

**ÉPREUVE ÉCRITE 1 — GÉOLOGIE STRUCTURALE, GÉODYNAMIQUE ET SYSTÈMES TERRESTRES**

***Himalaya vs Apennins : deux façons de construire une chaîne de montagnes***

**Temps : 100 minutes • Questions : 42 • Score : 42 points • Lire toutes les données avant de répondre. Une seule réponse correcte par question.**

Les chaînes de montagnes peuvent résulter de la convergence et de la collision des plaques lithosphériques. Nous comparons deux chaînes représentant différentes étapes de ce processus : l'Himalaya, l'archétype d'une collision continent-continent, et les Apennins du Nord, une chaîne collisionnelle en cours de démantèlement avec l'ouverture d'un bassin d'arrière-arc (la mer Tyrrhénienne). La structure profonde des Apennins du Nord est encore à l'étude. Les interprétations géodynamiques adoptées ici reflètent le modèle actuellement prédominant : une subduction vers l'ouest de la lithosphère adriatique, principalement continentale, sous les Apennins du Nord, dont la géométrie en profondeur reste débattue. Les indices d'une plaque plongeante profonde — sismicité et anomalies tomographiques jusqu'à ~300-500 km — se rapportent aux Apennins du Sud et à la Calabre (plaque ionienne).

**SECTION A : HISTOIRE GÉOLOGIQUE ET GÉODYNAMIQUE — Questions 1–8**

**Tableau 1 : données clés des deux chaînes de montagnes**

|  <b>HIMALAYA</b> |  <b>APENNINS DU NORD</b>                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| • Collision Inde-Eurasie : débute ~50-55 Ma                                                       | • Collision des plaques européenne-adriatique : débute ~20-27 Ma                                                                                                                                   |
| • Convergence actuelle : ~4-5 cm/an                                                               | • Convergence actuelle : ~1-2 cm/an                                                                                                                                                                |
| • Épaisseur de la croûte (profondeur maximale du Moho) : ~70-80 km                                | • Épaisseur de la croûte (profondeur maximale du Moho) : ~35-45 km (région des Marches) ; ~20-25 km (mer Tyrrhénienne)                                                                             |
| • Épaississement crustal : ~2× la normale (doublé)                                                | • Épaississement crustal : ~1-1,2× la normale / aminci sous la mer Tyrrhénienne                                                                                                                    |
| • Altitude : ~4000-5000 m                                                                         | • Altitude : ~500-1500 m                                                                                                                                                                           |
| • Sismicité : 0-80 km (superficielle)                                                             | • Sismicité : faible et très superficielle (10-20 km) dans le secteur tyrrhénien, épisodique et légèrement plus profonde (15-35 km jusqu'à de rares 60-70 km (ou plus)) dans le secteur adriatique |
| • Pas de volcanisme actif                                                                         | • Volcanisme de l'arc tyrrhénien                                                                                                                                                                   |
| • Anomalie gravimétrique : fortement négative                                                     | • Anomalie gravimétrique : négative (chaîne) / positive (mer Tyrrhénienne)                                                                                                                         |
| • Vitesse horizontale : ~40-50 mm/an (N-NE)                                                       | • Vitesse horizontale : ~2,5 mm/an (N-NE)                                                                                                                                                          |

Diagram of the main tectonic units that make up the Himalayan chain

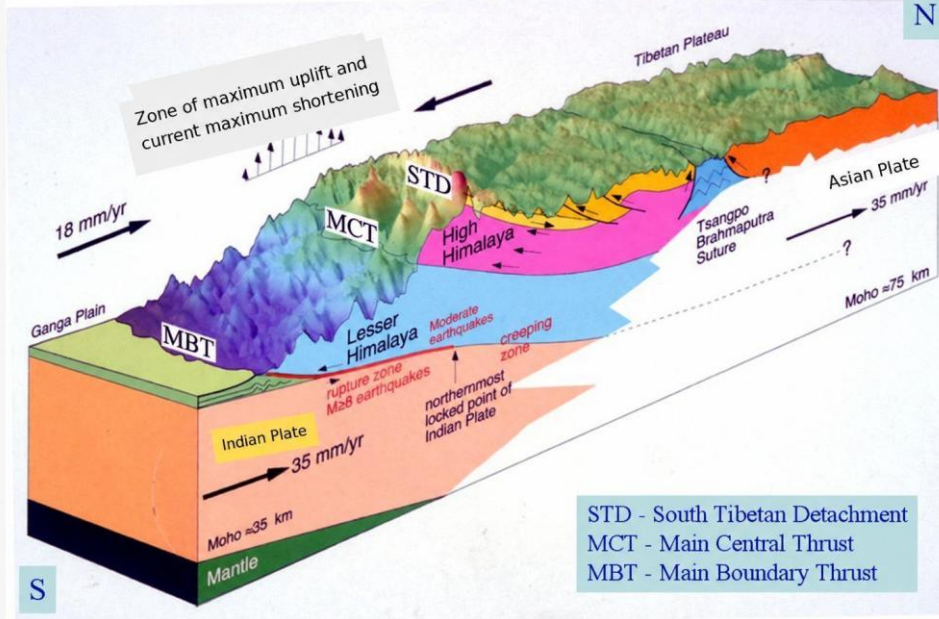


Figure 1 Diagramme tectonique de l'Himalaya

Zone of maximum uplift and current shortening = Zone de soulèvement maximal et de raccourcissement actuel

STD = Détachement Sud-Tibétain ;

MCT = Chevauchement central principal ;

MBT = Chevauchement bordier principal ;

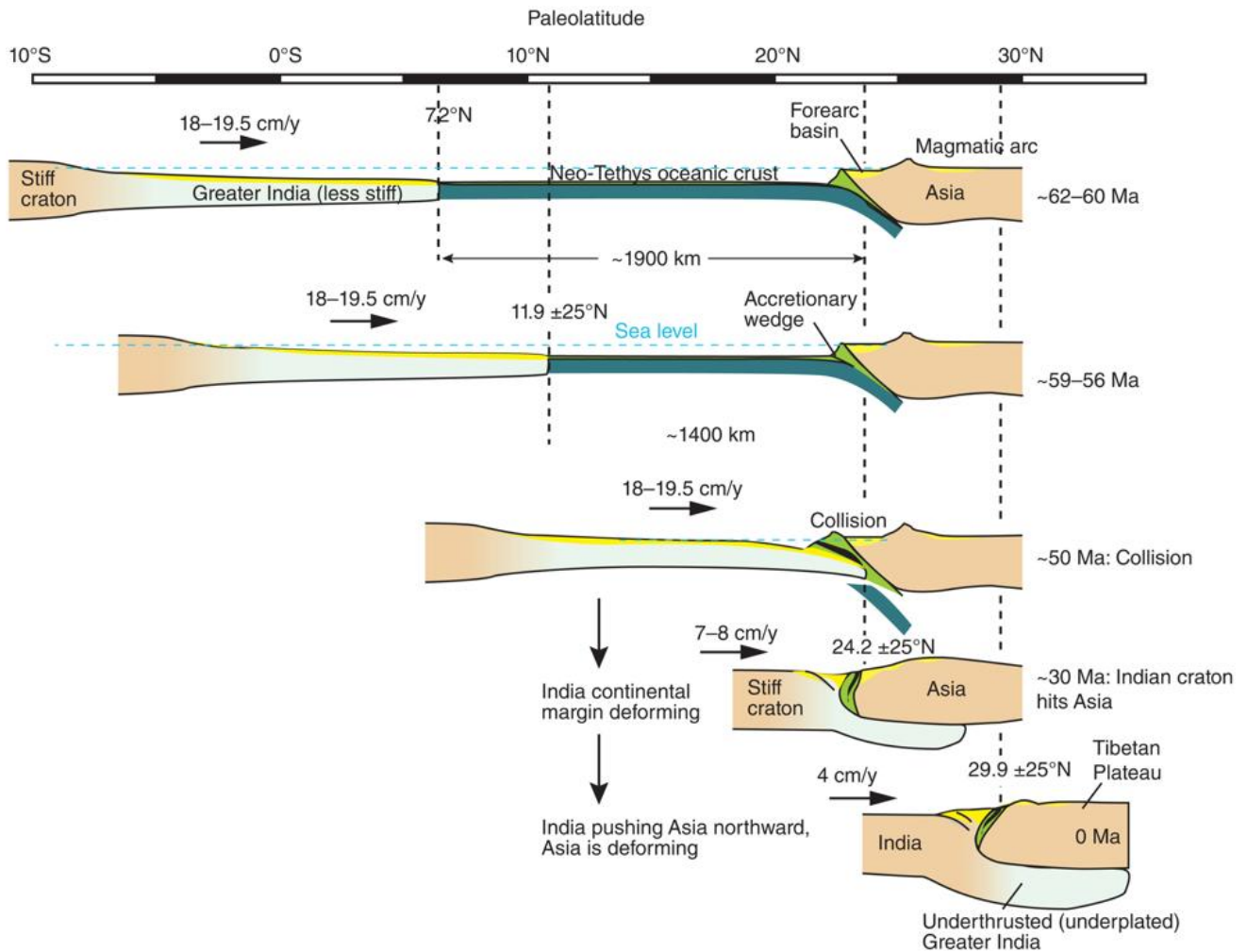


Figure 2 - Schéma évolutif de la chaîne himalayenne

Stiff craton = Craton rigide ; Forearc basin = bassin d'avant-arc ; Accretionary wedge = Prisme d'accrétion ; India continental margin deforming = Déformation de la marge continentale indienne ; India pushing Asia northward Asia is deforming = L'Inde repousse l'Asie vers le nord ; l'Asie se déforme ; Underthrust (underplated) Greater India = Grande Inde chevauchée (sous-plaquée).

**Question 1.** L'orogénèse himalayenne a commencé il y a environ 50-55 Ma. En observant le schéma tectonique (Fig. 1 et 2), quel a été le principal facteur déclencheur ?

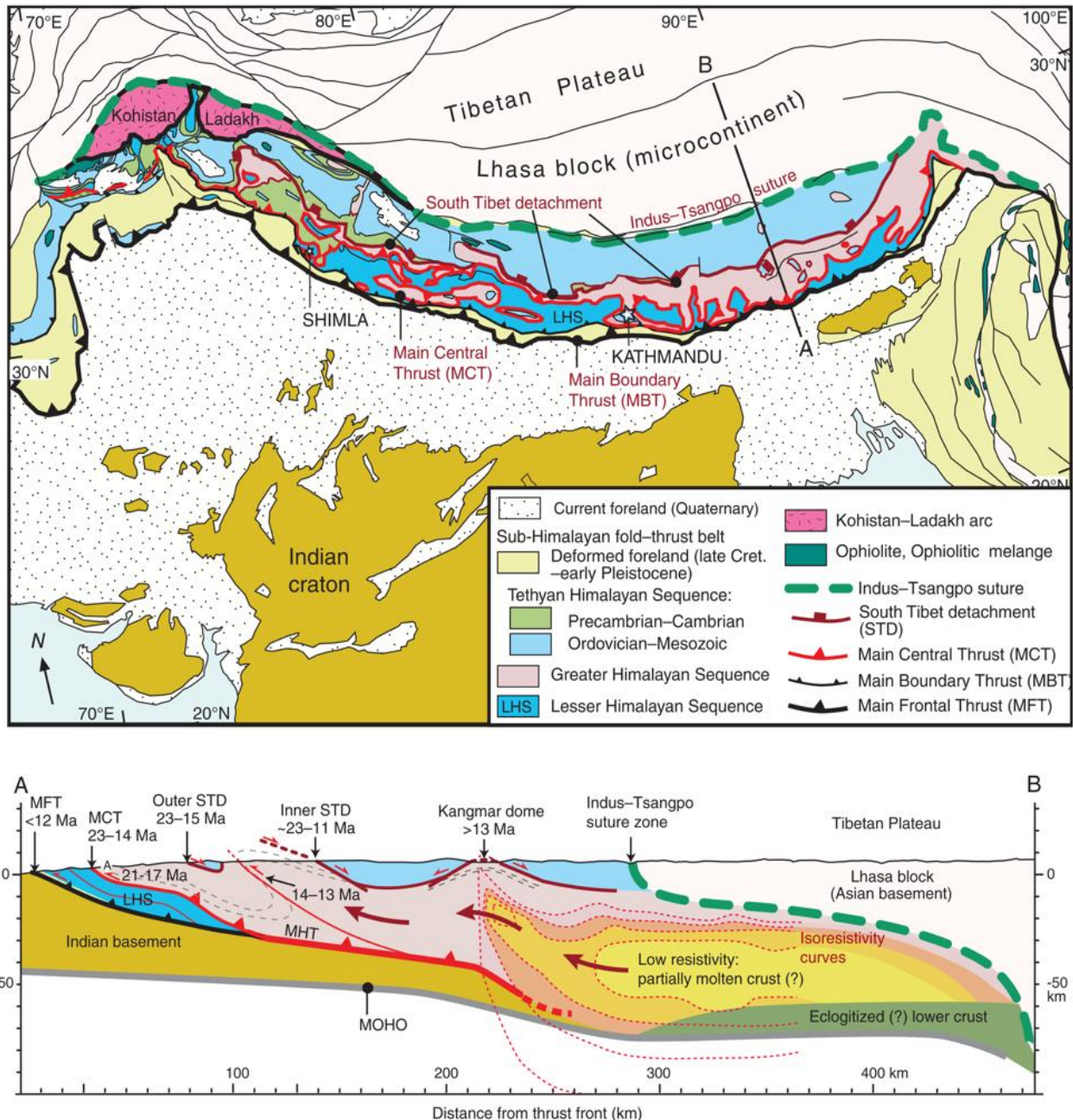
- A) La fusion du manteau sous la Téthys, qui a produit un arc volcanique qui s'est ensuite effondré pour former les montagnes.
- B) Le rifting de l'Inde par rapport à l'Afrique qui, se produisant brutalement, a généré une onde sismique capable de soulever la croûte eurasiennne.
- C) La fermeture de l'océan Téthys et la collision qui en a résulté entre les plaques indienne et eurasiennne.
- D) L'ouverture de l'océan Atlantique qui, en réorganisant les courants mantelliques, a poussé l'Inde vers le nord.

**Question 2.** L'Inde converge vers l'Eurasie à ~4-5 cm/an. Approximativement, quelle convergence totale s'est produite au cours des 50 derniers millions d'années ?

- A) ~2,0 - 2,5 km
- B) ~20 - 25 km
- C) ~200 - 250 km
- D) ~2000 - 2500 km

**Question 3.** Le chevauchement central principal (MCT), visible sur les figures 1 et 2, est une faille majeure particulièrement active entre 25 et 20 Ma. Quelle est la définition correcte ?

- A) Une faille inverse qui place des roches métamorphiques de haut grade (Haut Himalaya) au-dessus de roches de grade inférieur (Himalaya inférieur).
- B) Une faille normale formée lors de l'effondrement gravitaire du plateau tibétain.
- C) La limite initiale de la collision Inde-Eurasie, où se trouvent les ophiolites de l'ancienne Téthys.
- D) Le chevauchement le plus frontal et le plus récent, aujourd'hui actif dans la plaine Indo-Gangétique.



**Figure 3 — Carte et coupe géologique de la chaîne himalayenne**

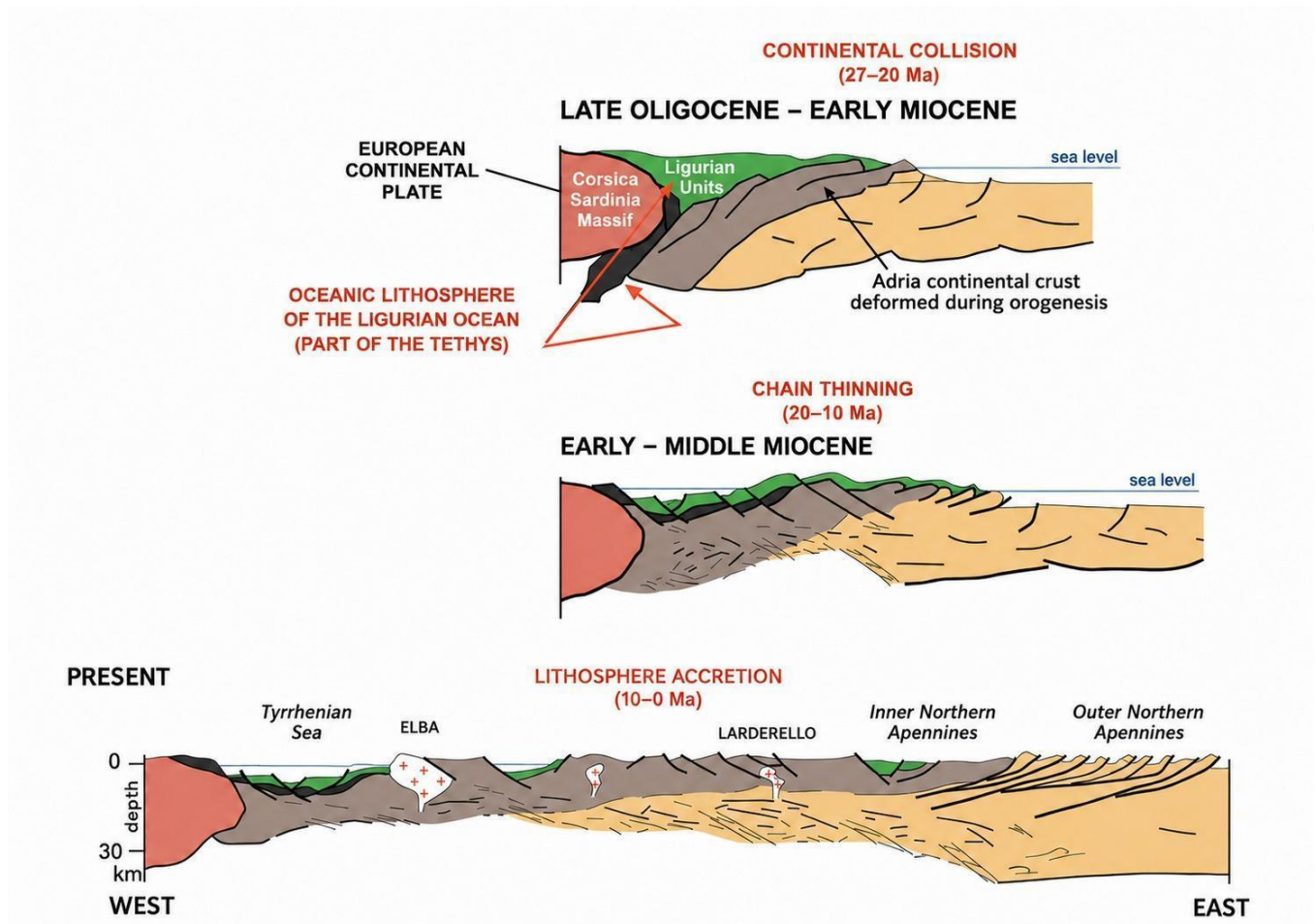
*Current foreland (Quaternary) = Avant-pays actuel (Quaternaire) ; Sub-Himalayan fold-thrust belt = ceinture de plis et de chevauchements subhimalayenne ; Deformed foreland (late Cret.-early Pleistocene) = Avant-pays déformé (fin Crét. – début Pléistocène) ; Tethyan Himalayan Sequence = Séquence téthysienne-himalayenne ; Greater Himalayan Sequence = Séquence de l'Himalaya supérieur ; Lesser Himalayan Sequence = Séquence de l'Himalaya inférieur ; STD = Détachement Sud-Tibétain ; MCT = Chevauchement central principal ; MBT = Chevauchement bordier principal ; MFT = Chevauchement frontal principal ; Basement = Socle ; Low resistivity : partially molten crust = Faible résistivité : croûte partiellement fondue ; Eclogitized (?) lower crust = Croûte inférieure éclogitisée ( ? ).*

**Question 4.** En observant les figures et les données fournies, selon le modèle prédominant, quelle plaque lithosphérique a été impliquée dans la subduction qui a formé les Apennins du Nord ?

- La lithosphère adriatique, qui subduit vers l'ouest sous la région tyrrhénienne.
- La plaque africaine, qui subduit directement vers le nord sous le bloc européen.
- La plaque européenne, qui subduit vers le sud sous l'Afrique du Nord.
- La microplaque tyrrhénienne, qui subduit vers l'est sous l'Adriatique.

**Question 5.** La mer Tyrrhénienne s'est ouverte comme un bassin d'arrière-arc, avec un mécanisme de « retrait ». Comment expliquez-vous ce mécanisme ?

- A) Un point chaud mantellique fixe crée une remontée de matériau chaud qui soulève et amincit la croûte.
- B) Un rifting continental entièrement indépendant de la subduction, similaire à l'ouverture de l'Atlantique.
- C) La plaque africaine comprime latéralement la microplaque adriatique, générant une transtension.
- D) La plaque plongeante se retire vers l'est entraînant l'arc et la chaîne avec elle, et ouvrant le bassin tyrrhénien par extension.



**Figure 4 — coupe des Apennins du Nord**

*Oceanic lithosphere of the Ligurian ocean (part of the Tethys) = lithosphère océanique de l'océan Ligure (partie de la Téthys) ; Chain thinning = amincissement de la chaîne ; Lithosphere accretion = formation de nouvelle lithosphérique.*

**Question 6.** Les ophiolites sont des fragments de croûte océanique piégés dans une chaîne après la fermeture d'un océan. Où trouve-t-on les ophiolites himalayennes ?

- A) Dans le bassin d'avant-fosse au sud de la chaîne, parmi les sédiments tertiaires de la plaine Indo-Gangétique.
- B) Au cœur des plus hauts sommets, où l'érosion a exposé la croûte océanique enfouie.
- C) Le long de la zone de suture Indus-Tsangpo, qui marque la position de l'ancienne Téthys désormais fermée.
- D) Dans l'Himalaya inférieur, où le métamorphisme de faible grade a préservé les ophiolites originelles.

**Question 7.** A partir des données du Tableau 1, quel facteur explique la différence d'altitude ?

- A) Le plateau tibétain amplifie l'effet altimétrique par le chauffage de la croûte épaisse qui dilate les roches.
- B) L'épaisseur de la croûte himalayenne produit une plus grande flottabilité isostatique que les Apennins.
- C) Les Apennins du Nord ont subi un degré d'extension plus important après la collision.
- D) L'Himalaya a des taux d'érosion beaucoup plus faibles et préserve le relief accumulé.

**Question 8.** Dans les Apennins du Sud-Calabre, les hypocentres atteignent ~300 km de profondeur, une profondeur bien plus importante que dans l'Himalaya ou les Apennins du Nord. Quelle pourrait être l'explication la plus directe ?

- A) Les Apennins du Sud sont plus jeunes et la sismicité est toujours plus profonde dans les systèmes récents.
- B) Dans les Apennins du Sud-Calabre, il doit y avoir une plaque océanique plongeante qui explique une sismicité plus profonde.
- C) Les stations sismiques himalayennes ne peuvent pas détecter les séismes profonds en raison de la plus grande épaisseur de la croûte.
- D) Cela dépend du type de faille : les failles inverses donnent des séismes superficiels, les failles normales des séismes profonds.

## SECTION B : STRUCTURE DE LA CROÛTE ET GÉOPHYSIQUE — Questions 9–14

**Question 9.** Quelle méthode géophysique est la plus utilisée pour déterminer la profondeur du Moho (limite croûte-manteau) à l'échelle crustale ?

- A) Réflexion et réfraction sismiques crustales.
- B) Tomographie de résistivité électrique, cartographiant les variations de conductivité en profondeur.
- C) Levés magnétométriques, mesurant les variations du champ magnétique dues aux minéraux ferromagnétiques.
- D) Mesures gravimétriques de surface, suffisantes à elles seules pour reconstruire la géométrie du Moho.

**Question 10.** Le Moho atteint une profondeur beaucoup plus importante sous l'Himalaya/Tibet (voir Tableau 1), contre ~35 km pour une croûte normale. Quel mécanisme explique l'épaississement ?

- A) L'intense collision continentale a augmenté de 50 % la croûte initiale.
- B) La collision continentale a approximativement doublé l'épaisseur initiale de la croûte.
- C) La croûte indienne faisait déjà ~70 km d'épaisseur avant la collision.
- D) Une érosion intense a retiré la croûte supérieure, abaissant le Moho.

**Question 11.** Les anomalies gravimétriques au-dessus de l'Himalaya sont fortement négatives (plus faibles que prévu pour une région montagneuse). Sachant que la croûte (~2 700 kg/m<sup>3</sup>) est moins dense que le manteau (~3 300 kg/m<sup>3</sup>), quelle en est la cause ?

- A) Des chambres magmatiques profondes réduisent la densité locale de la croûte.
- B) Les montagnes sont constituées de roches particulièrement denses qui attirent le gravimètre.
- C) La croûte épaisse occupe la place du manteau plus dense, réduisant la gravité.
- D) L'érosion a retiré les minéraux lourds de la surface, abaissant la densité moyenne.

**Question 12.** L'Inde et l'Eurasie convergent à ~4-5 cm/an, mais le soulèvement vertical de l'Himalaya n'est que de ~5-10 mm/an. La convergence « manquante » n'est ni due au soulèvement ni à l'érosion. Où va-t-elle ?

- A) Une grande partie est absorbée par l'épaississement crustal et par la déformation distribuée dans l'ensemble de la région.
- B) Elle est entièrement accommodée par la subduction.
- C) Les données GPS n'enregistrent que les mouvements de surface et la convergence profonde ne peut pas être mesurée.
- D) La convergence s'arrête au Moho : en dessous, le manteau s'écoule latéralement sans accumulation verticale.

**Question 13.** Le Moho se trouve à ~20-25 km sous le Nord de la mer Tyrrhénienne, contre ~35 km pour une croûte normale. Quelle combinaison de processus explique cet amincissement ?

- A) Le cas de la mer Tyrrhénienne est une anomalie globale encore dépourvue d'une explication solide.
- B) L'érosion sous-marine a progressivement aminci la croûte au cours du temps.
- C) La présence de roches volcaniques denses a comprimé la croûte, abaissant le Moho.
- D) Le retrait de la plaque en subduction et la tectonique post-collisionnelle ont aminci la croûte.

**Question 14.** Dans la mer Tyrrhénienne, les anomalies gravimétriques sont positives, tandis qu'au-dessus de la chaîne apenninique elles sont négatives. Que montre ce contraste ?

- A) La croûte océanique, riche en minéraux magnétiques, affleure dans la mer Tyrrhénienne, la rendant plus dense.
- B) La chaîne apenninique est constituée de roches plus denses que le manteau sous-jacent.
- C) Dans la mer Tyrrhénienne, les instruments enregistrent une erreur systématique de signe.
- D) Sous la mer Tyrrhénienne, la croûte est mince et plus proche du manteau, tandis que sous la chaîne la croûte est plus épaisse.

## SECTION C : PÉTROLOGIE ET MÉTAMORPHISME — Questions 15–22

### GLOSSAIRE.

Métamorphisme : transformation à l'état solide due à des changements de température (T) et/ou de pression (P) ; P augmente de ~1 kbar tous les ~3 km de profondeur.

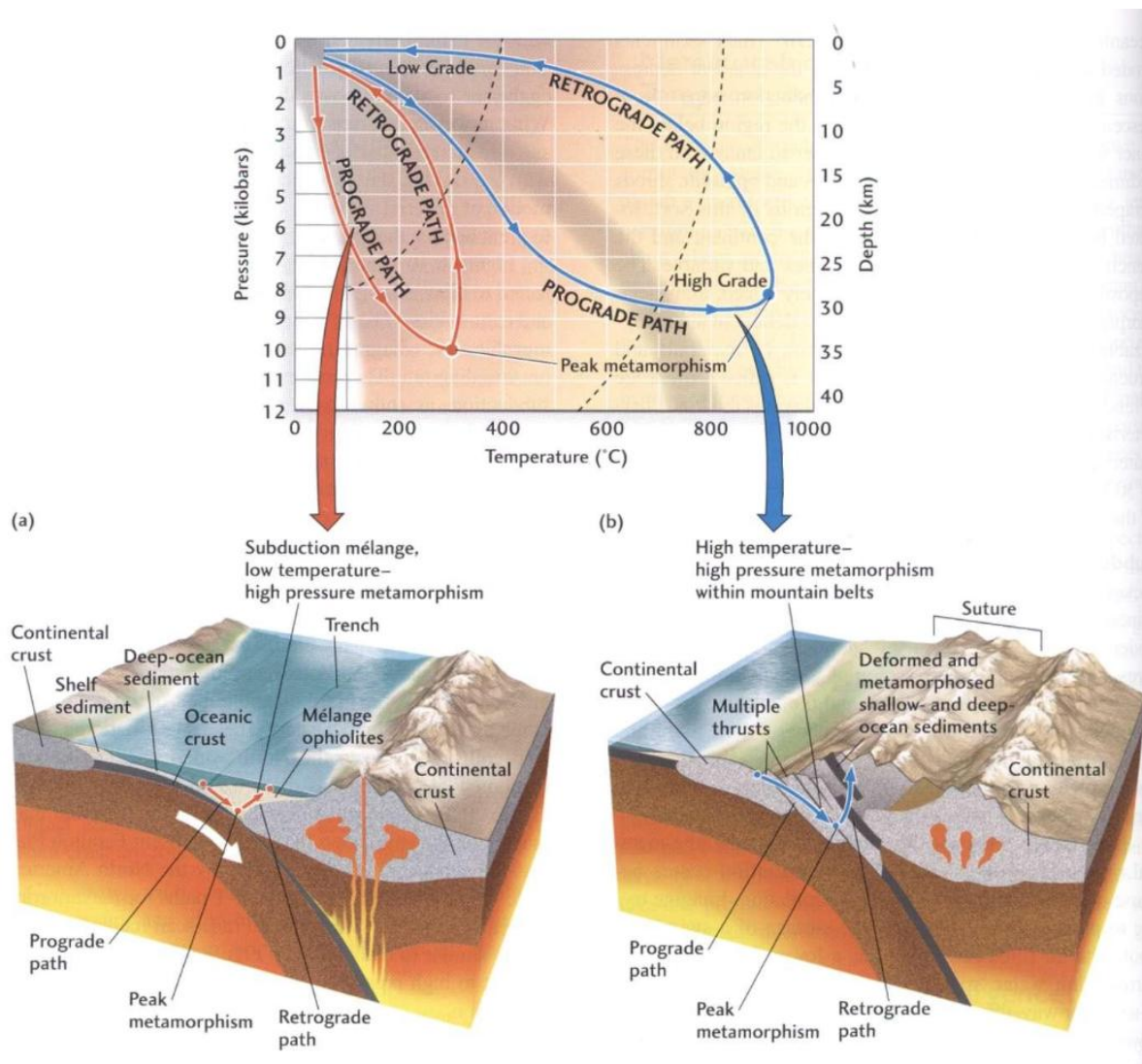
Minéral index : se forme uniquement dans certains domaines P-T et enregistre ces conditions.

Faciès : schistes verts = T et P faibles ; schistes bleus = T faible et P moyenne ; amphibolite = T et P moyennes ; granulite = T élevée ; éclogite = P très élevée.

Chemin P-T : le chemin de la roche lors de l'enfouissement et de l'exhumation.

Protolithe : roche initiale.

Migmatites : roches issues d'une fusion partielle, se formant à  $T > 650-700^{\circ}\text{C}$  en présence d'eau.



**Fig. 5 — Diagrammes P-T des chemins de subduction et de collision**

*Prograde path* = chemin prograde ; *Retrograde path* = chemin rétrograde ; *Low grade* = faible grade ; *High grade* = fort grade ; *Peak metamorphism* = Pic de métamorphisme. *Deformed and metamorphosed shallow- and deep-ocean sediments* = Sédiments océaniques de faible et de grande profondeur, déformés et métamorphisés.

**Tableau 2 : Minéraux index avec les conditions P-T correspondantes.**

| Minéral index             | Conditions de stabilité                                                                 | Présent dans                               |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Chlorite                  | T faible (<400°C), P faible-moyenne                                                     | Les deux (faible grade)                    |
| Biotite                   | T moyenne (400-600°C), P moyenne                                                        | Himalaya, Apennins du Nord                 |
| Grenat                    | P moyenne-élevée (>5 kbar), T moyenne-élevée                                            | Himalaya, Apennins du Nord                 |
| Disthène                  | P élevée (>5 kbar), T moyenne-élevée                                                    | Himalaya (Haut Himalaya), Apennins du Nord |
| Sillimanite / Andalousite | Sillimanite : T élevée (>600°C), P moyenne<br>Andalousite : T élevée (>600°C), P faible | Himalaya, Apennins du Nord                 |
| Glaucophane               | P élevée (>8 kbar), T basse (<450°C)                                                    | Apennins du Nord                           |
| Lawsonite                 | P très élevée (>10 kbar), T faible                                                      | Apennins du Nord                           |
| Omphacite                 | P très élevée (>12 kbar), T moyenne                                                     | Himalaya UHP, Apennins du Nord             |

**Question 15.** Le disthène, l'andalousite et la sillimanite ont la même formule ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ) mais une structure différente. Dans le Haut Himalaya (pic à 8-12 kbar), quel polymorphe est attendu ?

- A) Andalousite : c'est le polymorphe le plus courant dans les roches continentales.
- B) Disthène : les conditions himalayennes de 8-12 kbar se situent dans son domaine de stabilité.
- C) Les deux en équilibre : à 8-12 kbar, ils coexistent.
- D) Aucun : à haute P, seule la sillimanite se forme.

**Question 16.** Les migmatites du Haut Himalaya contiennent des leucosomes clairs (de composition granitique). Les migmatites nécessitent  $T > 650-700^\circ\text{C}$  en présence d'eau ; le pic himalayen est de  $650-750^\circ\text{C}$ . Quelle conclusion en découle ?

- A) Les migmatites indiquent un faciès granulite issu d'événements antérieurs ( $>900^\circ\text{C}$ ).
- B) Les migmatites se sont formées par métamorphisme de contact près d'une intrusion locale.
- C) Les conditions du pic ( $650-750^\circ\text{C}$ ) dépassent le seuil : la formation de migmatites est cohérente avec les données.
- D) Les conditions du pic sont trop froides : les migmatites n'ont pas pu se former sur place.

**Question 17.** Le glaucophane est une amphibole sodique bleue, stable à haute P ( $>8$  kbar) et basse T ( $<450^\circ\text{C}$ ). Des roches à glaucophane ont été trouvées dans certaines unités apenniniques. Quelle conclusion est correcte ?

- A) Le glaucophane se forme par altération hydrothermale sur le plancher océanique près des dorsales.
- B) Le glaucophane indique un métamorphisme de contact près d'une intrusion granitique à haute T.
- C) Les unités ont subi un métamorphisme à très haute T ( $>800^\circ\text{C}$ ), typique du faciès granulite.
- D) Les unités ont atteint une P élevée ( $>8$  kbar) tout en conservant une T basse ( $<450^\circ\text{C}$ ), ce qui est cohérent avec une lithosphère rapidement subduite.

**Question 18.** Dans un gneiss himalayen, les cristaux de grenat (P et T moyennes à élevées) contiennent des inclusions de chlorite et de biotite (faible grade). Sachant que les minéraux de faible grade se forment d'abord et sont ensuite englobés par ceux de grade élevé, que révèlent les inclusions ?

- A) Le grenat a crû pendant le métamorphisme prograde, en englobant les minéraux de faible grade préexistants.
- B) Le grenat s'est formé en premier, à faible grade ; la chlorite et la biotite ont crû plus tard dans des microfractures.
- C) Le grenat et les inclusions sont en équilibre : ils se sont formés simultanément au même grade.
- D) Les inclusions se sont formées dans des fractures du grenat lors d'un processus de métamorphisme rétrograde.

**Question 19.** Certaines unités toscanes montrent de faibles pressions (~1,4-3 kbar, soit ~6-10 km de profondeur) mais de hautes températures (500-600°C) ; le flux de chaleur tyrrhénien est aujourd'hui élevé (>100 mW/m<sup>2</sup>, contre ~60 mW/m<sup>2</sup> pour la croûte continentale moyenne). Quel processus explique une faible P et une haute T ?

- A) La tectonique extensive associée au magmatisme a élevé le gradient géothermique.
- B) Un enfouissement profond dans une zone de subduction froide, avec un faible gradient thermique.
- C) Une érosion rapide a retiré de grandes épaisseurs, réduisant P sans changer T.
- D) Un impact météoritique a produit de la chaleur localement et décompressé la croûte.

**Question 20.** En utilisant le tableau des minéraux index, quelle séquence représente un grade métamorphique croissant (température croissante) dans les roches pélitiques ?

- A) Sillimanite → Grenat → Biotite → Chlorite.
- B) Grenat → Chlorite → Sillimanite → Biotite.
- C) Chlorite → Biotite → Grenat → Sillimanite.
- D) Biotite → Chlorite → Grenat → Sillimanite.

**Question 21.** La Figure 5 décrit deux chemins P-T : « **Haute T - Haute P** » comme dans les zones de l'Himalaya les plus épaisses (conditions : 650-750°C à 8-12 kbar) et « **Basse T - Haute P** » comme dans certaines unités de lithosphère océanique ligure (conditions : 300-450°C à 10-15 kbar). Quelle explication est la plus cohérente ?

- A) Les différents taux d'érosion des deux structures contrôlent le taux de décompression et donc la pression globale.
- B) Les différentes compositions des roches initiales entre l'Himalaya continental et les unités ligures océaniques réagissent différemment à la température et à la profondeur.
- C) L'âge différent : les chemins P-T évoluent systématiquement avec le temps géologique.
- D) Une croûte plus épaisse retient la chaleur, tandis que la lithosphère océanique plus froide subduit rapidement sans se réchauffer.

**Question 22.** Le long du MCT himalayen, on peut observer du gneiss à sillimanite (haut grade) au-dessus du contact tectonique ; des phyllites à chlorite (faible grade) en dessous du contact tectonique. Comment cette séquence de faible à haut grade est-elle définie ?

- A) Gradient normal : le grade augmente vers le bas, comme attendu d'après la géothermie.
- B) Gradient inversé : le grade est plus élevé au-dessus et plus faible en dessous du contact, comme dans une faille inverse.
- C) Gradient de contact : les roches plus jeunes sont toujours au-dessus, indépendamment du grade.
- D) Non interprétable sans connaître l'âge des roches.

## SECTION D : MAGMATISME ET GÉOCHIMIE — Questions 23–27

### GLOSSAIRE.

Péralumineux : magma avec Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en excès par rapport à Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O+CaO ; se forme par fusion de roches sédimentaires riches en argile (pélites).

Signature de subduction (LILE/HFSE) : les fluides libérés par la plaque plongeante transportent des LILE (K, Rb, Ba, Sr — solubles dans l'eau) mais pas les HFSE (Nb, Ta, Ti — immobiles) : résultat LILE élevés + HFSE faibles.

MORB : basalte de dorsale médio-océanique, composition « normale », ni enrichie en LILE ni appauvrie en HFSE.

**Question 23.** Pourquoi n'y a-t-il actuellement pas de volcanisme significatif le long de la zone de collision himalayenne, contrairement à l'arc tyrrhénien ?

- A) La collision est trop ancienne pour que le volcanisme soit encore actif.
- B) La croûte himalayenne est trop épaisse pour permettre au magma de remonter.
- C) L'érosion a supprimé tous les produits volcaniques, mais le magmatisme se poursuit en profondeur.
- D) Il n'y a pas de plaque océanique en subduction sous l'Himalaya.

**Question 24.** Les leucogranites himalayens ont ~15 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et sont péralumineux ( $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}$ ). Quelle source produit un magma péralumineux ?

- A) Fusion partielle d'anciennes pélites, riches en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- B) Fusion du manteau lithosphérique, pauvre en Al par rapport à la croûte.
- C) Fusion de la croûte océanique subduite à grande profondeur.
- D) Assimilation de sédiments carbonatés pendant la remontée du magma.

**Question 25.** Les produits volcaniques du sud de la mer Tyrrhénienne ont  $\text{K}_2\text{O} \sim 4\%$  et une signature  $\text{LILE}\uparrow/\text{HFSE}\downarrow$ . Le Vésuve et les Campi Flegrei appartiennent à l'arc tyrrhénien. Quel type de magma est attendu ?

- A) Basaltes primitifs de composition MORB ( $\text{K}_2\text{O}$  faible, sans signature de subduction).
- B) Uniquement des rhyolites issues de la fusion de la croûte continentale campanienne.
- C) Magmas potassiques et ultrapotassiques ( $\text{K}_2\text{O}$  élevé,  $\text{LILE}\uparrow$ ).
- D) Carbonatites avec abondance de calcium et faible teneur en silice.

**Question 26.** Les fluides de la plaque plongeante transportent des LILE (solubles) mais pas les HFSE (immobiles) dans le manteau qui le recouvre, abaissant son point de fusion. Quelle proposition décrit correctement le résultat ?

- A) La contamination crustale ajoute des LILE lors de la remontée du magma.
- B) La cristallisation fractionnée des oxydes de Ti élimine les HFSE lors de la remontée.
- C) Le manteau est intrinsèquement pauvre en HFSE en raison d'événements de fusion antérieurs à la subduction.
- D) Le manteau enrichi produit des magmas à LILE élevés et HFSE faibles.

**Question 27.** Les basaltes de l'arc tyrrhénien montrent  $\text{LILE}\uparrow$  et  $\text{HFSE}\downarrow$  ; ceux du Sud de la mer Tyrrhénienne, formés par décompression asthénosphérique sans apport de fluides de la plaque plongeante, tendent à ressembler aux MORB. Quelle différence les distingue ?

- A) Les basaltes d'arrière-arc ont une faible contribution des fluides.
- B) Les basaltes d'arrière-arc ont davantage de  $\text{K}_2\text{O}$  en raison d'une source plus enrichie.
- C) Les basaltes d'arc ont systématiquement plus de  $\text{SiO}_2$  : c'est le principal critère discriminant.
- D) Les deux types sont géochimiquement identiques : seule l'appellation géographique change.

## SECTION E : GÉOLOGIE STRUCTURALE ET CARTOGRAPHIE — Questions 28–34

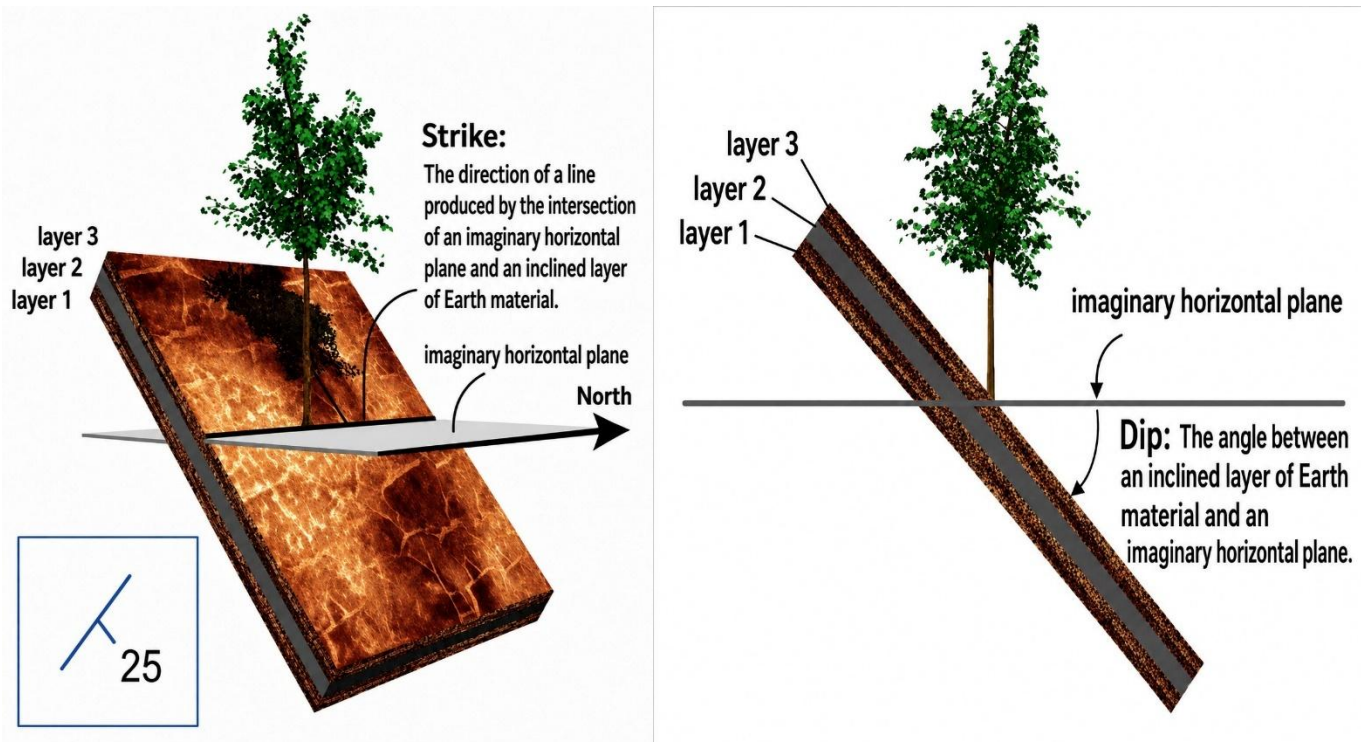
### SYMBOLES.

Orientation (direction/pendage) : la longue ligne = direction ; le petit trait = direction du pendage ; le nombre = angle de pendage en degrés. Chevauchement (faille inverse) : ligne avec triangles pleins sur le bloc supérieur. Faille normale : ligne avec des traits du côté abaissé.

Décollement : ligne en tirets, plan de détachement sur des niveaux faibles (argiles, évaporites).

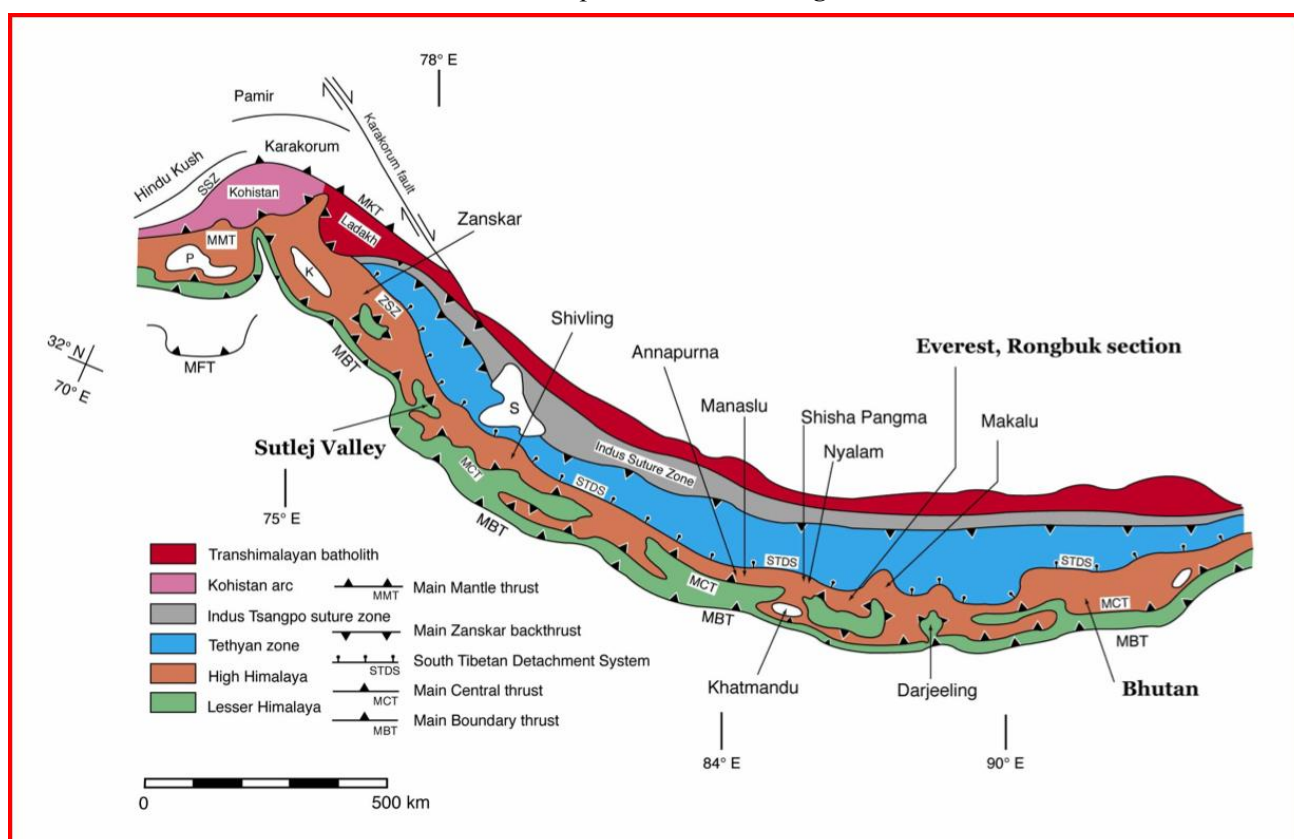
**Question 28.** Le long du MCT himalayen, on peut observer des mylonites, des brèches tectoniques et des stries de glissement ; au-dessus du contact tectonique, un gneiss de haut grade, en dessous du contact tectonique, des phyllites de faible grade, avec le bloc supérieur se déplaçant vers le sud. Quelle interprétation est correcte ?

- A) Les roches les plus jeunes se trouvent au nord de la faille.
- B) Le chevauchement pend vers le nord et le bloc supérieur a été charrié vers le sud.
- C) Le chevauchement est inactif et la flèche indique seulement la direction de l'ancienne Téthys.
- D) Il s'agit d'une faille normale qui abaisse le bloc nord.



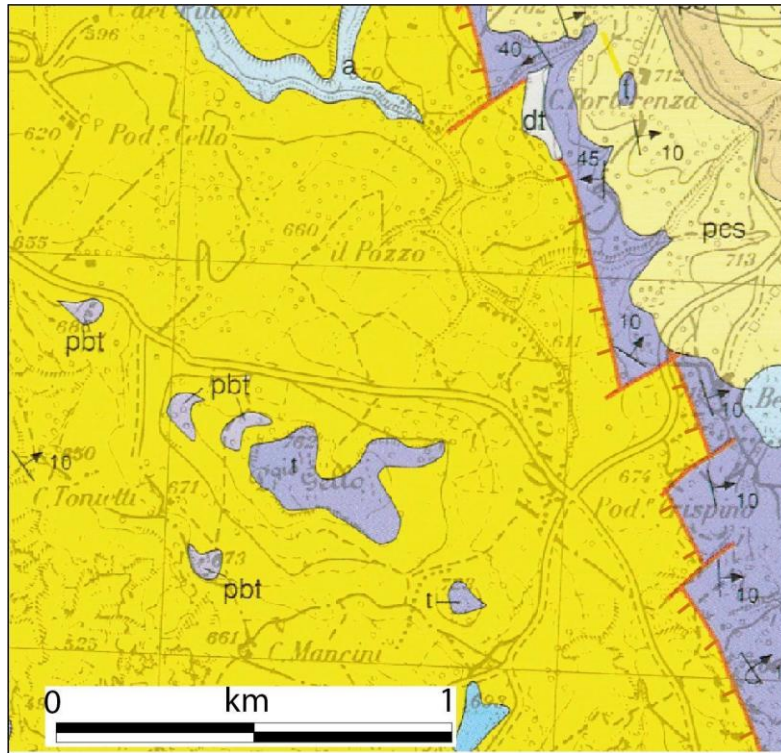
**Fig. 6 — Symboles d'orientation**

*Layer = couche ; Strike : the direction of a line produced by the intersection of the imaginary horizontal place and an inclined layer of Earth material = Direction : direction d'une ligne résultant de l'intersection d'un plan horizontal imaginaire et d'une couche inclinée de matière terrestre. Dip : the angle between an inclined layer of Earth material and an imaginary horizontal plane = Pendage : angle formé entre une couche inclinée de matière terrestre et un plan horizontal imaginaire.*



**Fig. 7 — Carte géologique de l'Himalaya (MCT vers le S, STD vers le N) ;**

*MMT = Chevauchement principal du manteau ; Main Zaskar backthrust = Rétrochevauchement principal du Zaskar ; STDS = Système de détachement du sud du Tibet.*



**Fig. 8 — carte d'une région des Apennins**

**Question 29.** Sur la carte de l'Himalaya, la STD a un mouvement vers le N (faille normale) et le MCT vers le S (chevauchement) : ils délimitent respectivement le Haut Himalaya au-dessus et en dessous. Quelle paire cinématique est correcte ?

- A) MCT vers le S et STD vers le N : des sens opposés coexistent à différents niveaux crustaux.
- B) Tous deux vers le S : ils sont contemporains et cinématiquement parallèles.
- C) Tous deux vers le N : le MCT a été réactivé avec une cinématique opposée.
- D) Les deux contacts ont une cinématique décrochante parallèle à la chaîne.

**Question 30.** Sur une carte des Apennins du Nord, une faille normale a des traits sur le côté ouest (traits = côté abaissé). Qu'indique-t-elle ?

- A) Le bloc ouest s'est soulevé : c'est le compartiment supérieur de la faille.
- B) Le bloc ouest s'est abaissé, ce qui est cohérent avec l'ouverture vers l'ouest de la mer Tyrrhénienne.
- C) La faille est un chevauchement masqué : la symbologie apenninique est inversée par rapport à la norme.
- D) La faille est inactive : les failles normales apenniniques se sont arrêtées au Pléistocène.

**Question 31.** Deux mesures d'orientation espacées de 200 m ont la même direction mais des pendages opposés : le site A plonge à 45° vers l'Est, le site B à 40° vers l'Ouest ; les couches plongent en s'éloignant l'une de l'autre. Quelle structure se trouve entre A et B ?

- A) La faille est un chevauchement masqué : la symbologie apenninique est inversée par rapport à la norme.
- B) Faille inverse : le changement de pendage indique un contact tectonique.
- C) Antiforme : les couches plongent en s'éloignant du centre.
- D) Synforme : les couches plongent vers le centre.

**Question 32.** Le décollement est un plan basal le long duquel toute la chaîne « glisse » sur le socle. Dans quelles roches un décollement se forme-t-il le plus facilement, et pourquoi ?

- A) Calcaires et quartzites : rigides et compétents, ils résistent à la déformation et forment des surfaces nettes.
- B) Granites du socle : les surfaces lissées agissent comme des plans de glissement naturels.
- C) Schistes, évaporites (sel, gypse) et argiles surpressurisées, qui sont plus faibles et ductiles.
- D) Roches volcaniques : la forte porosité réduit la cohésion et favorise le glissement.

**Question 33.** Anticlinal et synclinal sont des plis adjacents. Sur une carte, comment les distingue-t-on par l'âge des strates affleurant dans le cœur ?

- A) L'anticlinal a les strates les plus jeunes au cœur ; le synclinal les plus anciennes.
- B) Les deux ont les strates les plus anciennes au cœur : ils se distinguent uniquement par le pendage.
- C) L'âge des strates ne permet pas de les distinguer sans données de subsurface.
- D) L'anticlinal a les strates les plus anciennes au cœur ; le synclinal les plus jeunes.

#### SECTION F : SYNTHÈSE COMPARATIVE — Question 34

Dans le cycle de Wilson, l'Himalaya et les Apennins représentent des étapes successives. Les Apennins du Nord ont développé, dans leurs phases finales, des conditions métamorphiques de haute température typiques des zones d'amincissement crustal ; l'Himalaya est encore en construction, sans magmatisme ni amincissement. Les Apennins du Sud et la mer Tyrrhénienne représentent l'interaction entre subduction et extension sur la plaque supérieure, liée au retrait du panneau plongeant.

**Question 34.** Un géologue étudie deux échantillons. Échantillon 1 : gneiss avec grenat + disthène + biotite, inclusions de chlorite dans le grenat, chemin Haute T-Haute P. Échantillon 2 : schiste bleu avec glaucophane + lawsonite,  $P > 10$  kbar,  $T \sim 350^\circ\text{C}$ , chemin Basse T-Haute P. Quelle association est correcte ?

- A) Tous deux himalayens : le glaucophane de l'échantillon 2 peut aussi se former à faible P en présence de sodium.
- B) Échantillon 1 : subduction froide des Apennins (Basse T-Haute P) — Échantillon 2 : collision himalayenne (Haute T-Haute P).
- C) Échantillon 1 : collision himalayenne (Haute T-Haute P) — Échantillon 2 : subduction froide des Apennins (Basse T-Haute P, unités ligures).
- D) Échantillon 1 : bassin d'arrière-arc tyrrhénien (Basse P-Haute T) — Échantillon 2 : Haut Himalaya UltraHaute P avec coésite.

#### SECTION G : INTERACTIONS ENTRE LES SYSTÈMES TERRESTRES — Questions 35-42

Des scientifiques ont comparé le transport de sédiments depuis les bassins versants de l'Himalaya et des Apennins du Nord. Les observations sont résumées dans le Tableau 3.

**Tableau 3. Caractéristiques environnementales et géologiques sélectionnées des bassins versants de l'Himalaya et des Apennins du Nord**

| Observation                              | Himalaya              | Apennins du Nord      |
|------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Altitude moyenne des montagnes           | 4,500 m               | 1,100 m               |
| Précipitations annuelles moyennes        | 1,850 mm              | 1,750 mm              |
| Pente moyenne du bassin                  | 32°                   | 18°                   |
| Débit moyen des rivières                 | 690 m <sup>3</sup> /s | 240 m <sup>3</sup> /s |
| Concentration de sédiments en suspension | 1,180 mg/L            | 320 mg/L              |
| Calcium dissous                          | 68 mg/L               | 41 mg/L               |
| Silice dissoute                          | 23 mg/L               | 11 mg/L               |
| Couverture végétale                      | Modérée               | Dense                 |
| Couverture glaciaire                     | Étendue               | Très limitée          |
| Taux moyen de soulèvement (GPS)          | 6 mm/an               | 1 mm/an               |

**Question 35.** A partir du Tableau 3, quelle interprétation explique le mieux le transport plus important de sédiments des bassins himalayens ?

- A) Des précipitations similaires, combinées à des pentes plus douces, un débit plus faible, un soulèvement plus lent et une végétation plus dense.
- B) Des précipitations similaires, combinées à des pentes plus fortes, un débit plus élevé, un soulèvement plus rapide et moins de végétation.
- C) Des précipitations plus élevées uniquement, indépendamment des différences de relief, de débit, de soulèvement et de végétation.
- D) Une végétation plus dense uniquement, indépendamment des différences de relief, de débit, de soulèvement et de précipitations.

Au cours d'une année hydrologique, des épisodes de précipitations extrêmes ont été enregistrés sur des sites spécifiques des deux chaînes de montagnes. Les observations de télédétection et de terrain sont résumées dans le Tableau 4.

**Tableau 4. Conditions pendant les tempêtes dans les deux chaînes de montagnes**

| Observation                                 | Himalaya | Apennins du Nord |
|---------------------------------------------|----------|------------------|
| Précipitations pendant la tempête           | 240 mm   | 230 mm           |
| Glissements de terrain cartographiés        | 118      | 21               |
| Sédiments distribués aux rivières           | Élevée   | Modérée          |
| Densité de population sur les pentes raides | Élevée   | Modérée          |

**Question 36.** A partir des Tableaux 3 et 4, quelle interprétation explique le mieux le plus grand nombre de glissements de terrain et la plus grande distribution de sédiments dans l'Himalaya ?

- A) Processus atmosphériques, parce que les précipitations constituaient une différence pertinente entre les régions.
- B) Processus géologiques, parce que la pente contrôle les glissements de terrain.
- C) Processus hydrologiques, parce que le transport fluvial détermine la rupture de pente.
- D) Interactions entre les précipitations, le relief escarpé, le ruissellement, le transport des sédiments et l'exposition humaine.

**Question 37.** Des scientifiques ont collecté des échantillons d'eau de rivière et de sédiments dans un bassin himalayen et un bassin des Apennins du Nord au cours de la même saison. A partir du Tableau 3, quelle hypothèse est le plus fortement étayée par les données chimiques et sédimentaires combinées ?

- A) Des précipitations plus élevées ont diminué à la fois la dissolution minérale et le transport des sédiments en suspension.
- B) Un relief escarpé a renforcé l'altération mécanique et le transport fluvial.
- C) Une couverture végétale moindre a exposé davantage de roche-mère et réduit l'érosion du calcium et de la silice.
- D) Un débit fluvial plus rapide et la couverture végétale ont augmenté la dissolution minérale.

**Question 38.** Deux autorités régionales évaluent des tracés de routes de montagne sur les deux chaînes. Sur la base des données présentées sous forme de tableau, quelle évaluation d'ingénierie est la plus fortement étayée ?

- A) Une stabilisation plus importante est nécessaire le long du tracé himalayen en raison de conditions plus sévères.
- B) Une stabilisation plus importante est nécessaire dans les Apennins du Nord parce que le soulèvement est plus lent.
- C) Une stabilisation moins importante est nécessaire dans l'Himalaya en raison de la végétation modérée.
- D) Des mesures de stabilisation similaires sont appropriées parce que les deux chaînes sont comparables.

Deux régions montagneuses de l'Himalaya fournissent de l'eau douce aux communautés voisines. Leurs caractéristiques hydrologiques sont résumées dans le Tableau 5.

**Tableau 5. Caractéristiques des ressources en eau des deux sites de l'Himalaya**

| Observation                                 | Région 1 | Région 2     |
|---------------------------------------------|----------|--------------|
| Débit annuel moyen des rivières             | Élevée   | Modérée      |
| Variation saisonnière du débit des rivières | Faible   | Élevée       |
| Couverture glaciaire                        | Étendue  | Très limitée |
| Densité de population                       | Élevée   | Modérée      |

**Question 39.** Sur la base du Tableau 5, quelle région dispose actuellement de l'approvisionnement en eau le plus fiable tout au long de l'année ?

- A) Région 1, parce que le stockage glaciaire modère la variation saisonnière du débit des rivières.
- B) Région 2, parce que moins de personnes dépendent de l'eau des rivières.
- C) Les deux régions, parce que leurs totaux annuels de précipitations sont similaires.
- D) Aucune des deux, parce que les variations saisonnières n'indiquent pas la disponibilité de l'eau.

Des scientifiques ont suivi un bassin versant himalayen pendant 20 ans. Les observations sont résumées dans le Tableau 6.

**Tableau 6. Évolution des indicateurs tectoniques, climatiques, hydrologiques et sédimentaires sur 20 ans**

| Observation                                        | 1re année                      | 20e année             |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Soulèvement annuel moyen (GPS)                     | 5.8 mm/an                      | 6.1 mm/an             |
| Précipitations annuelles moyennes                  | 1,820 mm                       | 1,845 mm              |
| Épisodes de précipitations extrêmes (>100 mm/jour) | 3 épisodes                     | 9 épisodes            |
| Débit moyen des rivières                           | 610 m <sup>3</sup> /s          | 640 m <sup>3</sup> /s |
| Concentration de sédiments en suspension           | 910 mg/L                       | 1,280 mg/L            |
| Couverture végétale                                | Pas de changement significatif |                       |

**Question 40.** A partir du Tableau 6, quel phénomène a connu la plus forte augmentation en pourcentage sur l'ensemble de la période ?

- A) Épisodes de précipitations extrêmes.
- B) Précipitations annuelles moyennes.
- C) Concentration de sédiments en suspension.
- D) Débit moyen des rivières.

Des observations géophysiques représentatives de l'Himalaya et des Apennins du Nord sont résumées dans le Tableau 7.

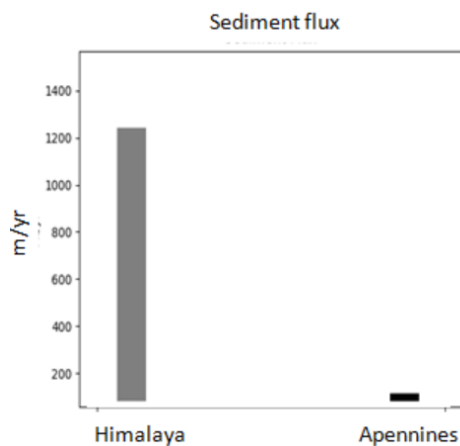
**Tableau 7. Altitude, épaisseur crustale et anomalies gravimétriques dans l'Himalaya et les Apennins du Nord**

| Observation                | Himalaya           | Apennins du Nord    |
|----------------------------|--------------------|---------------------|
| Altitude moyenne           | 4,500 m            | 1,200 m             |
| Épaisseur crustale moyenne | 72 km              | 38 km               |
| Anomalie gravimétrique     | Fortement négative | Légèrement positive |

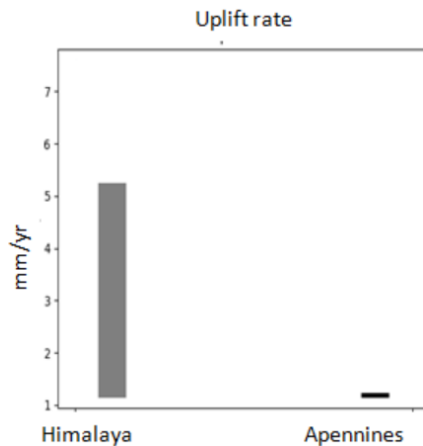
**Question 41.** Quelle option nécessiterait des preuves supplémentaires au-delà des observations du Tableau 7 ?

- A) La différence effective de hauteur de l'Himalaya.
- B) La profondeur effective du Moho dans les deux régions.
- C) L'amplitude effective de l'anomalie gravimétrique dans les deux régions.
- D) L'affirmation selon laquelle la gravité est plus forte dans les Apennins du Nord que dans l'Himalaya.

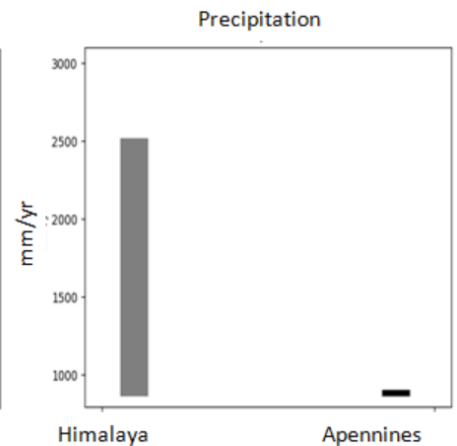
Des scientifiques de deux équipes A et B ont comparé le taux de soulèvement, les précipitations annuelles, le flux sédimentaire et les paysages représentatifs de deux sites de l'Himalaya et des Apennins du Nord. Des données quantitatives sont présentées dans les Fig. 9-11, les paysages des sites sont montrés dans les Fig. 12-13.



**Figure 9.** Flux sédimentaire moyen sur les sites considérés



**Figure 10.** Taux moyen de soulèvement sur les sites considérés



**Figure 11.** Précipitations annuelles moyennes sur les sites considérés

*Yr = year = année ; rate = taux.*



**Figure 12.** Paysage himalayen représentatif



**Figure 13.** Paysage représentatif des Apennins du Nord

**Question 42.** L'équipe A interprète le flux sédimentaire himalayen plus important comme étant principalement contrôlé par le climat. L'équipe B l'interprète comme étant principalement contrôlé par la tectonique. Sur la base des figures, quelle interprétation est la mieux étayée ?

- A) L'interprétation de l'équipe A est étayée parce que les données sont davantage cohérentes avec les différences de soulèvement.
- B) L'interprétation de l'équipe A est étayée parce que les données sont davantage cohérentes avec les différences de précipitations.
- C) L'interprétation de l'équipe B est étayée parce que les photographies des paysages montrent des différences dans la raideur des pentes.
- D) Ni l'interprétation de l'équipe A ni celle de l'équipe B n'est pleinement étayée par les données disponibles.