

## DEVOIR SURVEILLE n°4 – GEOLOGIE – éléments de correction

## Partie 1 : Quelques aspects de la géologie de l’océan Atlantique (durée conseillée 50 min)

[D’après : épreuves sur support de documents Géologie - Concours agro-véto 2018]

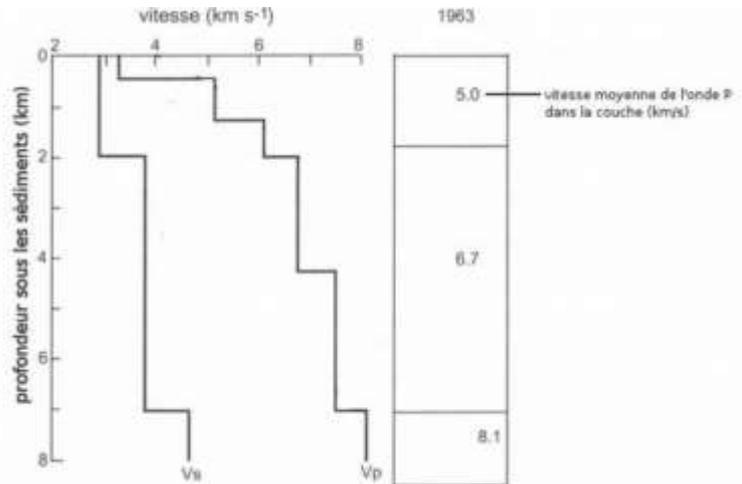
• **Structure et nature de la lithosphère océanique Atlantique**

**Document 1.1 :** Evolution des vitesses sismiques (en  $\text{km.s}^{-1}$ ) à travers la lithosphère océanique pour les ondes P et S et leur interprétation (partie de droite) en terme de modèle de lithosphère stratifiée (Raitt, 1963).

La profondeur zéro correspond à la profondeur sous la couche de sédiments. Les nombres dans les couches du modèle de Raitt correspondent à la vitesse moyenne de l’onde P dans chaque couche en  $\text{km.s}^{-1}$ .

**Question 1a. Définissez la notion de lithosphère en dix lignes maximum et sans schéma.**

La lithosphère est l’enveloppe solide la plus superficielle du globe terrestre. D’environ 100 km d’épaisseur, elle est constituée de la croûte (continentale ou océanique) et du manteau lithosphérique. Elle est rigide. Sa limite inférieure est une limite thermique : c’est l’isotherme 1 300 °C qui marque le sommet de la LVZ. Il s’agit donc d’une discontinuité physique qui sépare la lithosphère de l’asthénosphère, plus ductile.



**Question 1b. Expliquez quelles sont les propriétés des ondes sismiques utiles à la connaissance de la structure du globe.**

Les ondes sismiques P (ondes premières, de compression – dilatation) et S (ondes secondes, de cisaillement) sont des ondes de volume : elles se propagent en profondeur dans le globe terrestre et rencontrent ainsi les différents milieux qui le constituent.

Leur trajectoire suit la loi de Snell-Descartes : elle est rectiligne en milieu homogène. En revanche, les ondes subissent une réfraction et une réflexion lorsqu’elles rencontrent une discontinuité, c’est-à-dire un changement de milieu. Ainsi, l’étude de leur trajectoire peut renseigner sur l’existence et la localisation de certaines discontinuités majeures (Moho : discontinuité croûte / manteau lithosphérique, discontinuité de Gutenberg entre manteau inférieur et noyau externe, discontinuité de Lehman entre noyau externe et noyau interne).

Leur vitesse est liée aux propriétés des milieux traversés :

Ainsi, l’étude de leur vitesse renseigne sur les propriétés physiques de ces milieux : masse volumique  $\rho$ , module d’incompressibilité  $K$ , module de cisaillement  $\mu$  (celui-ci est nul dans les liquides : les ondes S ne s’y propagent pas, c’est le cas dans le noyau externe).

$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

**Question 1c. Analysez l’évolution des vitesses sismiques mesurées en fonction de la profondeur de la lithosphère océanique (document 1.1).**

Cette partie portant sur la structure de la lithosphère océanique, il importe de cibler l’analyse sur les changements de vitesse qui nous renseignent sur des discontinuités.

La vitesse des ondes est constante sur des intervalles séparés par de brusques augmentations :

- On relève deux augmentations pour les ondes S : à 2 km de profondeur (la vitesse passe de 2,9 à 3,9  $\text{km.s}^{-1}$ ) et à 7 km de profondeur (la vitesse passe de 3,9 à 4,5  $\text{km.s}^{-1}$ ),
- Et 5 augmentations pour les ondes P : à 400 m de profondeur (augmentation de 3,2 à 5,1  $\text{km.s}^{-1}$ ), à 1,2 km de profondeur (augmentation de 5,1 à 6,1  $\text{km.s}^{-1}$ ), à 2 km de profondeur (augmentation de 6,1 à 6,9  $\text{km.s}^{-1}$ ), à 4,3 km de profondeur (augmentation de 6,9 à 7,5  $\text{km.s}^{-1}$ ) et à 7 km de profondeur (augmentation de 7,5  $\text{km.s}^{-1}$  à 8,1  $\text{km.s}^{-1}$ ).

Ces changements de vitesse marquent des discontinuités, physiques et / ou chimiques, c’est à dire un changement de milieu. Les deux profondeurs pour lesquelles on a à la fois des changements de vitesse pour les ondes P et S marquent peut-être un changement de milieu plus marqué (tous ces milieux sont solides puisque les ondes S sont présentes).

**Question 1d. D’après vos connaissances, à quelles lithologies (roches) peuvent correspondre les différentes couches proposées par Raitt en 1963 (document 1.1) ?**

Montrez que vous mettez en relation modèle de Raitt, / observations sur la vitesse des ondes / vos connaissances.

L’interprétation de Raitt propose trois couches, qui coïncident avec les sauts de vitesse concernant à la fois les ondes P et les ondes S, à 2 km et 7 km de profondeur.

- La discontinuité à 7 km pourrait correspondre au Moho, limite entre la croûte et le manteau. On passe donc d’une croûte océanique constituée de gabbros au manteau constitué de péridotite.
- La discontinuité à 2 km pourrait correspondre à une limite entre basaltes et gabbros, roches toutes deux constitutives de la croûte océanique, les basaltes (roches volcaniques) surmontant les gabbros (plutoniques).

• **Mobilité de la lithosphère océanique Atlantique**

**Question 2a.** En utilisant les données des documents 1.2b et 1.2c, estimez approximativement le taux d'expansion moyen de cette dorsale (en  $\text{cm.an}^{-1}$ ).

Sur le document 1.2c on relève que le point situé à 500 km de distance de l'axe de la dorsale est situé à 4000 m de profondeur.

Sur le graphique 1.2b on repère que pour une profondeur (en ordonnée) de 4000 m, l'âge de la lithosphère est d'environ 20 Ma.

Le taux de demi-expansion moyen (qui ne prend en compte qu'un seul côté de la dorsale) est donc :

$$V_{\frac{1}{2} \text{ expansion}} = 500 \cdot 10^5 / 20 \cdot 10^6 = 5/2 = 2,5 \text{ cm.an}^{-1}$$

Pour le taux d'expansion, il faut doubler ce résultat (on considère que la dorsale a un fonctionnement symétrique) :

$$V_{\text{ expansion}} = 2,5 \cdot 2 = 5 \text{ cm.an}^{-1}$$

**Question 2b.** D'un point de vue cinématique, dans quelle catégorie classez-vous cette dorsale ?

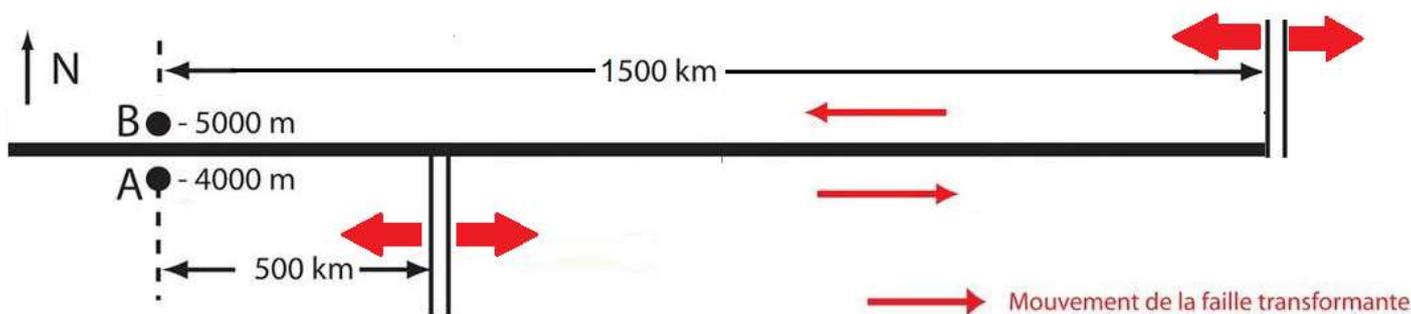
Avec une vitesse d'expansion de  $5 \text{ cm.an}^{-1}$ , il s'agit d'une dorsale lente.

**Question 3a.** D'après vos analyses, la faille transformante est-elle dextre ou sénestre ?

Sur le document 1.2c, le point B est situé à - 5000 m de profondeur. Il est donc plus âgé que le point A, il a environ 60 Ma. Par conséquent il est plus éloigné de l'axe de la dorsale. On en déduit que l'axe de la dorsale à la latitude de B est décalé vers l'Est et que B est situé à  $2,5 \cdot 60 \cdot 10^5 = 1500 \text{ km}$  de l'axe de la dorsale (on peut aussi faire le raisonnement suivant : B est 3 fois plus âgé que A donc trois fois plus loin de l'axe de la dorsale).

La faille active est située entre les deux portions d'axe de la dorsale, donc à l'Est de la partie Sud représentée sur le schéma. En conséquence, au Nord de cette faille la lithosphère se déplace vers l'Ouest et au Sud elle se déplace vers l'Est : la faille est sénestre.

**Question 3b.** Vous rajouterez des flèches pour indiquer le mouvement sur l'annexe à compléter page 11 et à rendre avec la copie.



**Question 4.** A partir du document 1.2, calculez l'épaisseur approximative de la lithosphère océanique aux points A et B. Vous vous aiderez de la relation âge-épaisseur donnée au document 1.2a et utiliserez les données du document 1.2b.

Le document 1.a indique que pour une lithosphère de 60 Ma, l'épaisseur est de 100 km, c'est donc le cas de la lithosphère au point B.

On peut aussi appliquer la relation donnée par le document 1.2a en utilisant  $\sqrt{t}$  donné par le graphique 1.2b : pour une profondeur de 5000 m,  $\sqrt{t} = 7,3$ . Alors :

$$e = 9,5 \cdot 7,3 = 69,35 \text{ soit environ } 70 \text{ km.}$$

Au point A, la lithosphère est âgée de 20 Ma. Son épaisseur est donc :

$$e = 9,5 \sqrt{t} = 9,5 \cdot \sqrt{20} = 9,5 \cdot 4,5 \text{ (approximation de } \sqrt{20} \text{ ou alors lecture de la valeur sur le graphique 1.2b)} = 42,75 - 2,25$$

(pour simplifier on calcule  $10 \cdot 4,5 - 0,5 \cdot 4,5$ )

$$e = 42,75 \text{ km soit environ } 40 \text{ km.}$$

**Question 5a.** A partir de vos connaissances et du document 1.2a, proposez un processus contrôlant la variation d'épaisseur de la lithosphère océanique au cours du temps.

Sur le doc 1.a on observe que la lithosphère océanique est d'épaisseur réduite au niveau des dorsales : l'isotherme  $1300^\circ\text{C}$  affleure à la surface du plancher océanique. Plus la lithosphère est éloignée de la dorsale, plus l'isotherme  $1300^\circ\text{C}$  est profond : plus la lithosphère est épaisse, en raison de l'ajout d'une « semelle » de manteau lithosphérique qui se forme en raison du refroidissement du sommet de l'asthénosphère.

*NB : Sur le document 1.2b, on observe que la profondeur du plancher océanique augmente avec le temps. Cet enfoncement s'explique par une augmentation de la densité de la lithosphère liée à son épaissement, puisque la croûte, moins dense que le manteau, représente une proportion de plus en plus faible dans la colonne de lithosphère. Ainsi, cette augmentation de densité entraîne une subsidence qui explique l'augmentation progressive de la profondeur du plancher océanique. Il s'agit d'une subsidence thermique.*

**Question 5b.** Quelle partie de la lithosphère océanique est affectée par la variation d'épaisseur ?

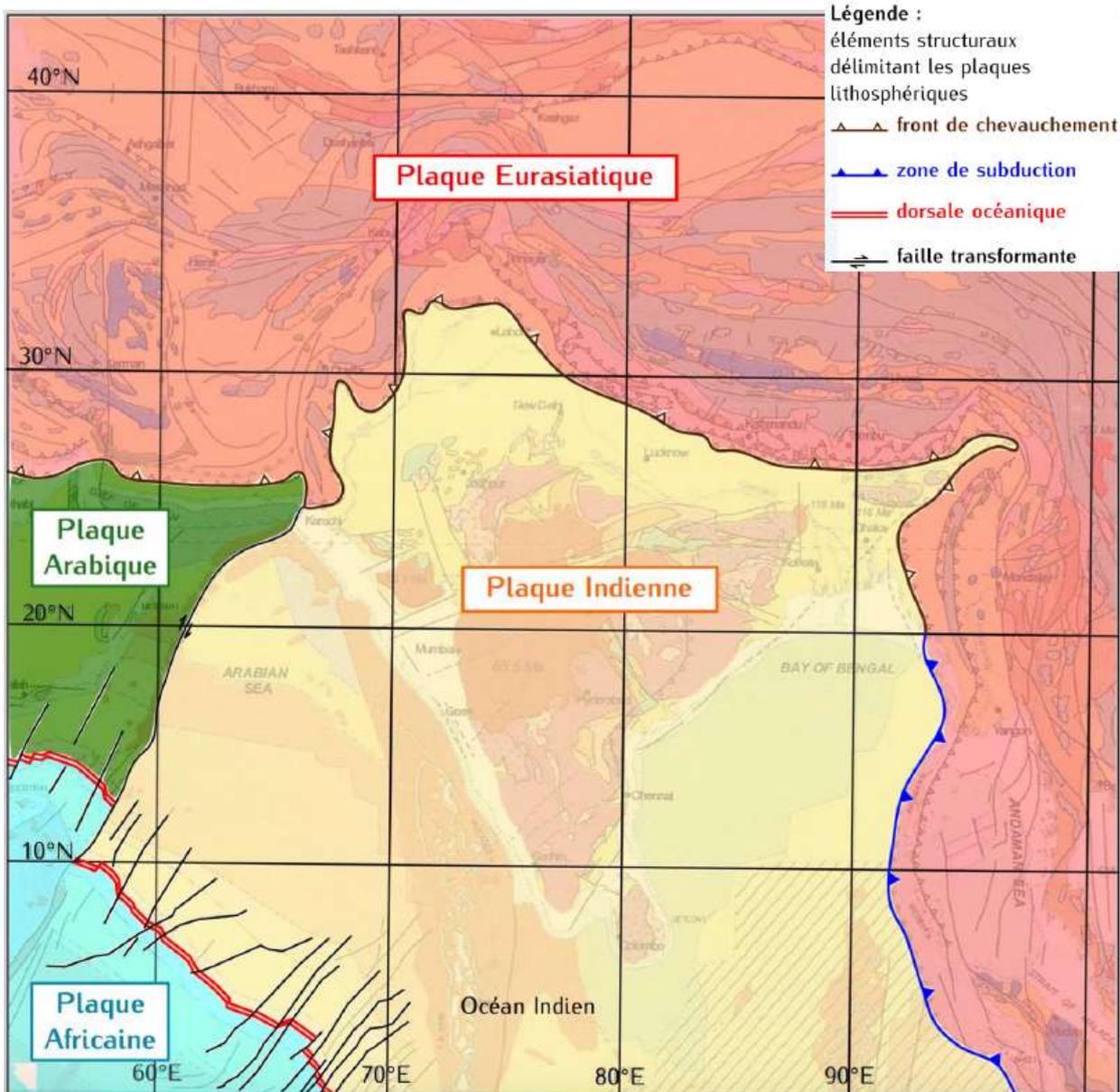
C'est le manteau lithosphérique dont l'épaisseur augmente par ajout d'une semelle de manteau asthénosphérique.

• **Le contexte général de la chaîne de montagne de l'Himalaya-Tibet**

**Question 1a. Définissez ce qu'est une plaque lithosphérique.**

Une plaque lithosphérique est une portion de lithosphère, elle est donc rigide et constituée de manteau lithosphérique et de croûte océanique (plaques océaniques) ou continentales (plaques continentales) ou les deux (plaques mixtes). Ses limites horizontales sont caractérisées par une concentration de l'activité géologique : nombreux séismes et volcans et déformations. En revanche il n'y a pas ou peu d'activité géologique au sein d'une plaque.

**Question 1b. Réalisez un schéma structural présentant la localisation des différentes plaques lithosphériques visibles sur la carte du document 1. Vous préciserez et justifierez les frontières de plaques représentées.**



**Schéma structural de la carte géologique du Monde centrée sur l'Inde, l'Himalaya et le Tibet avec localisation des plaques et identification de leurs limites.**

Les frontières de plaques correspondent aux zones où sont identifiés des mouvements relatifs entre plaques sur la carte du Monde : mouvements convergents matérialisés par les figurés de chevauchement correspondant à une collision si entre plaques continentales, à une subduction si entre une plaque océanique et une plaque continentale (ou entre deux plaques océaniques) ; symétrie des âges des fonds océaniques de part et d'autre des dorsales, qui sont d'autant plus âgés qu'ils sont éloignés de la dorsale ; faille transformante repérée par le décalage induit dans les différentes structures géologiques.

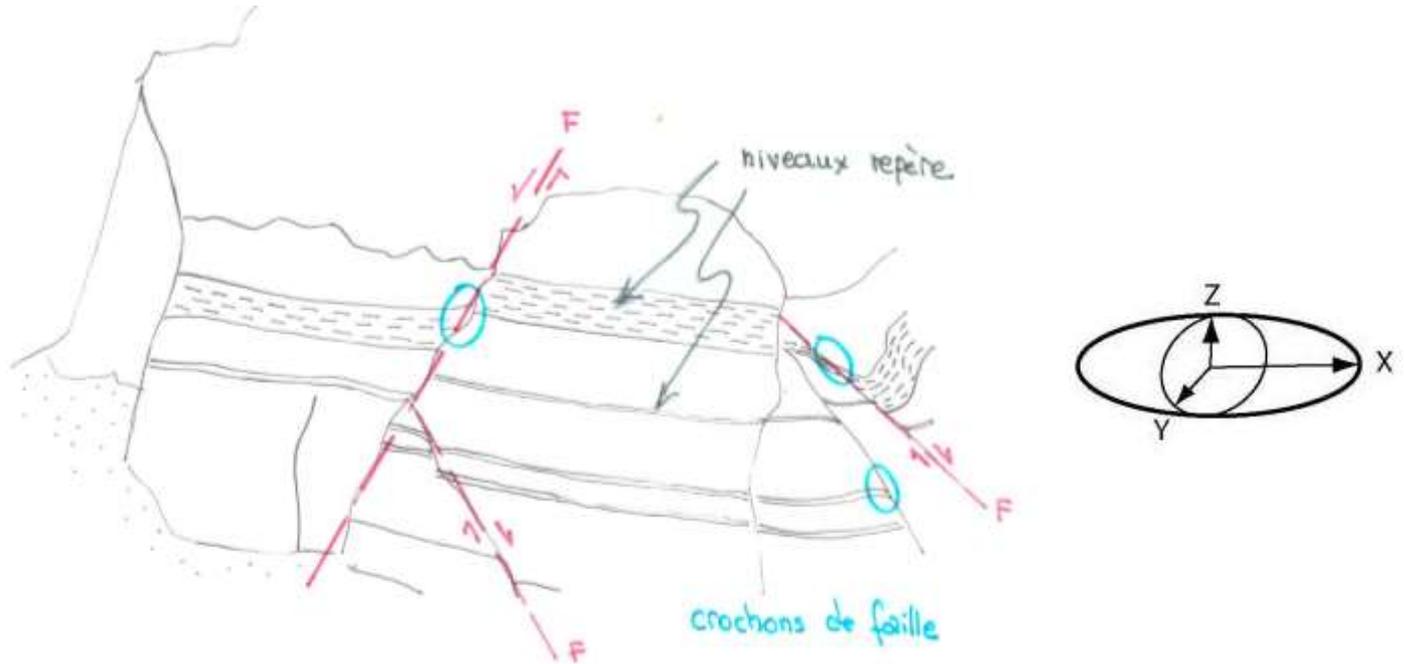
• **2. Structure de la chaîne himalayenne : analyse d'objets tectoniques**

**Question 2a. Nommez et caractérisez les déformations observées sur les documents 2a et 2b. Vous préciserez si ces déformations sont continues ou discontinues à l'échelle d'observation.**

Document 2a : plis couchés (plans axiaux horizontaux) isopaques (l'épaisseur des niveaux plissés semble constante). Il s'agit d'une déformation continue (à cette échelle) et hétérogène (des droites sont devenues des courbes).

Document 2b : failles normales conjuguées. Il s'agit d'une déformation discontinue.

**Question 2b.** Réalisez un schéma légendé de l'affleurement du document 2b et représentez à côté l'ellipsoïde des déformations fines.



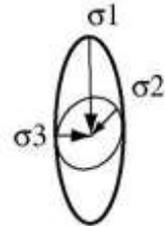
**Schéma interprétatif du document 2b (vue d'avion d'un affleurement) et ellipsoïde des déformations fines correspondant.**

**Question 2c.** Si cela est possible (vous le justifierez) représentez également l'ellipsoïde des contraintes.

Il s'agit d'une déformation discontinue, on peut donc déduire l'ellipsoïde des contraintes de l'ellipsoïde des déformations.

La contrainte maximale  $\sigma_1$  correspond à l'axe de raccourcissement maximal OZ.

La contrainte minimale  $\sigma_3$  correspond à l'axe d'allongement maximal OX.



• **Structure et dynamique actuelles de la chaîne himalayenne : données cartographiques et sismiques**

**Question 3.** A partir des informations issues de l'exploitation des documents 3a et 3b, précisez quelles sont les caractéristiques structurales de la chaîne himalayenne et proposez un contexte géodynamique de formation.

Les principaux traits structuraux de la chaîne himalayenne sont : la présence d'une zone de suture ophiolitique et de sédiments océaniques témoignant de l'existence d'un ancien océan refermé par subduction, la présence de nombreux chevauchements à vergence sud et un épaississement crustal vers le Nord (racine crustale : Moho à 80 km de profondeur).

On remarque que du Nord au Sud, les chevauchements sont de plus en plus jeunes. La chaîne s'est édifiée en différentes séquences du Nord vers le Sud.

Localisée à la limite entre la plaque indienne et la plaque eurasiatique, la chaîne himalayenne résulte d'un contexte de convergence entre plaques lithosphériques continentales. C'est une chaîne de collision.

**Question 4a.** Rappelez le principe de la tomographie sismique.

Rappels principes tomographie : comparaison entre la vitesse des ondes sismiques déterminées en tous points de leur trajet avec la vitesse prédite par le modèle PREM.

Une anomalie de vitesse positive (vitesse supérieure à celle attendue) est interprétée comme liée à un milieu plus rigide donc plus froid (anomalie thermique positive). Inversement, une anomalie de vitesse négative est interprétée comme une anomalie thermique positive.

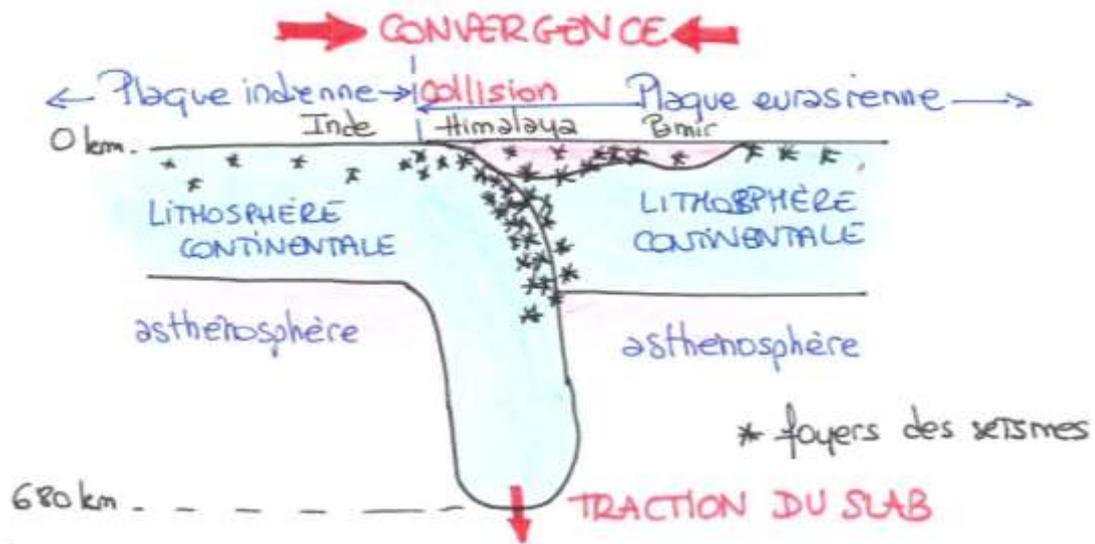
Attention ici de bien parler de rigidité/ductilité qui explique les variations de vitesse ! La masse volumique intervient aussi, mais rappelez-vous qu'elle est au dénominateur dans l'expression des vitesses.

**Question 4b.** Proposez un schéma d'interprétation du document 4.

En vous aidant de vos connaissances, proposez alors une hypothèse quant au moteur de l'édification de la chaîne himalayenne.

Schéma montrant :

- limites lithosphère continentales / asthénosphère, limite de plaques (nommées), localisation de l'anomalie de vitesse positive + répartition des séismes.
- Processus en jeu : convergence, collision, traction du slab



### Schéma d'interprétation du profil de tomographie sismique Nord-Sud au niveau de la chaîne himalayenne

Interprétation : anomalie de vitesse positive correspond à un panneau plongeant de lithosphère froide + répartition des foyers des séismes dessinant un plan de Wadati-Benioff → existence d'une subduction de lithosphère sous l'Himalaya. Il s'agit de lithosphère continentale : subduction continentale qui entraîne la collision en surface et la genèse de la chaîne himalayenne. Le moteur de l'édification de la chaîne est donc probablement la traction de ce panneau plongeant (slab pull).

#### **Question 5. Analysez les caractéristiques des vecteurs vitesse GPS représentés sur le document 5.**

**Que montrent ces données GPS sur l'accommodation (c'est-à-dire les modalités de dissipation des contraintes) de la convergence entre l'Inde et l'Asie ?**

**Ces données sont-elles en accord avec la définition d'une plaque lithosphérique donnée en question 1 ?**

Les vecteurs GPS localisés sur la plaque indienne sont orientés vers le NNE (30° N) avec une norme de 50 mm/an environ.

Les vecteurs localisés sur la plaque eurasiennne (grosso modo ceux qui sont au N de la latitude 30°) ont une norme plus faible, de l'ordre de 20 mm/an pour ceux localisés au niveau du Tibet et de 10 mm/an pour ceux au Nord du Tian Shan. De plus ils ne présentent pas tous la même orientation : vers le N pour ceux qui sont autour de 80° de longitude, vers l'ENE pour ceux situés les plus à l'Est de la carte.

Ces vecteurs localisés sur la plaque eurasiennne considérée comme fixe dans cette représentation indique des déplacements au sein de la plaque : des déformations.

Ces déformations sont également attestées par le fait que tous les vecteurs positionnés sur la plaque eurasiennne ne sont pas de même norme et de même direction : il y a donc des mouvements relatifs au sein de la plaque.

L'observation d'une norme des vecteurs GPS d'autant plus faible que la localisation est éloignée de l'Inde indique que tout le déplacement n'est pas transmis. On peut faire l'hypothèse que la remontée de l'Inde vers l'Asie est accommodée par la déformation de la plaque Eurasie / par l'extrusion vers l'Est du Tibet.

*Rq : on peut aussi utiliser la localisation des séismes indiquée sur la carte : pour localiser la zone de frontière entre les deux plaques, pour dire qu'une partie des déformations est cassante (séismes), mais pas seulement (cf plis observés préalablement).*

Ces constats montrent qu'il existe une déformation au sein de la plaque Eurasie, ce qui est en contradiction avec la définition d'une plaque lithosphérique censée être rigide.

### **Partie 3 : Gravimétrie et isostasie (durée conseillée 50 min)**

**Question 1. Ecrivez l'expression de l'anomalie de Bouguer et expliquez la signification de chacun de ses termes, puis interprétez les valeurs observées en Scandinavie (document 1).**

$$\Delta g_b = g_{\text{mesuré}} \pm \text{correction à l'air libre} \pm \text{correction de plateau} \pm \text{correction topographique} - g_0$$

L'anomalie de Bouguer résulte d'une confrontation entre la valeur de g mesurée en un point de latitude et d'altitude données, et celle calculée à la même latitude mais à l'altitude 0, sur l'ellipsoïde de référence (= de Clairault).

Au préalable, la valeur de g mesurée doit être successivement corrigée :

- des effets de l'altitude : correction à l'air libre,
- des effets des masses situées entre le point de mesure et l'ellipsoïde de Clairault : correction de plateau,
- des effets des reliefs voisins : correction topographique.

Une fois ces corrections effectuées, la différence entre « g mesurée corrigée » et « g calculée » est appelée anomalie de Bouguer.

Une anomalie de Bouguer positive signale un « excès » de masse (sous-entendu, excès par rapport à la Terre de référence, qui correspond au modèle PREM), c'est-à-dire des matériaux de masse volumique supérieure à ce que prédit PREM.

Inversement en ce qui concerne les anomalies négatives.

La carte 1b de l'anomalie de Bouguer en Scandinavie montre des valeurs négatives (-30 à -130 mgal) au niveau des reliefs montagneux indiqués par la carte topographique 1a : il existe un déficit de masse, que l'on peut interpréter comme la présence d'une racine crustale sous ces reliefs (la croûte, moins dense que le manteau, occupe un volume « normalement » occupé par du manteau).

**Question 2. Expliquer comment on utilise les données du document 2a pour déterminer les anomalies isostatiques puis interpréter les anomalies constatées en Scandinavie (document 2b).**

La profondeur du Moho indique la base de la croûte.

Sur la carte 2a sont indiquées :

- la profondeur du Moho déduite du modèle d'Airy selon lequel un relief est compensé en profondeur par une racine crustale comme indiqué plus haut,
- et le Moho sismique repéré grâce à la technique de sismique réflexion.

On constate que les données ne coïncident pas bien, le Moho sismique apparaît plus profond que le Moho calculé, en particulier au niveau du Golfe de Bothnie. La base de la croûte étant plus profonde qu'attendu, on peut en déduire que l'équilibre isostatique n'est pas réalisé.

La prise en compte du Moho calculé avec le modèle d'Airy permet de calculer une correction isostatique – qui prend en compte le déficit de masse lié à l'épaisseur anormalement importante de la croûte – qui permet de corriger l'anomalie de Bouguer. La valeur obtenue constitue alors l'anomalie isostatique. Si sa valeur diffère de zéro, cela signifie que l'équilibre isostatique n'est pas réalisé, comme le suggèrent les données du document 2a.

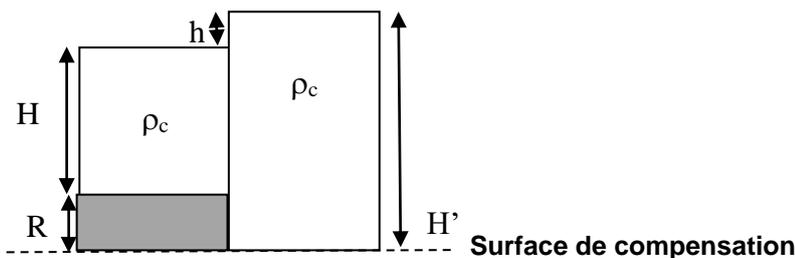
La carte 2b des anomalies isostatiques montre des anomalies négatives fortes, en particulier au niveau du Golfe de Bothnie : l'équilibre isostatique n'est pas réalisé dans ces zones, et son signe négatif indique que la région, encore en cours de rééquilibrage, se soulève.

Cela peut être mis en relation avec la disparition de la calotte glaciaire depuis 8000 ans : une surcharge a disparu, qui enfonçait la lithosphère dans l'asthénosphère. Depuis, la lithosphère est en rééquilibrage isostatique et se soulève.

**Question 3. Calculez la position attendue du Moho à Briançon, ville située à 1 326 m d'altitude, en supposant que cette portion de lithosphère est à l'équilibre, et que la croûte continentale possède une densité homogène.**

Soit h l'altitude du secteur de Briançon et H' l'épaisseur totale de la croûte continentale à ce niveau.

On peut représenter la situation de Briançon comme suit, en comparaison avec une croûte continentale « moyenne » d'altitude 0 et d'épaisseur H : si la croûte continentale est à l'équilibre, l'altitude h est compensée par l'existence d'une racine d'épaisseur R, dont il faut calculer la valeur.



Attention : la surface de compensation correspond au Moho seulement pour la colonne de droite.

A l'équilibre isostatique sur la surface de compensation : P1 (colonne de gauche) = P2 (colonne de droite)

Avec :

$$P1 = \rho_c \cdot g \cdot H + \rho_m \cdot g \cdot R$$

$$P2 = \rho_c \cdot g \cdot (h + H + R)$$

D'où :

$$\rho_c \cdot H + \rho_m \cdot R = \rho_c \cdot H' = \rho_c \cdot (h + H + R)$$

Vous pouvez aussi calculer directement H' en remplaçant dans l'expression de P1 R par (H'-H), mais inconvenient ici car l'expression de R vous sera utile pour la question 5...

$$R (\rho_m - \rho_c) = h \cdot \rho_c$$

$$R = h \cdot \rho_c / (\rho_m - \rho_c)$$

A.N. :  $R = 1\,326 \times 2,7 / (3,3 - 2,7) = 5\,967 \text{ m}$

La profondeur du Moho devrait donc être égale à  $h + H + R = 1\,326 + 30\,000 + 5\,967 = 37\,293 \text{ m}$  soit un peu moins de 40 km.

**Question 4. En utilisant les informations fournies par le document 3 :**

- a. Indiquez si la valeur utilisée pour la masse volumique de la croûte continentale dans le calcul précédent est plausible.
- b. Confrontez la position du Moho calculée précédemment à celle proposée dans le modèle.

a. On a utilisé une valeur de masse volumique égale à  $2,7 \text{ kg.m}^{-3}$  pour la croûte continentale et supposé que sa masse volumique était homogène.

- au vu du document 3b, les masses volumiques crustales ne sont pas homogènes mais augmentent avec la profondeur,
- à l'aplomb de Briançon, environ  $\frac{3}{4}$  de la croûte présente une masse volumique de  $2,75$  et le quart restant de  $2,9 \text{ kg.m}^{-3}$ .

On a sans doute sous-estimé la valeur de cette masse volumique dans notre calcul.

b. Le document 3b montre une profondeur du Moho de l'ordre de  $50 \text{ km}$  dans le secteur de Briançon. La différence du résultat calculé peut s'expliquer par sous-estimation de la masse volumique de la croûte dans notre calcul.

Puisque  $R = h \cdot \rho_c / (\rho_m - \rho_c)$  si  $\rho_c$  est plus élevée, alors la valeur de  $R$  est plus élevée.

**Question 5. En supposant que seule l'érosion intervient (et non des processus tectoniques), calculer en combien de temps le secteur de Briançon atteindra  $500 \text{ m}$  d'altitude.**

*Il faut en revanche prendre en compte le réajustement isostatique et donc la racine crustale dans les calculs.*

Si l'altitude est égale à  $500 \text{ m}$ , la racine a une épaisseur  $R = h \cdot \rho_c / (\rho_m - \rho_c)$  soit  $R = 2\,250 \text{ m}$ .

*Gagner du temps en reprenant la formule établie à la question 3 !*

La nouvelle épaisseur de croûte sera égale à  $h + H + R = 500 + 30\,000 + 2\,250 = 32\,750 \text{ m}$

L'érosion aura donc dû dégager une hauteur de  $37\,293 - 32\,750 = 4\,543 \text{ m}$  de matériaux rocheux.

A raison de  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ km/an}$ , le secteur atteindra l'altitude de  $500 \text{ m}$  en :  $4\,543 \cdot 10^{-3} / (0,5 \cdot 10^{-6}) = 9,086$  millions d'années.