

ÉCOLES NORMALES SUPÉRIEURES
ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

CONCOURS D'ADMISSION SESSION 2014

FILIÈRE BCPST

COMPOSITION DE GÉOLOGIE

Épreuve commune aux ENS de Cachan, Lyon, Paris et de l'ENPC

Durée : 4 heures

L'usage de calculatrices électroniques de poche, à alimentation autonome, non imprimante et sans document d'accompagnement, est autorisé.

★ ★ ★

Le Manteau terrestre



La stratification du monde selon Aristote

“Pour Aristote, au IV^{ème} siècle av. J.-C., la Terre est exclusivement formée de l'élément Terre ; elle est entourée d'eau, puis d'air et enfin d'une couche de feu. Au-delà, c'est le monde des astres et de l'éternité. La partie superficielle du globe contient des cavités internes et des canaux. Le vent (ou souffle interne), sortant des cavités, provoque des tremblements de terre. Lorsqu'il est broyé en petites particules, il prend feu et donne des volcans.”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.

¹ D'après Vincent Deparis, *“Histoire d'un mystère : l'intérieur de la Terre”*

Partie I. Impact de la minéralogie sur les structures et la dynamique du manteau terrestre

Temps conseillé : 2 heures et 15 minutes

1. La figure 1a montre une photographie d'un échantillon de roche.
 - 1a. Quel est le nom de cette roche?
 - 1b. La figure 1b montre une photographie, en lumière polarisée analysée, du minéral principal constituant de la roche observée ci-dessus. La formule chimique de ce minéral est $(Mg,Fe)_2SiO_4$. Quel est son nom ? On précisera, si possible, ses deux pôles chimiques, ainsi que leurs noms respectifs.
 - 1c. Cette roche particulière contient aussi un minéral accessoire, dénommé spinelle, et dont la formule chimique est $MgAl_2O_4$. Ce minéral, pour un géotherme continental, est stable dans des gammes de pressions allant de 1 à 2 GPa. Calculez approximativement la profondeur d'origine de cette roche.
 - 1d. Quel(s) autre(s) minéral(aux) connaissez-vous qui puissent être associés à ce type de roche ?
 - 1e. Cet échantillon a été trouvé dans un basalte dans le massif du Velay, en France. Comment expliquez-vous son origine ?

2. L'olivine est un minéral très anisotrope, c'est-à-dire qu'à l'échelle du cristal, les vitesses de propagation sismiques sont différentes suivant les directions cristallines. Ceci est illustré par la figure 2a qui montre les vitesses d'ondes P en fonction des axes cristallins de l'olivine.
 - 2a. Dans un diagramme, illustrez le profil rhéologique de la croûte océanique terrestre et du manteau lithosphérique sous-jacent.
 - 2b. Des études expérimentales à haute pression et haute température ont montré que, dans les conditions du manteau lithosphérique, l'olivine se déforme de manière dite « ductile », c'est-à-dire par plasticité intracristalline (Figure 3). Commentez qualitativement cette série d'images.
 - 2c. De la même manière que les vitesses sismiques, les ondes lumineuses se déplacent à des vitesses différentes suivant les orientations cristallines. C'est l'origine des teintes de polarisation en lumière polarisée analysée. Comment pourriez-vous interpréter la disparition de certaines teintes de polarisation et la persistance de certaines autres une fois l'olivine fortement déformée ?
 - 2d. La figure 2b montre la polarisation des vitesses sismiques sous la croûte océanique pacifique, au large de la Californie. Les traits noirs indiquent les directions selon lesquelles les vitesses de propagation sismiques sont maximales. Commentez cette direction par rapport à ce que vous connaissez de la direction du mouvement de la plaque pacifique.
 - 2e. A partir des questions précédentes, que peut-on penser de l'orientation des cristaux

d'olivine dans le manteau lithosphérique océanique ?

3. La serpentine est un phyllosilicate qui existe sous plusieurs formes cristallines, dont l'une des plus courantes est l'antigorite $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$. L'antigorite est le produit de l'altération hydrothermale de l'olivine.

3a. Quels autres minéraux de la famille des phyllosilicates connaissez-vous ?

3b. Calculez, en pourcents, la masse d'eau contenue sous forme cristalline dans l'antigorite. (Nb - on donne les masses molaires ($g.mol^{-1}$) des éléments suivants : $M_{Mg}=24$, $M_{Si}=28$)

3c. Ecrire la réaction d'altération de l'olivine par l'eau, qui produit de l'antigorite et de l'oxyde de fer (Fe_3O_4). Quel est l'autre produit (gazeux) de la réaction ? Par souci de simplicité, on considèrera un rapport molaire $Mg/Fe = 3$ dans l'olivine initiale et on précisera sous quelle forme ionique est l'atome de fer de part et d'autre de la réaction.

3d. A votre avis, dans quel contexte géologique cette réaction se produit-elle et quel rôle peut-elle jouer en lien avec la vie sur Terre?

4. La température de déshydratation de l'antigorite est relativement indépendante de la pression et égale à $550^\circ C$ environ. Cette réaction, aux conditions de pression et de température du manteau supérieur, est associée à la production d'olivine et de talc ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), mais libère aussi de l'eau sous forme vapeur. La réaction est endothermique, associée à un changement de densité solide de 2,7 à 3,2 environ.

4a. Ecrire la réaction de déshydratation de l'antigorite. Quel pôle du minéral d'olivine est libéré par la réaction ? Combien d'eau (en poids pourcents) est libérée au cours de la réaction ?

4b. La figure 4 illustre la sismicité localisée et enregistrée sous l'île de Honshu, île principale de l'archipel japonais. Discutez l'organisation spatiale de la sismicité, en particulier de son évolution en profondeur.

4c. La figure 4 présente aussi en surimposition la structure thermique de la zone de subduction japonaise. En comparant les deux (distribution de la sismicité en profondeur et structure thermique), quelle(s) hypothèse(s) pourriez-vous formuler quant au rôle que la réaction de déshydratation de l'antigorite pourrait jouer dans le déclenchement de la sismicité ?

5. En 1981, des sismologues ont publié le premier modèle de référence des vitesses de propagation sismiques pour la Terre. Ce modèle, ainsi que des modèles de vitesses plus récents, sont illustrés dans le cas du manteau supérieur terrestre moyen par la figure 5.

5a. Quelles sont les deux ondes de volume, 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 ?

5b. A quoi correspond la zone de faible profondeur ($z < 200 \text{ km}$) où les vitesses de propagation sismiques semblent décroître ?

5c. En 1961, à la suite d'études expérimentales, Francis Birch, publia une loi empirique qui relie la vitesse des ondes sismiques à la densité des roches. Cette loi, dite loi de Birch, s'écrit : $V = A + B\rho$ où A et B sont des constantes, indépendantes de la pression et de la température. A quoi correspondent respectivement l'augmentation continue des vitesses de propagation avec la profondeur, ainsi que les différents sauts de vitesses observés ?

6. Dans le manteau supérieur, l'olivine subit trois transitions de phase successives :

olivine (α) ---> *wadsleyite (olivine β)*

wadsleyite (olivine β) ---> *ringwoodite (olivine γ)*

ringwoodite (olivine γ) ---> *Perovskite + Magnésowüstite*

Les réactions *olivine (α)* ---> *wadsleyite (olivine β)* ---> *ringwoodite (olivine γ)* sont exothermiques, tandis que la réaction *ringwoodite (olivine γ)* ---> *Perovskite + Magnésowüstite* est endothermique.

6a. En vous rappelant que la pente de Clapeyron est définie par $dP/dT = \Delta H / (T\Delta V)$, où ΔH et ΔV sont respectivement l'enthalpie de réaction et la variation de volume liée à la réaction, illustrez dans un diagramme Pression-Température (P-T) ces trois différentes transitions de phase. Une attention toute particulière sera portée à la position en profondeur de ces réactions. On illustrera dans le même diagramme le géotherme moyen dans le manteau supérieur.

6b. La wadsleyite et la ringwoodite (respectivement, les polymorphes de structure β et γ de l'olivine) ont toutes les deux été découvertes à la fin des années soixante, dans des météorites. A votre avis quelles sont la ou les raisons pour lesquelles on les a découvertes dans des météorites en premier lieu ?

7. Les études minéralogiques ont montré que les pentes de réaction entre l'olivine α et l'olivine β , puis entre l'olivine γ et l'assemblage Pérovskite + Magnésowüstite dépendaient fortement de la température, si bien que les minéralogistes pensent qu'une anomalie thermique dans le manteau supérieur devrait s'illustrer par une topographie non-négligeable des discontinuités sismiques à 410, 520 et 660 km. Ces dernières ont, de ce fait, été largement étudiées au cours de ces dernières années par les sismologues. La figure 6 présente la topographie de ces discontinuités sismiques sous la chaîne des volcans Hawaïens.

7a. A quel type de volcanisme correspondent les îles Hawaïennes ?

7b. On rappelle que les réactions *olivine (α)* ---> *wadsleyite (olivine β)* ---> *ringwoodite (olivine γ)* sont exothermiques, tandis que la réaction *ringwoodite (olivine γ)* ---> *Perovskite + Magnésowüstite* est endothermique. Interprétez les variations topographiques des discontinuités à 410, 520 et 660 km observées sur la figure 6 en terme d'anomalies thermiques. On illustrera le raisonnement par un schéma.

7c. Quelle(s) discontinuité(s) fait (font) pencher en faveur de la remontée d'un

panache mantellique dans le manteau inférieur ?

8. La figure 7a montre une coupe sismologique de la zone de transition à l'aplomb de l'archipel japonais. Les sismologues y ont imaginé une anomalie de vitesse lente sous la discontinuité sismique à 410km. Ils interprètent cette anomalie comme liée à la présence d'olivine métastable, c'est à dire à de l'olivine (α) non-transformée dans le panneau de subduction plongeant.

8a. Pourquoi est-ce que la présence d'olivine (α) non-transformée, à cette profondeur ($z > 410\text{km}$), se traduirait-elle par une anomalie de vitesse lente ?

8b. En vous rappelant les résultats de la question 6, émettez une hypothèse qui expliquerait pourquoi l'olivine (α) du panneau de subduction plongeant, bien que plus froide que le manteau environnant, se transformerait néanmoins à plus grande profondeur.

8c. La figure 7b montre la localisation de la sismicité profonde sur la même coupe sismologique. Commentez puis formulez une hypothèse quant à l'origine de la sismicité profonde ($410 < z < 660\text{km}$).

9. Le 24 mai 2013, un tremblement de Terre de Magnitude $M_w=8.3$ a été durement ressenti en mer d'Okhotsk, en Russie. Son hypocentre était localisé à près de 620km de profondeur ; c'est le plus grand tremblement de Terre profond jamais enregistré (Figure 8).

9a. Calculez la pression P qui s'exerce à 620km (*nb : on prendra une densité moyenne du manteau supérieur égale à 3,3*).

9b. La magnitude d'un séisme est calculée de la manière suivante : $M_w = 2/3 \log_{10} M_o - 6.0$. On appelle le moment sismique $M_o = \mu DS$, où μ est le module élastique de cisaillement (Pa), D la magnitude du glissement (m) et S la surface totale de la faille (m^2). Calculez le moment sismique M_o pour le tremblement de Terre d'Okhotsk. Quelle est l'unité du moment sismique et comment appelle-t-on plus communément ce type d'unité en Physique ?

9c. En utilisant la figure 5, calculez le module élastique de cisaillement à 600km de profondeur. En déduire le rapport $D \times S$, puis la quantité de glissement D . (*nb : on négligera le pendage de la plaque, on rappelle que 1° d'arc = 111km et on prendra une densité égale à 3,5 à 620km de profondeur.*)

9d. Pour un séisme, la chute de contrainte $\Delta\sigma$ sur le plan de faille peut être calculée de la manière suivante : $\Delta\sigma = \mu D/L$, où L est la longueur caractéristique de la faille ($L = \sqrt{S}$). En déduire la chute de contrainte liée au séisme d'Okhotsk et comparez cette valeur à la pression P qui s'exerce à 620km.

9e. On considère que l'élévation de température ΔT sur le plan de faille est égale à : $\Delta T = PD/(h\rho C)$, où ρ est la masse volumique, C la chaleur spécifique ($10^3 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et h l'épaisseur de la zone de faille. Considérant que l'élévation en température est égale à la température de fusion de péridotite ($\Delta T = 600^\circ\text{C}$), quelle est l'épaisseur de la faille à l'origine du tremblement de terre profond d'Okhotsk ?

9f. Ce calcul néglige l'énergie consommée par la chaleur latente de fusion de l'olivine. Comment évoluerait l'épaisseur de la faille si on prenait celle-ci en compte ?

10. La figure 9 montre deux images tomographiques réalisées au niveau de l'Amérique centrale (9a) et du Japon (9b).

10a. Comment ont été obtenues ces images et à quoi correspond leur échelle de couleur ?

10b. En vous rappelant la question 5c, comment sont communément interprétées ces images ?

10c. Quelle différence fondamentale remarquez-vous entre la subduction américaine et la subduction japonaise aux alentours de la transition manteau supérieur - manteau inférieur ?

10d. En vous rappelant que la réaction *ringwoodite (olivine γ)* ---> *Perovskite + Magnésowüstite* est endothermique, comment pourriez-vous interpréter cette différence ?

10e. Qu'en déduire, en terme de température, pour la lithosphère océanique en subduction sous l'Amérique centrale par rapport à la lithosphère océanique en subduction sous la Japon ? Au vu de vos connaissances sur l'âge et la vitesse des plaques océaniques qui rentrent en subduction sur le pourtour du Pacifique, cela vous paraît-il vraisemblable ?

11. La pérovskite a pour formule chimique $(Mg,Fe)SiO_3$. Ce minéral représente plus de 80%, en poids, du manteau inférieur, ce qui en fait la phase minérale la plus abondante de notre planète.

11a. Quelle est la différence fondamentale entre la structure cristalline des olivines et celle de la pérovskite ?

11b. Quelle est la formule chimique de la Magnésowüstite, l'autre constituant principal du manteau inférieur ?

11c. Des études expérimentales ont montré, en 2005, que la pérovskite se transformait en post-pérovskite au delà de 120GPa et 2500K, c'est-à-dire les conditions terrestres équivalentes à une profondeur de 2700km environ. A votre avis, où pourrait-on trouver de la post-pérovskite à l'intérieur de la terre ?

12. La figure 10 illustre l'évolution de la sismicité intermédiaire ($100 < z < 410$ km) et profonde ($410 < z < 660$ km) dans le manteau supérieur, cumulée sur l'ensemble de la planète au cours des 30 dernières années.

12a. A votre avis, et en rappelant les résultats des questions précédentes, dans quel contexte géodynamique peut-on observer sur Terre de la sismicité intermédiaire et profonde ?

12b. En vous rappelant les résultats de la question 4, émettez une hypothèse qui expliquerait pourquoi la sismicité intermédiaire ($60 < z < 400$ km) semble s'éteindre progressivement pour atteindre un minimum vers 400km.

12c. En vous rappelant les résultats de la question 8, émettez une hypothèse qui expliquerait pourquoi la sismicité profonde ($400 < z < 660$ km) commence par augmenter

pour éteindre un pic à 600km de profondeur, puis semble s'éteindre vers 660km.

12d. Enfin, émettez une hypothèse qui expliquerait l'absence de sismicité observée dans le manteau inférieur.

Partie II. La convection mantellique

“En 1931, Arthur Holmes est un des rares partisans de la théorie de la dérive des continents d'Alfred Wegener. Selon lui, le manteau terrestre contenait des cellules de convection dissipant la chaleur radioactive et amenant la croûte terrestre vers la surface.”

Temps conseillé : 1 heure et 30 minutes

Le nombre de Rayleigh s'exprime généralement comme :

$$Ra = \frac{\alpha_v (T_1 - T_0) \rho_o g L^3}{\mu \kappa} \quad (1)$$

où α_v est le coefficient d'expansion thermique (K^{-1}), ρ_o la masse volumique, g l'accélération de la pesanteur, T_1 et T_0 les températures en surface et en profondeur respectivement, μ la viscosité dynamique (Pa.s), κ la diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$) et L la longueur caractéristique du système.

1.a Quelle est la signification physique du terme $\alpha_v (T_1 - T_0) \rho_o g L$? On précisera notamment son unité.

1.b Quelle est la signification physique du terme $\mu \kappa / L^2$?

1.c En déduire la signification du nombre de Rayleigh. A partir de quelle valeur de Ra un système se met-il à convecter ?

Dans la pratique, lorsque la source de chaleur est interne, comme pour le cas de la radioactivité dans le manteau d'une planète tellurique, on peut s'affranchir de la connaissance du gradient de température car le nombre de Rayleigh peut s'écrire de la manière suivante :

$$Ra_H = \frac{\alpha_v \rho_o^2 g H L^5}{\mu \kappa k} \quad (2)$$

où les paramètres sont les mêmes que dans l'équation (1) et où H est la puissance thermique de chauffe par unité de masse ($W.kg^{-1}$) et k la conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$).

La suite de cette partie consiste à déterminer le nombre de Rayleigh dans le manteau terrestre.

2. Pour ce faire, on cherche d'abord à calculer la densité moyenne du manteau terrestre, et ce grâce à la valeur du moment d'inertie terrestre C . On rappelle que le moment d'inertie d'une sphère de rayon a et de densité $\rho(r)$ est donné par la formule suivante :

$$C = \frac{8\pi}{3} \int_0^a \rho(r) r^4 dr \quad (3)$$

2.a Pour une sphère de densité constante ρ_o , trouvez une relation simple entre la masse de la sphère M et son moment d'inertie C . Quelle est alors la valeur du moment d'inertie normalisé, défini par C/Ma^2 ?

2.b Le tableau suivant donne les valeurs mesurées de C/Ma^2 pour la Terre, Mars et Vénus et la Lune. Commentez.

	Rayon (km)	Masse (kg)	C/Ma ²
Terre	6370	5,97x10 ²⁴	0,33
Lune	1730	7,34 x10 ²²	0,39
Vénus	6051	4,86x10 ²⁴	0,36
Mars	3390	0,64x10 ²⁴	0,33

2.c On suppose que la densité moyenne dans le noyau terrestre (noyau externe inclus) est de 10. En déduire la masse et la densité moyenne du manteau terrestre (nb : on négligera l'existence d'une croûte terrestre dans ce calcul).

3. On cherche maintenant à calculer la puissance thermique H . Pour ce faire, les géophysiciens réalisent des mesures de flux de chaleur en surface (figure 11).

3.a Commentez, en quelques lignes seulement, la figure 11. On expliquera notamment à quoi correspondent les zones de flux de chaleur les plus importantes et les zones de flux de chaleur les plus faibles.

3.b On estime le flux moyen de chaleur sur Terre à 65mW/m². En déduire la puissance thermique moyenne produite par unité de masse H (W.kg⁻¹) par la Terre.

3.c. On considère en fait que 20% de cette chaleur est produite dans la croûte terrestre, que 20% provient du refroidissement séculaire de la planète, et que par ailleurs, le noyau terrestre ne contient pas d'éléments radioactifs. En déduire la puissance thermique H dégagée par le manteau terrestre à proprement parler.

4. Le chauffage interne du manteau est essentiellement attribué à la décroissance radioactive des isotopes de l'uranium ²³⁵U et ²³⁸U, et de l'isotope du thorium ²³²Th. Le taux de chauffe et les demi-vies de ces trois isotopes sont donnés dans le tableau suivant :

	H (W.kg ⁻¹)	T _{1/2} (années)
²³⁸ U	9,46x10 ⁻⁵	4,47x10 ⁹
²³⁵ U	5,69x10 ⁻⁴	7,04x10 ⁸
²³² Th	2,64x10 ⁻⁵	1,4x10 ¹⁰

4a. Au temps présent, l'uranium naturel est composé à 99,28% d'²³⁸U et 0.71% d'²³⁵U, et le thorium naturel composé à 100% de ²³²Th. Par ailleurs, les études géochimiques montrent qu'au temps présent $C^{Th}_o/C^U_o = 4$, et ce quelles que soient les roches dans lesquelles on a pu les mesurer. En déduire les concentrations en Uranium, puis en Thorium dans le manteau terrestre.

4b. En rappelant le lien entre la concentration d'un isotope radioactif au temps t, sa concentration au temps présent et sa demi-vie, en déduire la puissance thermique dégagée par le manteau terrestre à un temps t de son histoire géologique.

4c. Quelle puissance thermique dégageait le manteau terrestre il y a 4 milliards d'années ? Commentez brièvement ce résultat et les conséquences que cela pourrait avoir sur le régime thermique primitif de la planète.

5. On cherche maintenant à déterminer la viscosité du manteau. Pour cela, on utilise des modèles de déformation visqueuse qui montrent que le déplacement d'une surface solide sur un « fluide » visqueux décroît de manière exponentielle au fur et à mesure que le

« fluide » visqueux peut s'écouler sur les bords. La variation de niveau de la topographie de la surface s'exprime alors selon la loi suivante :

$$h=h_m \exp(-t/\tau), \text{ où } \tau = 4\pi\mu/\rho g\lambda \quad (4)$$

où μ est la viscosité dynamique, g l'accélération de la pesanteur, ρ la masse volumique du solide et λ la longueur d'onde caractéristique de la surface solide.

5a. Rappeler la notion d'isostasie.

5b. La figure 12 montre le soulèvement vertical annuel mesuré sur le bouclier Canadien. Commentez cette carte. A votre avis, à quoi est dû ce soulèvement ?

5c. La figure 13a montre des plages surélevées dans le nord de la Suède. Des datations (figure 13b) ont permis de reconstruire l'histoire du soulèvement de la région, en fonction du temps. A votre avis, quels éléments radioactifs permettent ce type de datations ?

5d. Sur la figure 13b, la courbe noire montre la meilleure approximation obtenue par le modèle exponentiel pour l'évolution de la topographie au cours du temps. Commentez et déterminez approximativement le temps de relaxation τ .

5e. Dans le cas du bouclier scandinave, une longueur d'onde raisonnable est de l'ordre de 3000km. En déduire l'ordre de grandeur de la viscosité mantellique.

6. Les autres paramètres qui interviennent dans le calcul du nombre de Rayleigh peuvent tous être mesurés au laboratoire. Ainsi, pour l'olivine, la conductivité thermique k est de l'ordre du $4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, la diffusivité thermique κ de l'ordre de $10^{-4} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et l'expansion thermique α_v de $3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

6a. A votre avis, comment ces paramètres ont-ils été mesurés ?

6b. En utilisant la somme des résultats précédents, en déduire le nombre de Rayleigh du manteau terrestre dans son ensemble, du manteau supérieur et du manteau inférieur. Qu'en déduisez-vous ?

6b. Quelles sont, à votre avis, et en quelques lignes, les limites de ce calcul ?

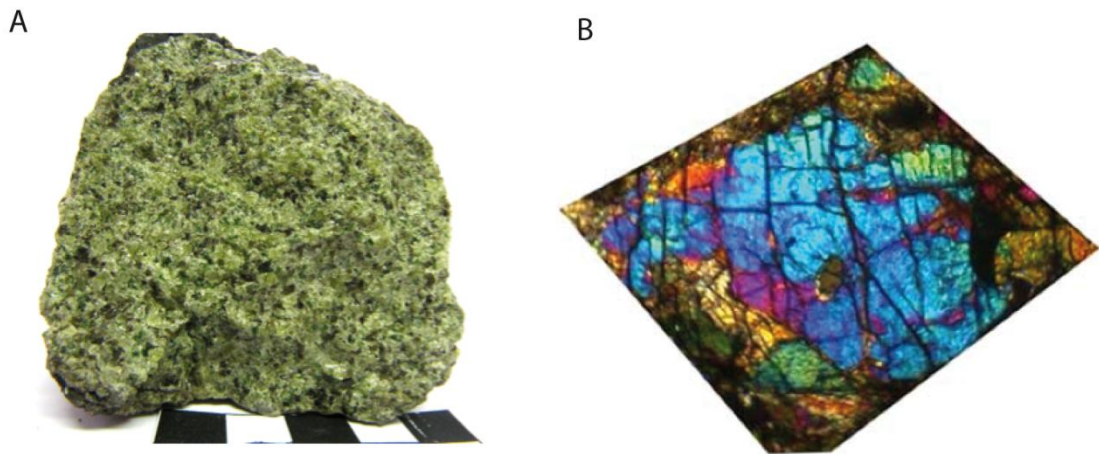


Figure 1. A) Roche mantellique. B) Principal minéral constituant de cette roche, en lumière polarisée analysée.

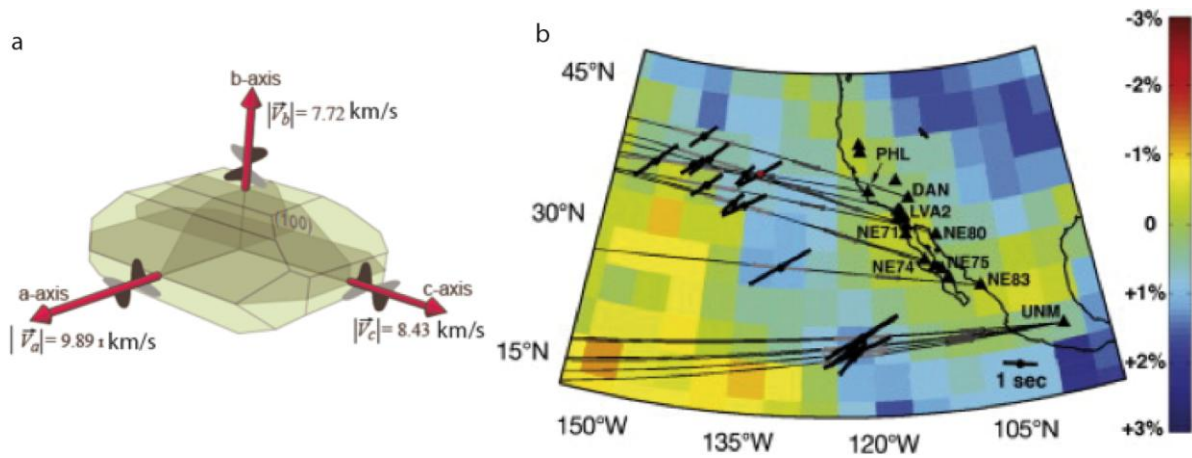


Figure 2. a) Vitesses de propagation des ondes P selon les axes cristallographiques de l'olivine. b) Polarisation de la vitesse des ondes sous la plaque Pacifique, au large de la Californie. Les traits pleins donnent la direction selon laquelle les vitesses de propagation sismique sont maximales.

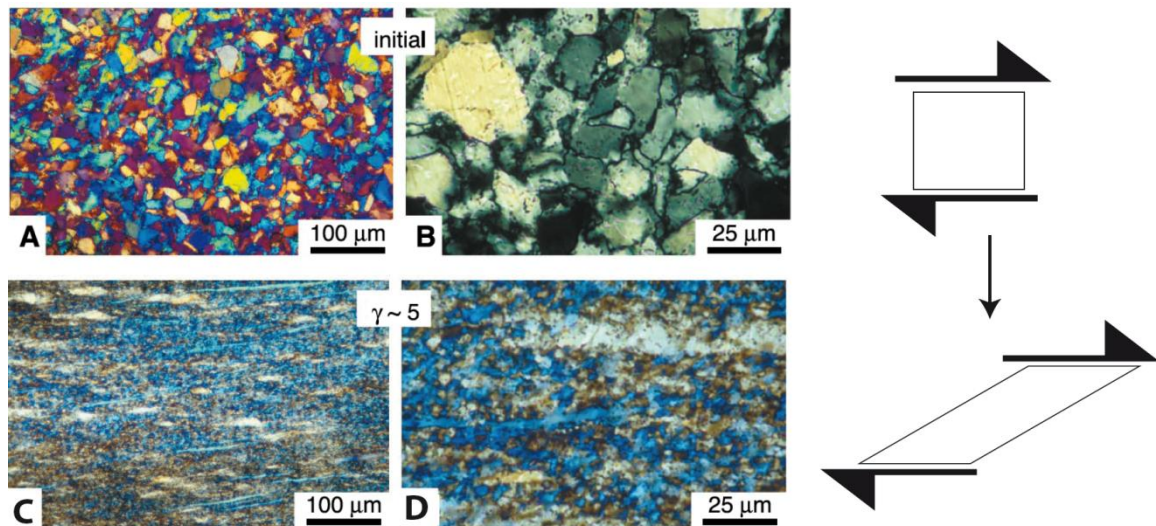


Figure 3. Microstructures après déformation expérimentale d'un agrégat d'olivine, en lumière polarisée analysée. A et C, vues d'ensemble ; B et D, vues de détail. γ correspond à la quantité de déformation. Les flèches indiquent la direction du cisaillement.

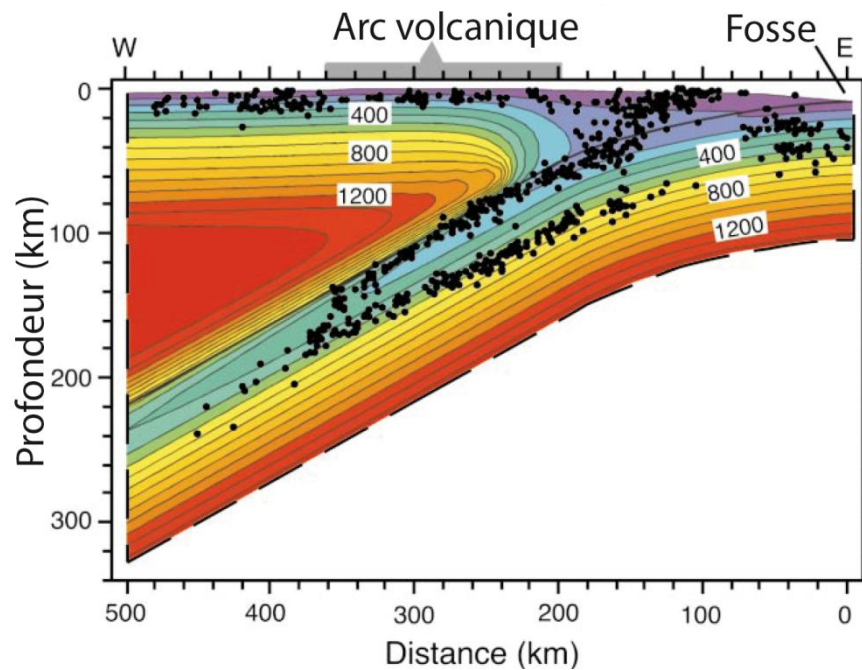


Figure 4. Distribution de la sismicité sous Honshu, île principale de l'archipel japonais. Le code couleur indique la structure thermique de la plaque en subduction. Les isothermes sont données en degrés Celsius.

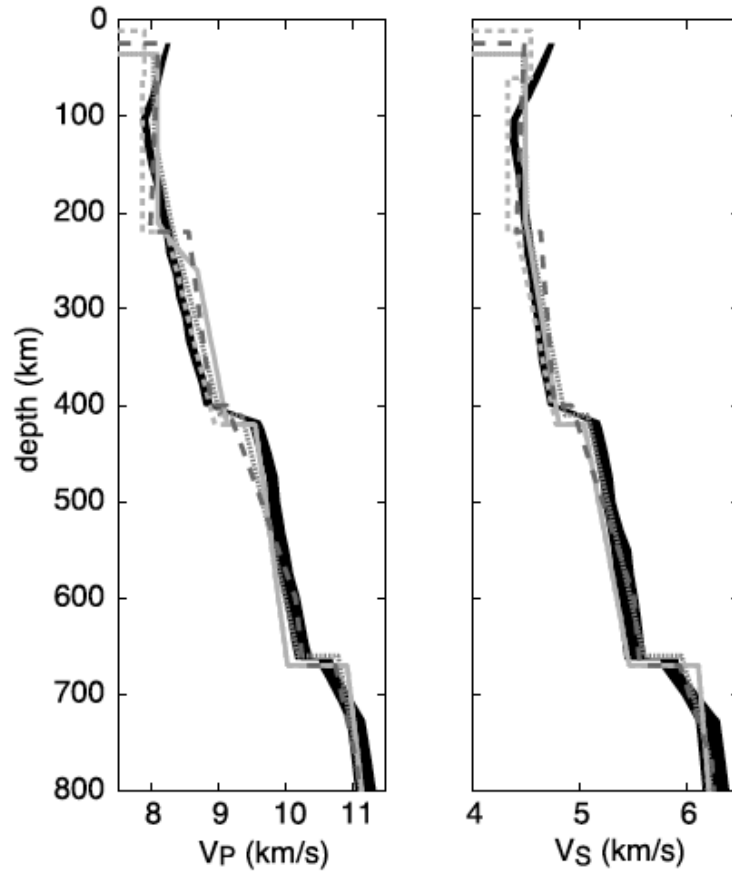


Figure 5. Vitesses de propagation des ondes sismiques dans le manteau supérieur.

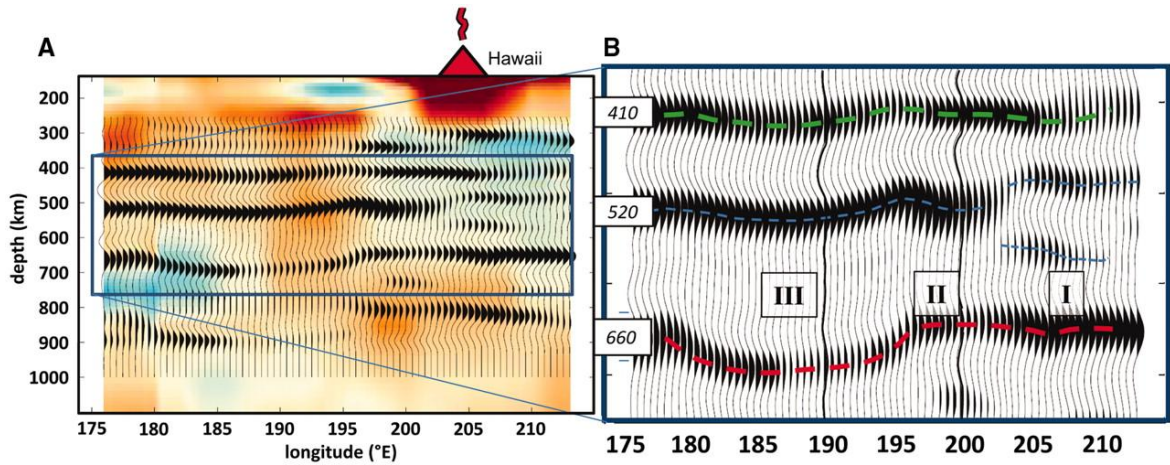


Figure 6. Topographies des discontinuités à 410, 520 et 660km au niveau de l'archipel volcanique d'Hawaï. A) Vue d'ensemble. B) Vue de détail.

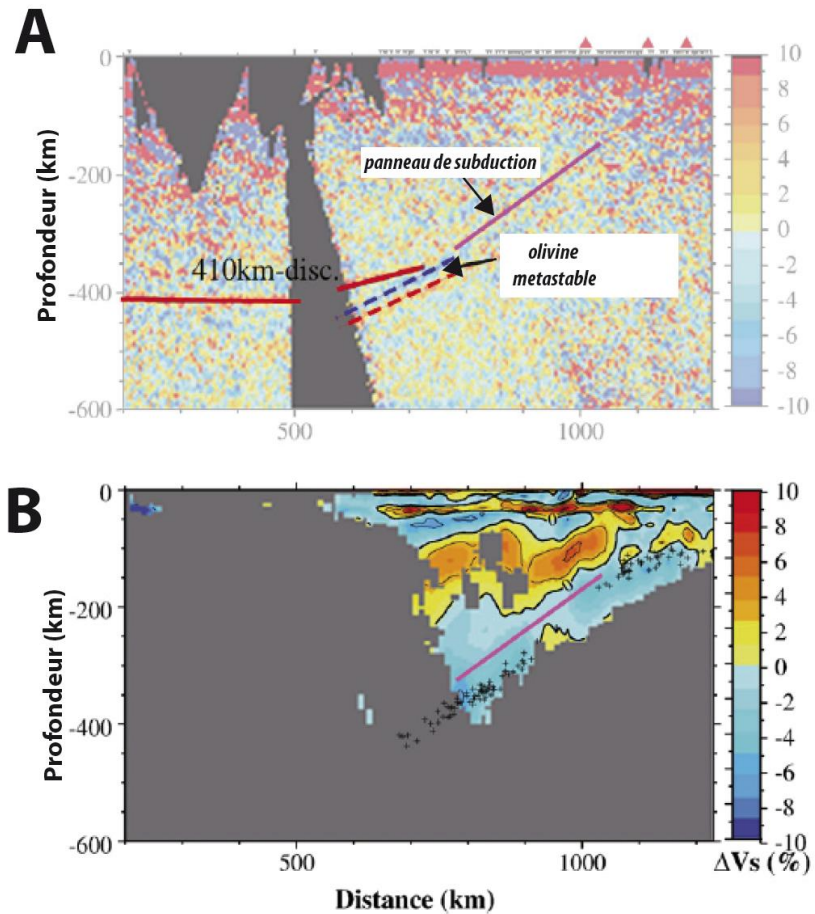


Figure 7. Coupes tomographiques d'ondes S à l'aplomb de l'archipel japonais. A) Image haute résolution des anomalies de vitesses d'onde S. B) Localisation de la sismicité.

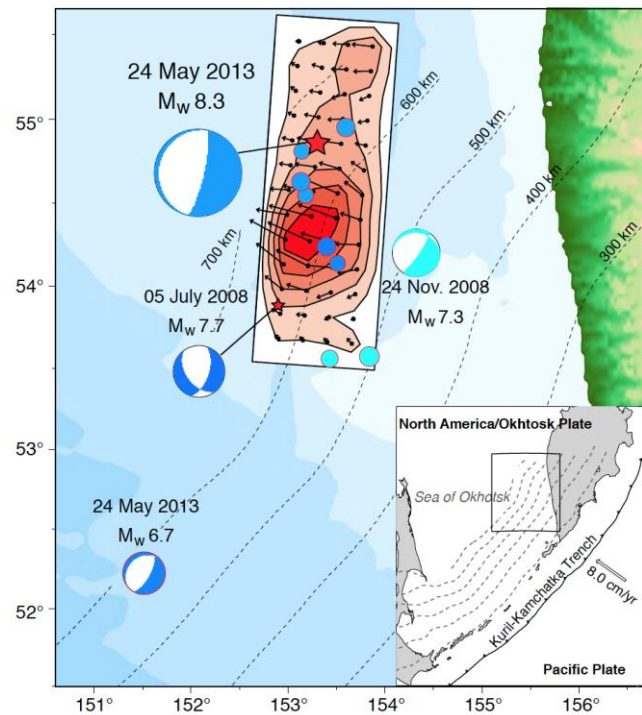


Figure 8. Carte du glissement (sans échelle) du tremblement de Terre profond d'Okhotsk du 24 mai 2013. Le mécanisme au foyer, ainsi que les répliques sont indiqués sur la figure.

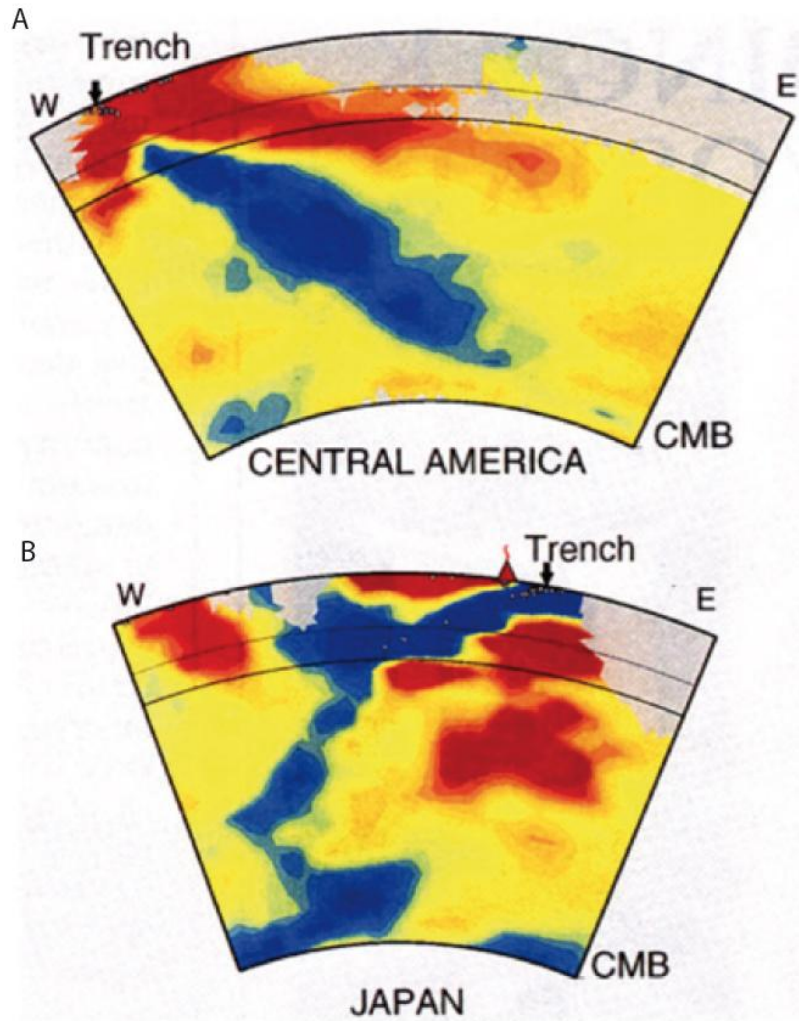


Figure 9. Coupes tomographiques d'ondes P.
 A) Au niveau de l'Amérique centrale. B) Au niveau du Japon.
 CMB = Limite Noyau -Manteau. Trench = fosse. E = Est. W = Ouest.

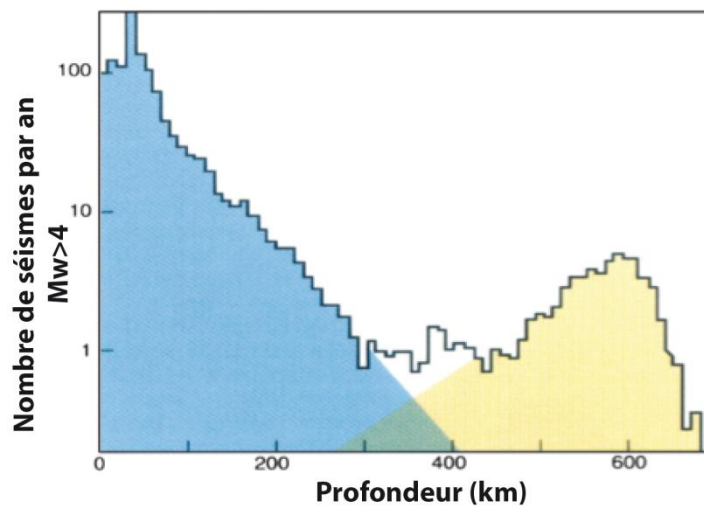


Figure 10. Distribution moyenne de la profondeur des séismes (Magnitudes $M_w > 4$) au cours des trente dernières années.

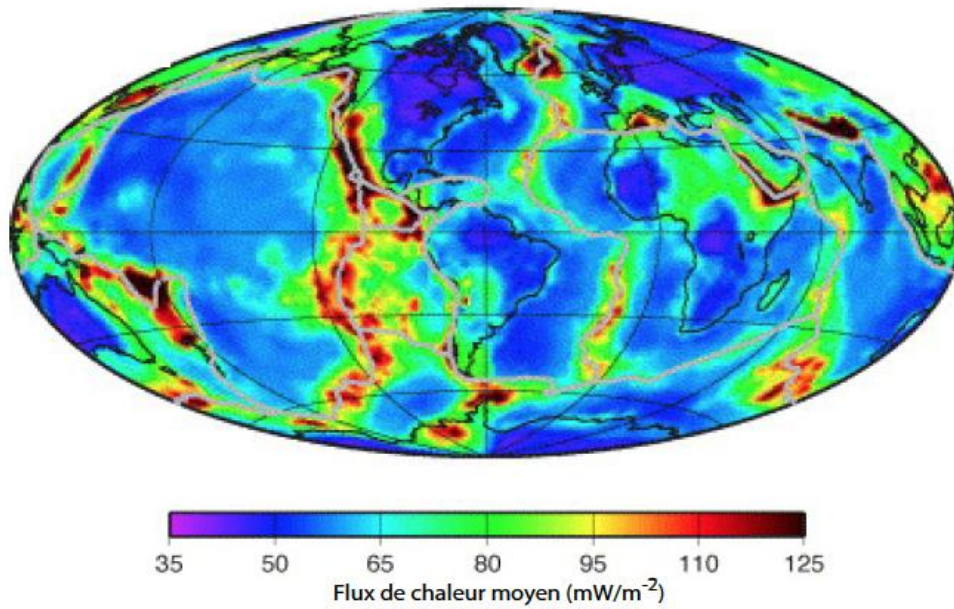


Figure 11. Carte du flux de chaleur (mW/m²) mesuré à la surface du globe.

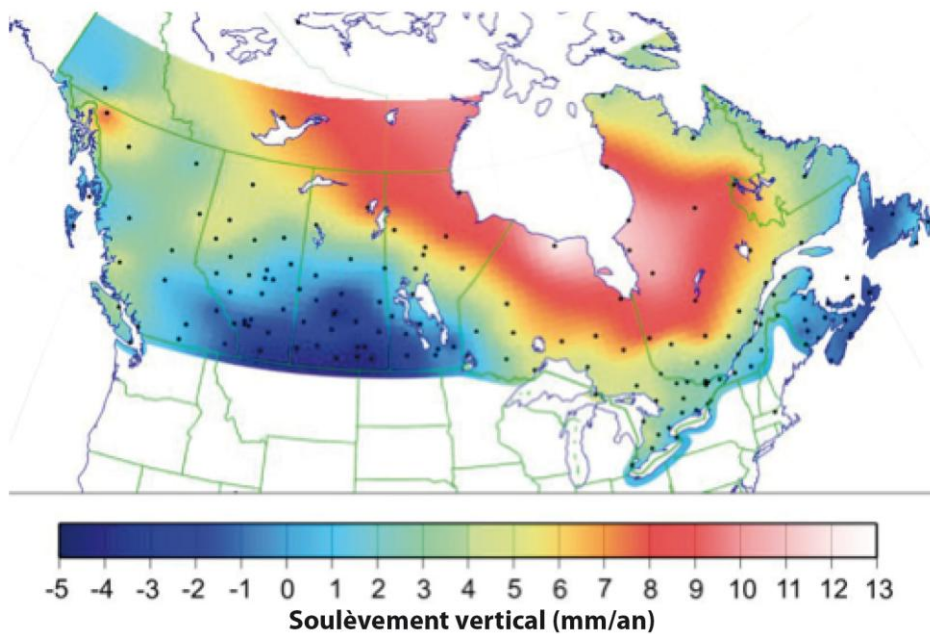


Figure 12. Carte du mouvement vertical moyen mesuré au Canada.

A



B

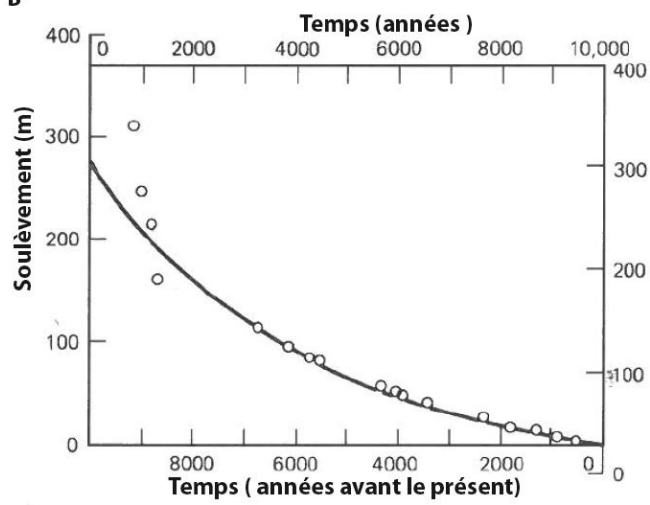


Figure 13. A) Plages surélevées à Östergransholm, Suède. Le soulèvement vertical actuel est de 2mm/an. B) Soulèvement de l'embouchure de la rivière Angerman, Suède, en fonction du temps au cours des derniers 10000 ans. La courbe noire indique l'approximation exponentielle, les cercles indiquent les points de mesure.