

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE LYON

Concours d'admission session 2020

Filière universitaire : Second concours

COMPOSITION DE SCIENCES DE LA TERRE

Durée : 3 heures

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

*L'orthographe ainsi que la propreté de la copie seront prises en compte par les correcteurs.*

\* \* \*

Cet énoncé comporte 22 questions pour un total de 100 points.

# Épreuve de Sciences de la Terre

## L'Odyssée selon Victor Bérard

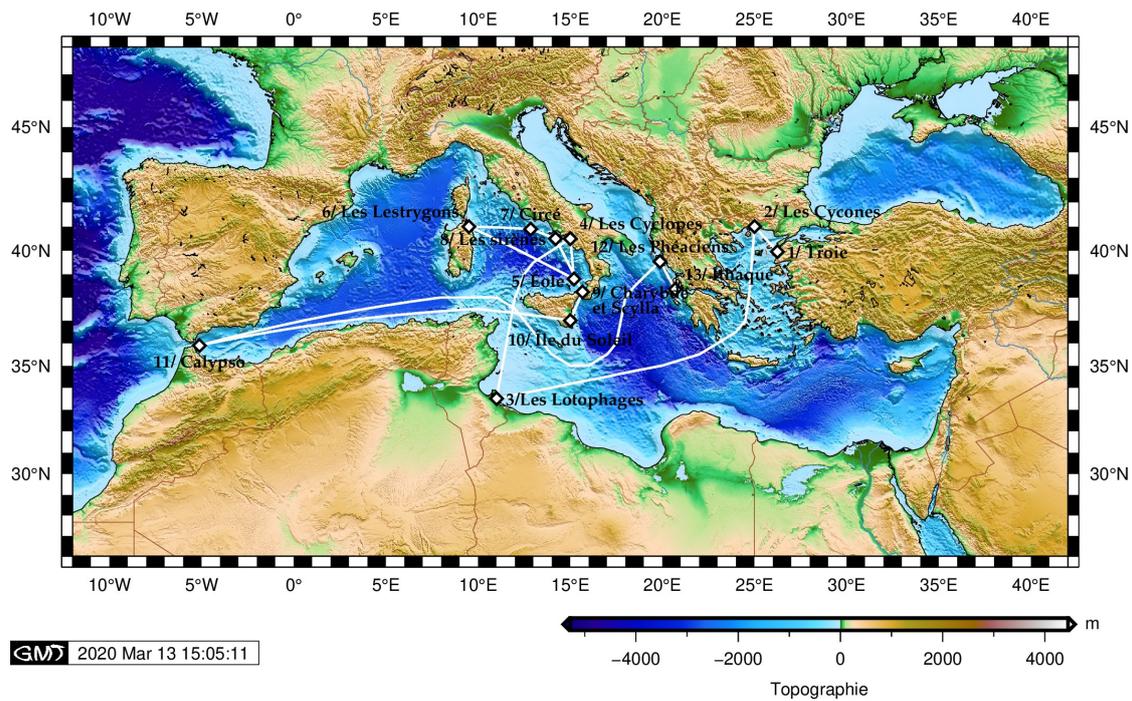


FIGURE 1 – Le parcours de l’Odyssée d’après l’helléniste Victor Bérard (1864-1931)

Nombre de spécialistes actuels de l’œuvre d’Homère considèrent que les étapes fantastiques de l’Odyssée sont largement de pures inventions. Mais au début du XX<sup>e</sup> siècle, au contraire, l’helléniste français et traducteur de l’Odyssée Victor Bérard a voulu reconnaître dans chaque endroit abordé par Ulysse un lieu réel de la Méditerranée. Il en tira la carte reprise sur la FIGURE 1 et parcourut lui-même cet itinéraire sur son propre navire... moderne.

Ce sujet prend prétexte de cette carte pour examiner quelques éléments de géologie de ces régions.

# 1 L'île des Cyclopes : les Champs Phlégréens ?

Une fois partie de Troie détruite, la flotte d'Ulysse pille le pays des Cicones, dans l'actuelle province grecque de Thrace. Repoussés par ce peuple, Ulysse et ses hommes vivent leur première aventure fantastique chez les Lotophages, dont la nourriture, le lotus, fait perdre la mémoire et le désir du retour à l'équipage. Victor Bérard y voyait une évocation du haschich, consommé sur l'île de Djerba dans l'actuelle Tunisie. Après cet épisode, Ulysse atteint l'île des Cyclopes. Bérard la situait en Campanie, sur la côte napolitaine, dans la région volcanique des Champs Phlégréens (Campi Flegrei).

Cette zone proche de Naples a connu plusieurs grandes éruptions. La plus importante, datée d'il y a 39 000 ans environ, a dispersé des cendres sur une large partie de l'Europe orientale, donnant des dépôts dénommés Ignimbrites Campaniennes. Le panache volcanique émis par l'éruption aurait pu atteindre plus de 40 km d'altitude.

## 1.1 La composition des Ignimbrites Campaniennes

### Question 1.1.1

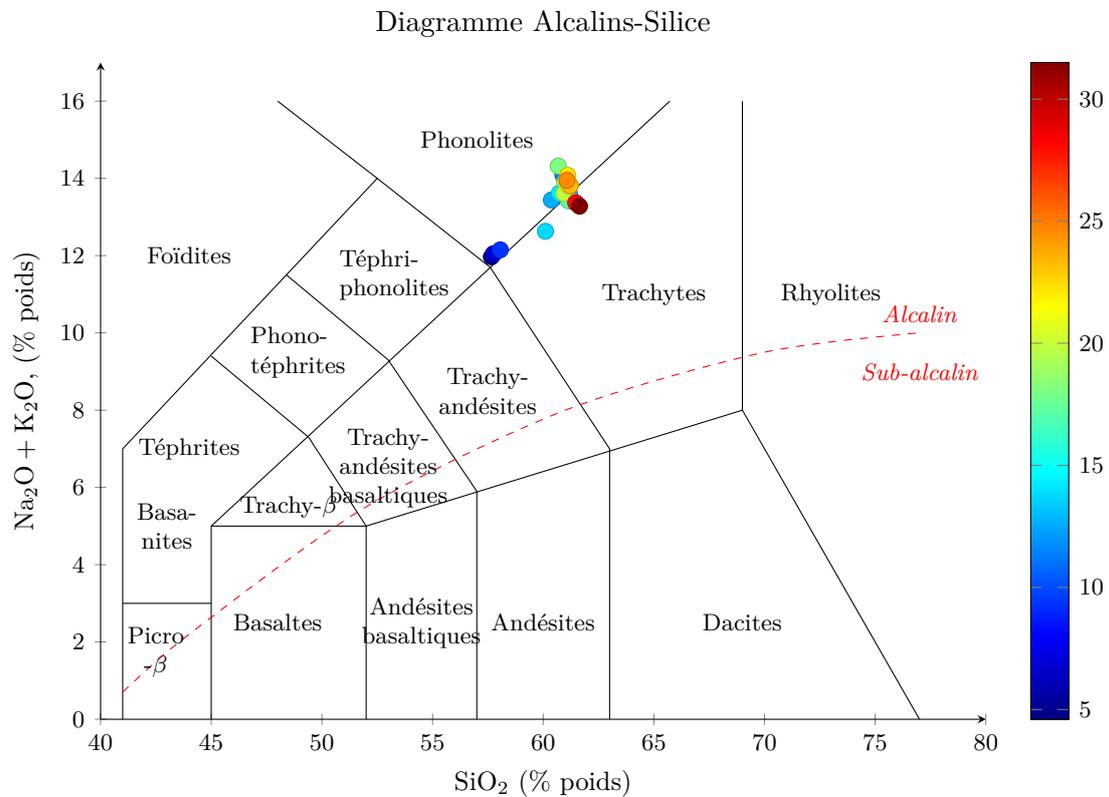
3 points

Diverses études ont analysé les dépôts des Ignimbrites Campaniennes. L'une d'entre elle a utilisé un forage réalisé dans ces dépôts au Nord de Naples, à quelques kilomètres des Champs Phlégréens. Quelles informations générales la FIGURE 2A vous donne-t-elle sur le magma à l'origine de l'éruption des Ignimbrites Campaniennes ?

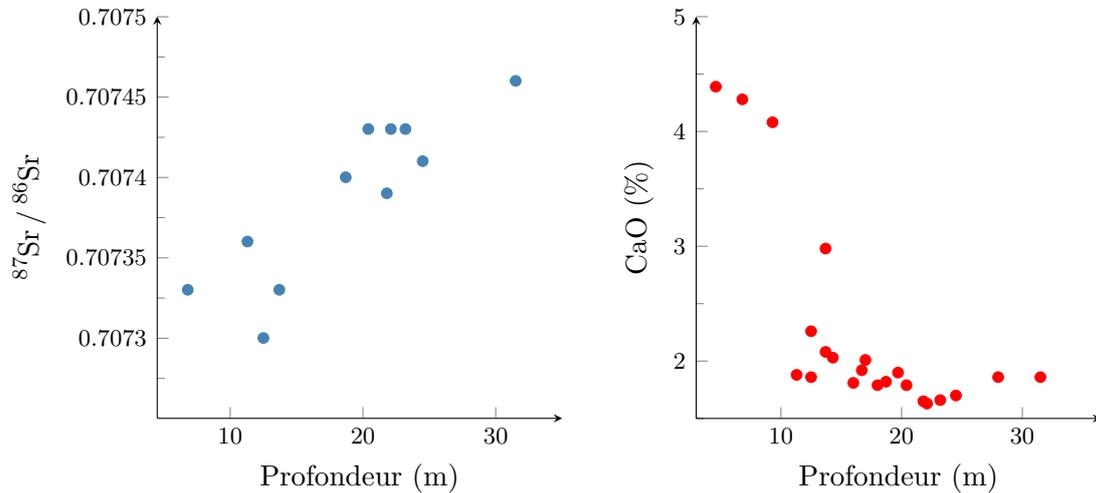
### Question 1.1.2

3 points

Plus en détails, comment pourriez-vous interpréter les variations de chimie des dépôts avec la profondeur, résumées sur les FIGURES 2A à 2C ?



(a) Positionnement des ignimbrites campaniennes d'une carotte dans le diagramme Alcalins-Silice. L'échelle colorée indique la profondeur de l'échantillon, en mètres.



(b) Rapports isotopiques du strontium selon la profondeur dans la carotte.

(c) Teneur en calcium en fonction de la profondeur dans la carotte.

FIGURE 2 – Évolution des compositions chimiques et isotopiques selon la profondeur dans une carotte forée dans les Ignimbrites Campaniennes. (PAPPALARDO et al. 2002)

## 1.2 Les climats au temps de l'éruption campanienne

### Question 1.2.1

L'âge de l'éruption des Ignimbrites Campaniennes a été évalué par des datations radiochronologiques effectuées sur différents dépôts attribués à cette éruption, ou par le dépôts de sédiments et de carotte de glace dans lesquelles ces dépôts ont été repérés. Cette éruption peut ainsi être replacée dans l'enregistrement paléoclimatique de l'hémisphère Nord déduit des carottes de glace de l'Arctique.

- (4 points) Rappelez comment est obtenu et interprété l'enregistrement représenté sur la FIGURE 3.
- (4 points) Les variations enregistrées dans la carotte GRIP jusque vers  $-100\,000$  ans, comme celle soulignée en bleu sur la FIGURE 3, semblent concerner principalement l'hémisphère Nord. Expliquez comment elles sont interprétées.

### Question 1.2.2

7 points

Expliquez par quels processus une éruption volcanique intense comme celle des Ignimbrites Campaniennes est susceptible de modifier le climat régional à mondial. Dans le cas présent, d'après la FIGURE 3, quelle influence aurait pu avoir cette éruption ?

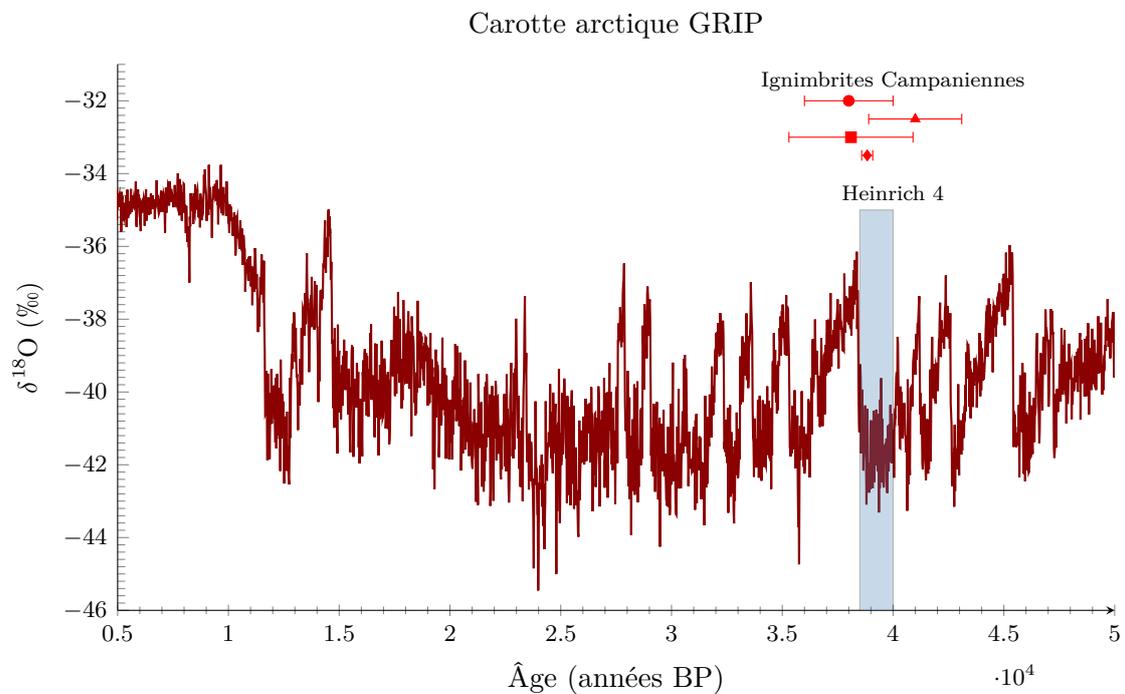


FIGURE 3 – Enregistrement isotopique de la carotte arctique GRIP et datations  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  proposées pour les Ignimbrites Campaniennes par divers auteurs (FEDELE, GIACCIO et HAJDAS 2008).

## 2 Charybde et Scylla : le détroit de Messine

Ayant quitté Circé et surmonté le chant des Sirènes (que Victor Béliard situait sur l'archipel des Galli, trois îlots voisins du cap de Sorrente et de l'île de Capri), le navire d'Ulysse doit franchir une passe encadrée par deux périls : d'un côté Scylla, monstre à six têtes caché dans une caverne, de l'autre Charybde, créature invisible qui engloutit puis recrache l'eau du détroit et broie les navires. Cette étape a été interprétée comme une évocation fantasmagorique du détroit de Messine. Situé entre la Sicile et la Calabre (la pointe de la « botte » italienne), ce passage relie la mer Tyrrhénienne, au nord-ouest, à la mer Ionienne au sud-est. Il est effectivement remarquable par les forts courants qui le traversent, dont le sens change au cours du temps et qui engendrent des tourbillons, que Charybde personnifierait.

### 2.1 La tectonique du détroit

#### Question 2.1.1

3 points

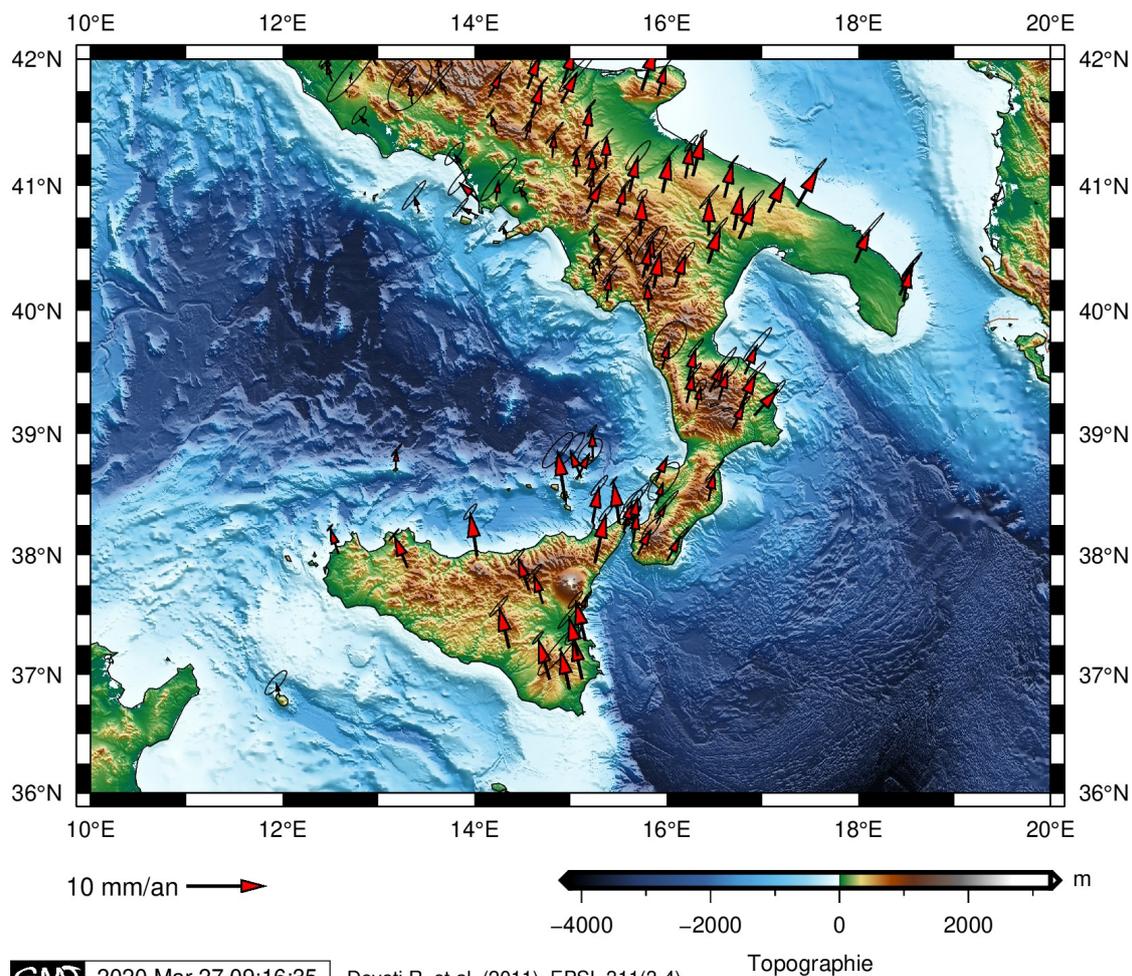
À partir des informations de la FIGURE 4, comment expliquez-vous l'existence du détroit de Messine ?

#### Question 2.1.2

3 points

Précisez l'orientation des mouvements tectoniques relatifs entre la Sicile et la Calabre.

### Mouvements GPS Italie / Eurasie fixe



GM 2020 Mar 27 09:16:35 Devoti R. et al. (2011), EPSL 311(3-4).

FIGURE 4 – Données de balises GPS installées sur la Sicile et la Calabre de 1998 à 2009 (projection Mercator). (DEVOTI et al. 2011)

## 2.2 Les communications du détroit

Dans le détroit de Messine, les mesures de température et de salinité montrent que deux masses d'eau se superposent : une masse « tyrrhénienne » au-dessus, venant du nord, et une masse d'eau « ionienne » en dessous, en provenance du sud. L'interface entre les deux masses se décale au cours de la journée, du sud vers le nord puis du nord vers le sud. De plus, si les marées sont faibles en Méditerranée, elles sont néanmoins perceptibles et diffèrent selon les bassins (FIGURE 5). Le détroit de Messine est ainsi un *point amphidromique*, une région où la marée est quasi-nulle.

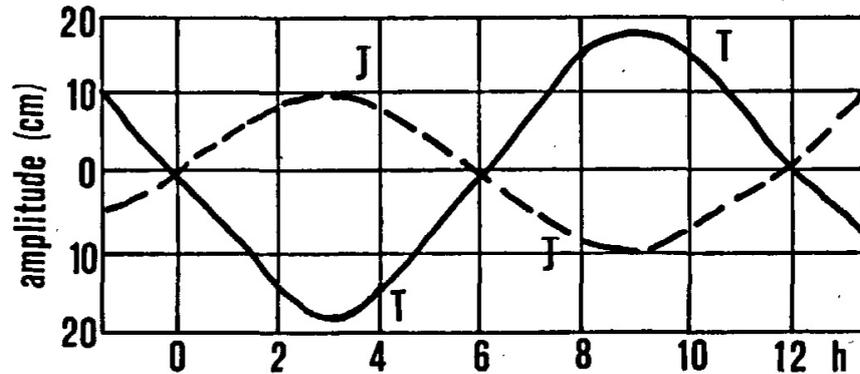


FIGURE 5 – Amplitude moyenne de la marée dans les bassins Ionien (I) et Tyrrhénien (T).

On cherche à comprendre pourquoi les deux bassins gardent des marées différentes (dans leur amplitude et leur chronologie) alors qu'ils sont en connexion. Le détroit est un passage beaucoup plus étroit et moins profond que les deux bassins qu'il relie.

### Question 2.2.1

2 points

Proposez une explication à l'existence de courants dans le détroit et précisez leur sens.

### Question 2.2.2

On simplifie le détroit en considérant le fond des deux bassins plats. On se place au moment d'une pleine mer dans le bassin Ionien (sud, FIGURE 6). A et B sont deux points situés à des profondeurs indéterminées, mais appartenant à la même ligne de courant.

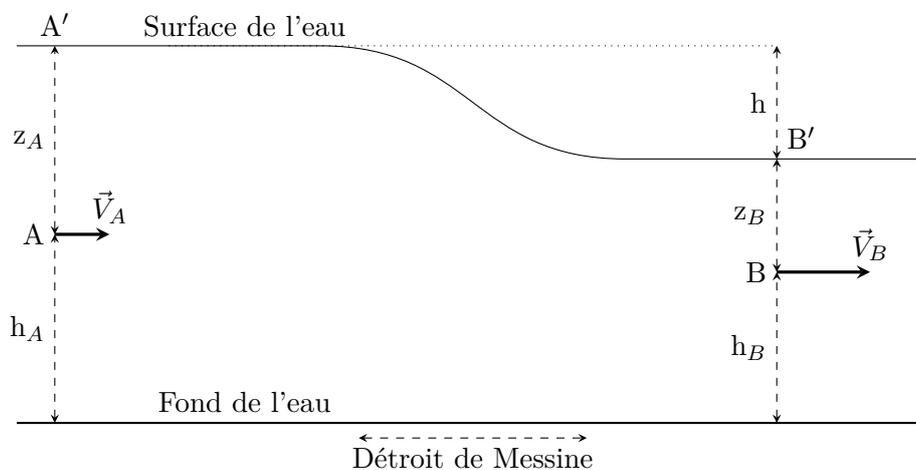


FIGURE 6 – Schématisation du détroit lors d'une marée haute.

- (a) (2 points) Exprimez la pression aux points A et B.
- (b) (2 points) On suppose que les vitesses ne sont qu'horizontales, donc que l'écoulement est linéaire, sans turbulence. En ce cas, on démontre que la quantité :

$$\frac{v^2}{2} + g \cdot h + \frac{p}{\rho} \quad (1)$$

se conserve le long d'une ligne de courant.  $v$  représente la vitesse du fluide au point considéré,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $h$  l'altitude du point,  $p$  la pression et  $\rho$  la densité du fluide. Si l'on considère que le point A sur la FIGURE 6 est très éloigné du détroit, quelle hypothèse pouvez-vous faire sur la vitesse en A ?

- (c) (3 points) Déduisez-en que la vitesse au point B peut s'exprimer par  $v_B = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ . Calculez la valeur de cette vitesse du courant.

**Question 2.2.3**

3 points

Exprimez le débit volumique  $D$  à travers le détroit en fonction de  $h$ . En schématisant ce détroit comme un triangle isocèle de largeur 3 km et d'une profondeur minimale de 75 m, et avec les autres données disponibles, quelle est la valeur de ce débit ?

**Question 2.2.4**

- (a) (2 points) On rappelle qu'en supposant la Terre sphérique en première approximation, un degré de longitude à l'équateur est égal à un degré de latitude et correspond à 110 km. Mais à quelle distance (en kilomètres) correspond un degré de longitude à la latitude de  $\lambda = 40^\circ$  ?
- (b) (4 points) En simplifiant le bassin Ionien comme une surface carrée d'environ  $5^\circ$  de côté, et en supposant que les équations précédentes restent valables quand le niveau de l'eau change lentement, quel temps faudrait-il pour que le débit du détroit « efface » l'écart de niveau entre les deux bassins à marée haute ? On rappelle que le bassin Ionien se situe à environ  $40^\circ$  N de latitude. Concluez.

Les courants du détroit de Messine, ainsi grossièrement interprétés, ne sont en réalité pas linéaires et génèrent des tourbillons, d'autant que la topographie du détroit n'est pas régulière. Charybde serait la personnification de ce danger pour la navigation. Quant à Scylla, l'étroitesse du détroit et ses falaises abruptes en font un endroit idéal pour nicher un monstre.

### 3 L'île de Calypso : vers le lointain Gibraltar

Après avoir échappé à Charybde et Scylla, le navire d'Ulysse reste bloqué sur l'île du Soleil, que Victor Bérard suppose être la Sicile. Là, poussé par la faim, l'équipage tue et consomme le troupeau de bœufs du dieu Soleil Hélios. En punition de ce sacrilège, tous périssent dans une nouvelle tempête, à l'exception d'Ulysse, qui dérive longtemps pour finalement atteindre l'île d'Ogygie (« la cachée »), demeure de la nymphe Calypso.

Victor Bérard situe Ogygie près de Gibraltar, site méditerranéen le plus éloigné des territoires grecs. D'autres récits mythologiques attribuent cependant le détroit de Gibraltar à un accès de colère d'Héraclès au cours de son voyage à la recherche des pommes d'or des Hespérides, son onzième travail. Cette zone est en effet modérément sismique, surtout côté Atlantique.

La secousse la plus célèbre survenue dans cette région est celle du 1<sup>er</sup> novembre 1755, vers 9 h 30 heure locale, qui a touché la ville de Lisbonne, sur la côte Atlantique. Elle fut suivie d'un tsunami qui causa d'énormes dégâts et des incendies. On estime à 60 000 le nombre de victimes 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

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

##### Question 3.1.2

- (2 points) Expliquez comment ont pu être obtenues les données de la FIGURE 7A.
- (2 points) Rappelez ce que représentent les anomalies de Bouguer utilisées sur la FIGURE 7B.
- (2 points) Expliquez le principe de la technique employée pour obtenir les images de la FIGURE 11A.

##### Question 3.1.3

- (4 points) Analysez les FIGURES 7C ET 8A (localisées sur la FIGURE 9). Quels matériaux occupent les fonds du golfe ?
- (4 points) En analysant la FIGURE 11A, 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

3 points

Analysez de même la FIGURE 8B, en précisant ce que signifie l'échelle verticale en « secondes temps double ».

##### Question 3.1.5

4 points

Interprétez la FIGURE 11B : 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  $\mu$  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 :

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

- (a) (2 points) Compte tenu des informations ci-dessus, précisez votre réponse à la question **3.1.1** : pourquoi certains contextes tectoniques sont-ils plus susceptibles de produire des séismes de forte magnitude ?
- (b) (5 points) Selon certains auteurs (Gutscher *et al.*), le séisme aurait eu lieu sous la structure étudiée sur la FIGURE 8A, 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 10. 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) (3 points) Expliquez ce qu'est un tsunami et les causes de sa dangerosité.
- (b) (3 points) À partir de la TABLE 1 et de la FIGURE 13, calculez les vitesses approximatives du tsunami pour les données de Saint-Vincent, Oeiras, Cadiz, Safi et Madère.
- (c) (2 points) En eau peu profonde, lorsque la hauteur d'eau  $h$  est très inférieure à la longueur d'onde du tsunami  $\lambda$  (de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres), la vitesse du tsunami est décrite par la formule

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

où  $h$  est l'épaisseur d'eau et  $g$  l'accélération de la pesanteur.

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

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
Martinique	~ 600

**Question 3.2.3**

3 points

Les tsunamis sont aujourd'hui modélisés numériquement, grâce aux connaissances des fonds océaniques et de la mécanique des fluides. La FIGURE 13B 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**

2 points

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**

2 points

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 12.

Commentez ces résultats. Permettent-ils de privilégier l'une des hypothèses concernant le lieu de la rupture de 1755 ?

**3.3 Le séisme de 2013****Question 3.3.1**

4 points

Un tremblement de terre nettement moins puissant ( $M_w = 5$ ) a été ressenti dans le golfe de Cadiz le 16 décembre 2013. La FIGURE 14 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.

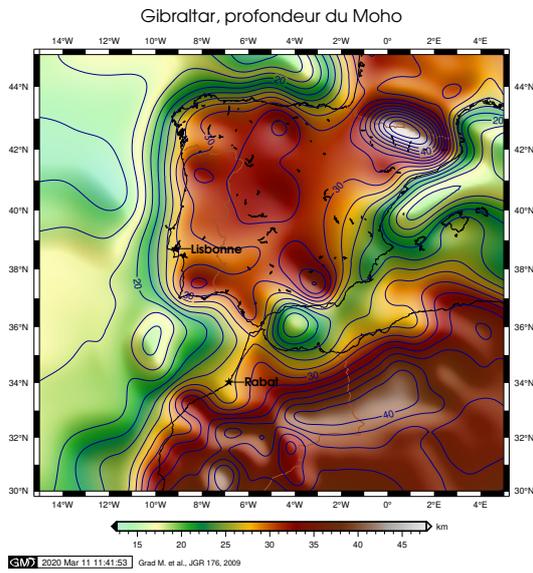
Identifiez les deux trains d'onde pointés sur les enregistrements. Précisez la nature de ces ondes et discutez (éventuellement au moyen d'un schéma) de l'intérêt d'un enregistrement à trois composantes pour les identifier.

**Question 3.3.2**

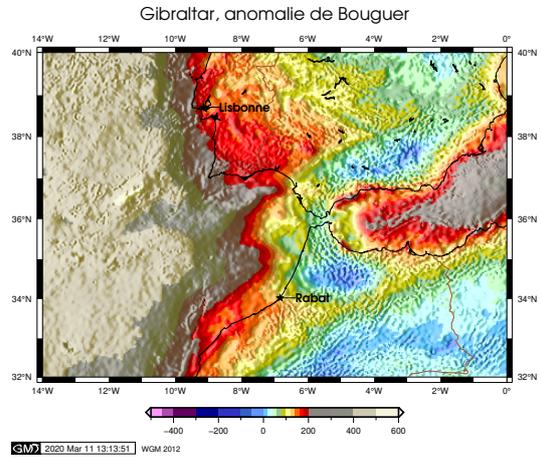
3 points

À l'aide de la FIGURE 15, estimez les distances épacentrales séparant le séisme des deux stations.

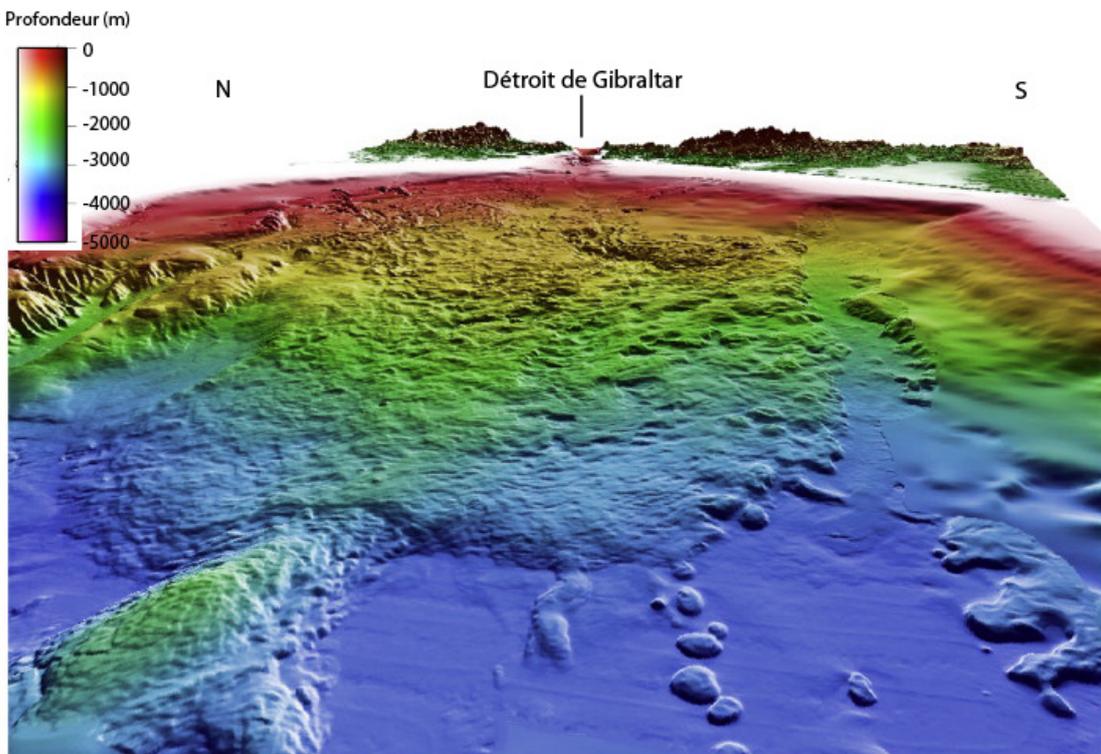
Ulysse serait resté neuf ans chez la nymphe Calypso, sans qu'Homère n'évoque le moindre tremblement de terre à Ogygie. Ce n'est que de retour sur la mer qu'Ulysse doit affronter à nouveau les colères de « l'ébranleur du sol », Poséidon, dieu de la mer, des tsunamis et des séismes.



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

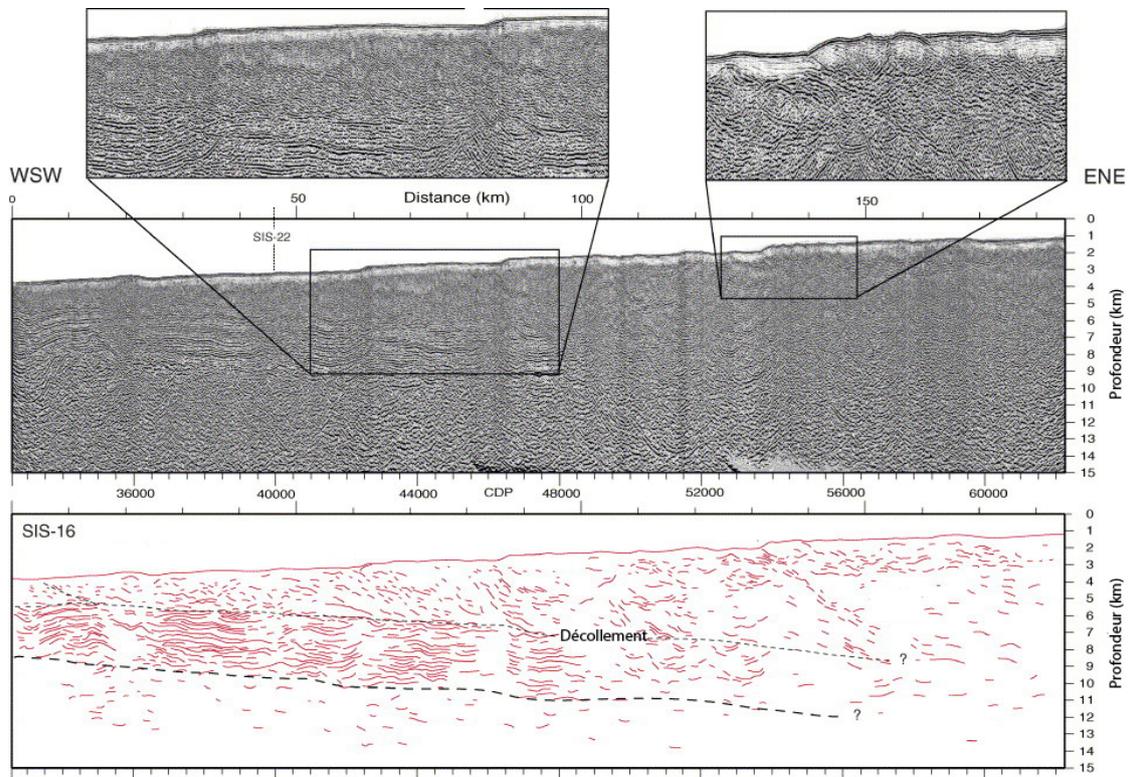


(b) Anomalies gravimétriques de Bouguer autour du détroit de Gibraltar.

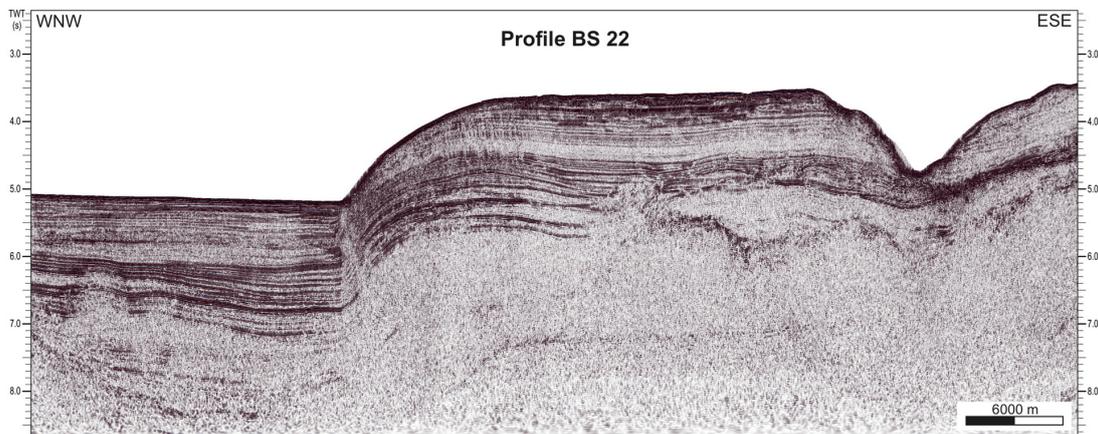


(c) Image bathymétrique des fonds du golfe de Cadiz, vue depuis l'ouest. (GUTSCHER et al. 2009)

FIGURE 7 – Données géophysiques de la région du détroit de Gibraltar.



(a) Profil géophysique SIS-16 dans le golfe de Cadiz.



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

FIGURE 8 – Imagerie géophysique des fonds du golfe de Cadiz et du Sud-Ouest du Portugal. (THIEBOT et GUTSCHER 2006)

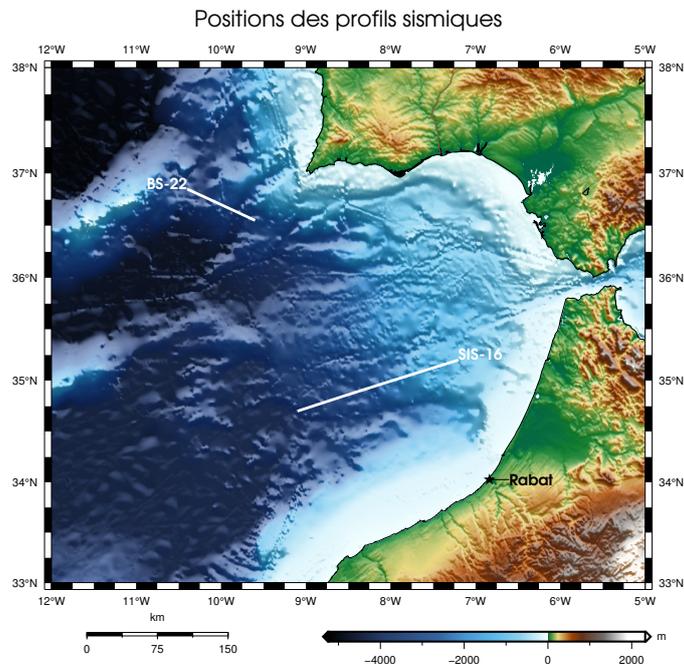


FIGURE 9 – Localisation des profils des FIGURES 8A ET 8B.

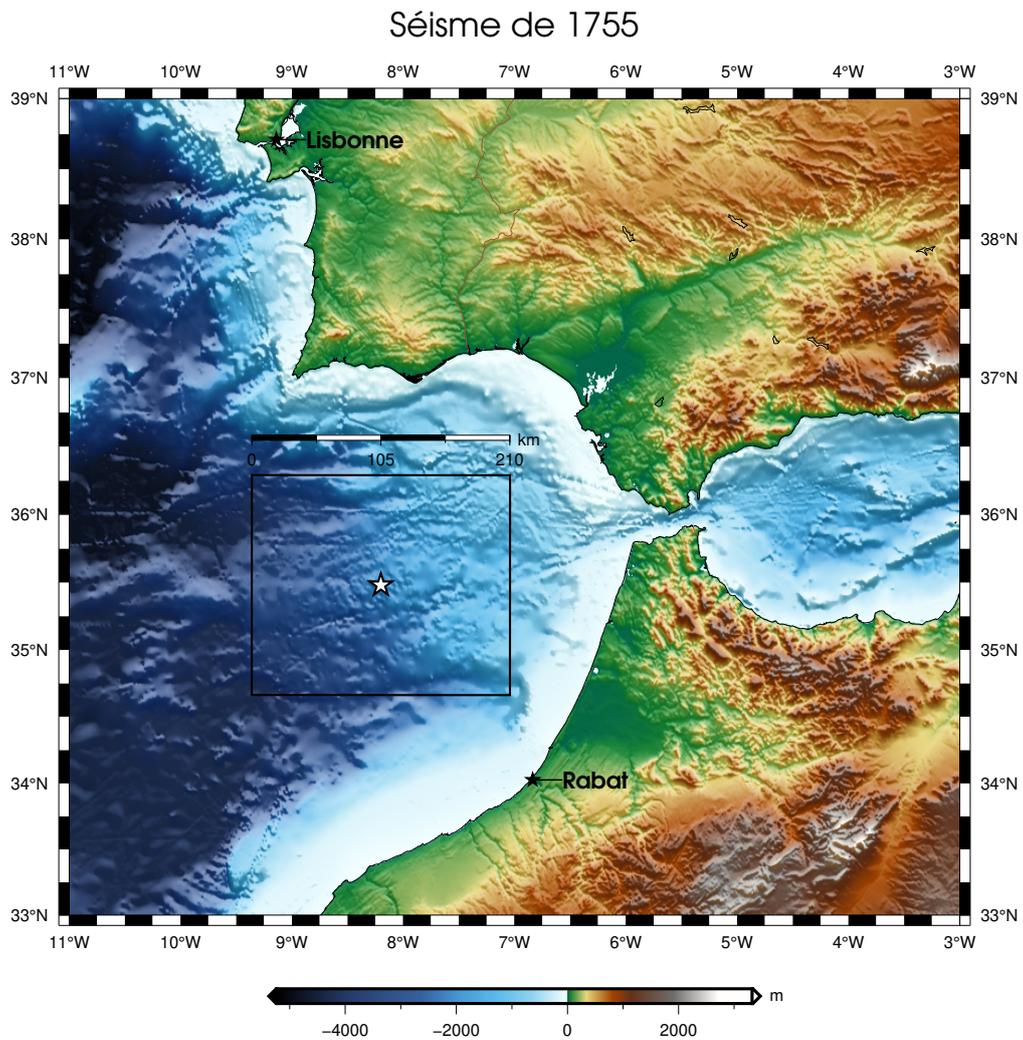
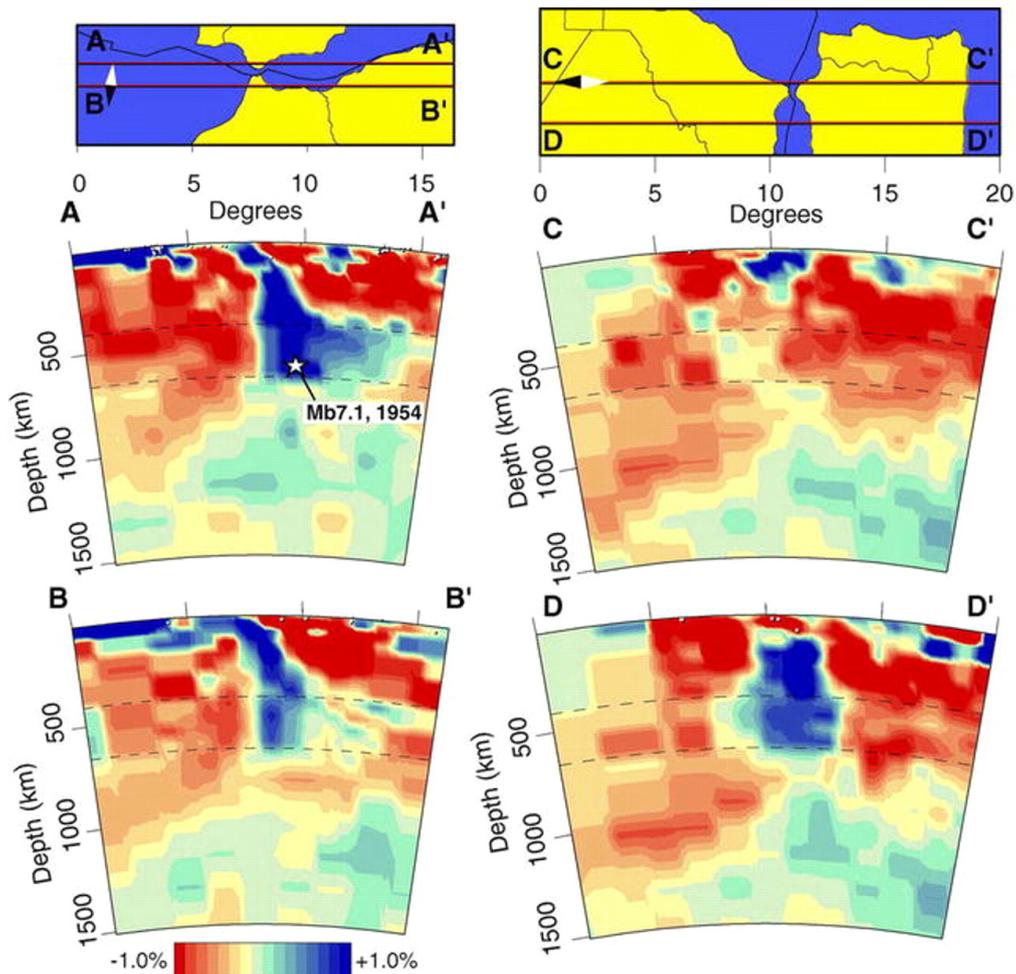
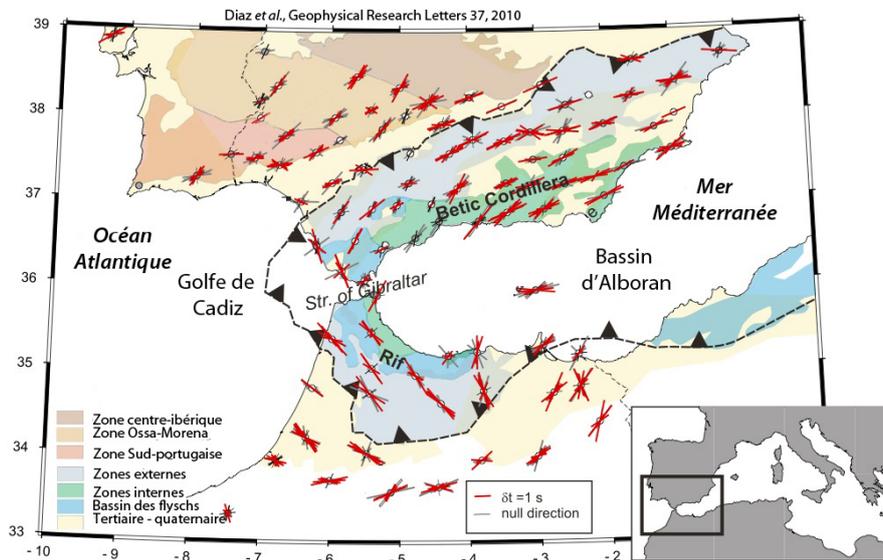


FIGURE 10 – Le cadre noir délimite la surface cartographique possiblement mobilisée par le séisme de 1755, dans l'hypothèse de Gutscher *et al.*, 2006. L'échelle indiquée représente les distances longitudinales à la latitude de 35,5° N.

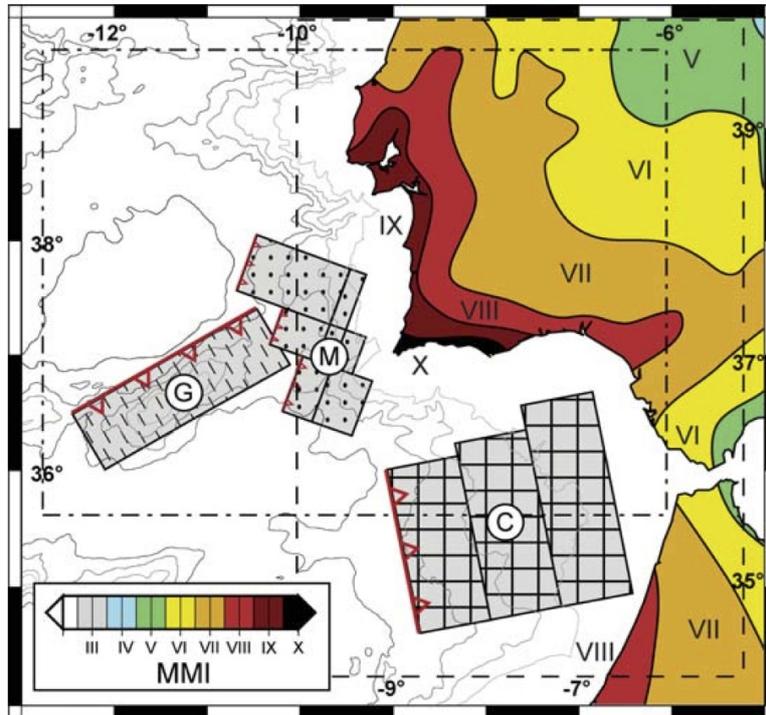


(a) Imagerie sismologique du manteau sous le détroit de Gibraltar (GUTSCHER et al. 2002).

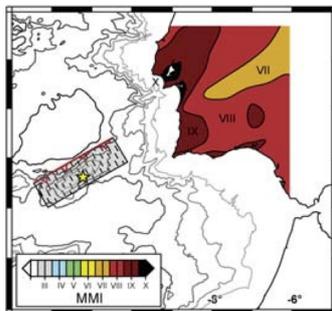


(b) Anisotropie sismique dans le manteau sous le détroit de Gibraltar, vers 200 km de profondeur (DIAZ et al. 2010). Les barres rouges indiquent les directions d'écart maximal de vitesse entre les deux composantes polarisées des ondes S traversant les cristaux. Cet écart est expliqué par l'anisotropie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

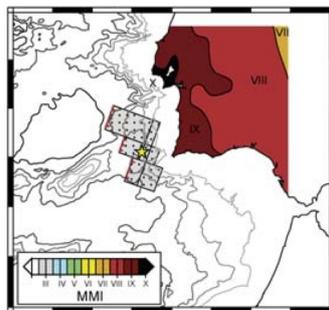
FIGURE 11 – Données de géophysique profonde sous le détroit de Gibraltar.



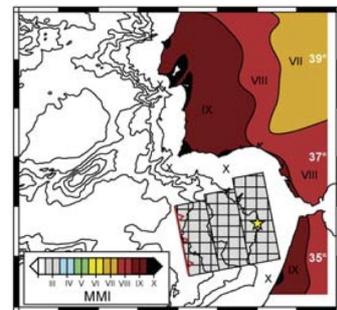
(a) Carte des isoséistes (zones de même intensité sismique) reconstituée pour le séisme de 1755. Sont également représentées les trois zones de rupture envisagées : Marquès de Pombal (M), banc de Goringe (G) et golfe de Cadiz (C).



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



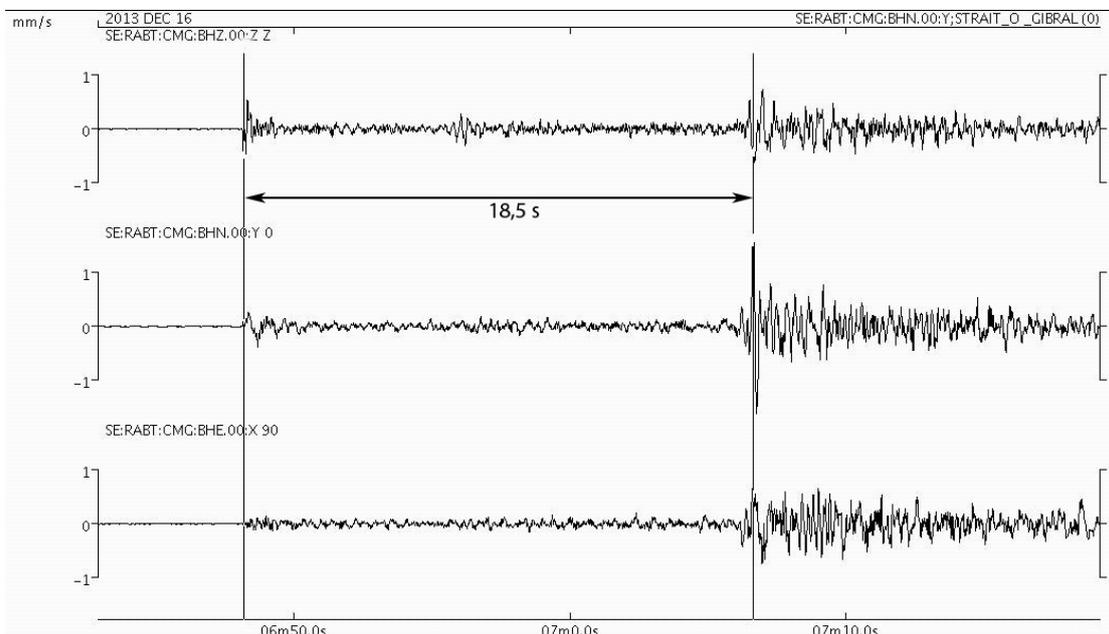
(c) Isoséistes reconstitués dans l'hypothèse d'une rupture dans le banc Marquès de Pombal.



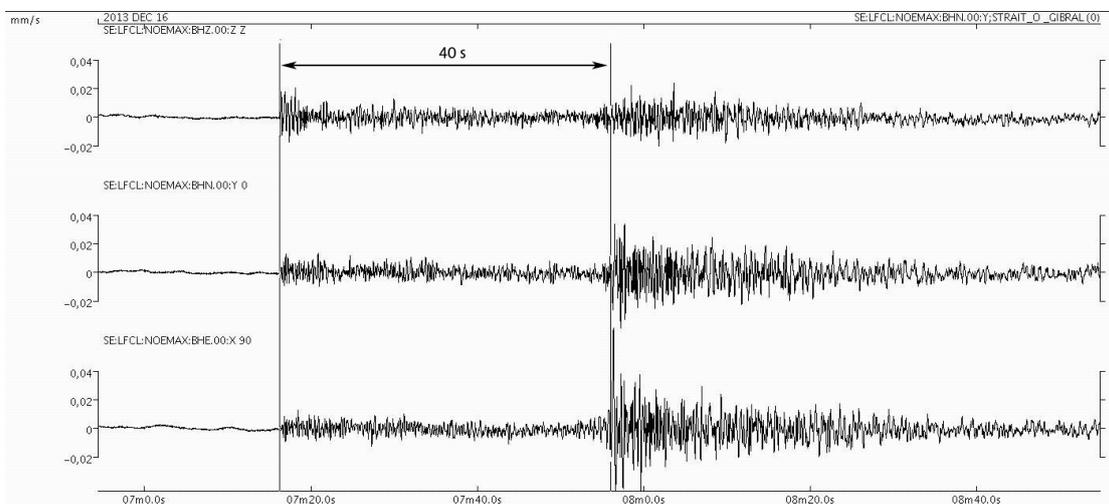
(d) Isoséistes reconstitués dans l'hypothèse d'une rupture dans le golfe de Cadiz.

FIGURE 12 – Carte des intensités sismiques (échelle de Mercalli Modifiée (MMI)) reconstituée 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).



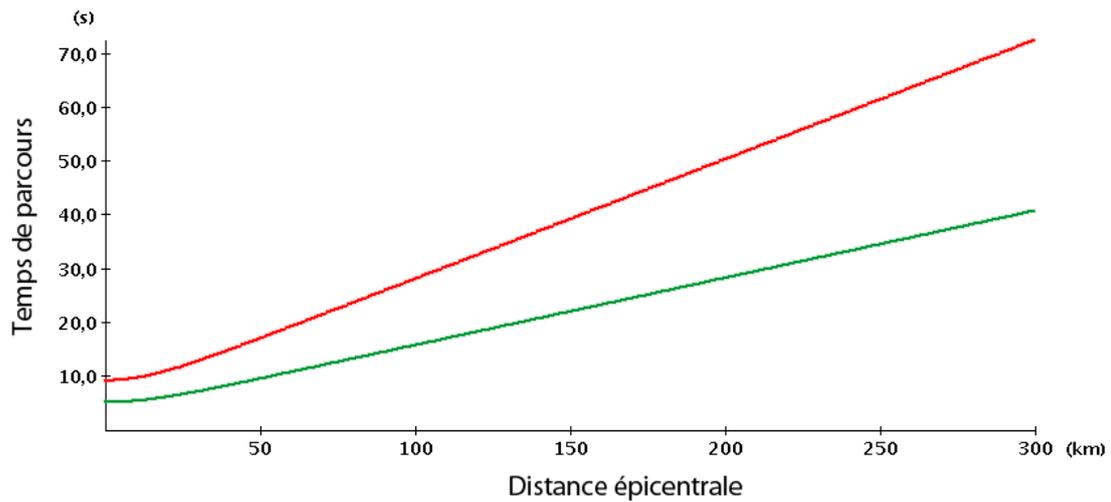


(a) Enregistrement obtenu par la station sismique de Rabat.

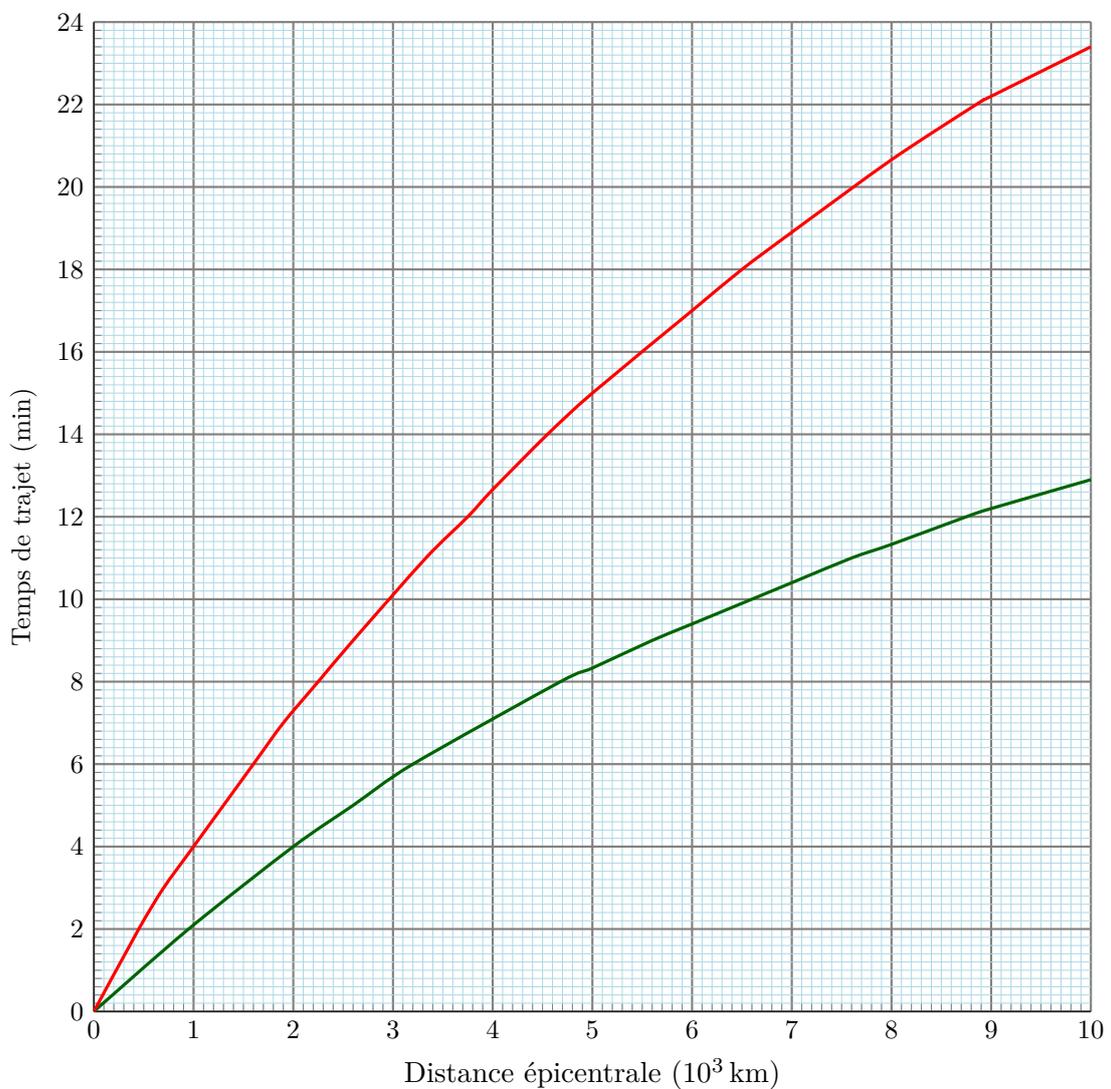


(b) Enregistrement obtenu par la station sismique de Lisbonne.

FIGURE 14 – 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 15 – Graphe temps de parcours-distance épacentrale pour un séisme comme celui du 16 décembre 2013.