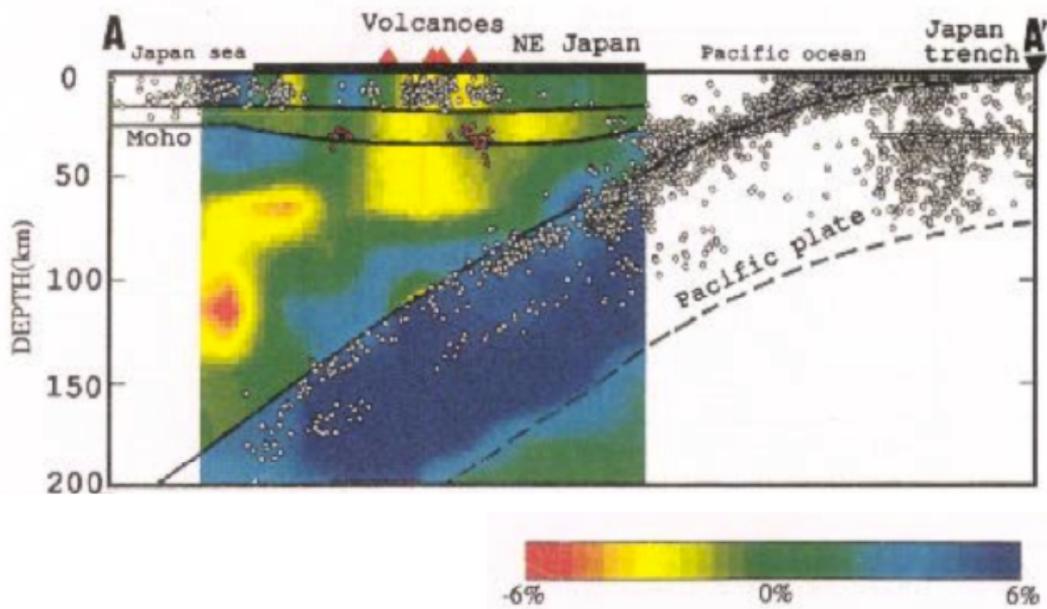


Figure 10. Coupe tomographique du Nord Est de l'île de Honshu (Japon) au niveau de Tohoku (Sendai). Sur la figure, la sismicité est représentée par des points blancs. Le plan de coupe est aussi représenté sur la figure suivante (12).

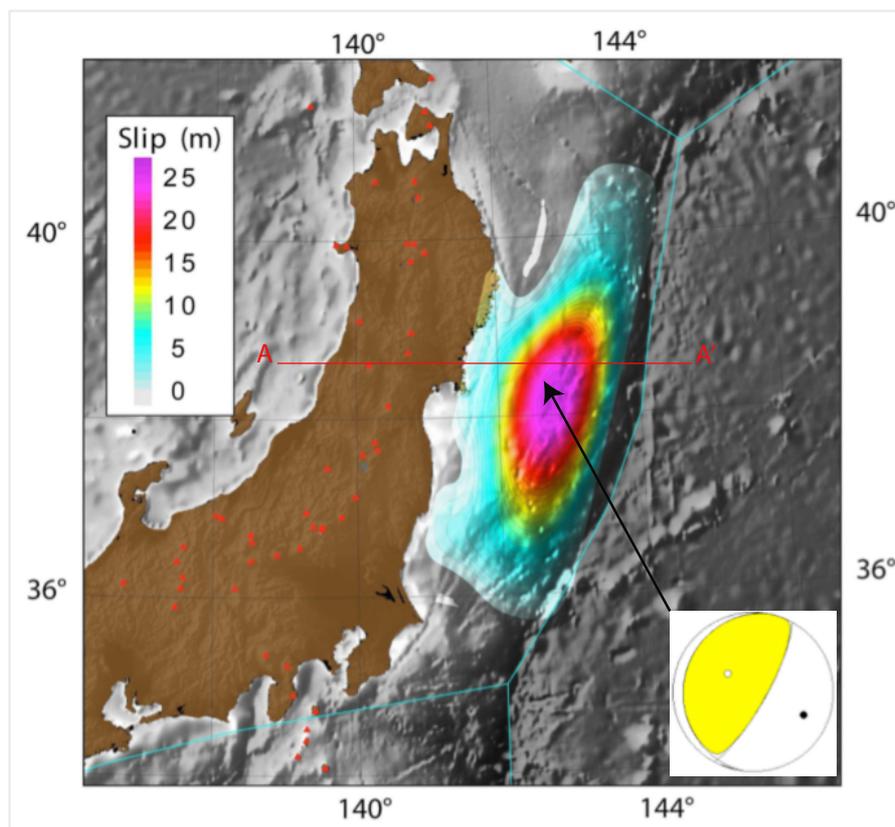


Figure 11. Carte du glissement induit par le séisme de Tohoku, qui a lieu le 11 mars 2011 au large de la ville de Sendai, dans le Nord-Est de l'île de Honshu (Japon). Sur la carte, l'échelle de couleur correspond à la magnitude du glissement sur le plan de faille. Celui est projeté en surface. En bas à droite, la solution du mécanisme au foyer est aussi représentée. Le plan de coupe de la figure précédente est aussi représenté.

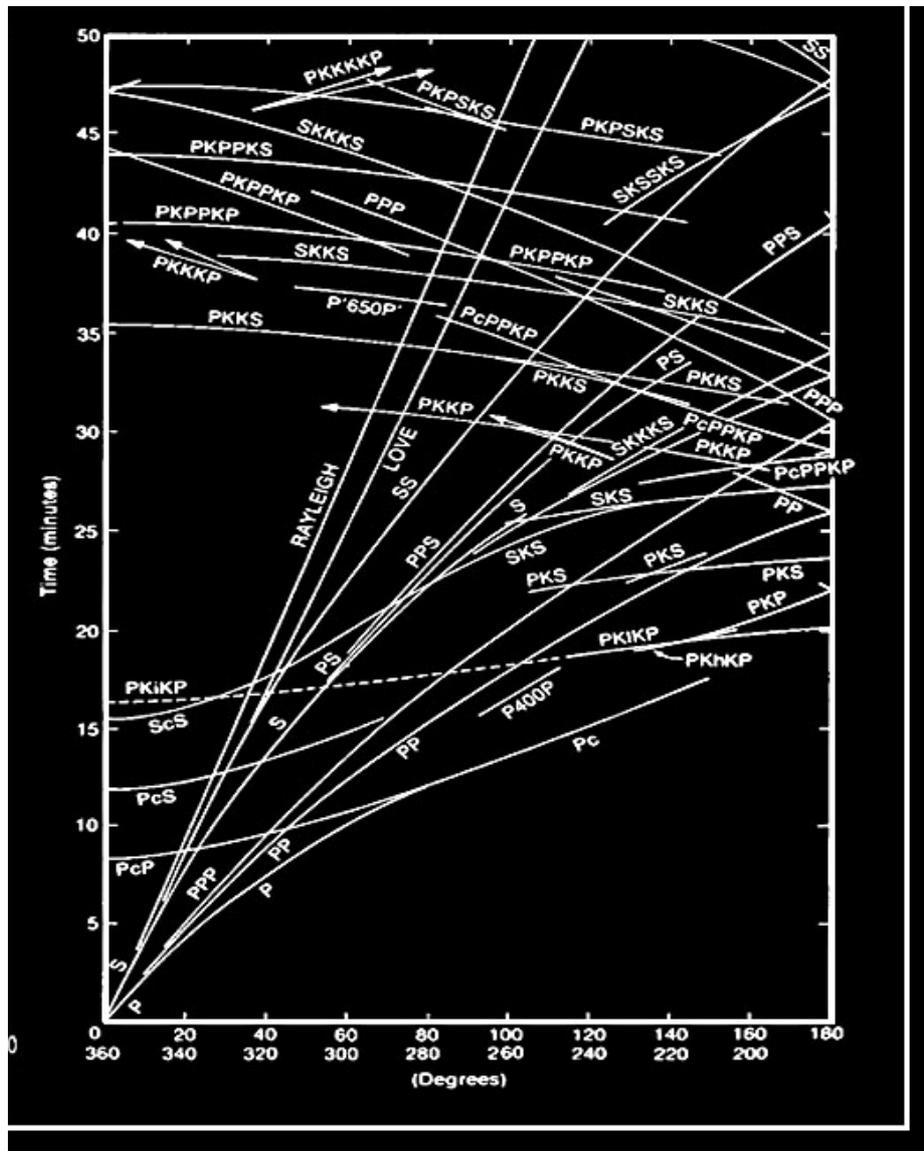


Figure 12. Les hodochrones terrestres. En abscisse, la distance épacentrale est donnée en degré, en ordonnée, le temps est donné en minutes.

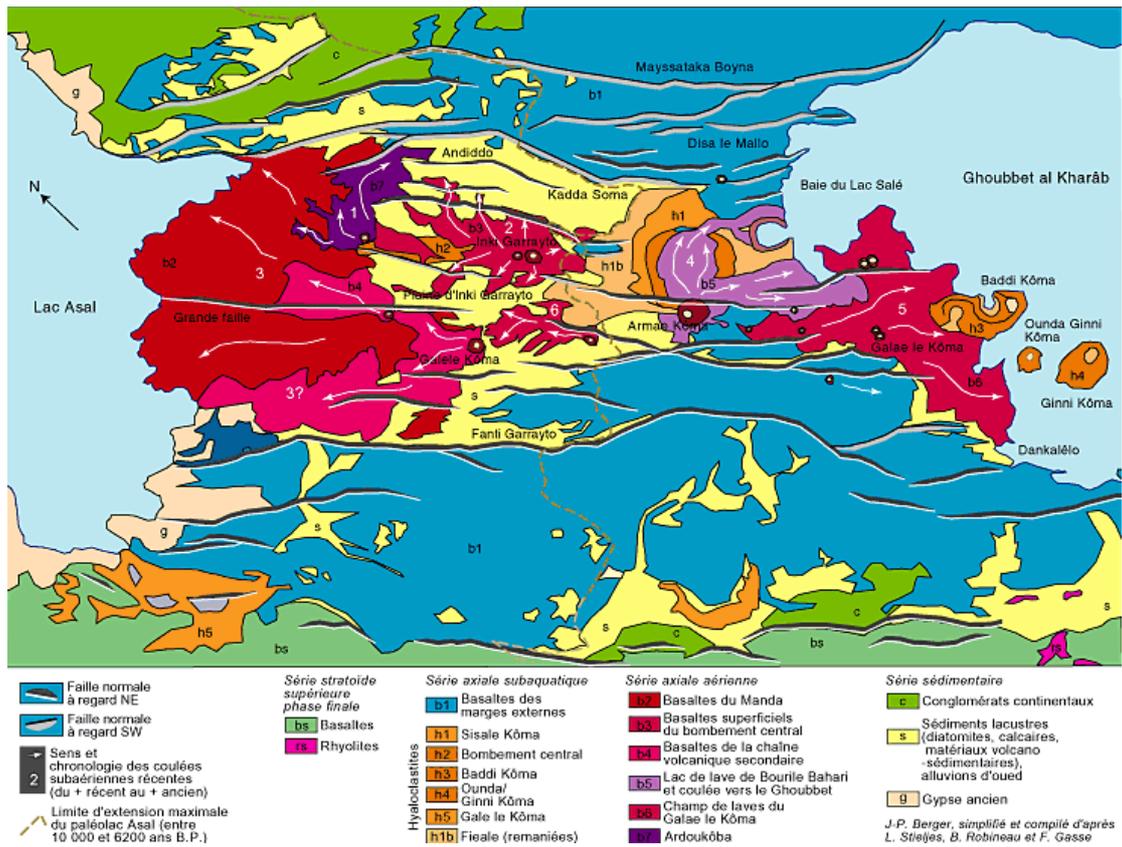


Figure 13. Carte géologique du rift d'Asal.

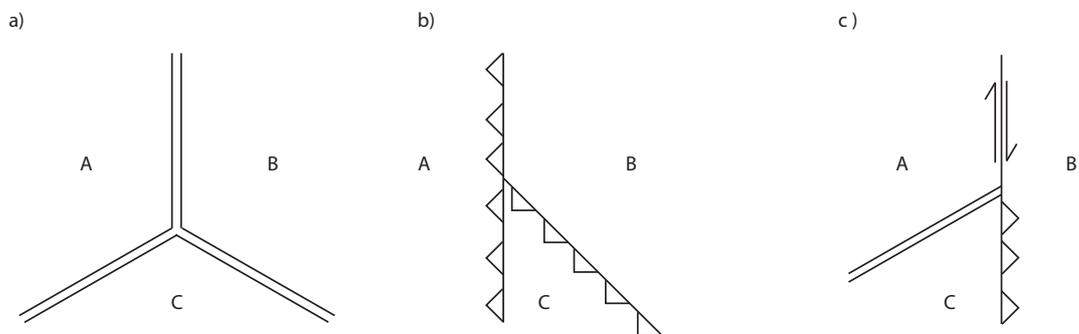


Figure 14. Trois exemples de points triples.

candidat :

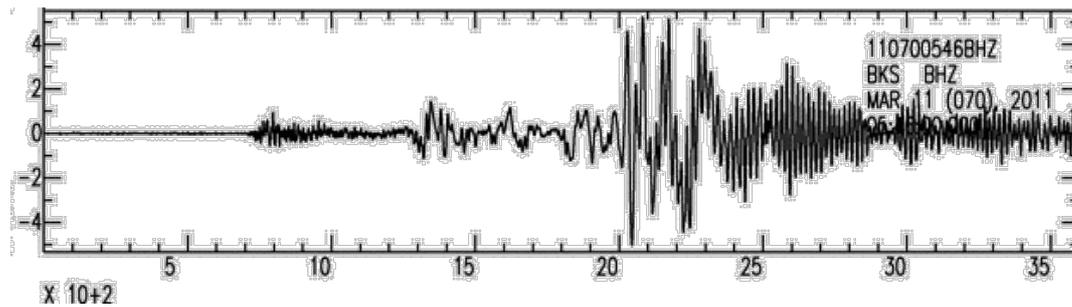


Figure Annexe. Enregistrement (composante verticale) réalisé à l'université de Berkeley (Californie) du tremblement de Terre de Tohoku (11 Mars 2011). L'échelle verticale est en microns, l'échelle horizontale en centaines de secondes.

II.2.4.c Identifiez au moins trois arrivées d'ondes différentes sur ce sismogramme. Vous rendrez cette figure complétée avec votre copie.