

Devoir surveillé n°4

Samedi 5 janvier 2026

Épreuve d'analyse de documents de géologie

Exercice 1 – L'Himalaya – Tibet, une zone de déformations

1. L'HIMALAYA-TIBET, UNE FRONTIÈRE DE PLAQUES

Question 1 – Définissez une plaque lithosphérique. Détaillez l'ensemble des caractéristiques de l'enveloppe terrestre appelée « la lithosphère ».

Une plaque lithosphérique est une portion de lithosphère délimitée par des zones d'activité géologique intense liée à des mouvements de convergence, divergence ou coulissage. Elle est mobile sur la LVZ. Le cœur de la plaque présente peu d'activité géologique (éventuellement un point chaud).

La lithosphère est l'enveloppe rigide la plus superficielle de la Terre : elle comprend la croûte et la partie supérieure du manteau jusqu'à l'isotherme 1 300°C. Cela représente environ 100 km d'épaisseur. Le gradient géothermique y est très élevé. Elle repose sur l'asthénosphère plus ductile.

Question 2 – En utilisant les figures 1a et 1b, justifiez le fait que le domaine Himalaya–Tibet constitue une frontière de plaques entre une plaque « Inde » et une plaque « Eurasie » (représentée par la Mongolie sur la figure 1b).

Figure 1a : Le domaine Himalaya – Tibet montre de très nombreux séismes (forte activité géologique) et un relief important > 3 000 m, qui correspond à une zone de déformation.

Figure 1b : L'Inde et l'Eurasie se déplacent à des vitesse différentes : il y a donc une zone de discontinuité entre les deux.

Question 3 – Quel est le mouvement relatif de la plaque Inde par rapport à la plaque Eurasie dans cette région (figure 1b) ? Donnez les caractéristiques (direction et norme) de ce mouvement relatif.

L'Inde converge vers l'Eurasie avec une vitesse relative d'environ 45 à 50 mm.a⁻¹. Son déplacement est en direction du NNE.

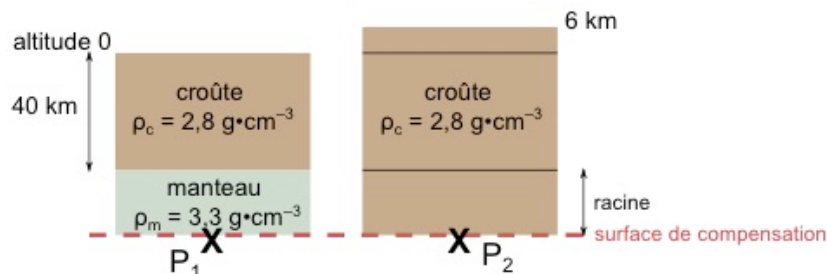
2. L'ÉQUILIBRE ISOSTATIQUE EN HIMALAYA-TIBET

Question 4 – Énoncez le principe d'isostasie.

Il existe en profondeur une surface de compensation sur laquelle les pressions lithostatiques exercées par la colonne de roches sus-jacente sont égales en tout point.

Question 5 – En supposant la région de l'Himalaya-Tibet à l'équilibre isostatique, et en considérant une altitude moyenne de 6 000 mètres, déterminez la profondeur du Moho sous cette région (schéma attendu).

Données de masses volumiques : $\rho_c = 2,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ pour la croûte continentale et $\rho_m = 3,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ pour le manteau lithosphérique. La croûte choisie comme référence est celle du continent indien, d'épaisseur 40 km.



D'après Airy, si l'équilibre isostatique est atteint, alors $P_1 = P_2$. Étant donné que les 40 km de croûte sont communs aux deux systèmes, alors cela signifie que la pression exercée par une colonne R de manteau est équivalente à une colonne de R+6 de croûte.

Donc si on simplifie par g, on obtient : $R \times \rho_m = (R+6) \times \rho_c$

Donc $R = \rho_c / (\rho_m - \rho_c) \times 6 = 2,8 \times 6 / 0,5 = 5,6 \times 6 = 33,6 \text{ km}$.

La profondeur du Moho est donc de 73,6 km (sous l'altitude 0).

Question 6 – Quel est le pourcentage d'épaississement de la croûte continentale dans l'ensemble Himalaya – Tibet et comment se répartit-il ?

La croûte continentale de l'Inde est de 40 km et celle de l'Himalaya de 79,6 km, soit un doublement : épaississement + 100 %.

Pour un relief de 6 km, il y a une racine de 33,6 km donc la répartition est d'environ 15 % en surface (relief) et 85 % en profondeur (racine).

Question 7 – La figure 3 montre la profondeur estimée du Moho sous l'Himalaya – Tibet, obtenue grâce à des méthodes sismologiques. Comparez avec le résultat obtenu à la question 5. Qu'en concluez-vous ?

- la figure propose un Moho positionné vers 75 km de profondeur. C'est le même ordre de grandeur que le résultat du calcul d'équilibre isostatique.

- on en conclut que l'ensemble Himalaya-Tibet est globalement à l'équilibre isostatique

Question 8 – Qu'est-ce qu'une anomalie gravimétrique de Bouguer ? Comment est-elle calculée ? Quelle est la signification de son signe ?

L'anomalie de Bouguer est l'écart entre la valeur de l'attraction gravitationnelle g_0 (qui sert de référence, sur l'ellipsoïde de référence) et la valeur de l'attraction gravitationnelle mesurée g_m qui a été corrigée des effets du relief.

$$\text{anomalie} = g_m \text{ corrigée} - g_0$$

Calcul de l'anomalie :

On mesure la valeur de g en un lieu donné (g_m). Cette valeur est corrigée de l'altitude du lieu de mesure (correction à l'air libre) et de l'effet de la masse de roches constituant le relief (corrections de plateau et de terrain). L'ensemble de ces corrections constitue la correction de Bouguer.

puis calcul : anomalie = g_m corrigée – g_0

Interprétation de l'anomalie :

Si elle est négative, il existe en profondeur un volume anormalement peu dense (et inversement)

Question 9 – Comparez l'anomalie mesurée et l'anomalie modélisée via un modèle d'Airy (Fig. 4) et interprétez vos observations.

On voit que l'anomalie de Bouguer calculée est superposable à l'anomalie mesurée au niveau de la plaine du Gange et au niveau du Tibet. On en conclut que ces zones sont à l'équilibre isostatique dont rend bien compte le modèle d'Airy (ce qui est cohérent avec la réponse 7).

Dans l'Himalaya, on voit que les courbes ne sont pas superposées, donc l'équilibre isostatique local de type Airy ne permet pas de rendre compte de la situation naturelle.

Au sud du front himalayen et dans les parties méridionales de l'Himalaya, on observe un déficit de masse par rapport au modèle d'Airy. Inversement et de manière quasi symétrique, on observe dans le nord de l'Himalaya un excès de masse par rapport au modèle d'Airy. La compensation isostatique se fait donc de manière régionale (et non locale) en Himalaya, avec une flexuration de la lithosphère indienne sous le poids de la chaîne, contrôlée par la rigidité de cette lithosphère.

Exercice 2 – La zone Pacifique des Tonga–Kermadec

Question 1 – Estimer la longueur du bassin de Lau (selon l'axe Nord–Sud).

Le bassin représente environ 10° de latitude soit $10 \times 111 \text{ km} = 1\,110 \text{ km}$.

Question 2 – Utilisez les figures 1 et 2 pour identifier le contexte géologique : au moins 4 arguments sont demandés. Précisez le mouvement relatif des deux plaques mises en jeu.

Le contexte est une zone de subduction = zone de convergence pour laquelle la plaque Pacifique s'enfonce sous la plaque australienne.

Arguments =

- fosse profonde à la suture, côté plaque Pacifique
- îles volcaniques alignées selon l'axe N–S
- forte activité sismique
- foyers sismiques alignés selon un plan (plan de Wadati–Benioff)

Question 3 – Expliquez l'anomalie de Bouguer observée au niveau de la plaque Pacifique.

L'anomalie de Bouguer est positive et monte à + 470 mgal. Cela témoigne d'un excès de masse par rapport au modèle de référence. Cet excès de masse est dû à un manteau peu profond en domaine océanique : la croûte ne représente que 6 à 10 km d'épaisseur et le manteau, plus dense, est juste en dessous.

Question 4 – Proposez une explication à l'anomalie positive du bassin de Lau.

Le bassin de Lau présente une anomalie positive, que l'on peut interpréter comme un amincissement crustal et une remontée du manteau. La présence d'un matériau plus dense est aussi possible.

Le document 4 apporte 2 types d'informations.

Question 5 – En quoi le flux géothermique moyen mesuré dans le bassin de Lau vient-il confirmer votre hypothèse formulée à la question 4 ? Pour rappel, le flux géothermique moyen sur Terre vaut $80 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$.

Le flux géothermique dans le bassin de Lau est quasiment le double du flux moyen terrestre. Cette chaleur excédentaire pourrait venir de la remontée de manteau chaud : cela confirme l'idée d'un amincissement crustal avec remontée de manteau.

Question 6 – Estimer l'angle de pendage du slab dans la région des Tonga.

Les échelles horizontales et verticales sont données : le slab descend d'environ 400 km verticalement pour une distance horizontale de 400 km : l'angle est donc d'environ 45°.

Question 7 – À l'aide d'arguments rigoureux tirés des figures 3, 4 et 5, précisez le régime compressif ou extensif du contexte géologique régional.

Le bassin de Lau présente :

- une dépression au niveau du fond océanique, visible au niveau de la bathymétrie, encadrée par deux zones moins profondes
- une remontée mantellique

Ces deux arguments témoignent d'un contexte en extension.

De plus, les balises GPS montrent un déplacement de la marge, côté plaque chevauchante, qui s'éloigne du continent et se déplace vers la plaque Pacifique, à une vitesse entre 8 et 16 $\text{cm} \cdot \text{an}^{-1}$.

Enfin, l'angle de plongement de la plaque Pacifique est élevé.

Tout ceci concorde avec un système de subduction en extension.

Question 8 – Nommez la structure géologique du bassin de Lau.

La zone pourrait être un bassin d'arrière-arc présentant un rift passif en formation (bonus).

Exercice 3 – Les Montagnes Rocheuses de l'Ouest américain

Question 1 – Rappelez en une phrase ce qu'est le Moho. Comment peut-on interpréter les valeurs de la profondeur du Moho au niveau de la région des Montagnes Rocheuses où l'altitude est de 3 km ?

Le Moho est la discontinuité qui sépare la croûte (continentale ou océanique) du manteau.

Dans la zone où les Montagnes Rocheuses atteignent 3 km d'altitude, la profondeur de Moho est d'environ 40 à 45 km, alors qu'elle est aux alentours de 30 km plus à l'Est, dans la plaine (sans relief).

Cela signifie donc que la croûte continentale est épaissie au niveau de ce relief : elle a une épaisseur de 40 à 45 km (contre 30 km en général) = présence d'une racine crustale qui compense en profondeur l'excès de masse dû au relief.

Question 2 – Cette région est-elle à l'équilibre isostatique au niveau du Moho ? Vous justifierez votre réponse avec un petit calcul d'équilibre isostatique et un schéma explicatif.

Pour les calculs on prendra : masse volumique de la croûte continentale $\rho_c = 2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, masse volumique du manteau lithosphérique $\rho_m = 3,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Si la chaîne était en équilibre isostatique, on aurait $P_1 = P_2$ soit $\rho_c \cdot e_c \cdot g + \rho_m \cdot r \cdot g = (l + e_c + r) \cdot \rho_c \cdot g$

On commence par calculer l'épaisseur de la racine crustale r :

$$\rho_c \cdot e_c + \rho_m \cdot r = (l + e_c + r) \cdot \rho_c \quad \text{soit} \quad r \cdot (\rho_m - \rho_c) = l \cdot \rho_c \quad \text{donc} \quad r = l \cdot \rho_c / (\rho_m - \rho_c)$$

$$\text{A.N : } r = 13,5 \text{ km.}$$

Depuis l'altitude 0, la profondeur du Moho serait donc de $e_c + r = 43,5 \text{ km}$, ce qui correspond à la valeur observée sur la figure. La région est donc bien à l'équilibre isostatique au niveau du Moho.

Question 3 – Calculez l'épaisseur de roche qui aura été enlevée par l'érosion lorsque l'altitude de la chaîne aura diminué de 1 000 m.

Si l'altitude de la chaîne diminue de 1 000 m, elle passe donc de $l = 3 \text{ km}$ à $l' = 2 \text{ km}$.

On utilise l'équation établie dans la question 2 pour calculer la nouvelle épaisseur de la racine crustale :

$$r' = l' \cdot \rho_c / (\rho_m - \rho_c) \quad \text{A.N : } r = 9 \text{ km.}$$

La croûte a donc perdu une épaisseur de $l - l' = 1 \text{ km}$ mais aussi $r' - r = 4,5 \text{ km}$, soit un total de 5,5 km.

Exercice 4 – L'Alaska et l'Islande sous la glace

A. Le soulèvement de l'Alaska

Question 1 – Décrivez l'évolution de l'altitude de l'Alaska enregistré par les données GPS et modélisé dans le document 2. Proposez une explication possible à cette observation.

Le document 2 montre que le sud de l'Alaska s'est soulevé au cours de la 2^{ème} moitié du 20^{ème} siècle, et que ce soulèvement est particulièrement important (jusqu'à $25 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$) au cœur de la zone.

On peut faire l'hypothèse ce soulèvement a pour origine la fonte des glaces qui recouvrent l'Alaska.

Cette fonte entraîne en effet un allègement de la lithosphère, qui se retrouve alors en déséquilibre isostatique (elle s'était enfoncée sur l'asthénosphère lors de l'accumulation de la glace). L'équilibre va être rétabli grâce à un soulèvement vertical de la lithosphère. La glace fond plus rapidement que le déplacement du manteau asthénosphérique.

Question 2 – Expliquez ce qu'est le géoïde et comment on le construit.

Le géoïde est la surface équipotentielle de pesanteur qui passe par le niveau zéro des mers.

En domaine océanique, le géoïde coïncide avec la surface d'équilibre de la mer en l'absence de courants et de vents.

Le géoïde marin est établi par altimétrie satellitaire : on mesure l'altitude de la surface des océans par rapport à la surface de l'ellipsoïde de référence. Le géoïde continental est construit grâce à des mesures satellitaires du vecteur g .

Question 3 – Décrivez la variation de hauteur du géoïde dans cette région d'Alaska. Expliquez cette évolution. Pourquoi les chercheurs doivent-ils tenir compte de la viscosité de l'asthénosphère dans leur modèle ?

Le document 3 montre que la surface du géoïde s'est enfoncée de 1 à 4 mm·an⁻¹ dans le sud de l'Alaska, au cours de la 2^{ème} moitié du 20^{ème} siècle.

La forme du géoïde dépend de la répartition des masses sous la surface : un excès de masse par rapport à ce que décrit le modèle PREM se manifeste par une « bosse » du géoïde = la surface du géoïde est plus élevée que celle de l'ellipsoïde de référence. À l'inverse, un déficit de masse par rapport à ce que décrit le modèle PREM se manifeste par un « creux » du géoïde = la surface du géoïde est plus basse que celle de l'ellipsoïde de référence.

L'enfoncement du géoïde traduit donc une diminution de masse dans cette région.

La fonte entraîne l'allègement de la lithosphère (et donc une diminution de la hauteur du géoïde) : l'équilibre est rétabli grâce à un soulèvement vertical de la lithosphère.

Ce soulèvement se fait à une vitesse très lente (plus lente que la fonte des glaces), qui dépend de la viscosité de l'asthénosphère. Cette viscosité est en effet très élevée, ce qui ne permet pas un retour rapide de l'asthénosphère à son état initial (avant l'accumulation de glace). Il faut donc tenir compte de ce paramètre pour modéliser le soulèvement de la lithosphère lors d'un réajustement isostatique.

B. La déglaciation de l'Islande

Question 4 – Établir une corrélation entre les graphiques A et B. Proposez alors deux hypothèses reliant volume de glace et volcanisme.

On remarque que les périodes de forte déglaciation correspondent aux périodes de forte activité volcanique. Alors que les périodes sans fonte des glaces sont en adéquation avec les périodes à faible apport magmatique.

Deux hypothèses :

- soit l'activité volcanique dégage du CO₂ qui réchauffe le climat et fait fondre les glaciers ;
- soit la fonte des glaces favorise l'activité volcanique.

Question 5 – Proposez une hypothèse expliquant l'influence du climat sur l'activité volcanique. Vous accompagnerez votre modèle d'un schéma clair et rigoureux.

Il est possible d'envisager que la fonte de la glace allège la lithosphère et donc fait remonter de l'asthénosphère qui compense la masse déficitaire. Cette remontée de manteau chaud est alors assimilée à une remontée par décompression adiabatique induisant le passage du solidus et favorisant ainsi la fusion mantellique.

