

DS n°4 – Eléments de correction
« Quelques contextes géodynamiques »

I – Le Groenland

1. Rappelez ce qu'est le Moho et comment sa profondeur peut être déterminée.

Le Moho est la discontinuité qui sépare la croûte du manteau lithosphérique. Séparant deux milieux solides de composition chimique différente, c'est donc une discontinuité chimique. L'étude de la variation de la vitesse des ondes sismiques permet de déterminer sa profondeur.

2. Expliquez ce qu'est une anomalie de Bouguer et comment elle est calculée.

Les mesures de g effectuées grâce à des gravimètres doivent être corrigées avant d'être comparées à la valeur de g théorique calculé sur l'ellipsoïde de Clairaut :

- Correction à l'air libre qui prend en compte l'altitude de mesure
- Correction de plateau qui prend en compte l'effet des masses comprises entre l'altitude zéro et le point de mesure
- Correction topographique qui prend en compte l'effet des masses du relief environnant le point de mesure

L'anomalie de Bouguer résulte du calcul de la différence entre le g mesuré corrigé et le g théorique :

$$\text{Anomalie de Bouguer} = g \text{ mesuré } \pm \text{ corrections (à l'air libre/de plateau/topographique) } - g \text{ théorique}$$

Si elle est positive, c'est que l'on n'a pas assez corrigé : il y donc un excès de masse à l'aplomb du point de mesure, dû à la présence de matériaux plus denses que prévu,

Si elle est négative, c'est que l'on a trop corrigé, il y a un déficit de masse à l'aplomb du point de mesure.

3. A partir de l'exploitation des documents 1 et 2, expliquez la répartition de l'anomalie de Bouguer au Groenland.

Sur le document 1 on constate que la profondeur du Moho est supérieure à 45 km dans l'Est, le Sud-Est et le Sud du Groenland. Alors qu'il est à 30 km de profondeur dans le Nord du pays. Cette dernière profondeur correspond à la l'épaisseur moyenne de la croûte continentale. La croûte est donc plus épaisse, avec une épaisseur maximale le long de la côte SE.

Le document 2 montre que l'anomalie de Bouguer est comprise entre 0 et -300 mgal sur le territoire du Groenland. En comparant avec le document 1, on constate que les zones qui montrent l'anomalie négative la plus forte coïncident avec les zones où le Moho est le plus profond, c'est-à-dire le SE du Groenland.

On peut donc interpréter les anomalies négatives comme résultant d'un épaississement crustal, avec présence de racine crustale sous des reliefs.

4. Utilisez les informations apportées par le document 3, ainsi que vos connaissances, pour proposer une explication aux mouvements verticaux observés sur le document 4. Votre réponse s'accompagnera de schémas explicatifs.

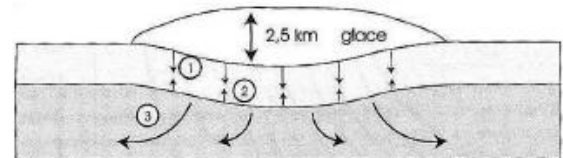
Sur le document 4 on constate un soulèvement au niveau du Groenland, avec une vitesse de soulèvement maximale au niveau de la côte SE et de la côte Ouest (jusqu'à 10 mm/an, relevés entre 2003 et 2008).

Or le document 3 montre que la région était entièrement recouverte d'une calotte glaciaire il y a 18 000 ans (comme on l'a vu pour la Scandinavie).

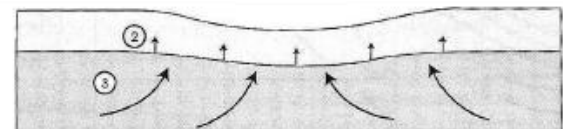
A l'heure actuelle cette calotte subsiste sur les 3/4 de l'île, les régions qui en sont dépourvues ou recouvertes de glace moins épaisse étant sans doute localisées en périphérie de l'île.

La calotte de glace exerçait une surcharge sur la lithosphère élastique qui l'enfonçait dans l'asthénosphère ductile. La fonte des glaces fait diminuer cette surcharge, ce qui entraîne un rééquilibrage isostatique qui se traduit par un soulèvement. Ce soulèvement est d'autant plus important au niveau des côtes, comme le montrent les vitesses de soulèvement sur le document 4, où la glace a disparu ou est en cours de disparition, alors qu'elle est encore présente au centre de l'île.

Il y a 18000 ans, le Groenland est recouvert de glace, et se trouve à l'équilibre isostatique grâce à l'enfoncement de la lithosphère dans l'asthénosphère.



Depuis 18000 ans, la fonte de la glace entraîne un déséquilibre isostatique. La lithosphère se soulève jusqu'à ce qu'un nouvel état d'équilibre isostatique soit atteint.



5. Expliquez ce qu'est le géoïde, et comment on le construit.

Le géoïde est la forme gravimétrique de la Terre, il correspond à l'équipotentielle de pesanteur qui coïncide avec la surface d'équilibre des océans.

Pour le construire, on utilise l'altimétrie satellitale : la distance entre un satellite dont la trajectoire orbitale est connue et la surface des océans est déterminée grâce à la mesure du temps d'aller-retour d'ondes émises par ce satellite et réfléchies sur la surface de l'eau. La compilation d'un grand nombre de données permet d'éliminer les variations liées aux vents, courants... et de construire la surface du géoïde. Celle-ci est prolongée au niveau des continents par le calcul (et en prenant en compte les variations de la trajectoire des satellites).

Les ondulations de courte longueur d'onde du géoïde rendent compte de la topographie des fonds océaniques.

6. Utilisez l'ensemble des informations apportées par les documents 3 à 5, ainsi que vos connaissances, pour proposer une explication aux variations de hauteur du géoïde observées dans la région.

Sur le document 5 on observe que la hauteur du géoïde varie négativement – donc elle diminue – globalement au niveau du Groenland. Cette diminution est faible (1 mm / an) au centre et au Nord de l'île, en revanche elle est plus élevée (jusqu'à 4 mm/an) le long des côtes SE et Ouest de l'île.

Cette dernière coïncide avec les vitesses de soulèvement les plus marquées observées sur le document 4.

On a donc aux mêmes endroits un soulèvement et une diminution de l'altitude.

Le document 3 montre qu'il y a 18 000 ans la calotte de glace était centrée sur le Groenland. On sait qu'elle a en grande partie fondu aujourd'hui et l'on nous indique qu'actuellement elle couvre encore plus des 3/4 du territoire groenlandais.

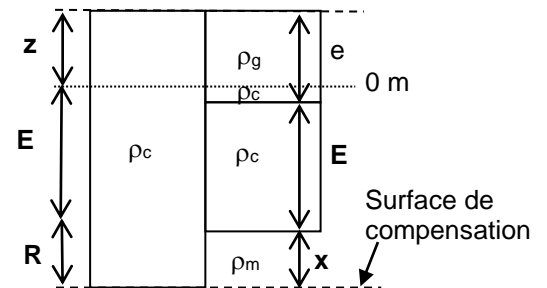
On peut faire l'hypothèse que la fonte des glaces qui a progressivement réduit cette calotte par ses bords, fond en particulier au niveau des côtes SE et Ouest du Groenland, et que la diminution d'épaisseur des glaces explique d'une part le soulèvement discuté dans la question 4, d'autre part la diminution de l'altitude du relief (comme dans le cas de l'érosion d'une montagne, le réajustement isostatique lié à la suppression d'une surcharge ne compense pas complètement la diminution d'altitude liée à l'ablation de matériel).

NB : les données du document 6 sont également en faveur d'une calotte de glace plus épaisse au centre de l'île : celui-ci semble « enfoncé », avec des altitudes négatives ; on nous dit de plus que la zone la plus élevée de la chaîne calédonienne n'est pas couverte de glaces).

7. En supposant que l'ensemble du Groenland est à l'équilibre isostatique, et que cet équilibre est atteint au niveau du Moho, calculez l'épaisseur de la croûte continentale sous la chaîne calédonienne, dans sa zone la plus élevée non recouverte de glace (2 500 m d'altitude). Votre réponse sera accompagnée de schémas explicatifs. Discutez les résultats obtenus.

Le modèle proposé (schéma ci-contre) suppose que le relief crustal est compensé en profondeur par une racine crustale. La croûte à l'équilibre est surmontée par un glacier de 3 000 m d'épaisseur, qui exerce une surcharge et doit entraîner un enfoncement de la lithosphère.

La surface du glacier est à la même altitude que le sommet de la chaîne calédonienne, ce qui est cohérent avec les données topographiques du modèle numérique de terrain (document 6 : au centre, la surface de la croûte continentale serait à une profondeur comprise dans l'intervalle – 70 à – 750 m).



On peut alors écrire l'équilibre des pressions exercées sur la surface de compensation pour les deux colonnes :

$$\rho_c g (z + E + R) = \rho_g g e + \rho_c g E + \rho_m g x$$

or $x = z + E + R - e - E = z + R - e$

d'où :

$$\rho_c (z + R) = \rho_g e + \rho_m (z + R - e)$$

$$\rho_c z + \rho_c R = \rho_g e + \rho_m z + \rho_m R - \rho_m e$$

$$R (\rho_m - \rho_c) = e (\rho_m - \rho_g) - z (\rho_m - \rho_c)$$

$$R = [e (\rho_m - \rho_g) - z (\rho_m - \rho_c)] / (\rho_m - \rho_c) = e (\rho_m - \rho_g) / (\rho_m - \rho_c) - z$$

A. N. :

$$R = 3 (3,3 - 0,9) / (3,3 - 2,7) - 2,5 = 3 \times 2,4 / 0,6 - 2,5 = 7,2 / 0,6 - 2,5 = 12 - 2,5 = 9,5 \text{ km}$$

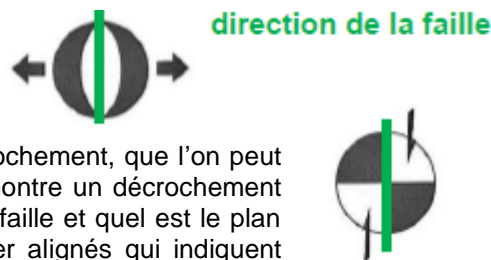
L'épaisseur totale de la croûte au niveau de la chaîne calédonienne est donc : $z + E + R = 2,5 + 30 + 9,5 = 42 \text{ km}$

Cette valeur paraît un peu faible par rapport aux données de la carte du Moho (document 1) où l'on constate que la profondeur est située à 47,5 voire 50 km à l'aplomb de la chaîne calédonienne. Cependant, pour faire ce calcul, on a considéré que l'équilibre isostatique était réalisé, ce qui n'est pas le cas (comme le montre le document 4). Le soulèvement indique un déficit de masse pas encore compensé, avec une racine crustale plus importante que ce à quoi on s'attend compte tenu de l'altitude des montagnes.

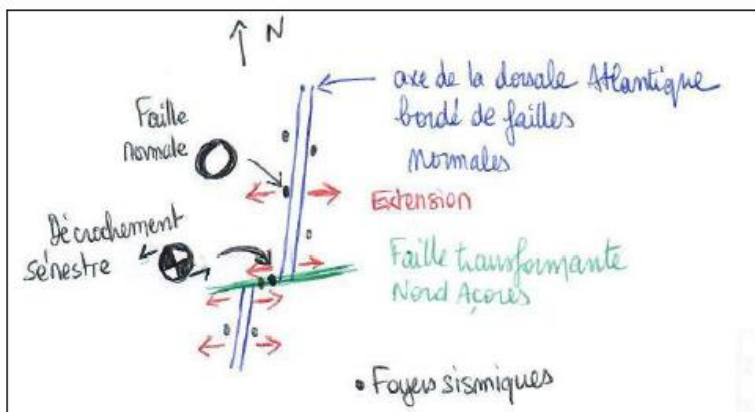
1. Identifiez les principaux types de mécanismes au foyer observés dans la région des Açores (document 7).

On observe deux grands types de mécanismes au foyer :

- Ceux présentant un quadrant central blanc et des quadrants latéraux noirs indiquent un mécanisme en extension, que l'on peut associer au jeu de failles normales.
- Ceux présentant quatre quadrants, deux blancs et deux noirs opposés deux à deux indiquent un mécanisme au foyer en décrochement, que l'on peut associer au jeu d'une faille décrochante. Le schéma ci-contre montre un décrochement dextre, mais pour le savoir il faut déterminer quel est le plan de faille et quel est le plan accessoire (et pour cela repérer plusieurs mécanismes au foyer alignés qui indiquent ainsi le plan de faille).



2. Réalisez un schéma explicatif légendé de la région encadrée du document 8, en vous aidant des informations tirées du document 7 et de vos connaissances.



3. Expliquez le principe de la tomographie sismique.

La tomographie sismique consiste à comparer les vitesses de propagation de nombreuses ondes sismiques recueillies lors de différents séismes à celles calculées à partir du modèle PREM. Les ondes sismiques sont ralenties lors de leur passage dans un milieu peu dense, et accélérées lors de leur passage dans un milieu très dense. C'est l'écart (en %) entre la valeur mesurée et la valeur théorique, c'est-à-dire l'anomalie de vitesse, qui est représenté sur la carte.

Ainsi, une anomalie de vitesse négative (en rouge) sera interprétée comme une zone moins dense, donc anormalement chaude.

Une anomalie de vitesse positive (en bleu) sera interprétée comme la présence d'un matériau plus dense, donc moins chaud que la référence.

4. A l'aide des informations tirées de l'ensemble des documents 7 à 9, précisez l'origine des îles du groupe central.

Sur le document 9, le profil tomographique A2B2 réalisé le long du rift de Terceira montre une anomalie de vitesse négative peu profonde (entre 200 km de profondeur et la surface), qui pourrait correspondre à une remontée de matériel anormalement chaud sous une dorsale. Cette hypothèse est confirmée par la carte tomographique à 112 km de profondeur qui montre un matériel anormalement chaud bien localisé sous le rift, et par le document 8 qui montre des mécanismes en extension le long de ce rift.

Les îles Graciosa et Terceira qui se trouvent sur ce rift pourraient donc avoir pour origine le fonctionnement d'une dorsale océanique.

Mais comment expliquer la présence des 3 autres îles du groupe central à distance du rift ?

Sur le document 9, le profil tomographique A1B1 montre une anomalie négative plus profonde (entre 400 km de profondeur et la surface) sous les îles du groupe central.

On retrouve cette anomalie sur la carte tomographique à 375 km de profondeur, où on constate qu'elle est bien localisée sous Terceira.

Il y aurait donc une remontée ponctuelle de matériel chaud issu du manteau profond sous Terceira, c'est-à-dire un point chaud, et cette île active serait également due au fonctionnement de ce point chaud.

Sao Jorge, Pico et Faial se trouvent à distance du rift, sur la plaque africaine, et elles forment avec Terceira un alignement de direction NE – SW. Ces îles se seraient donc formées successivement (d'abord Faial et Pico, puis Sao Jorge) lors du passage de la lithosphère océanique à la verticale du point chaud.



5. Rappelez brièvement le principe de la méthode GPS et indiquez quel est le repère utilisé pour donner la position des stations (10 lignes maximum).

Les satellites du système GPS émettent en permanence des signaux (ondes radio) qui contiennent l'information de la position du satellite et de l'heure d'émission.

La station GPS qui reçoit les signaux peut déterminer, à partir de l'heure de réception, la distance qui la sépare du satellite émetteur.

En combinant les informations résultant de la réception de signaux issus de 4 satellites différents, la position de la station peut être précisément déterminée à l'instant t de réception des signaux. La répétition des mesures permet d'accroître la précision de la détermination de la position, et de suivre un déplacement au cours du temps.

La position est déterminée dans le référentiel axe de rotation de la Terre / équateur.

6. Exploitez graphiquement les données GPS fournies (document 10) pour caractériser le déplacement des stations FLRS et PDEL :

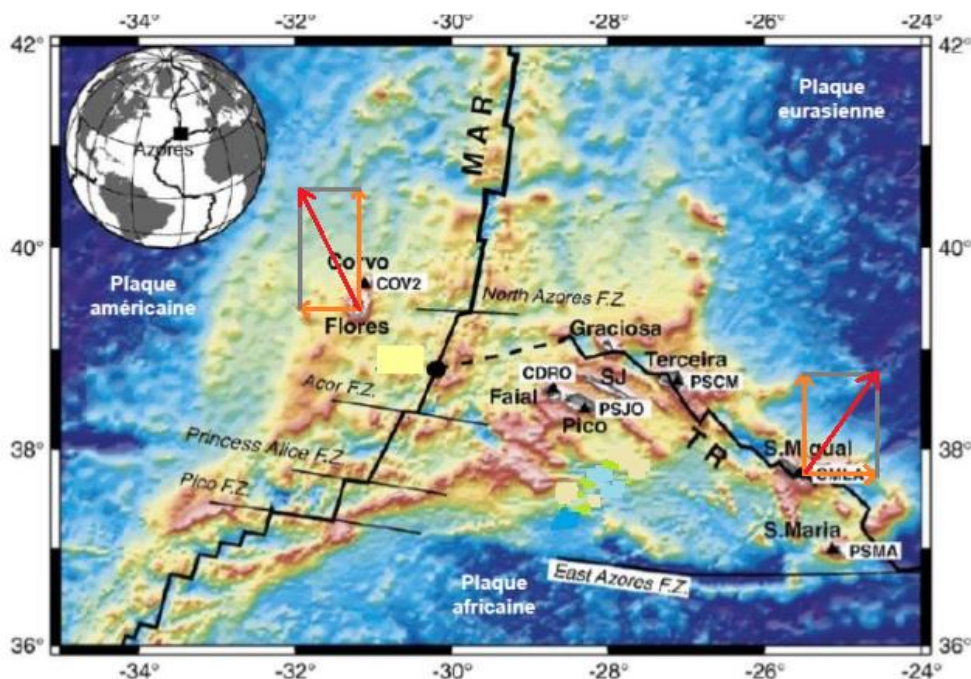
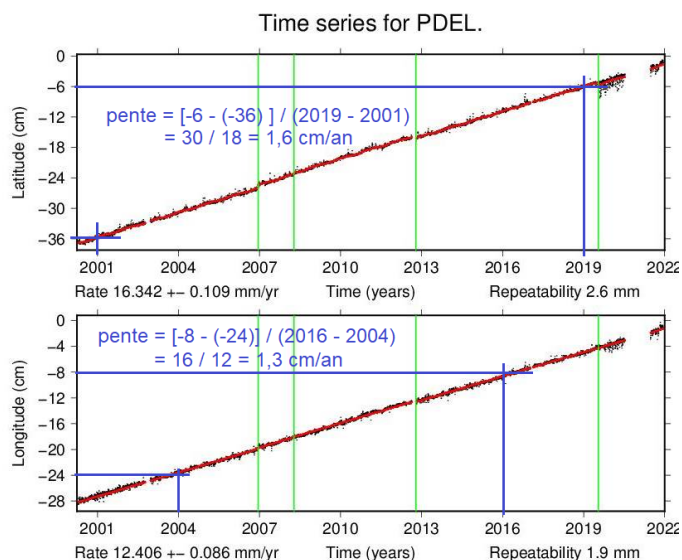
- a. Quantifiez le mouvement horizontal de ces deux stations et reportez les résultats obtenus sous la forme de vecteurs sur la carte (document 7 fourni en annexe, à compléter).

Pour déterminer les mouvements en longitude et en latitude, il faut déterminer la pente sur les graphiques représentant la position longitudinale et latitudinale de chaque station au cours du temps.

Pour PDEL (voir ci-contre) : déplacement en latitude vers le N d'environ 1,6 cm/an ; déplacement en longitude vers l'E d'environ 1,3 cm/an

Pour FLRS : déplacement en latitude vers le N d'environ 2 cm/an ; déplacement en longitude vers l'W d'environ 1 cm/an

NB : vous pouvez vérifier vos résultats avec les valeurs indiquées sous les graphiques.



- b. Précisez s'il s'agit d'un mouvement relatif ou absolu (après avoir défini l'un et l'autre).

Le mouvement est relatif quand on considère deux plaques lithosphériques (ou deux stations GPS) l'une par rapport à l'autre car le point de référence (l'autre station) fait partie du système étudié puisque situé sur une des plaques.

Le mouvement est absolu quand le repère utilisé est indépendant des plaques (repère absolu), ce qui est le cas ici puisque le repère est l'axe de rotation de la Terre et le plan équatorial (comme dit plus haut).

7. Proposez une explication au mouvement relatif constaté entre ces deux stations.

La station PDEL se déplace vers le NE alors que la station FLRS se déplace vers le NW. Il y a donc un mouvement relatif divergent EW entre les îles sur lesquelles sont localisées ces stations. Ce mouvement relatif peut s'expliquer par leur localisation par rapport à la dorsale Atlantique : FLRS est à l'Ouest de la dorsale, PDEL à l'Est, elles sont donc localisées sur deux plaques qui divergent au niveau de la dorsale.

A partir de l’exploitation des documents 11 à 13, répondez aux questions suivantes :

1. Justifiez l’existence au niveau du golfe d’Aden d’une dorsale séparant l’Afrique de la péninsule arabique et estimez la vitesse d’ouverture au niveau de cette dorsale.

Document 11 : la topographie montre un relief positif d’orientation NE-SW dans le golfe d’Aden, découpé transversalement par des reliefs négatifs : cela correspond à la signature d’une dorsale et de failles transformantes.

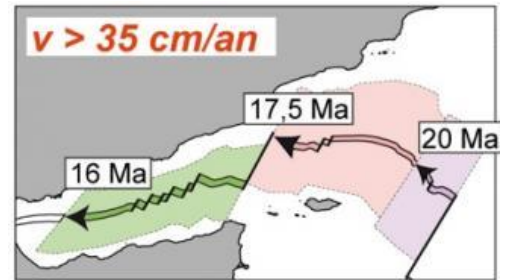
Document 12 : il existe de nombreux séismes dans le golfe d’Aden, répartis au niveau de bandes étroites qui sont interprétées comme des limites de plaques lithosphériques. On observe deux types de mécanismes au foyer : des mécanismes en extension dont la répartition s’aligne sur le relief positif précédemment décrit, des mécanismes de coulissage alignés sur les reliefs négatifs précédemment décrits. Ces mécanismes sont cohérents avec un mouvement de divergence associé à la dorsale, et un mouvement de coulissage localisé au niveau de failles transformantes.

Document 13 : la répartition des âges donnés par les anomalies magnétiques montre que plus on s’éloigne d’un axe NE-SW qui traverse le golfe d’Aden, plus l’âge du plancher océanique est élevé, et ce de manière symétrique à l’axe. Cette caractéristique signe la mise en place de lithosphère océanique au niveau de cet axe, qui doit donc être une dorsale.

Estimation de la vitesse d’ouverture : environ 2 cm/an (indiquez comment et à quel niveau vous effectuez vos calculs. Ex : 2,5 cm/an entre 52 et 53° de longitude). Pensez à x2 si vous prenez la distance à l’axe de la dorsale.

2. Les géologues affirment que cette ouverture se propage vers l’Ouest, justifiez cette affirmation et estimez la vitesse de propagation vers l’ouest

A l’Est, les fonds océaniques les plus anciens sont datés de 17,5 à 19,7 Ma, alors qu’à l’Ouest, ils ont moins de 2,6 Ma. On peut donc en déduire que la dorsale s’est mise en place bien plus tôt à l’Est qu’à l’Ouest et que l’ouverture océanique se propage vers l’Ouest. On distingue trois secteurs en fonction de l’âge du plus ancien plancher océanique : cette ouverture s’est déroulée en trois phases (schéma ci-contre).



Estimation de la vitesse de propagation pour la phase la plus récente :

Ouverture datée de 17,5 Ma à 14,5°N – 52°E

Ouverture datée de 16 Ma à 12°N – 45°E

Pour ne pas tenir compte du décalage de l’axe de la dorsale, on raisonne sur la même latitude. Entre ces deux points, la distance est donc de : 52 – 45 = 7 degrés de longitude soit 7 x 111 = 777 km environ

D’où une vitesse de : $777 \cdot 10^5 / 1,5 \cdot 10^6 = 51,8 \text{ cm/an}$

(Là encore, bien indiquer où vous réalisez vos calculs, la vitesse étant variable le long de la dorsale).

3. Identifiez la nature probable du mouvement relatif des plaques indienne et arabique.

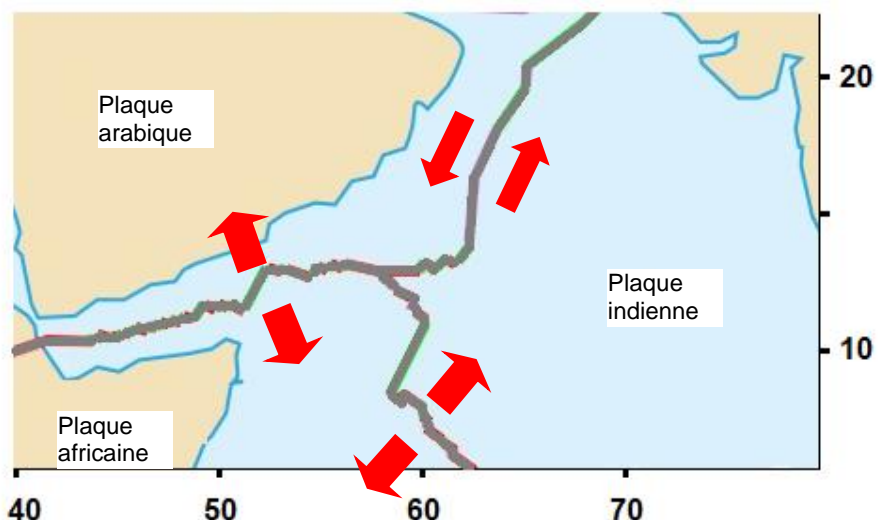
Les mécanismes au foyer (document 12) et la topographie de la zone étudiée (document 11) associée à l’âge du plancher océanique (document 13) indiquent un mouvement relatif divergent entre la plaque africaine et la plaque arabique.

Les mécanismes au foyer et la topographie indiquent un mouvement relatif divergent entre la plaque indienne et la plaque africaine.

Les mécanismes au foyer coïncidant avec une faille NE-SW visible sur les documents 11 et 13 indiquent un coulissage sénestre.

On en déduit donc que la plaque indienne se déplace vers le NE plus rapidement que la plaque arabique, d’où ce coulissage entre les deux plaques.

4. Sur la carte fournie en annexe (à rendre avec la copie), récapitulez les mouvements relatifs entre les trois plaques concernées.



1. A partir de l'exploitation du document 14 donnez les arguments qui vous permettent d'identifier le contexte géodynamique à l'origine des îles Sandwich du Sud.

Le document 14 montre que les îles Sandwich du Sud forment un arc, bordé à l'Est (côté plaque Sud-Américaine) par une profonde fosse, cette association de reliefs positifs et négatifs se rencontre dans les zones de subduction. Les très nombreux séismes alignés indiquent que nous sommes au niveau d'une frontière de plaques, ce qui est confirmé par l'encart sur le document.

De plus, les foyers sismiques sont de plus en plus profonds d'Est en Ouest. Ils matérialisent donc la surface d'une lithosphère froide et rigide plongeant dans l'asthénosphère plus chaude et plus ductile (= plan de Bénihoff).

Toutes ces observations laissent supposer que cette frontière de plaques est une frontière en subduction : la lithosphère Sud-Américaine plonge vers l'Ouest, sous la lithosphère Scotia. Les îles Sandwich du Sud correspondraient alors à l'arc volcanique situé sur la lithosphère chevauchante.

2. Représentez ce contexte sous la forme d'un schéma simple.

Schéma avec :

Lithosphère (croûte + manteau lithosphérique figurés distinctement) plongeant d'Est en Ouest sous une lithosphère océanique chevauchante, portant un arc volcanique, localisation des séismes figurée, flèche indiquant le plongement de la lithosphère

Légendes : croûte océanique, manteau lithosphérique, lithosphère océanique froide subductée, lithosphère océanique chevauchante, fosse océanique, île volcanique (arc insulaire), asthénosphère, plan de Benihoff.

