

**ÉCOLES NORMALES SUPÉRIEURES
ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES**

CONCOURS D'ADMISSION SESSION 2015

FILIÈRE BCPST

COMPOSITION DE SCIENCES DE LA TERRE

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

Durée : 4 heures

Les calculatrices non-programmables sont autorisées. La qualité de la rédaction et de la présentation sera prise en compte dans la notation de la copie.

★ ★ ★

Escales dans l'Atlantique Nord

Les sections 1, 2 et 3 peuvent être traitées indépendamment.

1 L'Atlantique Nord et l'Islande

1.1 Sismicité et tectonique islandaises

Question 1.1.1

Expliquez ce que représente et comment sont construits les figurés circulaires blancs et noirs indiqués sur la **figure 1b**.

Question 1.1.2

À partir de la **figure 1**, réalisez un schéma structural simplifié de l'Islande expliquant la répartition de ses séismes.

Question 1.1.3

- (a) En vous appuyant sur la modélisation de la **figure 3**, proposez une interprétation à la répartition des séismes et des failles actives des **figures 2a** et **2b**.
- (b) En exploitant les **figures 2a**, **2b** et **3**, expliquez à quel type de structure équivaut cette région de l'Islande.

1.2 Les glaces d'Islande

Question 1.2.1

L'Islande est encore aujourd'hui recouverte sur la majorité de sa surface par de grands glaciers. Les données paléoclimatiques indiquent que ceux-ci recouvraient entièrement l'île lors de la dernière phase glaciaire, il y a 18 000 ans environ. Le recul de ces glaces n'a été ni uniforme ni régulier. Une dernière avancée glaciaire est enregistrée au Dryas récent, vers $-11\,500$ ans.

- (a) Expliquez pourquoi la construction ou la fonte des calottes glaciaires occasionnent des mouvements verticaux de la surface terrestre.
- (b) Qu'est-ce que le niveau marin relatif mesuré à Reykjavik sur la **figure 4a**? Quel(s) processus pourriez-vous évoquer pour expliquer les résultats présentés sur ce document?
- (c) La **figure 4b** compare deux stations GPS situées aux extrémités de l'Islande. En supposant un niveau marin identique à l'ouest et à l'est de l'île, calculez la vitesse de variation du niveau marin à la station HOFN.

Question 1.2.2

Le glacier Vatnajökull, qui recouvre le Sud-Est de l'Islande, a la forme d'un disque d'environ 50 km de rayon. Si l'on considère les roches sous-jacentes comme un demi-espace à comportement visqueux newtonien, la fonte de ce glacier occasionnerait un mouvement du substratum dont la vitesse verticale, au centre de la zone déchargée, $\dot{u}$, peut être modélisée par l'équation :

$$\dot{u}(t) = \frac{\rho_{\text{glace}} \times \dot{a}}{\rho_{\text{roche}}} \times (1 - \exp(-t/\tau_r)) \quad (1)$$

où $\dot{a}$ est le taux d'amincissement du glacier, t le temps écoulé depuis le début de la fonte, ρ_{glace} et ρ_{roche} les masses volumiques et τ_r un temps de relaxation caractéristique, fonction de la viscosité des roches η et du rayon de la calotte glaciaire R .

$$\tau_r = \frac{2 \times \eta \times \bar{k}}{\rho_{roche} \times g} \quad (2)$$

Avec $\bar{k}$ la longueur d'onde de la perturbation due à la charge, $\bar{k} = 1,2/R$ et g l'accélération de la pesanteur, qu'on prendra égale à 9,81 (en unités SI).

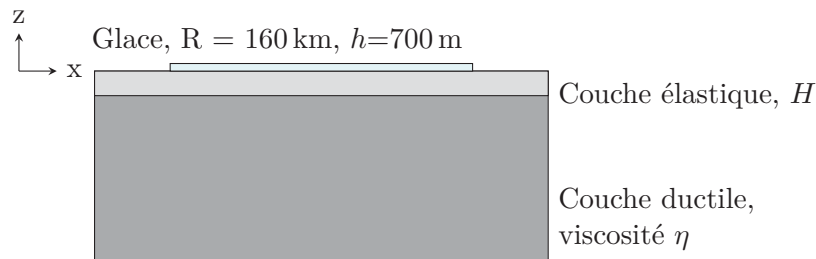
Donnez la valeur du temps de relaxation τ_r pour deux valeurs de viscosité des roches : $\eta_1 = 1 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ et $\eta_2 = 5 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Les masses volumiques seront prises égales à $\rho_{glace} = 920 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{roche} = 3200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Question 1.2.3

En supposant un amincissement du glacier de $1 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, **tracez sur un graphe** temps de fonte - vitesse l'évolution de la vitesse de mouvement en fonction du temps, par pas de temps de 25 ans, avec les mêmes valeurs de viscosité que précédemment.

Question 1.2.4

On examine maintenant la situation au Dryas Récent, quand une calotte glaciaire plus grande recouvrait l'île. Cette calotte est simplifiée sous la forme d'un disque de 160 km de rayon. On considère cette fois un modèle de comportement mécanique des roches un peu plus élaboré (ci-dessous).



Avec ce modèle, on montre qu'une charge glaciaire d'épaisseur h produit, à l'équilibre, une subsidence $u_z(x)$:

$$u_z(x) = \frac{\rho_{glace}}{\rho_{roche}} \cdot \frac{h}{2} \times \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) \times \cos\left(\frac{x}{\alpha}\right) \quad (3)$$

où x est la distance depuis le bord de la calotte glaciaire et α le paramètre flexural. Du fait de l'échelle adoptée, cette subsidence n'est pas visible sur le schéma ci-dessus. Le paramètre α s'exprime lui-même par :

$$\alpha = \sqrt[4]{\left(\frac{4 \cdot D}{\rho_{roche} \cdot g}\right)} \quad D = \frac{K \cdot H^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (4)$$

Où D , la rigidité flexurale, est exprimée en fonction du module d'Young K et du coefficient de Poisson ν (sans unité) : $K = 100 \text{ GPa}$, $\nu = 0,25$.

- À partir de ces équations, reliez la pente du terrain et la subsidence à l'équilibre.
- Exprimez la pente en bordure de la calotte (lorsque celle-ci a commencé à fondre et en supposant qu'il n'y a pas encore de rééquilibrage).
- La valeur typique de cette pente est estimée à $-2,5 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$. Déduisez-en les valeurs de α et de D . Précisez les dimensions de ces deux paramètres.

- (d) Pour les valeurs de K et ν fournies, quelle doit être l'épaisseur élastique H ? Commentez cette valeur.

Question 1.2.5

Les observations permettent d'estimer que le mouvement de l'Islande suite à la déglaciation après l'épisode du Dryas récent s'est achevée en 1000 ans ou moins. Cette durée doit correspondre environ au triple du temps de relaxation τ_r (95% de la réponse à la décharge est réalisée).

Avec les formules et les résultats précédents, estimez la viscosité η de la région ductile. À quelle couche réelle de la Terre pourrait-elle correspondre?

1.3 Les magmas d'Islande

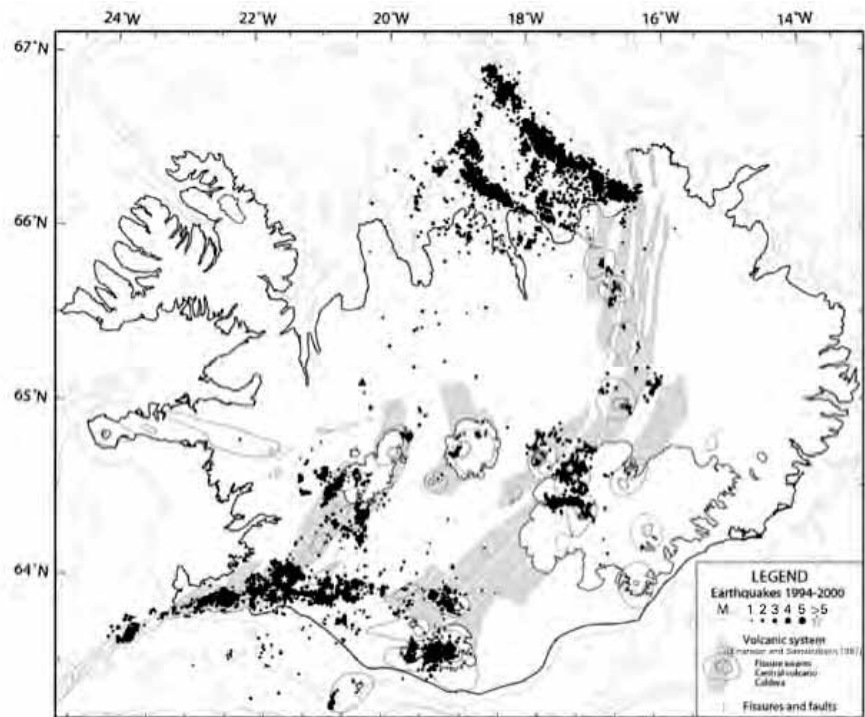
Question 1.3.1

Analysez la **figure 5** et proposez une interprétation aux résultats rassemblés sur ces graphes.

Question 1.3.2

En vous appuyant sur l'analyse des **documents 6, 7 et 8** :

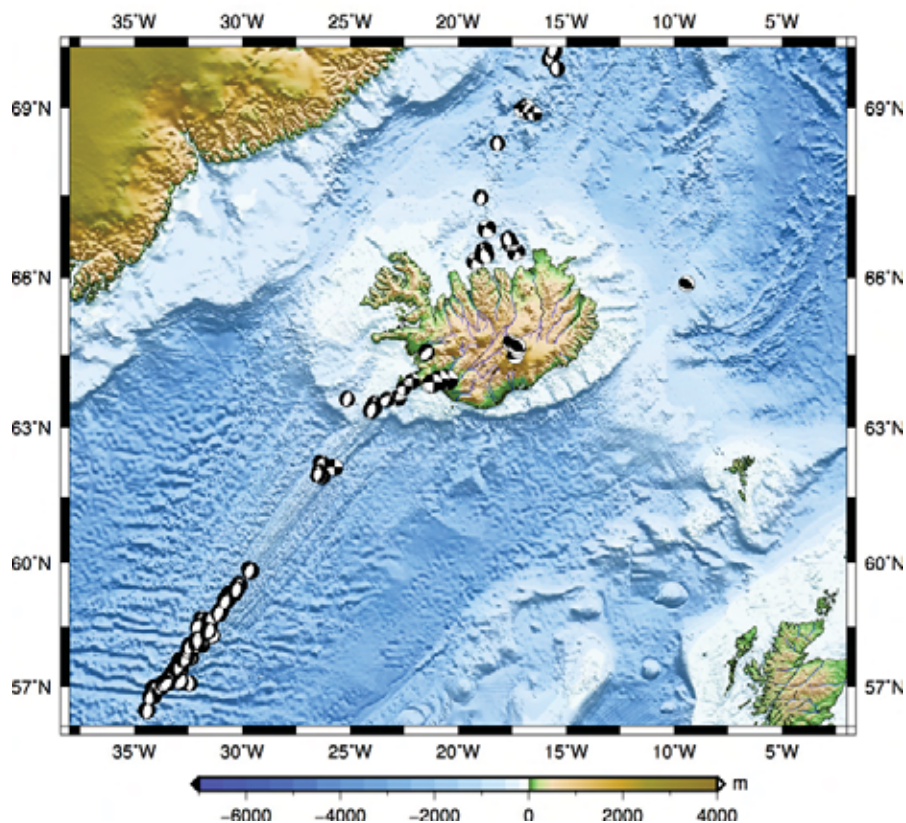
- (a) Expliquez l'intérêt des rapports isotopiques du strontium et du néodyme pour identifier les sources des roches magmatiques.
- (b) Proposez une interprétation au magmatisme islandais et à ses particularités par rapport à d'autres contextes géologiques analogues.



Modified from Jakobsdóttir et al. (2002) with permission of Jökull. Courtesy of Gunnar Guðmundsson, Icelandic Meteorological Office.

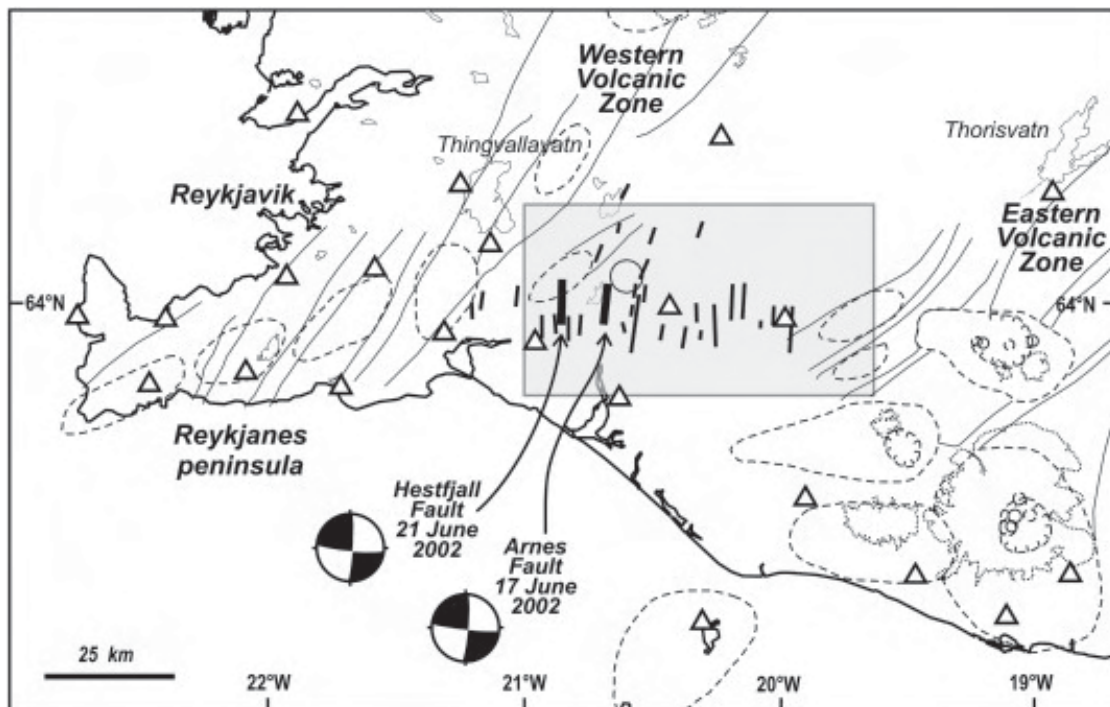
F. Sigmundsson, *Iceland Geodynamics*, Springer Praxis Book, 2006.

(a) Localisation des séismes enregistrés en Islande de 1994 à 2000
Islande, séismes 1990–2013



(b) Mécanismes au foyer des principaux séismes islandais, de 1990 à 2013

Figure 1 – Sismicité islandaise de 1994 à 2000 et mécanismes au foyer des principaux séismes enregistrés sur la période 1990-2013.



(a) Mécanismes au foyer des séismes survenus en 2000 dans la zone sismique sud-islandaise. Les tiretés délimitent les principales régions volcaniques actives durant l'Holocène.



(b) Répartition des alignements de séismes (en traits gris) et des failles actives (traits noirs épais) dans la zone encadrée sur la figure 2a.

Figure 2 – Sismicité et mouvements de la Zone Sismique Sud-Islandaise (SISZ) (F. Sigmundsson, 2006).

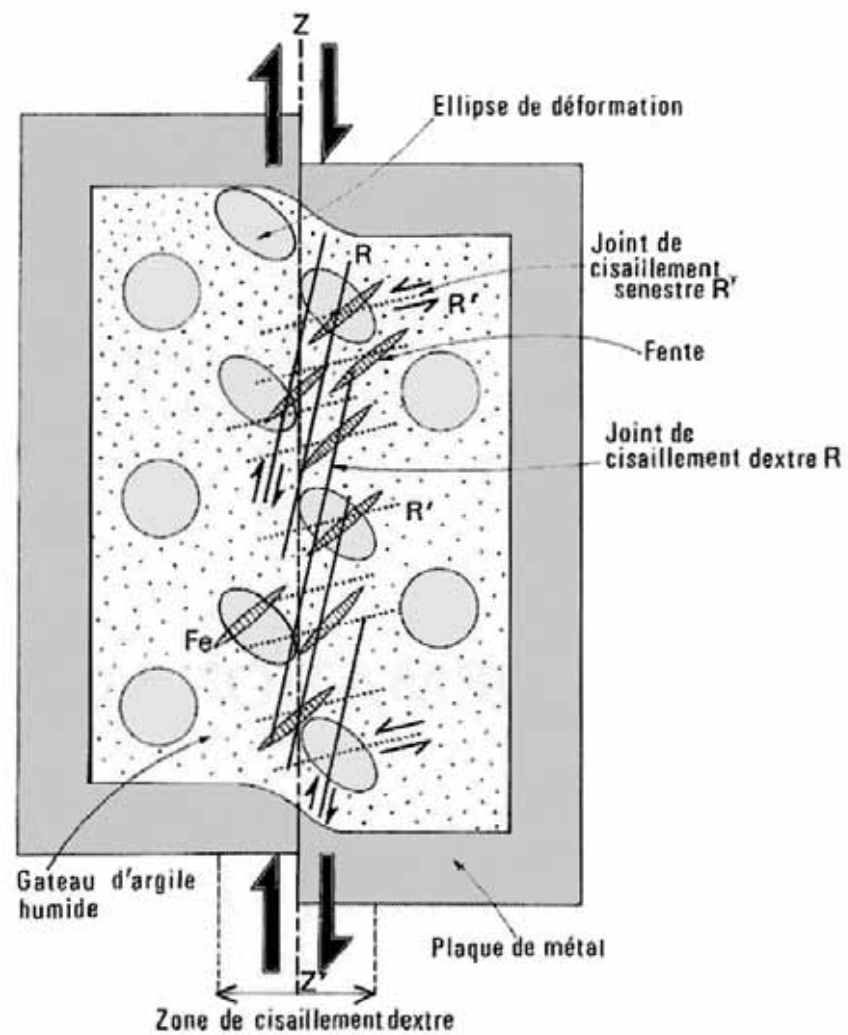
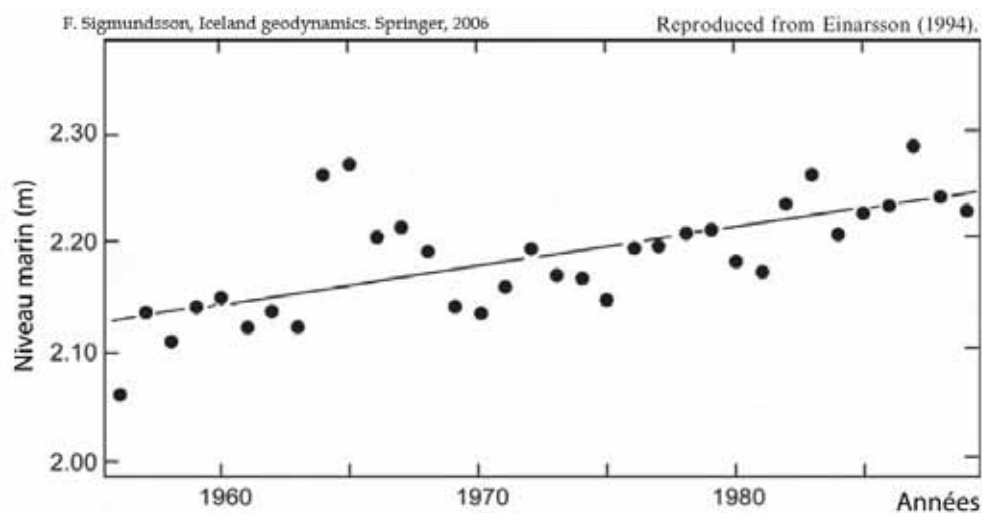
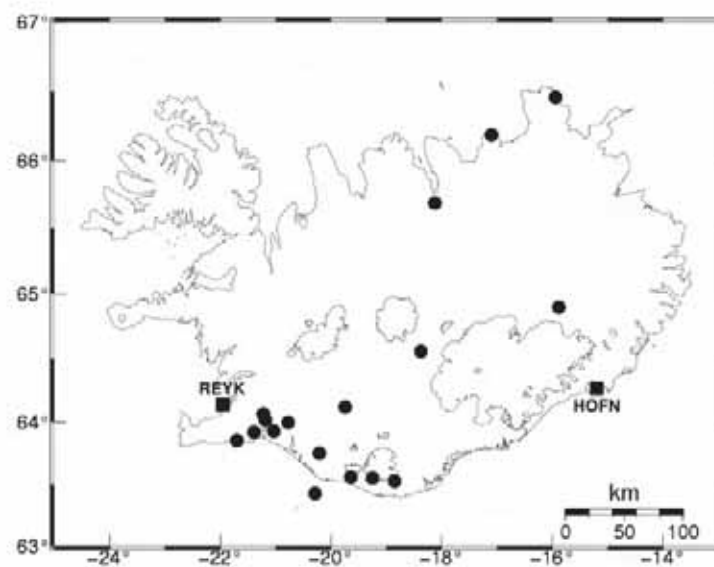
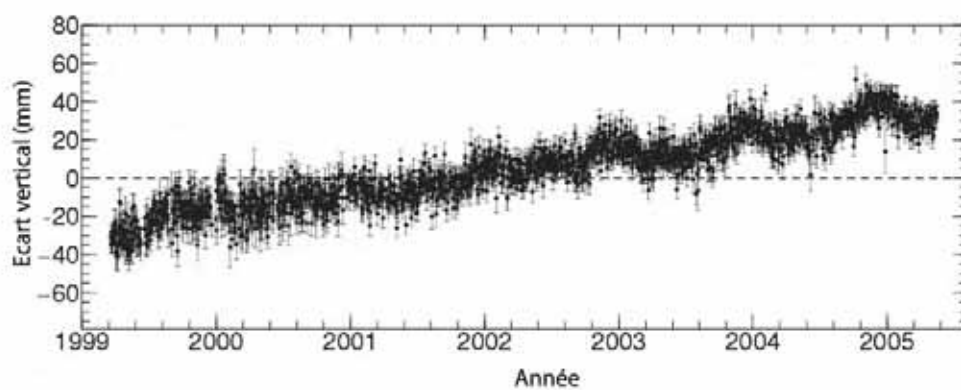


Figure 3 – Fentes de tension et joints de cisaillement obtenus par déformation sur modèles réduits (Cloos, 1932).



(a) Niveau marin mesuré à Reykjavík sur trois décennies.



(b) Suivi GPS continu des positions relatives verticales des stations de l'ouest (REY) et de l'Est (HOFN) de l'Islande (repérées sur la carte).

Figure 4 – Evolution du niveau marin à Reykjavík et suivi GPS des positions de plusieurs régions d'Islande (F. Sigmundsson, 2006).

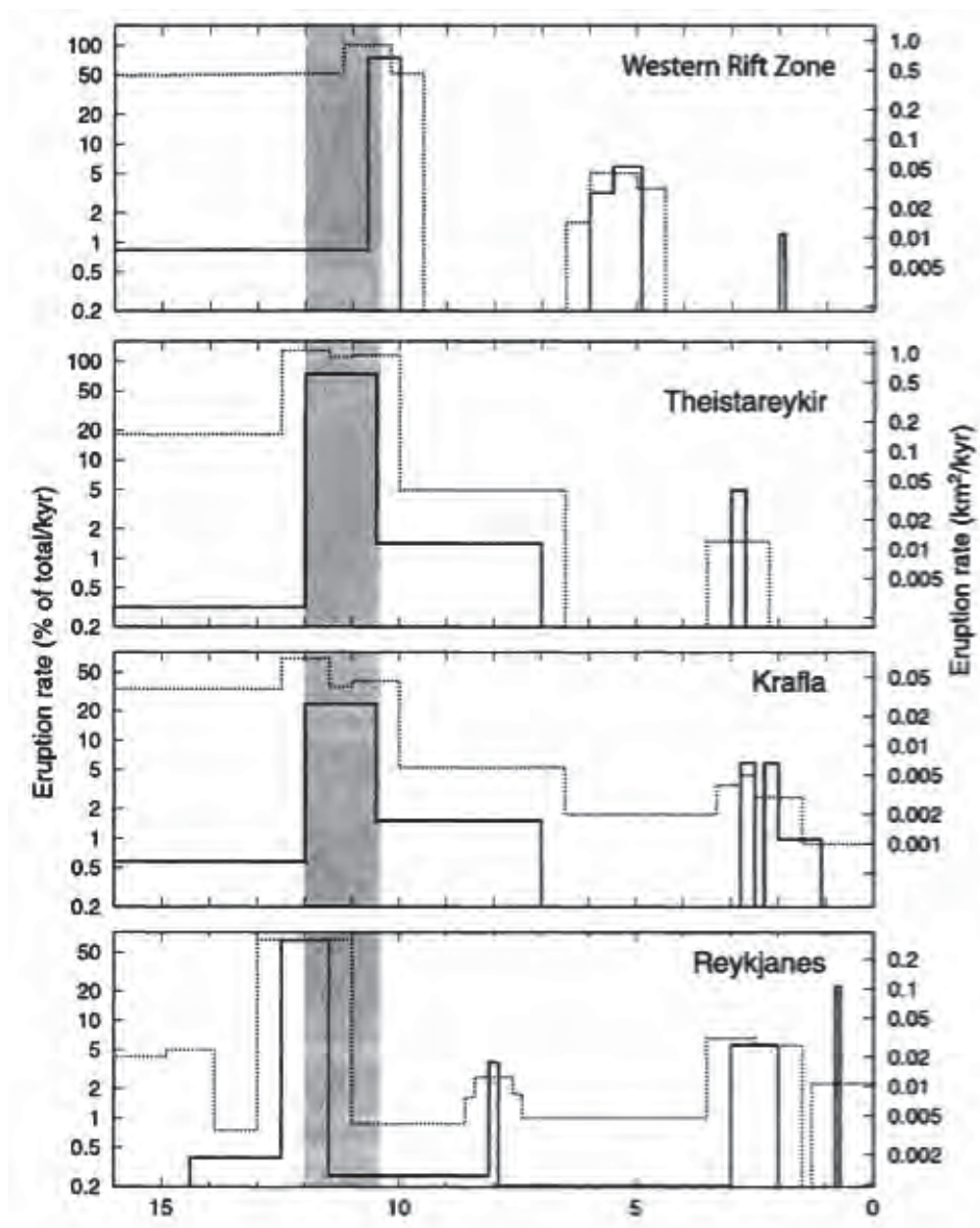


Figure 5 – Taux d'éruption dans différentes régions d'Islande, en % par mille ans et en volume émis par mille ans (en coordonnées logarithmiques). Abscisses en milliers d'années (ka) par rapport à l'actuel. La zone grisée souligne la période aux alentours de -12500 ans. Ligne pleine : taux d'éruption moyen ; ligne pointillée : limite supérieure du taux d'éruption. (MacLennan *et al.*, 2002).

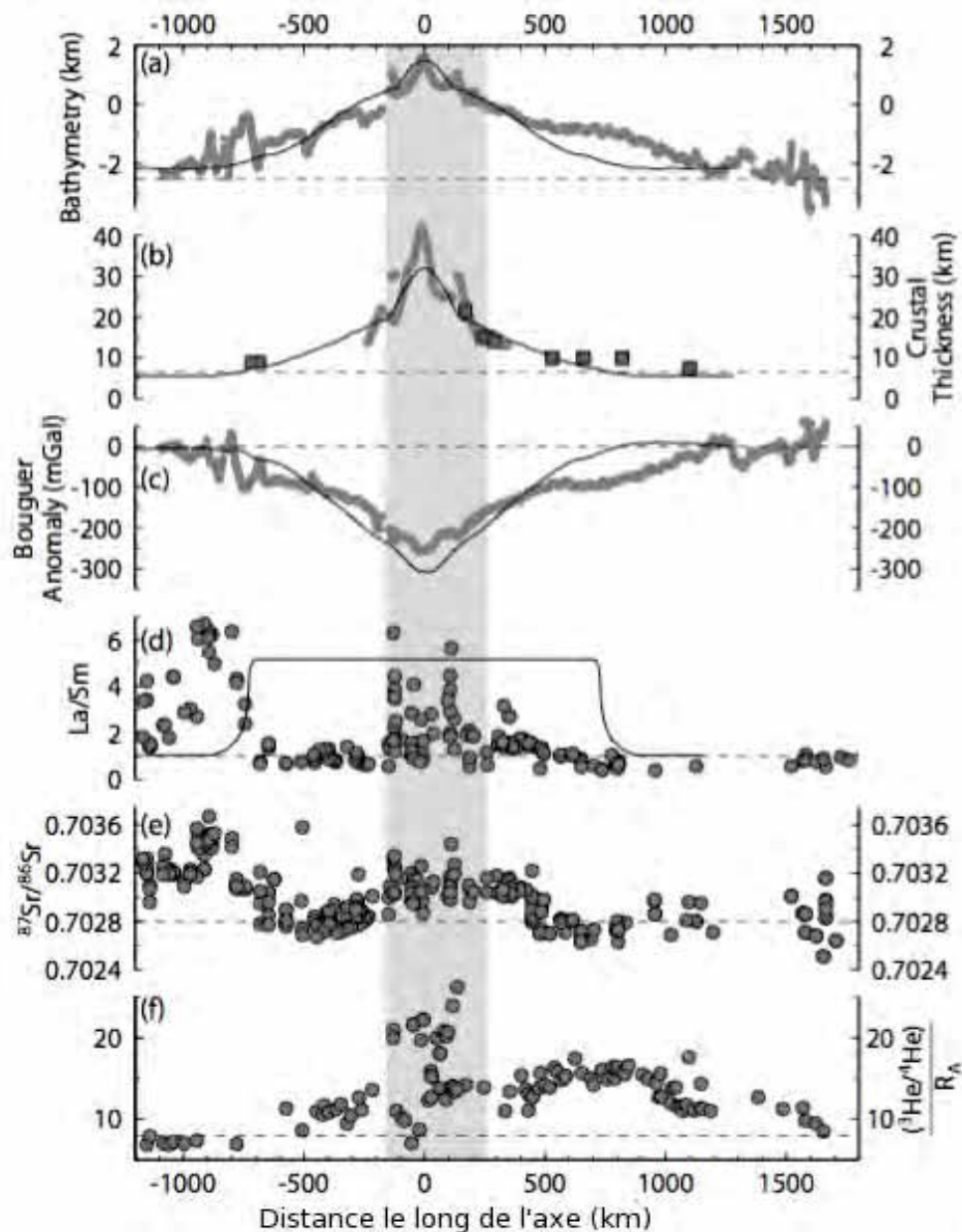


Figure 6 – Profils le long de la ride médio-atlantique et centrés sur l'Islande de (a) la bathymétrie, (b) l'épaisseur de la croûte, (c) l'anomalie de Bouguer, (d) le rapport La/Sm, (e) les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et (f) $^3\text{He}/^4\text{He}$ normalisé au rapport atmosphérique R_A . La zone grisée marque la région de l'Islande. Les courbes fines de (a) à (c) indiquent les prédictions du modèle géodynamique 3D de Ito et al. (1999).

Rapports $^3\text{He}/^4\text{He}$: ^4He est l'isotope stable de l'hélium et ^3He un isotope produit par la chaîne de désintégration de l'uranium. L' ^3He radiogénique qui se forme dans le manteau tend à gagner peu à peu l'atmosphère (dégazage du manteau).

Rapport des terres rares La/Sm : indice d'une source des magmas plus ou moins appauvrie en éléments légers très incompatibles (comme La) par de précédentes fusions et/ou du taux de fusion partielle (lui-même lié à la profondeur de fusion). Les laves de type MORB ont un rapport La/Sm faible.

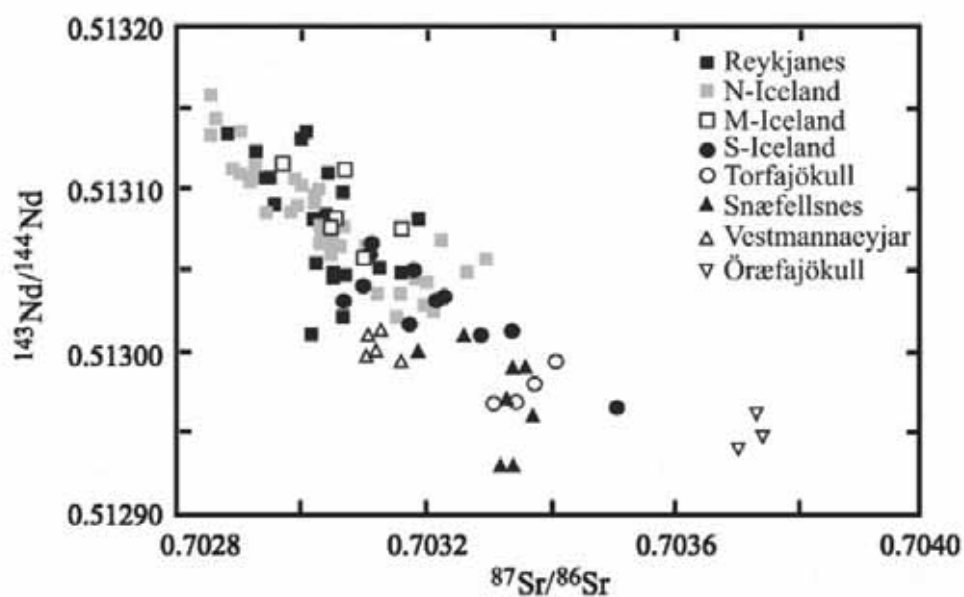


Figure 7 – Rapports isotopiques du néodyme et du strontium dans les basaltes d’Islande (Sigmarsson, 2007).

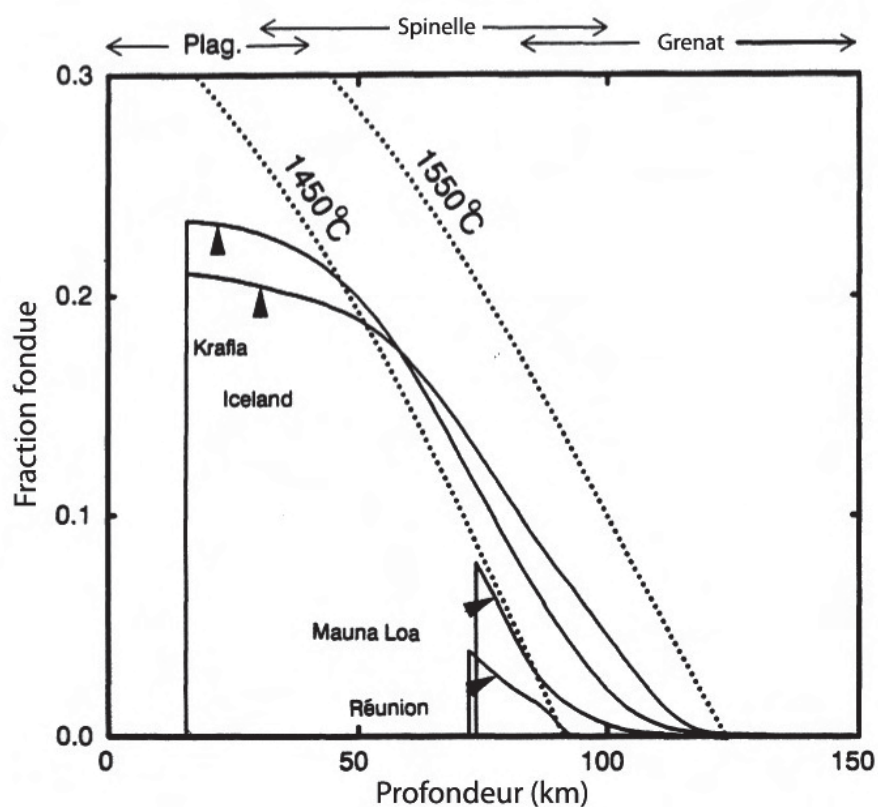


Figure 8 – Distributions estimées des zones de fusion sous différents systèmes volcaniques intra-plaques océaniques. Les courbes pointillés représentent la température potentielle du manteau (température du matériau ramené à la pression atmosphérique). Les minéraux caractéristiques des différentes régions du manteau sont indiqués (Sigmundsson 2006, repris de White & Mc Kenzie, 1995).

2 L'Atlantique central

2.1 Bathymétrie et océanologie de l'Atlantique central

Question 2.1.1

Analysez la **figure 10**.

- (a) Que représente la structure losangique imagée sur la **figure 10c**? Expliquez son origine et son fonctionnement.
- (b) De même, analysez la **figure 10b**.

Question 2.1.2

Comment s'organisent les vents de basse altitude au-dessus de la région représentée sur la **figure 9**?

Question 2.1.3

Les courants marins superficiels sont liés à la friction des vents sur la surface de la mer. On montre que cette « tension » τ exercée sur l'eau, par unité de surface, par un vent de vitesse horizontale W , s'exprime par :

$$\tau = \rho_a \times k \times W^2 \quad (5)$$

avec ρ_a la masse volumique de l'air ($1,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), k une constante, sans unité ($k = 1,3 \times 10^{-3}$).

Les composantes méridienne u (Sud-Nord, *positives vers le N*) et zonale v (Ouest-Est, *positives vers l'E*) du déplacement d'eau superficielle peuvent s'exprimer par le système d'équations suivant :

$$+f \cdot u = +\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (6)$$

$$-f \cdot v = -\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (7)$$

Où u et v sont respectivement les composantes zonale et méridienne de la vitesse de l'eau, ρ la densité de l'eau, τ_x et τ_y les composantes de la friction, f le paramètre de Coriolis (positif dans l'hémisphère nord et qui s'exprime en s^{-1}), x et y les directions zonale (x) et méridienne (y), z la profondeur.

Cette influence de la friction du vent s'atténue en profondeur et ne mobilise finalement qu'une épaisseur d'une cinquantaine de mètres.

- (a) Comment appelle-t-on cette tranche d'eau mise en mouvement par le vent?
- (b) Quel paramètre a-t'on choisi de négliger dans les équations précédentes?
- (c) À quoi correspond, physiquement, τ ? Quelle est son unité?

Question 2.1.4

- (a) À partir des équations précédentes, exprimez mathématiquement les composantes zonale U_m et méridienne V_m du mouvement produit dans l'ensemble de cette couche superficielle, en fonction des composantes de la tension du vent, en surface et à la base de la couche.
- (b) Précisez les conditions aux limites à la base de la couche et déduisez-en une expression simple de U_m et V_m en fonction des composantes de τ . Quelle est l'unité de ces valeurs U_m et V_m ?
- (c) Comment est orienté le déplacement d'eau ainsi engendré, dans le cas d'un vent orienté vers le Nord d'une part, vers l'Est d'autre part (dans l'hémisphère nord)?

- (d) On appelle *transport* le débit d'un courant par unité de longueur perpendiculaire au courant. Pour un vent d'ouest de $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, quel est le transport du courant produit dans cette couche superficielle, en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$? On prendra $\rho = 1023 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et f vaut, à cette latitude, $7,27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Question 2.1.5

L'observation des océans par les satellites permet de mesurer des variations de hauteur de la surface de la mer par rapport à la surface moyenne globale. C'est la *topographie dynamique* de l'océan, représentée, pour l'Atlantique central nord, sur la **figure 9**.

- Rappelez le principe d'obtention de cette altitude de la mer par satellite (sous la forme d'un schéma).
- À quoi correspond la surface moyenne des mers, d'altitude zéro? En quoi sa détermination peut-elle être utile?
- Les « bosses » d'eau océaniques sont ceinturées par de grands courants océaniques. De quel courant s'agit-il ici, dans la partie Nord de la « bosse »?

Question 2.1.6

Dans le cas de ces grands courants, on démontre que la vitesse des flux d'eau s'exprime à l'aide des équations suivantes :

$$-f \cdot u = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \quad (8)$$

$$+f \cdot v = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} \quad (9)$$

Avec les mêmes notations qu'à la question **2.1.2** et P la pression.

- Rappelez la correspondance entre distance géographique, exprimée en degré d'angle, et distance linéaire en kilomètre.
- À l'aide de la **figure 9**, exprimez la pression à une profondeur d'eau H sous le niveau moyen et pour une topographie dynamique h .
- Déduisez-en le gradient de pression *maximal* (c'est-à-dire sur la plus courte distance) entre l'extérieur et l'intérieur de la bosse d'eau, à 30° de latitude nord.
- Exprimez la vitesse zonale u en fonction de h , H , f et de la densité de l'eau. Estimez la valeur correspondante, pour $f = 7,27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Question 2.1.7

Synthétisez les résultats de vos réponses précédentes en expliquant comment apparaît et se maintient la circulation océanique superficielle dans les grands bassins océaniques comme l'Atlantique central, aux latitudes moyennes.

2.2 Les Açores

Les petites îles des Açores représentent les pointements émergés d'une structure semblable à l'Islande. Cependant, les données cinématiques, notamment GPS, montrent qu'elles se situent à proximité de l'intersection de trois plaques : Amérique du Nord, Eurasie et Nubie (portion occidentale de l'Afrique jusqu'au rift Est-africain).

Question 2.2.1

À partir des données de la **figure 11**, déterminez le mouvement relatif de la Nubie par rapport à l'Eurasie (azimuth et vitesse). Expliquez votre démarche.

Question 2.2.2

Compte tenu du résultat précédent, proposez, sous la forme d'un schéma structural, une interprétation à la morphologie des fonds visible sur cette figure.

Question 2.2.3

- D'après vos conclusions précédentes, représentez par un schéma la région cartographiée sur la **figure 12** en y ajoutant le type de mécanismes au foyer des séismes qui pourraient être détectés au niveau des Açores.
- Par quel mouvement général de la plaque Nubie peut-on concilier les mouvements indiqués par ces mécanismes au foyer entre les extrémités ouest et est de la frontière Nubie-Eurasie ?
- Rappelez comment sont décrits les mouvements des plaques tectoniques à la surface du Globe.

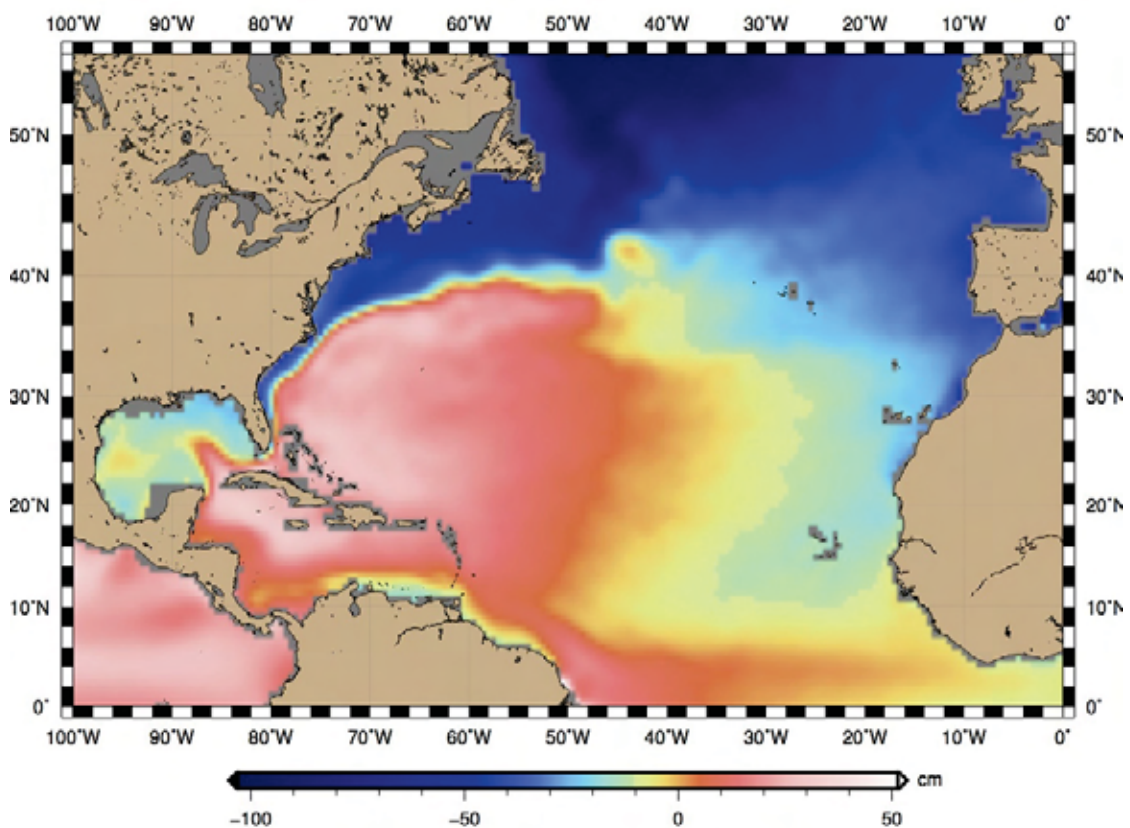
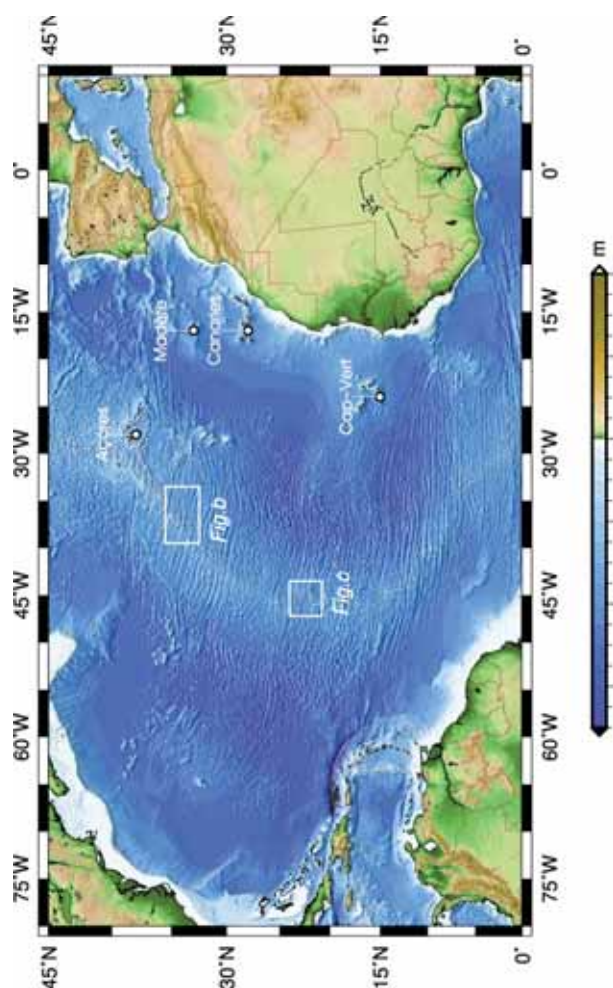
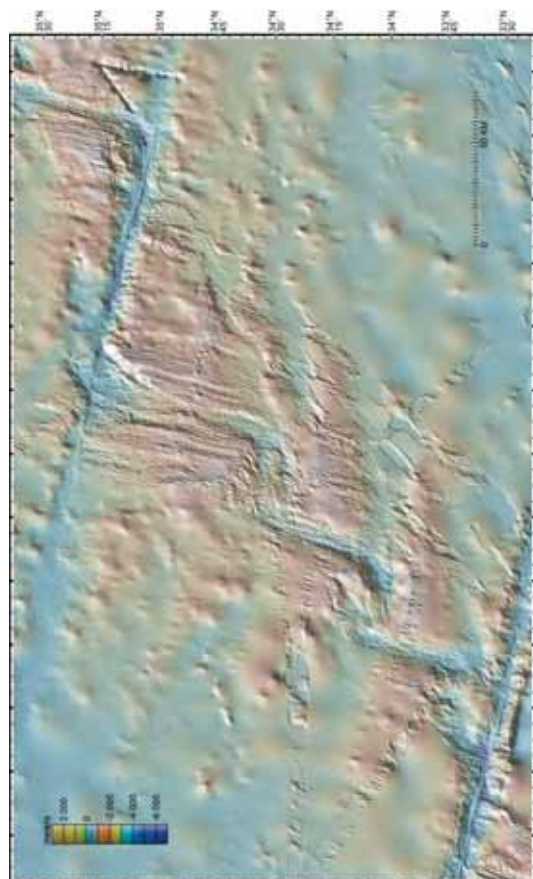


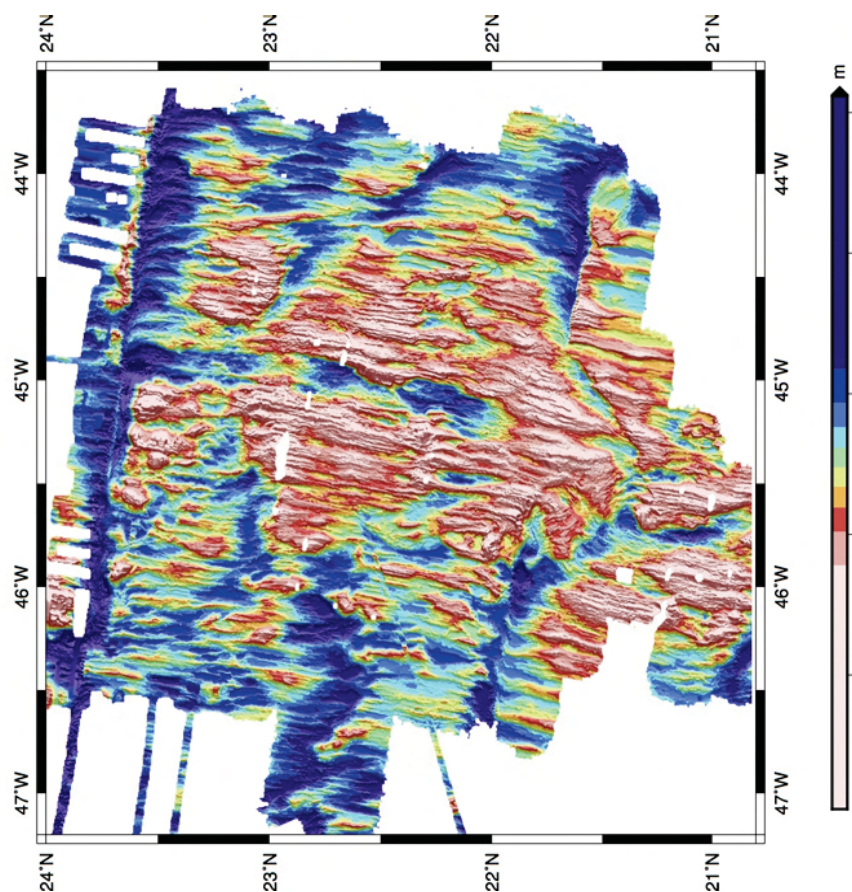
Figure 9 – Topographie dynamique de l'océan Atlantique Nord, tirée de mesures satellitaires obtenues entre 1992 et 2002.



(a) Carte topographique et bathymétrique du bassin atlantique central. Le cadre blanc repère la région représentée sur les **figures 10c** et **10b**.



(b) Bathymétrie à haute résolution de la région nord repérée sur la **figure 10a**



(c) Bathymétrie à haute résolution de la région sud repérée sur la **figure 10a**.

Figure 10 – Données topographiques et bathymétriques de l'Atlantique central.

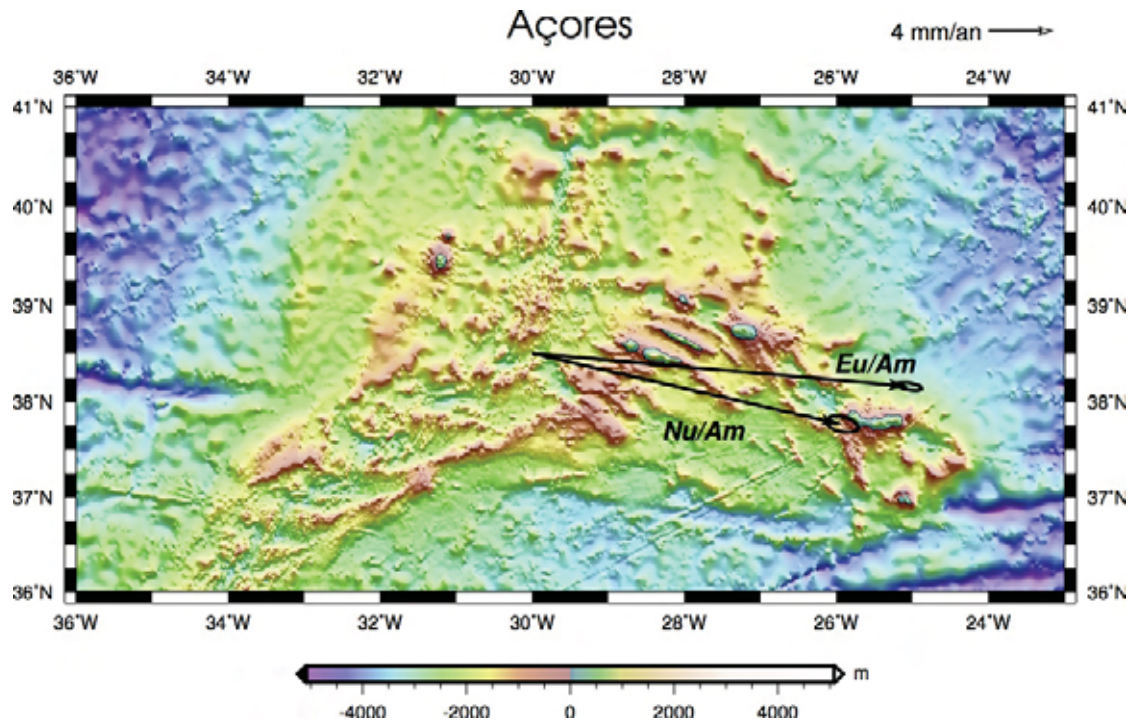


Figure 11 – Topographie de la région des Açores et vitesses tectoniques (par rapport à l'Amérique fixe) obtenues par un modèle cinématique récent (MORVEL, DeMets *et al.*, 2010). Nu : Nubie ; Eu : Eurasie ; Am : Amérique du Nord.

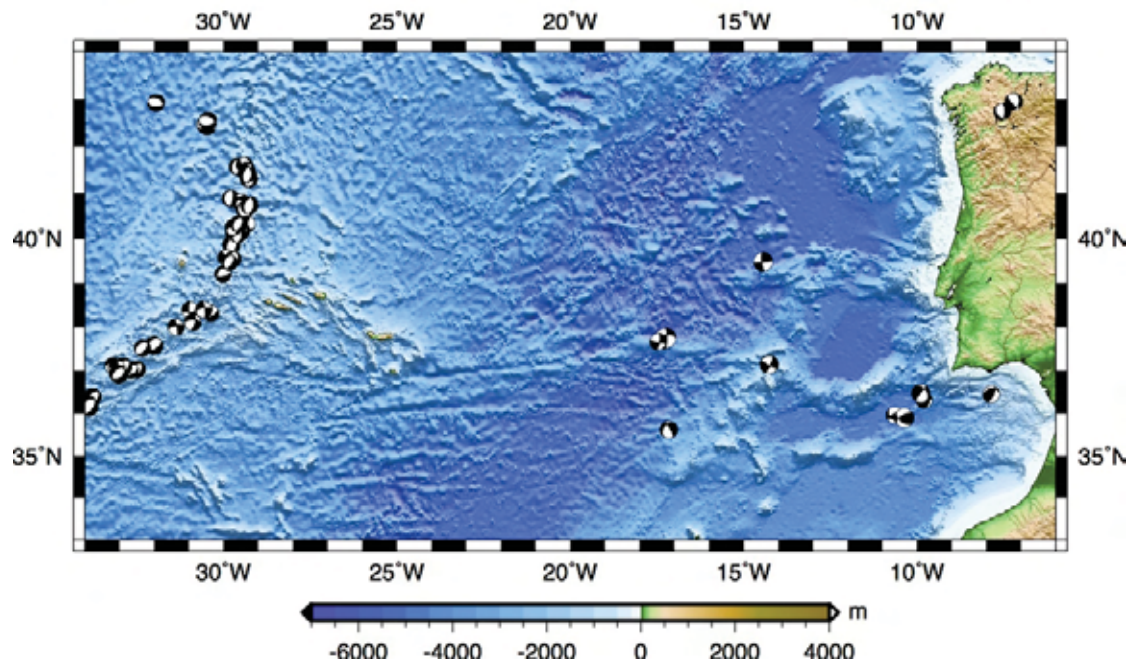


Figure 12 – Mécanismes aux foyers de certains séismes, depuis les Açores jusqu'à Gibraltar.

3 Le golfe de Cadiz

Le 1^{er} novembre 1755, vers 9h30 heure locale, un violent tremblement de terre a touché la ville de Lisbonne. Il fut suivi d'un tsunami qui causa d'énormes dégâts et des incendies. On estime à 60 000 le nombre de victimes de cette catastrophe dans cette ville. Ce séisme fut le premier rigoureusement décrit et ses conséquences marquèrent fortement les élites intellectuelles européennes de cette époque des Lumières.

On s'intéresse ici au golfe de Cadiz (à l'ouest immédiat du détroit de Gibraltar, entre Espagne et Maroc), où certains auteurs situent cet événement majeur.

3.1 Données géophysiques

Question 3.1.1

- (a) Rappelez dans quel contexte tectonique s'observe habituellement les plus gros séismes. Citez au moins un exemple de séisme majeur (lieu, date, magnitude).
- (b) Où (géographiquement) les séismes sont-ils les plus abondants ?
- (c) À quelle(s) profondeur(s) se produisent la grande majorité des séismes ? Précisez pourquoi.

Question 3.1.2

- (a) Expliquez comment ont pu être obtenues les données de la **figure 13a**.
- (b) Rappelez ce que représentent les anomalies de Bouguer utilisées sur la **figure 13b**.
- (c) Expliquez le principe de la technique employée pour obtenir les images de la **figure 17a**.

Question 3.1.3

- (a) Analysez les **figures 13** et **14a** (localisées sur la **figure 15**). Quels matériaux occupent les fonds du golfe ?
- (b) En analysant la **figure 17a**, complétez votre interprétation de cette zone : à quelle structure tectonique s'apparentent les fonds du golfe de Cadiz ? Synthétisez votre réponse par une coupe schématique Ouest-Est à travers le golfe.

Question 3.1.4

Analysez de même la **figure 14b**, en précisant ce que signifie l'échelle verticale en « seconde temps double ».

Question 3.1.5

Interprétez la **figure 17b** : quel(s) processus pourrai(en)t expliquer la disposition de l'anisotropie dans cette zone ?

3.2 Le séisme de 1755

Question 3.2.1

Les données historiques suggèrent que le séisme de 1755 a été le plus violent jamais enregistré dans la période historique dans cette région. Il pourrait avoir approché la magnitude 9.

La magnitude de moment M_w est liée au *moment sismique* M_0 , grandeur caractéristique du séisme, défini par $M_0 = \mu \times S \times D$

où S est la surface de la zone mise en mouvement par le séisme, D la distance de glissement relatif des deux compartiments et μ le module élastique de cisaillement (estimé à 30 GPa). Les très grands séismes correspondent à des glissements dont l'ordre de grandeur est de 10 m.

Magnitude et moment sont reliés par :

$$M_w = \frac{2}{3} \cdot \log(M_0) - 6 \quad (10)$$

- (a) Compte tenu des informations ci-dessus, précisez votre réponse à la question **3.1.1**.
- (b) Selon certains auteurs (Gutscher *et al.*), le séisme aurait eu lieu sous la structure étudiée sur la **figure 14a**, sur un plan grossièrement Ouest-Est, dont la pente moyenne vers l'Est serait de 5° . L'aire de la surface concernée par le glissement est représentée sur la **figure 16**. Avec ces hypothèses, calculez la magnitude de ce séisme.

Question 3.2.2

Le séisme de Lisbonne a été ressenti tout autour de l'Atlantique, notamment en raison du *tsunami* qu'il a déclenché.

- (a) Expliquez ce qu'est un tsunami et les causes de sa dangerosité.
- (b) À partir de la **table 1** et de la **figure 19**, calculez les vitesses approximatives du tsunami pour Saint-Vincent, Oeiras, Cadiz, Safi et Madère.
- (c) En eau peu profonde, lorsque la hauteur d'eau h est très inférieure à la longueur d'onde du tsunami λ (de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres), la vitesse du tsunami est décrite par la formule

$$v = \sqrt{g \cdot h}$$

où g est l'accélération de la pesanteur. Pour une tranche d'eau profonde, l'expression adéquate est plutôt :

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}}$$

Avec les documents et vos calculs précédents, et en justifiant vos choix, estimez la profondeur moyenne des fonds sur les trajectoires considérées auparavant.

- (d) Dans le cas de la Martinique, située à environ 5 800 km du golfe de Cadiz, vous semble-t-il justifié de considérer l'océan comme profond par rapport au tsunami ?

Table 1 – Temps d'arrivée du tsunami après le séisme, déduits des archives historiques.

Lieu	Temps d'arrivée historique (min)
St-Vincent (Sao Vicente)	16 ± 7
Huelva	50 ± 10
Cadiz	78 ± 15
Porto	60 ± 15
Madère (Madeira)	90 ± 15
Safi	28-34
Oeiras	25 ± 10
Figueira	45 ± 10
Caraïbes	~ 600

Question 3.2.3

Les tsunamis peuvent aujourd'hui être modélisés numériquement, grâce aux connaissances des fonds océaniques et de la mécanique des fluides. La **figure 19b** montre l'amplitude du tsunami modélisée dans l'hypothèse d'une source située dans le golfe de Cadiz. L'hypothèse de Gutscher *et al.* vous paraît-elle en accord avec ces résultats et les données historiques disponibles ?

Question 3.2.4

La localisation de la faille à l'origine du séisme de 1755 reste controversée. Certaines études la situent plus à l'ouest, au large du Portugal, au niveau d'une structure

en compression dite banc de Gorringer, ou encore plus près du Portugal. L'une des approches envisagées pour départager ces hypothèses a consisté à utiliser les données historiques pour évaluer l'intensité sismique liée à ce séisme.

Définissez l'intensité sismique. En quoi se distingue-t-elle de la magnitude ?

Question 3.2.5

En exploitant les données disponibles sur des séismes plus récents, on a pu obtenir une relation empirique entre l'intensité sismique ressentie dans la région ibéro-marocaine et les caractéristiques du séisme. Ce calibrage permet ensuite de calculer des cartes d'intensité pour d'autres séismes moins connus. Cette démarche a été appliquée aux trois sites de rupture envisagés pour le séisme de 1755. Les résultats obtenus sont présentés sur la **figure 18**.

- (a) Commentez ces résultats. Permettent-ils de privilégier l'une des hypothèses concernant le lieu de la rupture de 1755 ?
- (b) Quel paramètre peut-on encore faire varier dans les modèles ?

3.3 Le séisme de 2013

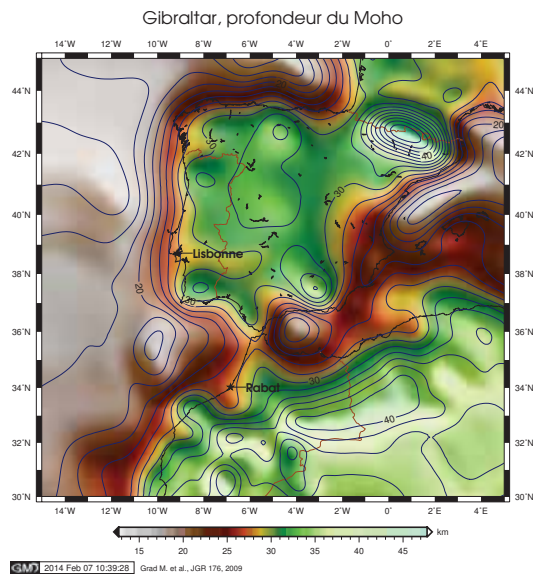
Question 3.3.1

Un tremblement de terre nettement moins puissant ($M_w = 5$) a été ressenti dans le golfe de Cadix le 16 décembre 2013. La **figure 20** vous montre les enregistrements sismiques obtenus par deux sismomètres (trois composantes, verticale (Z), horizontales Nord-Sud (N) et Est-Ouest (E)) situés respectivement à Rabat et à Lisbonne.

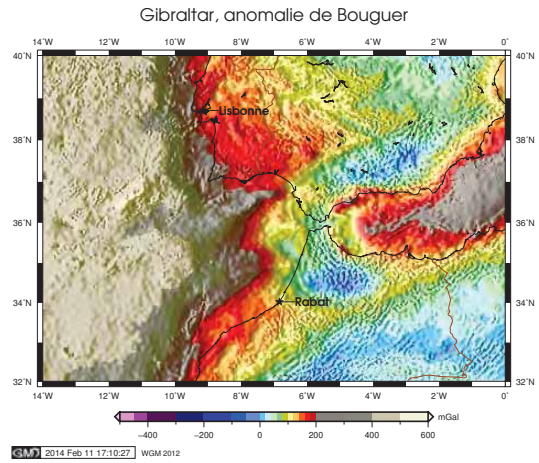
- (a) Identifiez les deux trains d'onde pointés sur les enregistrements. Précisez la nature de ces ondes et discutez (éventuellement au moyen d'un schéma) de l'intérêt d'un enregistrement à trois composantes pour les identifier.
- (b) À l'aide de la **figure 21**, estimez les distances épacentrales séparant le séisme des deux stations.

Question 3.3.2

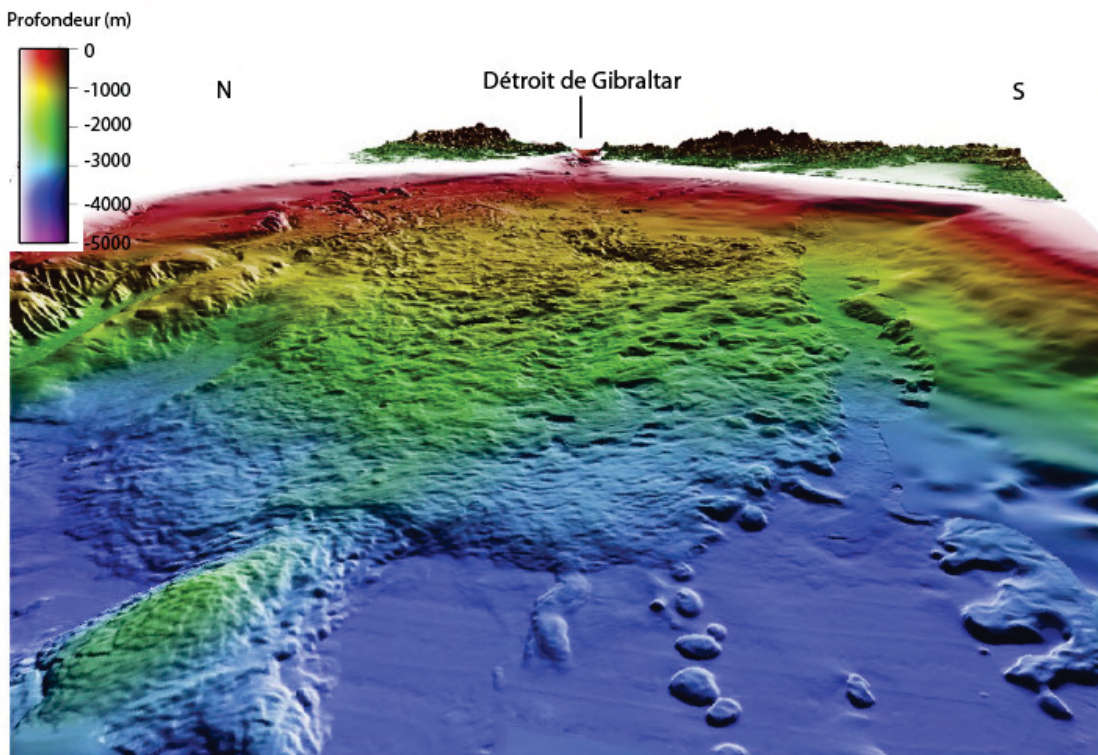
Les courbes de la **figure 21** résultent de modèles de propagation des ondes sismiques dans les couches internes du globe. D'après les divers documents fournis sur cette zone de Gibraltar, quel(s) paramètre(s) sont susceptibles d'affecter cette propagation et devraient donc être pris en compte pour obtenir des courbes ajustées à cette région ?



(a) Profondeur du Moho sous la mer d'Alboran et le golfe de Cadiz.

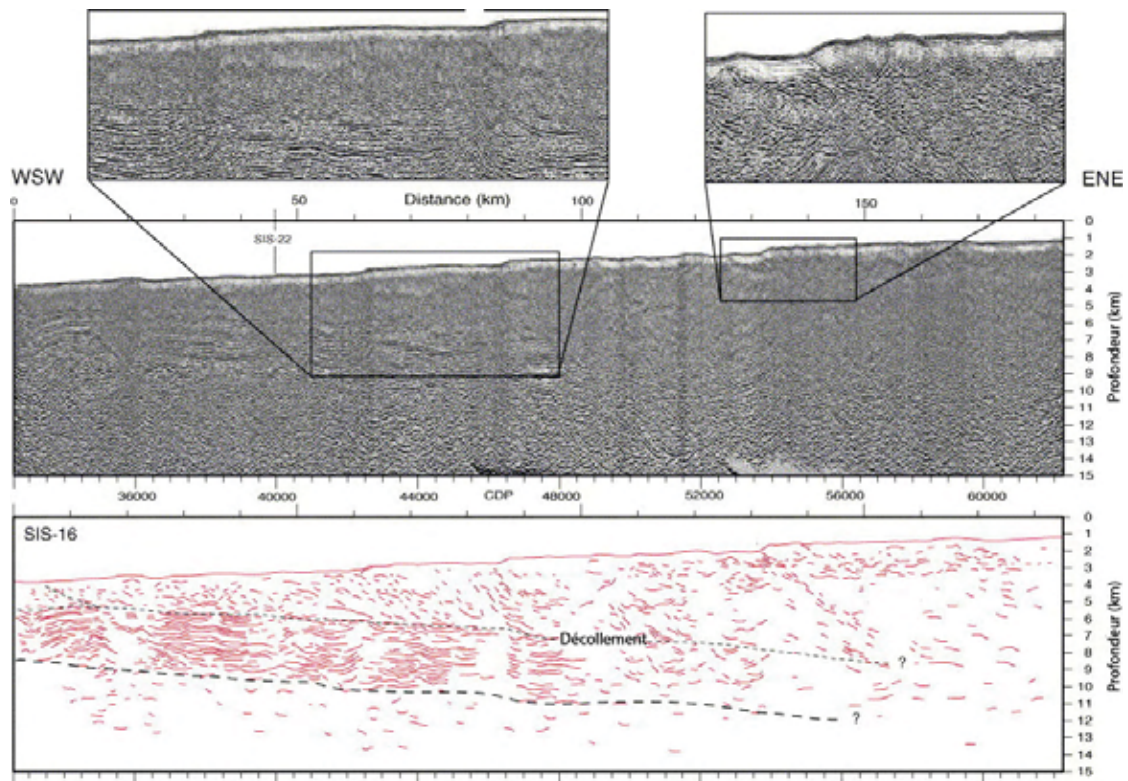


(b) Anomalies gravimétriques de Bouguer autour du détroit de Gibraltar.

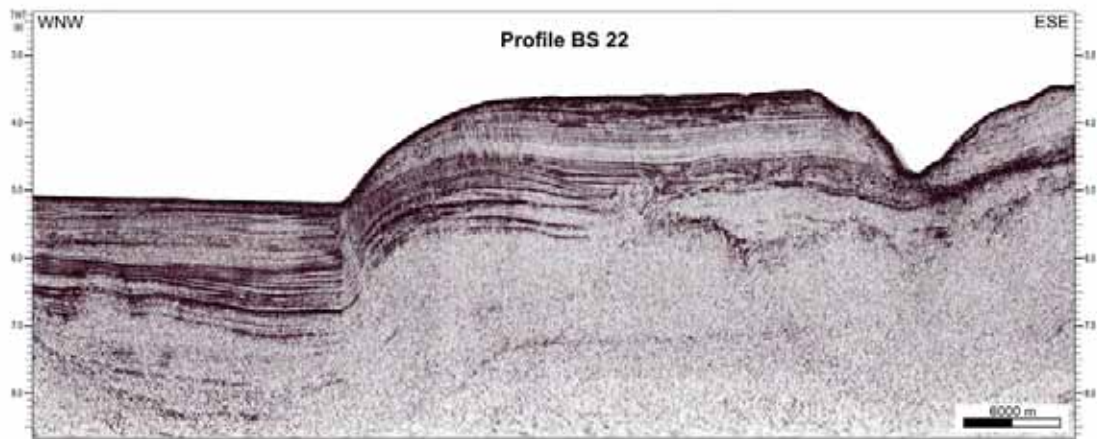


(c) Image bathymétrique des fonds du golfe de Cadiz, vue depuis l'ouest.

Figure 13 – Données géophysiques de la région du détroit de Gibraltar.



(a) Profil géophysique SIS-16 dans le golfe de Cadiz (Gutscher *et al.*, 2006).



(b) Profil géophysique BS-22 au large du Portugal (échelle verticale : seconde temps double).

Figure 14 – Imagerie géophysique des fonds du golfe de Cadiz et du Sud-Ouest du Portugal.

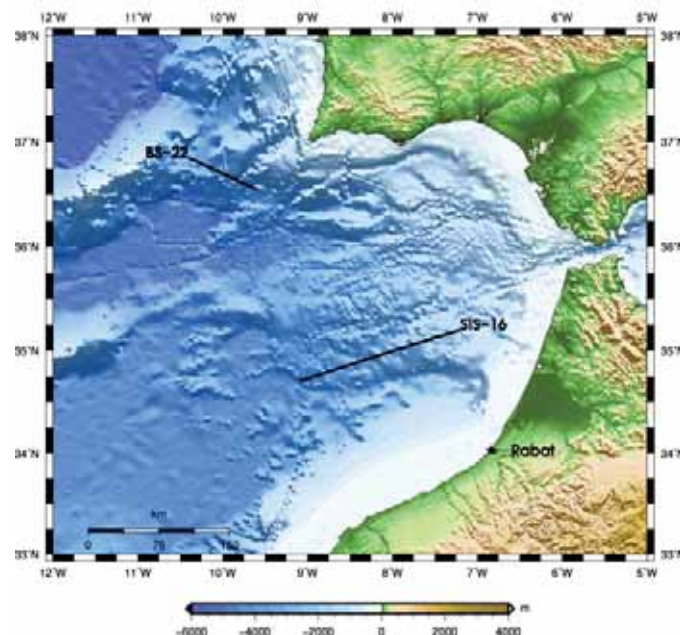


Figure 15 – Localisation des profils des figures 14a et 14b.

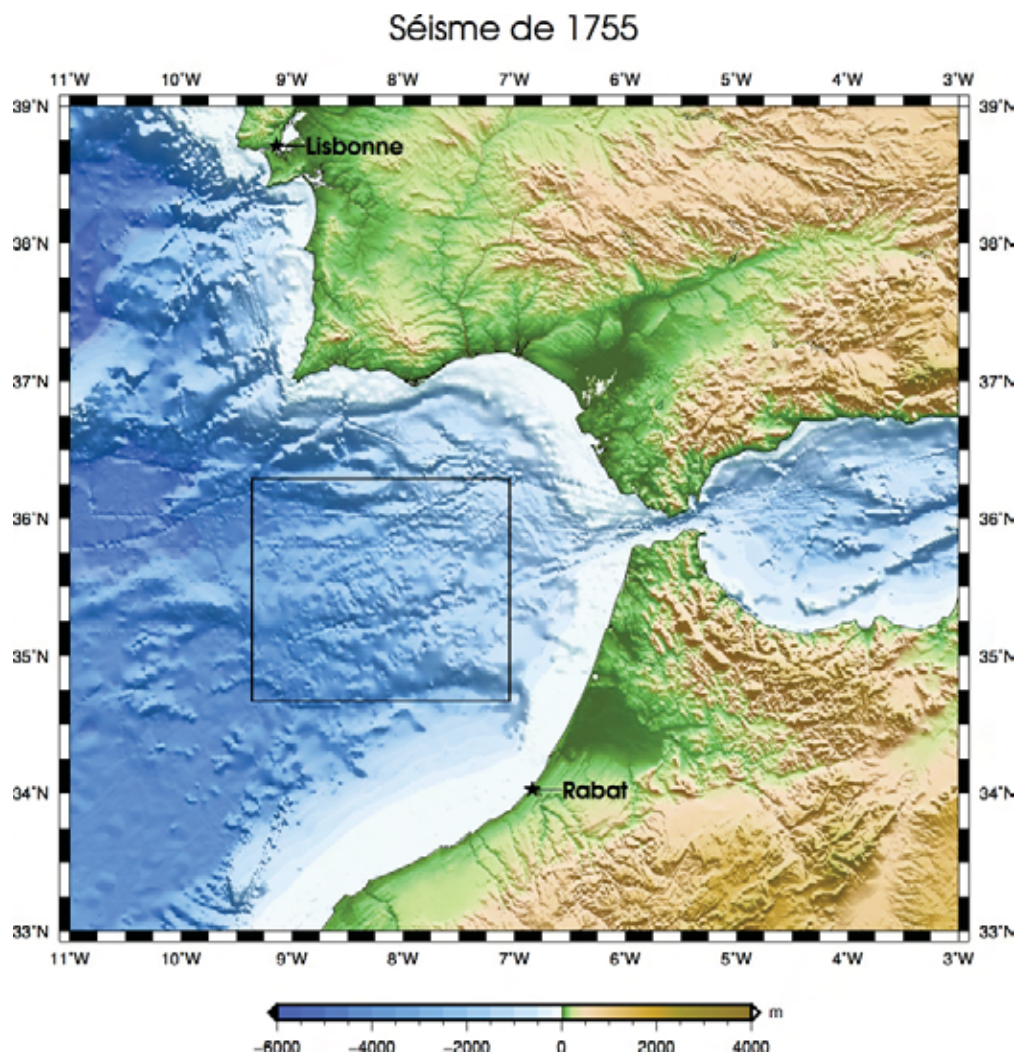
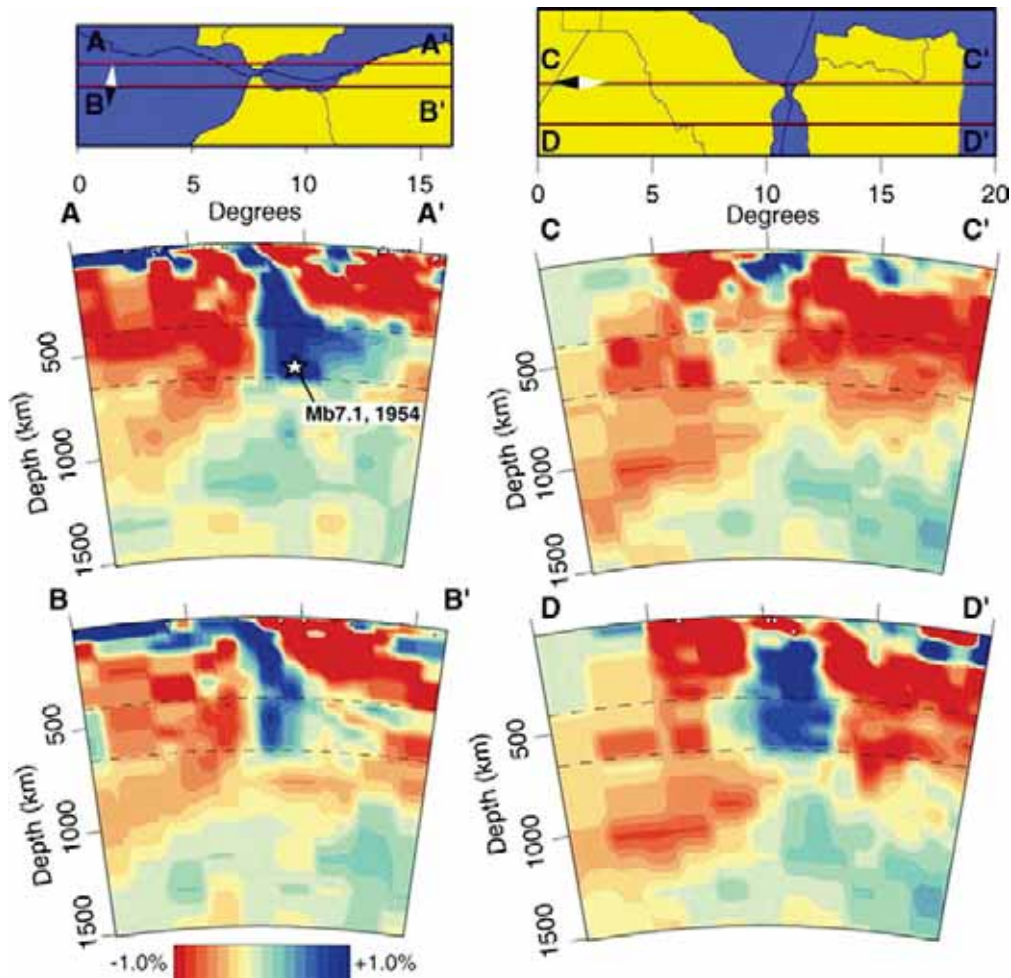
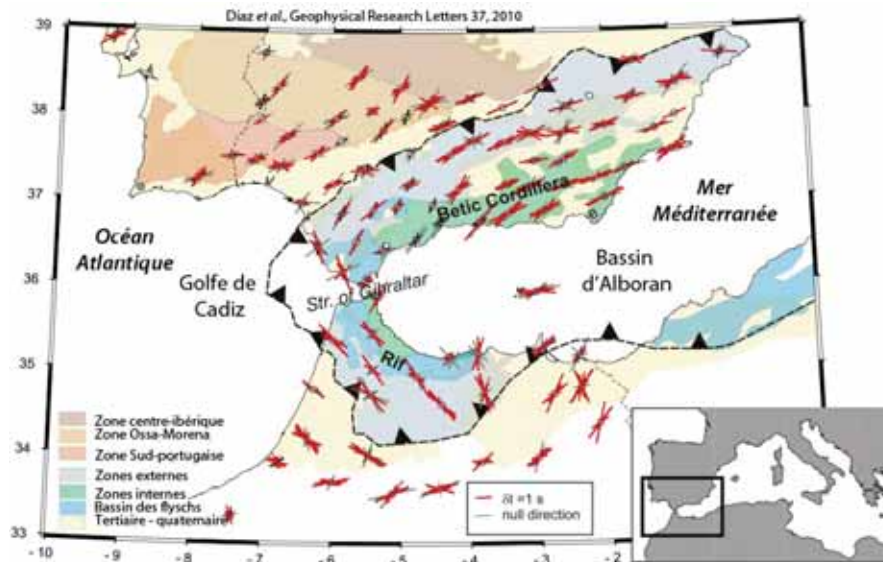


Figure 16 – Le cadre noir délimite la surface cartographique potentiellement mobilisée par le séisme de 1755, dans l'hypothèse de Gutscher *et al.*, 2006.

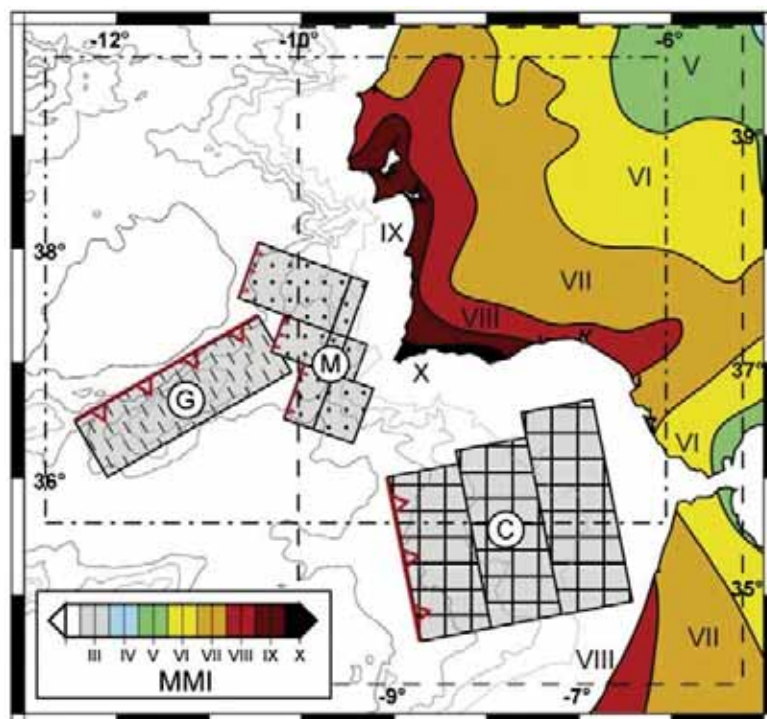


(a) Imagerie sismologique du manteau sous le détroit de Gibraltar (Gutscher *et al.*, 2002).

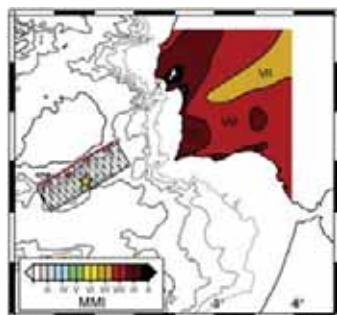


(b) Anisotropie sismique dans le manteau sous le détroit de Gibraltar, vers 200 km de profondeur (Diaz *et al.*, 2010). Les barres rouges indiquent les directions d'écart maximal de vitesse entre les deux composantes polarisées des ondes S traversant les cristaux. Cet écart est expliqué par l'anisotropie des cristaux d'olivine.

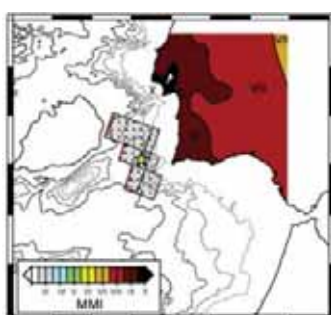
Figure 17 – Données de géophysique profonde sous le détroit de Gibraltar.



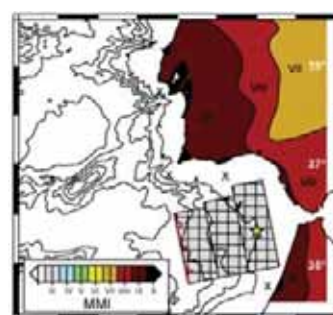
(a) Carte des isoséistes (zones de même intensité sismique) reconstituée pour le séisme de 1755. Sont également représentées les trois zones de rupture envisagées : Marquès de Pombal (M), banc de Gorringe (G) et golfe de Cadiz (C).



(b) Isoséistes reconstitués dans l'hypothèse d'une rupture dans le banc de Gorringe.



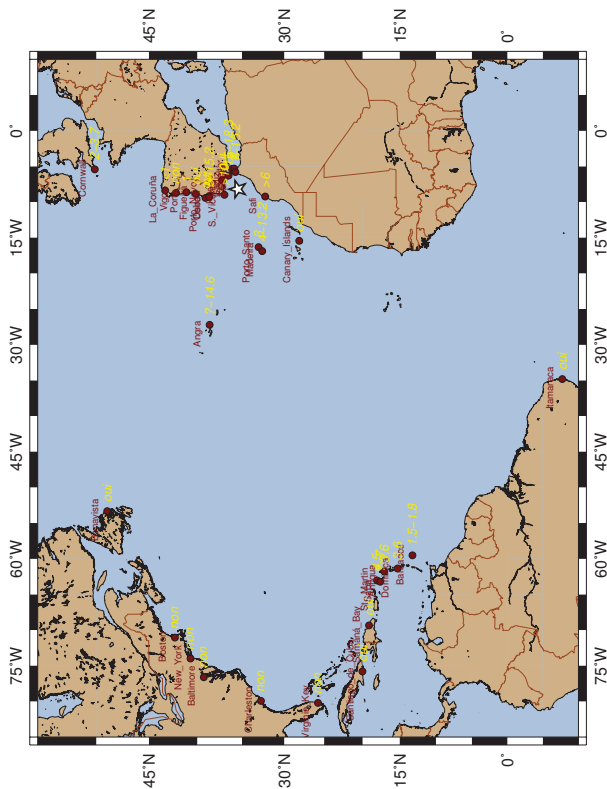
(c) Isoséistes reconstitués dans l'hypothèse d'une rupture dans le banc Marquès de Pombal.



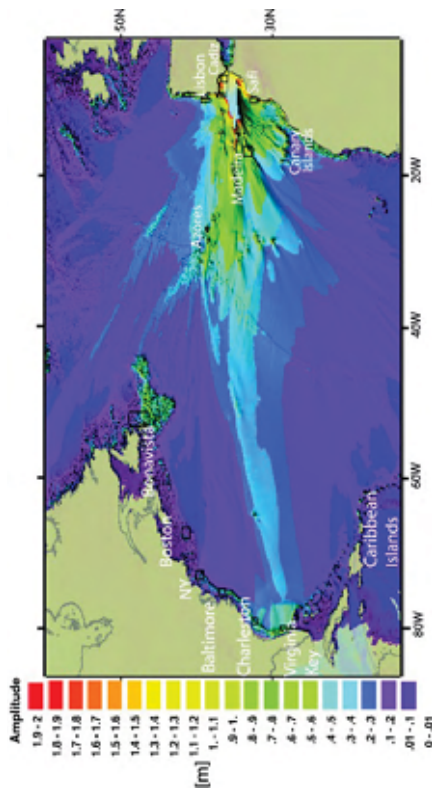
(d) Isoséistes reconstitués dans l'hypothèse d'une rupture dans le golfe de Cadiz.

Figure 18 – Carte des intensités sismiques (échelle de Mercalli Modifiée (MMI)) reconstituées pour le séisme de 1755 et modélisées pour plusieurs zones de rupture possibles. Sur chaque modélisation, l'étoile indique le lieu supposé de la première rupture du plan de faille (Grandin *et al.*, 2007).

Séisme de 1755, enregistrement du tsunami

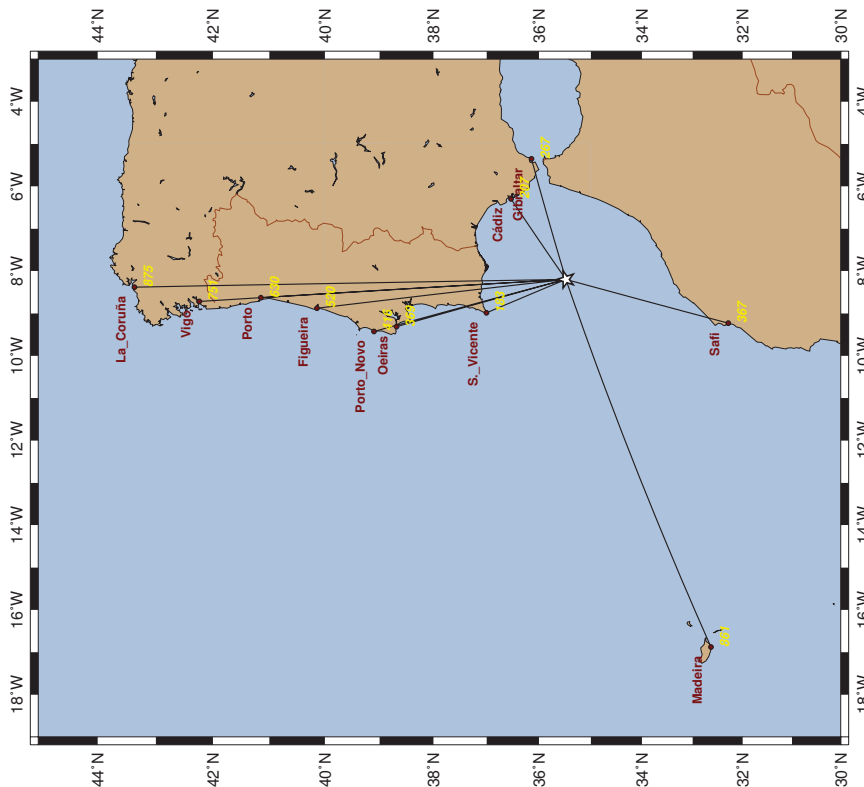


(a) Témoignages du tsunami de 1755. **Nombre** : hauteur estimée de la vague; **oui** : tsunami constaté, mais sans estimation de la hauteur; **non** : pas de tsunami constaté.



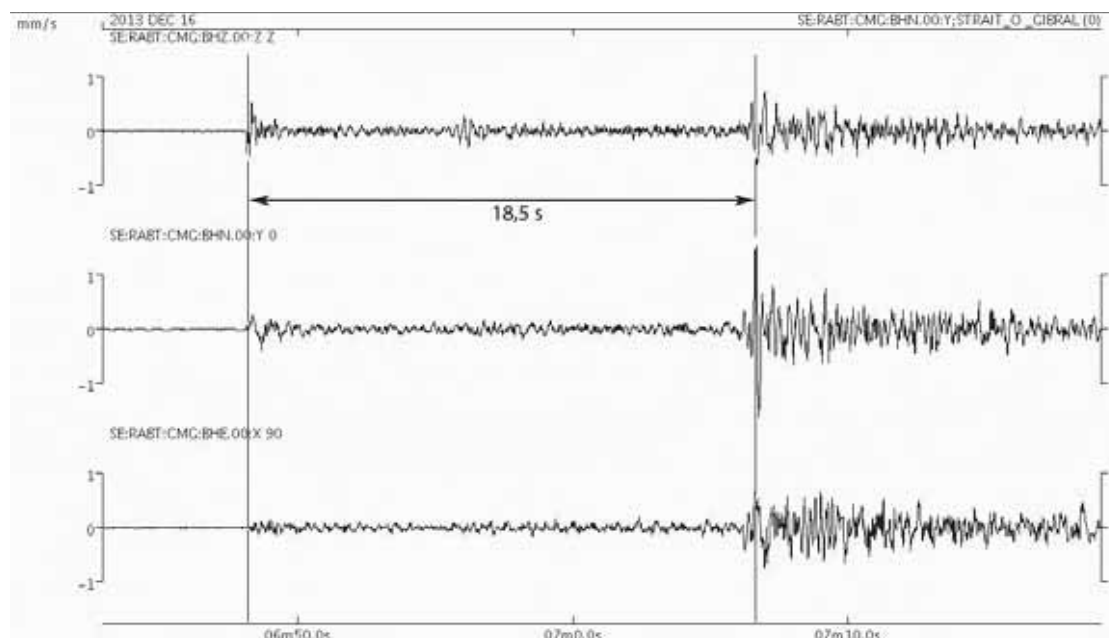
(b) Modélisation de l'amplitude du tsunami, pour une magnitude sismique similaire à celle de 1755 et une zone-source correspondant à la proposition de Gutscher *et al.* (Barkan *et al.*, 2009)

Séisme de 1755, distances à la source

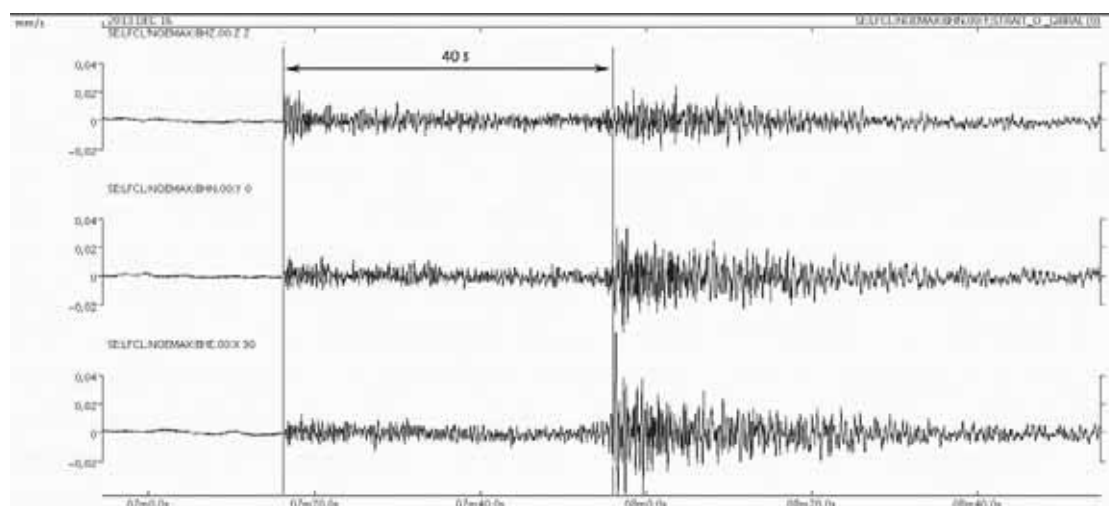


(c) Distances de certaines régions ayant ressenti le tsunami à la source supposée, en kilomètres.

Figure 19 – Données sur le tsunami lié au séisme du 1^{er} novembre 1755.

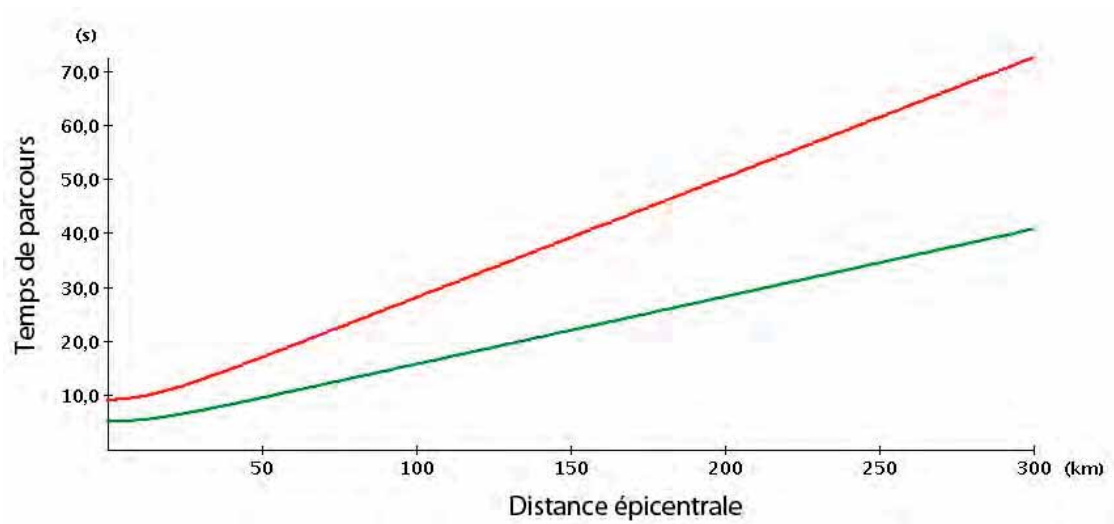


(a) Enregistrement obtenu par la station sismique de Rabat.

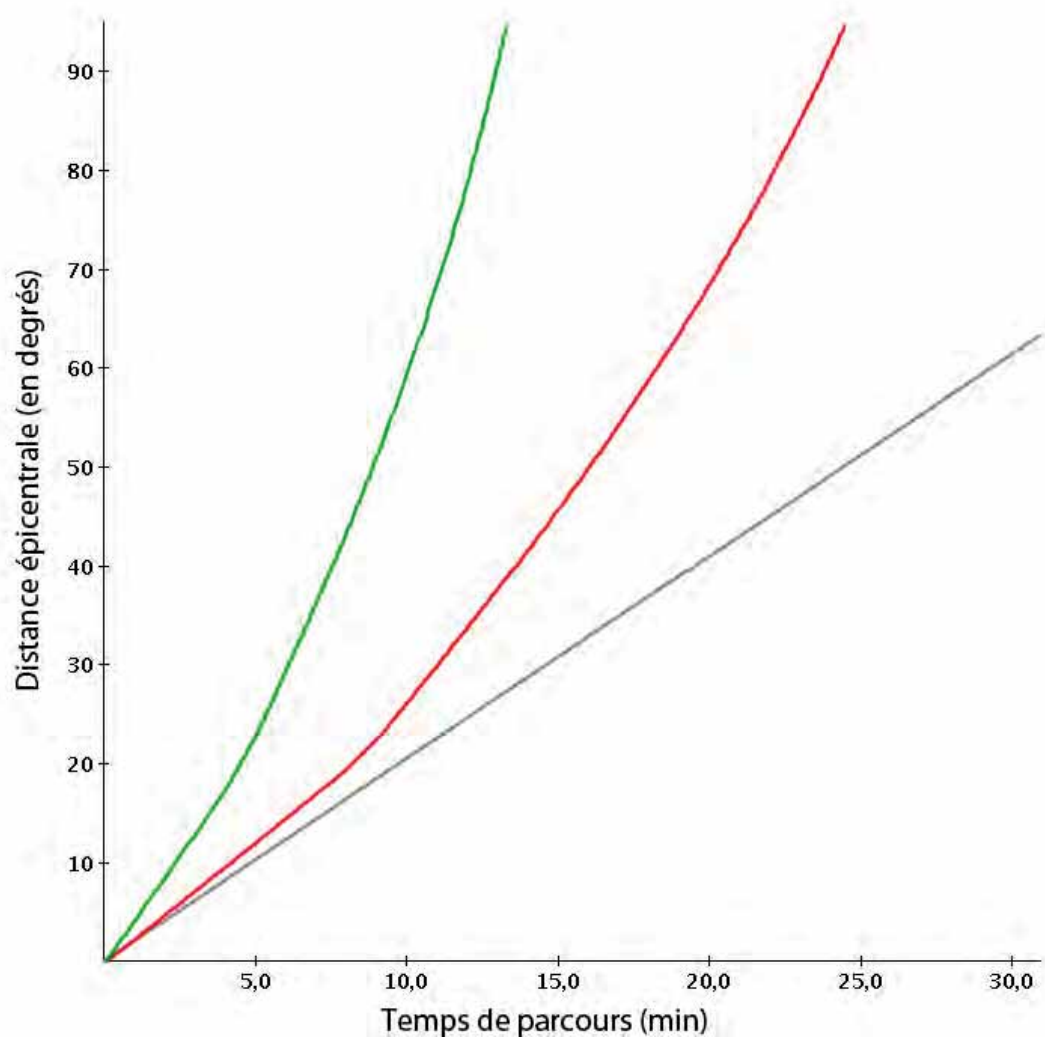


(b) Enregistrement obtenu par la station sismique de Lisbonne.

Figure 20 – Enregistrements du séisme survenu dans le golfe de Cadiz le 16 décembre 2013.



(a) Graphe temps de parcours-distance épacentrale pour un séisme proche.



(b) Graphe temps de parcours-distance épacentrale pour un séisme lointain.

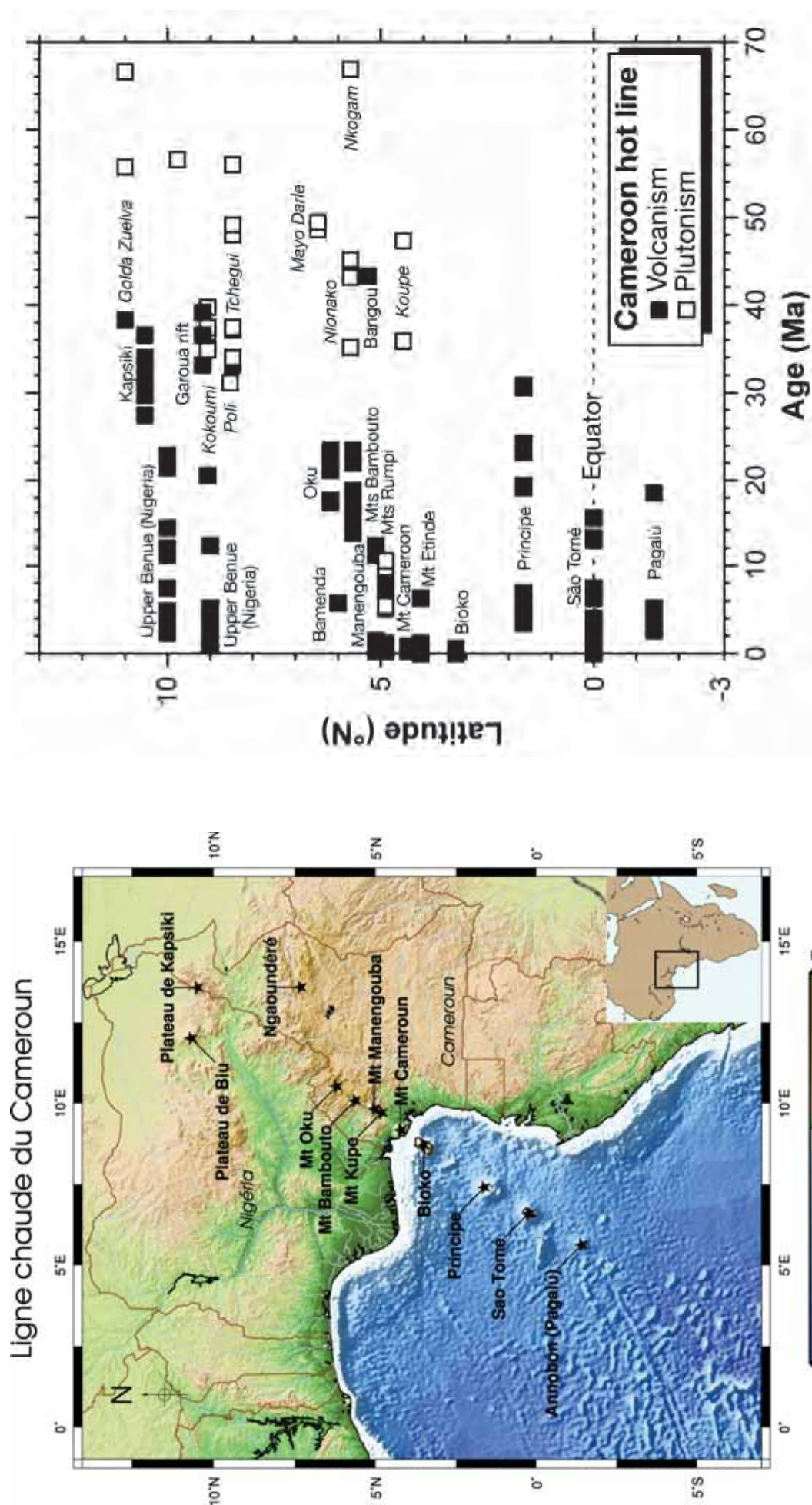
Figure 21 – Graphe temps de parcours-distance épacentrale pour un séisme comme celui du 16 décembre 2013.

4 La ligne du Cameroun

Du golfe de Guinée au nord du Cameroun s'alignent plusieurs structures volcaniques, regroupées sous la dénomination de « ligne chaude du Cameroun ». Plusieurs auteurs y associent d'autres ensembles volcaniques (**figure 22a**) ainsi qu'une série de complexes magmatiques annulaires du Cameroun.

Question 4.1

*Par une analyse rédigée et argumentée, s'appuyant sur les données des **figure 22**, **figure 23** et **figure 24**, discutez de la validité du modèle classique du « point chaud » pour interpréter cette structure géologique particulière.*



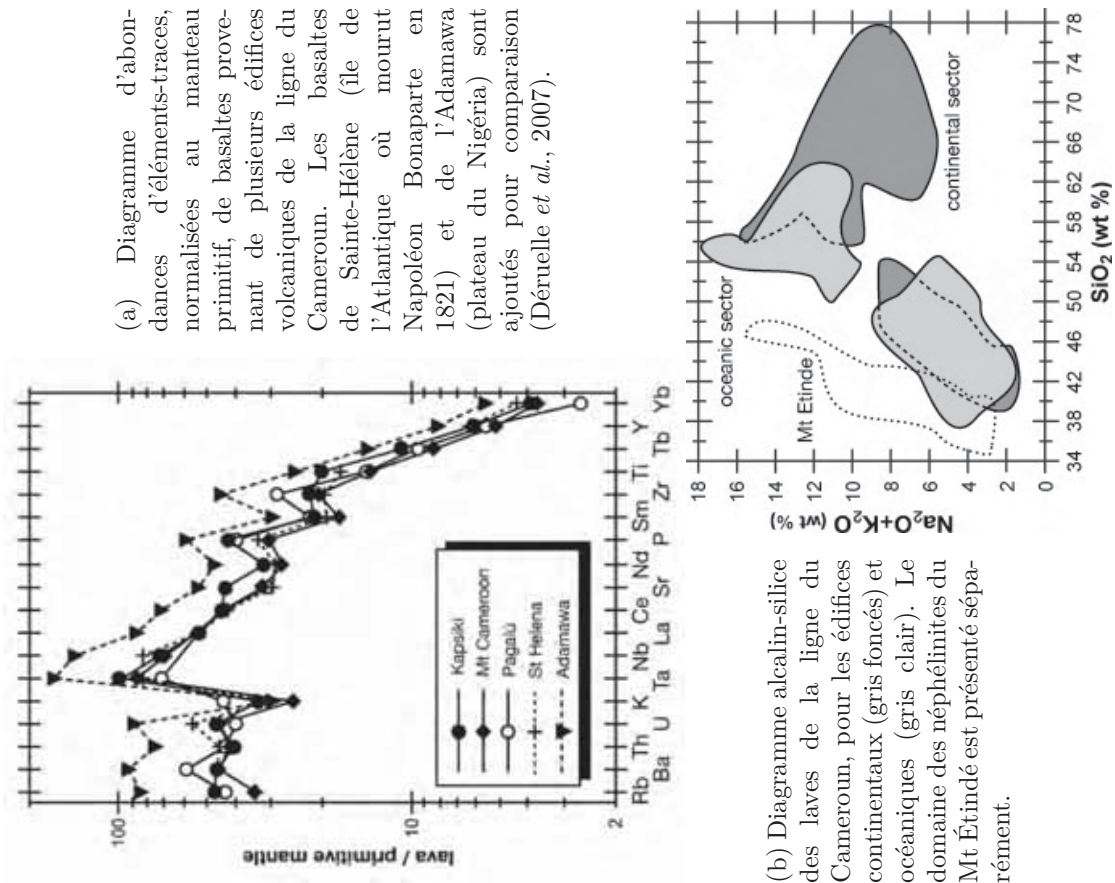
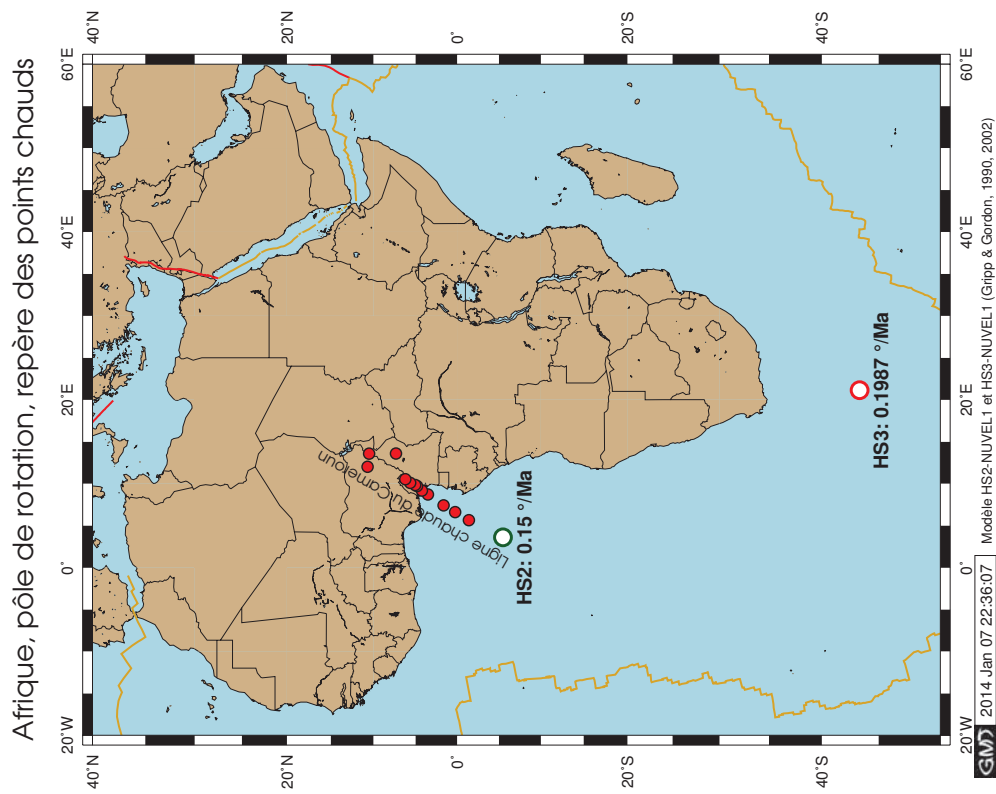


Figure 23 – Données géochimiques et tectoniques sur la ligne chaude du Cameroun.



(c) Pôle de rotation eulérien de la plaque Afrique dans le repère des points chauds, pour deux modèles cinématiques : HS2-Nuvel1 (Gripp & Gordon, 1990) et HS3-Nuvel1 (Gripp & Gordon, 2002) ; rotation en sens *anti-horaire*, vitesses moyennes pour les derniers 6 Ma. La projection Mercator utilisée conserve les angles.

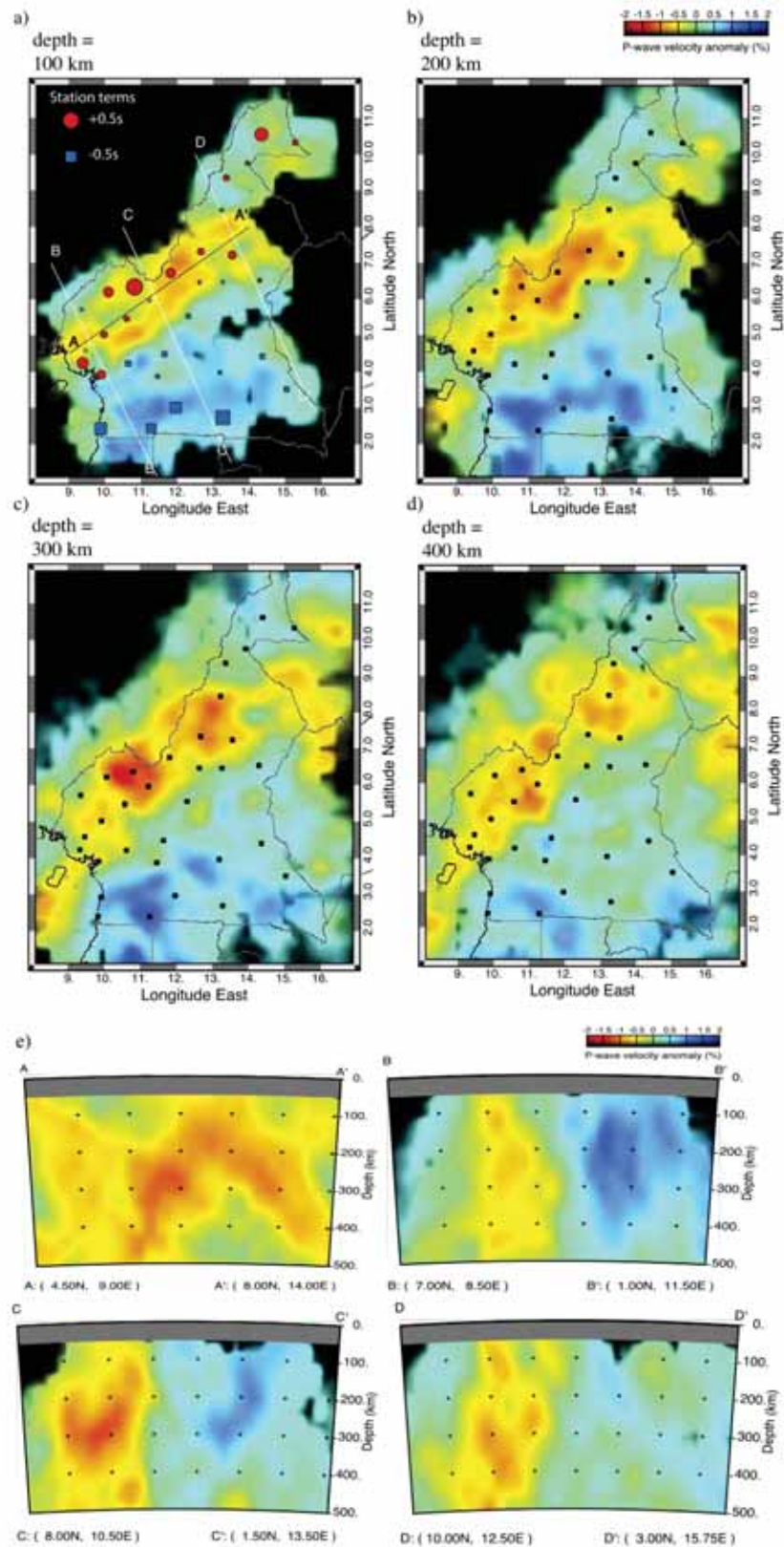


Figure 24 – Résultats de tomographie sismique des ondes P sous le Cameroun, en carte ((a) à (d)) et en coupes (e). Les tracés des coupes de la figure (e) sont indiqués sur les figures a). (Reusch et al., 2010)