

# ÉPREUVE ÉCRITE DE GÉOLOGIE

Le sujet traitait de « quelques aspects de la géologie de l'Himalaya-Tibet », depuis la dislocation de la Pangée et la formation de la Téthys jusqu'à la collision entre les plaques indienne et eurasiatique. De nombreuses disciplines de la géologie, tectonique, géophysique, pétrographie du magmatisme et du métamorphisme étaient abordées dans quatre parties indépendantes afin de décrire la formation de la chaîne himalayenne. Une synthèse était attendue en dernier lieu sous forme de tableau.

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

1.1. La caractérisation de la lithosphère devait aborder différents aspects : (i) une caractérisation sismologique où la lithosphère est considérée comme une enveloppe superficielle d'épaisseur variable, de 0 à 100 km en domaine océanique et de 100 à 200 km en domaine continental. Elle est délimitée à sa base par une zone à faible vitesse (aussi appelée LVZ pour « low velocity zone ») où la vitesse des ondes sismiques ne croît plus avec la profondeur mais décroît légèrement. (ii) une caractérisation rhéologique : la lithosphère est une enveloppe rigide (le terme d'élastique était accepté). (iii) une caractérisation thermique : la lithosphère est une enveloppe dans laquelle la dissipation de la chaleur se fait par conduction. Sous cette couche limite, la convection mantellique opère. (iv) une caractérisation pétrologique : la croûte continentale est essentiellement constituée de granitoïdes, de gneiss et de roches sédimentaires et volcaniques ; la croûte océanique, de basaltes et de gabbros et le manteau, de péridotites. Le détail des masses volumiques n'était pas forcément attendues mais ont été prise en considération si elles apparaissaient dans la copie.

Pour cette question de cours, nombre des caractéristiques ont été oubliées même si la qualité de certaines copies laisse supposer que le candidat devait connaître la plupart d'entre elles telles que l'épaisseur, la rhéologie, la pétrologie, etc. Ce qui manque surtout, et quasi systématiquement c'est la caractérisation thermique ; on ne parle pas de conduction, même s'il est parfois évoqué le terme de convection qui anime le manteau asthénosphérique sous-jacent. La masse volumique ou les densités ne sont pas souvent signalées, ou parfois celle du manteau et pas celle de la croûte continentale ou *vice versa*.

1.2. Une plaque lithosphérique est un fragment de la lithosphère rigide, mobile horizontalement et verticalement sur la zone à faible vitesse (LVZ).

Une plaque lithosphérique se déplace à la surface du globe en suivant un mouvement de rotation autour d'un axe. La rigidité de la plaque lui confère une unité cinématique : tous ses points se déplacent à la même vitesse angulaire, par contre pas à la même vitesse linéaire.

Pour cette autre question de cours, la plaque est bien signalée comme une portion de la lithosphère, sauf exception, mais la rotation des plaques autour d'un axe, dit eulérien, est exceptionnellement reportée (1% des copies environ) ou encore l'unité cinématique. On en appelle quasi unanimement dans les réponses au moteur apparent de la dérive des plaques qui se situe à l'aplomb des dorsales ou des zones de subduction, et ceci de façon extensive. Ainsi, la cinématique des mouvements des plaques au-dessus de la LVZ est peu mentionnée par rapport à celle induite par la divergence ou la convergence aux limites des plaques. En général, la moitié des points n'a pas pu être attribuée à cette question.

1.3. Le domaine Himalaya-Tibet constitue une frontière de plaques car : (i) la sismicité (ou déformation active) est concentrée dans ce domaine (figure 1a), (ii) on observe un relief positif anormal (altitudes supérieures à 3000 m, figure 1a) par rapport au domaine continental en équilibre isostatique (la référence pour le domaine continental à l'équilibre isostatique étant de 300 m), (iii) le déplacement des domaines continentaux est différent de part et d'autre de ce domaine, 48 mm/an vers le Nord pour l'Inde et un déplacement quasi nul pour la Mongolie. On est donc sur deux plaques cinématiques différentes de part et d'autre de l'Himalaya-Tibet.

1.4. La plaque indienne se déplace vers le Nord par rapport à la plaque eurasiatique fixe (vecteurs presque nuls). Il y a donc un mouvement de convergence relative entre ces plaques.

L'azimut de la convergence est N023 (une marge comprise entre N015 et N030 était acceptée, « vers le NNE » voire « vers le NE » était aussi valorisée). La norme de cette convergence est de 48 mm/an (marge de  $\pm 4$  mm/an).

Les candidats ont été assez prolixes en répondant aux questions 1.3 et 1.4 avec des réponses qui se télescopent. Des réponses à la question 1.4 sont apparues dans la question 1.3 sur la direction et la norme des vecteurs ; et la réponse à la question 1.3 a été souvent précisée en 1.4, en ce qui concerne les mouvements différentiels entre les deux plaques. Il manque souvent un élément de réponse à la question 1.3 : si on parle systématiquement de séismes, on oublie parfois l'altitude ou les données sur les différents vecteurs de vitesse et de direction des plaques Inde et Eurasie. Les réponses aux questions 1.3 et 1.4 sont parfois rectifiées au moment des questions 2.6 et 2.9. Mais il est clair qu'une absence de réponse en 1.3 ou 1.4 sur le déplacement relatif des deux plaques se traduit ensuite par une absence de réponse ou une mauvaise réponse aux deux questions 2.6 et 2.9. La réponse sur la direction des vecteurs en Inde est le plus souvent correcte, que ce soit indiqué dans le texte ou sur la figure 2. Quelques copies indiquent néanmoins un axe NS et il y a parfois une erreur dans la position des points cardinaux avec les directions NE-SW, qui sont indiquées NW-SE, ou encore une représentation des quatre points cardinaux avec l'ouest situé à droite, à la place de l'est. Apparemment, le nord n'a jamais été perdu !

## 2. LA DÉFORMATION DANS L'HIMALAYA-TIBET

2.1. Un mécanisme au foyer est une représentation de la répartition géométrique, autour du foyer sismique, du signe de la première onde émise au niveau de l'hypocentre lors du séisme. Les stations sismologiques réparties à la surface du globe reçoivent une première onde vibratoire, dont l'impetus (ou le signe) peut être positif ou négatif (on acceptait vers le haut ou vers le bas, voire « up » et « down »). Cela correspond respectivement à une première onde en pression ou en dilatation, représentées traditionnellement par des zones noires et blanches sur le dessin. On effectue une projection stéréographique de la position des stations ayant reçu une première onde en compression ou en dilatation. L'hypocentre est au centre de la projection. Une représentation en coupe d'un plan de faille et de son plan auxiliaire à l'hypocentre avec les dièdres en compression et dilatation ainsi que les signaux de la première onde enregistrée dans les stations sismologiques était attendus.

Pour interpréter le mouvement ayant eu lieu lors du séisme, il faut déterminer lequel des deux plans est le plan de faille (l'autre étant le plan auxiliaire). Le déplacement des blocs de part et d'autre de la faille lors du séisme s'est fait des secteurs en dilatation (zone de relaxation de  $\sigma_1$ ) vers les zones en pression (zone de relaxation de  $\sigma_3$ ).

Dans les copies, le mot « séisme » apparaît rarement, de même que l'existence d'une « première onde » à partir de laquelle est construit le mécanisme au foyer. La définition du mécanisme au foyer renvoie rarement au phénomène sismique à l'origine de la déformation observée grâce aux failles. La définition se résume généralement à l'illustration du mouvement des failles avec la projection des cadans en compression ou en dilatation. Les dessins du mécanisme au foyer apparaissent parfois extrêmement simplifiés, avec peu de commentaires sur sa construction, notamment ceux relatifs à la représentation de la première onde.

2.2. Dans la chaîne himalayenne, les mécanismes au foyer sont majoritairement compressifs, donc ce sont des failles à jeu inverse.

2.3. Sur la figure 2, le raccourcissement devait être représenté dans une direction NNE, et l'allongement vertical. Les dessins avec une seule direction moyenne de raccourcissement ainsi que les dessins montrant la direction de raccourcissement tout le long de l'arc himalayen ont été acceptés.

2.4. En faisant l'hypothèse d'une déformation coaxiale, on en déduit que  $\sigma_1$  est SSW-NNE,  $\sigma_3$  est verticale, et donc  $\sigma_2$  est WNW-ESE.  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  sont dans le plan horizontal,  $\sigma_3$  est verticale, il s'agit donc d'une tectonique compressive.

Cinq questions se réfèrent à la figure 2 (2.2, 2.3, 2.4, 2.7 et 2.8). Les réponses à ces questions sont reportées soit dans le texte, soit sur la figure 2, soit encore sur les deux, ce qui est parfois redondant, sans spécifier toujours, au niveau de la figure 2, à quelle question correspond le schéma effectué ou la flèche reportée, s'il s'agit d'un allongement/raccourcissement, concernant le jeu des failles

inverses (2.3 et 2.4), décrochantes (2.7 et 2.8) ou encore normales (2.7, voire 2.13 et 2.14) ! C'est parfois difficile, pour le correcteur, de discerner le bon grain de l'ivraie... Heureusement, il a été spécifié dans la question 2.2 qu'il s'agissait de la zone en gris pour les failles majoritaires. L'allongement lié aux failles inverses, n'a quasiment jamais été reporté comme vertical. Il est placé perpendiculairement au raccourcissement dans le plan de la figure 2 et d'orientation WNW-ESE. Cette erreur se poursuit, mais de façon moindre, en réponse aux questions 2.13 et 2.14, quand il s'agit du raccourcissement lié aux failles normales. D'une manière générale, les relations entre ellipsoïdes de déformation et des contraintes ne sont pas bien assimilées. La plupart des copies n'ont pas reporté l'un ou l'autre des ellipsoïdes ! Quand ils le sont, les reporter par rapport au nord, ou par rapport à la chaîne himalayenne, semble avoir été un exercice très difficile. Et on cherche toujours la position des axes de déformation ou des contraintes qui sont placés verticalement ou par rapport au nord. Par ailleurs, le terme « compressif » n'est pas régulièrement reporté quand il s'agit d'indiquer le régime tectonique. On lui préfère souvent les termes de « convergence » ou « collision » en réponse aux questions 2.2 et 2.4. La réponse est un peu redondante en 2.4 car si la réponse est mauvaise en 2.2, elle le sera aussi en 2.4. Il existe parfois des variations dans les réponses apportées aux questions 2.2 et 2.4 : le régime « compressif » en 2.2 peut devenir de « convergence » ou de « collision », comme s'il s'agissait de synonymes !

2.5. Une faille inverse est une discontinuité mécanique présentant un pendage important (théorique entre 30° et 45°) et séparant les terrains en deux blocs : un toit (au-dessus de la faille) et un mur (en-dessous de la faille). Le long de cette surface se produit un mouvement tangentiel entre les blocs. Le mouvement du toit se faisant à l'opposé du sens de pendage de la faille, on parle de faille inverse. Un chevauchement est un contact anormal peu incliné (moins de 30°), le long duquel s'effectue un mouvement des unités supérieures – l'allochtone – sur les unités inférieures – l'autochtone – suivant un jeu inverse. Ce mouvement est essentiellement à composante horizontale, et permet le raccourcissement horizontal ainsi que l'épaississement vertical.

Évidemment, les réponses sont largement incomplètes. La discontinuité mécanique est rarement évoquée même si on parle parfois de roches « recoupées ». L'angle du pendage est lui aussi peu signalé, le dessin devant parler de lui-même. Les schémas reportent rarement les termes de « mur » et de « toit », même s'il est souvent signalé dans le texte le mouvement respectif des blocs de part et d'autre de la faille. En général, sur le schéma, le sens du mouvement des deux blocs est correctement reporté. Quant au chevauchement, les notions sont moindres que pour celles sur les failles inverses. Le plus souvent elles se réduisent au chevauchement de plaques lithosphériques, à partir d'une zone de subduction ! Si le contact sub-horizontal est souvent illustré sur le dessin, parfois après quelques contorsions, à partir d'une faille inverse plus pentue, le chevauchement n'apparaît le plus souvent que comme enraciné sur une faille inverse. Autrement dit, les notions d'allochtone et d'autochtone sont quasi absentes des copies, ou encore celles d'unités inférieures ou supérieures. Ceci semble indiquer que de grands pans de la tectonique alpine, par exemple, n'ont pas été bien assimilés ! Exceptionnellement, une copie illustre la création d'un chevauchement à partir de plis couchés. Peu de copies signalent que les deux structures résultent d'une tectonique compressive, avec le chevauchement comme résultat extrême de cette tectonique. L'épaississement vertical et le raccourcissement horizontal ne sont pas souvent signalés comme la conséquence du fonctionnement de ces structures. En résumé, on constate qu'un seul élément descriptif est le plus souvent reporté pour définir chaque type de structure, venant en appui aux deux dessins qui se contentent de placer respectivement un pendage fort ou faible entre deux blocs ou deux portions de lithosphères.

2.6. Sur la figure 3, on constate que le taux de raccourcissement horizontal en Himalaya varie de 10 à 18 mm/an. La convergence est de 48 mm/an (question 1.4), il manque donc au moins 30 mm/an qui ne sont pas absorbés par la déformation compressive himalayenne.

C'est une question à laquelle il est largement répondu. Le taux est souvent reporté avec des valeurs moyennes. Et la notion d'absorption du déplacement relatif est bien comprise, même si toujours pas bien exprimée. Selon la réponse aux questions 1.3 et 1.4, l'écart entre le déplacement de l'Inde et le taux de raccourcissement peut varier d'une copie à une autre. Toutefois, il existe quelques copies où il n'y a pas de réponse au sujet de l'absorption du déplacement.

2.7. Au sud et au centre du Tibet, les mécanismes au foyer sont respectivement en distension et décrochants. Le seul rendu de la figure annotée avec des légendes claires était accepté.

Là encore, les candidats ont bien interprété les « beach-ball » et désigné, en partie ou en totalité, les zones en distension et celles en décrochement. Les limites de ces zones sont parfois approximatives. Certains n'ont pas trouvé la zone en distension. Une zone en compression additionnelle, la plus septentrionale, est alors parfois signalée à sa place. L'encadré, au bas de la figure, prévu pour la légende, a été, le plus souvent, correctement rempli, avec le signalement des deux zones respectives, souvent accompagnées de la flèche de raccourcissement général dans la chaîne himalayenne et celui de l'allongement, à 90°, dans le plan de la feuille. Plusieurs copies témoignent d'une confusion entre failles normales et failles inverses, ce qui va se retrouver dans les autres questions (2.11 à 2.14).

2.8. À partir des figures 2 et 4, on a constaté que le régime tectonique dans le centre du Tibet était décrochant. Les failles choisies sont donc *a priori* à jeu décrochant ce qui est confirmé par les mécanismes au foyer décrochants qui sont superposés au tracé des failles choisies sur la figure 2. Pour la faille de l'Altyn Tagh, le bloc nord se déplace très peu, le bloc sud se déplace vers l'Est. Pour la faille du Kunlun, le bloc nord se déplace vers l'est, mais moins vite que le bloc sud. Pour la faille de Xian Shui He, le bloc nord se déplace vers l'est mais également moins vite que le bloc sud. Il s'agit donc de trois failles senestres.

Les réponses ont été extrêmement variables d'une copie à l'autre. Cette question a donc été bizarrement assez discriminante. Certains candidats, bien qu'en reportant que les failles étaient dans une zone en décrochement, ont finalement indiqué, après avoir étudié chaque faille, que toutes n'étaient pas décrochantes, seulement 2/3 ou 1/3 d'entre elles, et que les autres étaient inverses, voire parfois normales. Quant au sens des failles décrochantes, il n'est pas toujours indiqué « senestre », loin de là. Dans de nombreuses copies, le sens de la faille n'est pas indiqué du tout. Dans d'autres copies, elles sont indiquées comme dextres ; parfois l'une est dextre et l'autre senestre. C'est très variable et les nombreuses confusions entre faille normale *versus* inverse ou dextre *versus* senestre sont surprenantes.

2.9. Les différents blocs constituant le Tibet se déplacent globalement vers l'ENE grâce au jeu des failles décrochantes qui le parcourrent. On constate que le déplacement horizontal total sur ces failles est de 34 mm/an, ce qui correspond à l'ordre de grandeur de 30 à 38 mm/an de convergence résiduelle de la question 2.6. Une partie de la convergence n'est pas accommodée par le raccourcissement dans la chaîne himalayenne (question 2.6) ; elle est transmise horizontalement au nord de l'Himalaya et permet le jeu décrochant des grandes failles tibétaines. Cela constitue l'extrusion continentale.

Dans l'ensemble, les candidats ont bien compris la notion d'accommodation de la déformation : ils signalent qu'une partie de la convergence a été transmise par les failles décrochantes. L'amplitude reportée dans les copies sur la valeur de cette transmission varie selon l'estimation du déplacement de l'Inde, de celle des failles chevauchantes par rapport aux failles décrochantes. L'amplitude reportée est donc très variable selon les copies même si la compréhension du processus est acquise. Il existe quelques réponses fantaisistes, hors sujet, surtout lorsque les réponses aux questions 1.3 et 1.4 sont incomplètes et que le jeu des failles décrochantes n'a pas été bien compris à la question 2.8. Plusieurs copies n'ont pas du tout traité cette question.

2.10. Le réseau hydrographique incise le plateau surélevé et forme des vallées séparées par des lignes de crêtes. Les cours d'eau incisant le plateau transportent les particules du substratum érodé jusqu'à l'exutoire du bassin versant. La diminution brutale de la pente (et de la vitesse d'écoulement) après l'exutoire permet le dépôt des particules détritiques sous la forme de cônes alluviaux qui s'étendent dans la plaine. Les termes attendus en légende de la figure 6 étaient : plaine alluviale, cônes alluviaux, exutoire de cours d'eau, bassins versants, lignes de crête et facette triangulaire.

Quasiment tous les candidats ont répondu à la question avec des bonheurs divers. Certains sont extrêmement elliptiques quant à la description et leur réponse -bonne- se limite à indiquer : érosion – transport – dépôt, avec une ligne de commentaires. D'autres sont plus prolifiques et décrivent différents types d'érosion avec moultes informations sur les différents mécanismes impliqués, voire même sur le climat et la tectonique ! Quant à la figure à légendier, le placement des termes est généralement bien reporté, de façon plus ou moins élégante. Certains, parmi les meilleures

réponses, séparent par un trait, les zones d'érosion et de transport, de celles du dépôt, par rapport à la plaine alluviale, donnant au schéma une vue synthétique assez satisfaisante.

2.11. L'escarpement suit une surface fortement pentée vers la plaine qui peut être une faille. La plaine représente le toit de la faille, le plateau surélevé représente le mur de celle-ci. Le mouvement du toit se fait dans le même sens que le sens de pendage de la faille, c'est donc une faille normale. On attendait les légendes suivantes : toit, mur, faille normale et surtout la flèche du jeu de la faille.

Beaucoup de copies montrent en 3D ou 2D, un escarpement, mais pas toujours lié à une faille, qui plus est, une faille normale. Certains ont même reporté trois dessins, confondant les questions, ce qui fait avec la question suivante, six dessins reportés ! Là encore, les termes de « mur » et « toit » sont peu indiqués : il est noté « plateau » et « plaine ». Le report des flèches n'est pas systématique à côté du plan de faille. Quelques copies confondent (encore) faille inverse et faille normale.

2.12. L'élément X est le remplissage sédimentaire qui se dépose pendant le jeu de la faille normale : ce remplissage est syn-tectonique. Le fonctionnement en jeu normal de la faille se fait par succession d'événements sismiques provoquant des rejets successifs de petite amplitude (quelques centimètres à dizaine de cm par exemple). On parle de déformation incrémentale. La faille doit être listrique en profondeur, ce qui permet la rotation du bloc constituant le toit. Pendant le fonctionnement de la faille, donc pendant la rotation du bloc, les sédiments se déposent dans l'espace disponible généré. Les sédiments les plus anciens sont à la base de l'élément X et donc ceux qui ont enregistré la plus grande quantité de rotation totale du bloc.

Le terme « sédimentation syn-tectonique » a été reporté dans peu de copies. Et la formation de cet élément X n'a pas pu être correctement traitée, que ce soit dans le texte ou à partir des trois dessins demandés. La plupart des copies montrent qu'il s'agit d'un dépôt au pied d'un escarpement, que cet escarpement ait été à l'origine créé par le jeu d'une faille normale ou non. Il existe des dessins avec faille inverse, voire quasiment un début de subduction ! De nombreuses copies font référence à la formation d'un bassin molassique avec subsidence liée soit à une faille, soit au poids des sédiments. Le dessin reporte parfois la forme liée au basculement des couches par subsidence dans un environnement faillé ou non. Par ailleurs, tous ceux qui ont reconnu un remplissage syn-tectonique n'aboutissent pas forcément à la mise en oeuvre de blocs basculés et d'une faille listrique pour rendre compte de la morphologie des sédiments déposés. Le lien entre remplissage sédimentaire, bloc basculé et faille listrique n'est clairement pas assimilé ; il en va bien entendu de même pour la déformation incrémentale (ourtant indispensable au remplissage sédimentaire caractéristique). Les candidats n'ont aucune notion quant à la durée, l'échelle et à l'amplitude de nombre de processus de « base ».

2.13. On observe des failles normales orientées N-S (avec leurs barbules sur la carte, et en cohérence avec la proposition de failles normales établie en question 2.10). Ces failles normales sont à pendage opposé et convergent : ce sont des failles conjuguées. Une série de grabens orientés N-S affecte donc le sud du plateau du Tibet.

De nombreuses copies reportent la présence de failles normales, sans pour autant penser à donner l'orientation de celles-ci et/ou la présence de failles conjuguées. Par contre il est plus facilement signalé la présence de rifts ou de grabens que de failles conjuguées. Toutefois, le nombre de copies qui signale la présence de rifts ou grabens est assez faible.

2.14. La direction d'allongement est orthogonale à la direction des failles : ici E-W. Le raccourcissement est vertical (amincissement). On en déduit que  $\sigma_1$  est verticale,  $\sigma_3$  est E-W, et donc  $\sigma_2$  est N-S (les valeurs azimutales des directions étaient aussi acceptées).  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  sont dans le plan horizontal,  $\sigma_1$  est verticale, il s'agit donc d'une tectonique extensive.

Il y a eu beaucoup de difficultés pour passer de la reconnaissance des failles normales à celle des contraintes responsables de la formation de ces failles. Si beaucoup de copies reportent l'existence d'un allongement proche de E-W, ces mêmes copies n'évoquent pas un raccourcissement vertical. Ainsi, le report des contraintes est généralement faux ou très incomplet. En fait, les candidats semblent avoir été perturbés par l'existence d'une part, d'une contrainte maximale  $\sigma_1$  NNE-SSW, liée à la compression générale dans l'Himalaya et d'autre part, de failles normales, parallèles à la contrainte principale dans la chaîne,  $\sigma_1$ . Or, pour expliquer les failles normales,  $\sigma_1$  devait être localement orienté différemment. En fait, beaucoup de candidats ont choisi de maintenir la contrainte maximale  $\sigma_1$  NNE-SSW et de placer la contrainte minimale  $\sigma_3$ , au mieux, proche de E-W. Ainsi

pour les failles normales, une seule des contraintes  $\sigma_3$ , a été bien placée, et pas les deux autres,  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ . Le nombre de copies avec une réponse correcte et complète est excessivement faible.

2.15. L'augmentation de l'épaisseur de la chaîne augmente la valeur de la force de poids développée par le relief, ainsi que la valeur de la force d'Archimède développée par la racine crustale. Ces contraintes verticales liées à l'épaississement peuvent augmenter au point de dépasser la valeur de la contrainte horizontale transmise par la convergence. Lorsque cette limite est atteinte, la contrainte maximale devient verticale, et la région passe en régime tectonique extensif.

Certaines copies évoquent l'épaississement de la chaîne susceptible d'entrainer un certain effondrement et donc la formation de structures en extension. Le rôle éventuel de la force d'Archimède est parfois évoqué, mais sans conclure sur la variation de l'intensité des forces en présence, avec l'augmentation progressive de la contrainte verticale. Un dessin n'était pas exigé, mais pouvait constituer un bon palliatif à des longues et laborieuses explications.

### 3. L'ÉQUILIBRE ISOSTATIQUE EN HIMALAYA-TIBET

Le début de cette partie n'a pas apporté les points que l'on pouvait escompter à cause des définitions de piètre qualité (3.1 et 3.6) et des erreurs de calculs (3.2 et 3.3) qui ont entraîné ensuite de mauvaises réponses (3.4). Par ailleurs, l'interprétation de la figure 9 liée à la question 3.7 n'étant pas forcément immédiate, l'observation des anomalies de Bouguer a été dans l'ensemble assez négligée.

3.1. 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.

La définition de l'isostasie est très variable d'une copie à une autre et souvent incomplète, souvent même incompréhensible dans la forme et le fond. Il y a beaucoup de confusions. On peut trouver dans cette définition des commentaires sur l'équilibre isostatique mais il n'est pas souvent fait référence à l'existence d'une surface de compensation. Le modèle PREM est signalé à plusieurs reprises pour définir les mécanismes liés à l'isostasie.

3.2. On a de manière classique :  $h_{\text{racine}} = (\rho_{\text{Croûte}}) / (\rho_{\text{Manteau}} - \rho_{\text{Croûte}}) * h_{\text{relief}}$

$$\text{donc } h_{\text{racine}} = 33,6 \text{ km}$$

La profondeur du Moho est donc de  $40 + 33,6 = 73,6$  km (par rapport à une valeur 0 de la profondeur qui serait la plaine de l'Inde).

Les réponses qui donnaient une profondeur de Moho sous le Tibet de 79,6 km, partant d'une valeur 0 de la profondeur à 6000 mètres d'altitude étaient également validées, si les explications étaient claires.

Pour traiter cette question, beaucoup de candidats ont utilisé le schéma d'Airy. La position des termes utilisés dans leur équation de départ sur l'équilibre des forces/masses en présence dans deux colonnes, au-dessus de la surface de compensation, n'a pas toujours été reportée, de même que l'existence ou la position de cette surface. Des erreurs sont intervenues dans l'établissement de l'équation et dans les calculs pour trouver la valeur de l'épaisseur de la racine entraînant des impossibilités à répondre ensuite correctement à la question 3.8.

3.3. On a un épaississement de :  $e = (e_{\text{finale}} - e_{\text{initiale}}) / e_{\text{initiale}}$

$$\text{donc } e = 39,6 / 40 = 99 \%, \text{ soit un doublement de l'épaisseur de la croûte.}$$

L'épaississement de 39,6 km est donc réparti en 6 km de relief, soit 15 % et 33,6 km de racine, soit 85 %.

3.4. La figure 8 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.

Si le calcul a été correctement effectué à la question 3.2, la plupart des copies indiquent que l'équilibre isostatique a été atteint.

3.5. Définition anomalie de Bouguer : une anomalie de Bouguer est l'écart entre la valeur de l'attraction gravitationnelle  $g_0$  (qui sert de référence) et la valeur de l'attraction gravitationnelle mesurée  $g_m$  qui a été corrigée des effets du relief.

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.

Cette valeur mesurée est corrigée et maintenant comparée à une valeur référence calculée, située à l'altitude 0 et ne présentant pas de relief anomalique. La différence entre  $g$  mesuré corrigé et  $g_0$ , appelée aussi « résidu », constitue l'anomalie de Bouguer. Interprétation de l'anomalie : si elle est négative, il existe en profondeur un volume anormalement peu dense (et inversement).

Les candidats connaissent assez bien l'anomalie de Bouguer, la façon dont elle est calculée et la signification de son signe. Toutefois, la définition *sensu stricto* est de piètre qualité, incomplète, voire inexacte. Beaucoup n'utilisent pas le terme d'écart ou de différence pour exprimer ce qu'est une anomalie gravimétrique. Les notions de pesanteur ou de gravité semblent aussi souvent absentes. À la place, des commentaires sur les effets de l'anomalie gravimétrique interviennent dans la définition. Les corrections de  $g$  mesuré sont signalées en totalité ou en partie mais l'équation illustrant l'écart de cette anomalie gravimétrique est assez peu reportée dans son intégralité. On retrouve les mêmes travers que pour la question 2.1 au sujet du mécanisme au foyer. On définit le principe à partir des techniques d'utilisation du principe en question, sans reconnaître, voire comprendre, le principe sous-jacent lui-même. D'où l'impression, pour le lecteur, d'une connaissance superficielle des différents mécanismes utilisés en géophysique ou tectonique.

3.6. Le modèle d'Airy est un modèle d'équilibre isostatique, qui postule que la pression lithostatique sur la surface de compensation est égale en tout point. Dans ce modèle, l'équilibre latéral des pressions est permis par une variation de l'épaisseur des blocs situés au-dessus de la profondeur de compensation. Ce modèle, appliqué aux orogènes, propose que les racines crustales équilibrent l'excès d'attraction gravitationnelle généré par les reliefs.

Les réponses sont parfois incomplètes ou très vagues, voire même absentes. Elles peuvent se résumer à l'esquisse d'un dessin du modèle d'Airy qui s'avère insuffisamment compris. Le dessin vient souvent conforter cette méconnaissance du modèle. On se rend compte alors que le savoir est assez superficiel, ce qui se traduit ensuite par des difficultés à interpréter les variations de l'anomalie de Bouguer. Beaucoup de candidats avaient déjà proposé un schéma de type Airy pour répondre à la question 3.2, ils ont donc renvoyé le lecteur à leur précédente réponse.

3.7. On voit sur la figure 9 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 3.4). 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.

L'étude pas à pas des deux courbes sur une distance de 1500 km n'a quasiment jamais été effectuée. Seules, de très rares copies signalent que les deux courbes sont superposables à des centaines de km en dehors de la chaîne himalayenne. Au niveau de l'Himalaya, la signification de l'excès ou du déficit de masse est simplement appliquée par rapport au modèle d'Airy : il est conclu que l'équilibre n'est pas encore atteint. L'évocation de la flexuration de la lithosphère pour expliquer les anomalies reste une exception.

#### 4. LES PROCESSUS DE STRUCTURATION DU DOMAINE HIMALAYA-TIBET

4.1. Roche A : roche sombre, présentant une foliation à l'échelle de l'affleurement. Cette foliation est portée par l'alignement des minéraux sombres. À l'échelle de la lame mince, on voit une texture

holocristalline grenue (grains jointifs et sans ciment). Les minéraux présents sont l'olivine et l'orthopyroxène. Nous sommes donc face à une périclase manteau, la harzburgite.

- Roche B : l'affleurement montre une roche sombre sans cristaux visibles, organisée en coussins. Sur la lame mince, la roche présente une texture hémicristalline microlithique. Les minéraux principaux sont le plagioclase et le clinopyroxène. Cette roche est donc une roche magmatique volcanique, le basalte en coussins (pillow lava).

- Roche C : la roche présente une texture holocristalline grenue. Les minéraux majoritaires sont le plagioclase et le clinopyroxène. Cette roche est donc une roche magmatique plutonique, le gabbro.

4.2. Le basalte en coussins est issu du refroidissement et de la cristallisation partielle d'un magma basaltique émis en surface (roche volcanique). Le débit en coussins montre que cette lave s'est écoulée en milieu sous-aquatique.

4.3. La roche C est issue du refroidissement et de la cristallisation du même type de magma, le magma basaltique. Le magma n'atteignant pas la surface, son refroidissement lent permet sa cristallisation intégrale et la formation de cristaux de grande taille visibles à l'œil nu. C'est donc l'équivalent, plus en profondeur, de la roche B. La roche A est une périclase du manteau. L'absence de clinopyroxène montre que c'est une harzburgite, résidu non fondu lors de la fusion partielle de la périclase juvénile (lherzolite).

Il y a une amélioration certaine des descriptions avec un effort notable pour hiérarchiser les observations présentées et leur qualité. Mais il reste que les termes utilisés pour décrire ne sont pas toujours compris : on parle de « microlithique » pour une roche grenue en juxtaposant, sans complexe, les deux termes « roche grenue » et « microlithique ». Il y a en fait beaucoup de contradictions que ce soit pour définir les textures ou la nature des roches d'après leur composition minéralogique. Ainsi, la présence de clinopyroxène et de plagioclase dans les roches B et C est signalée, mais il est conclu pour B à la reconnaissance d'un basalte, ce qui est correct, et pour C à celle d'un granite ! Cette attribution du nom de granite à partir d'une roche avec clinopyroxène et plagioclase, alors que l'on avait reconnu précédemment un basalte, avec les deux mêmes minéraux, n'a pas été du tout rare dans les copies ! Évidemment, la reconnaissance d'une périclase a été encore plus difficile, même quand il est signalé la présence d'olivine et de pyroxène. L'absence de plagioclase, signalée lors de la description, n'empêche pas certains candidats de conclure à la présence d'un gabbro.

4.4. Le trait pointillé marque la limite entre les séries magmatiques alcalines (en haut) et les séries magmatiques calco-alcalines ou tholéitiques (en bas). Les roches A, B et C appartiennent à la série calco-alcaline (on accordait des points pour série tholéitique).

La signification du pointillé en tant que courbe séparant deux domaines de séries, alcaline et calco-alcaline / tholéitique, est peu connue des candidats. Souvent cette ligne n'est pas définie, ou alors elle représente la ligne d'évolution de la série magmatique en question (roches A, B et C) ; cette courbe a été aussi interprétée comme un géothermomètre ou bien a reçu toute autre appellation en lien ou non avec le magmatisme.

4.5. Ces trois roches forment un fragment de lithosphère océanique formé aux dorsales par décompression adiabatique du manteau périclase sous-jacent. La décompression de la lherzolite permet sa fusion partielle et la formation d'un produit de fusion : le magma basaltique à l'origine des basaltes (roche B) et des gabbros (roches C) et d'un résidu de fusion, la harzburgite (roche A).

Pour ceux qui ont répondu sur l'existence d'un magmatisme « basique », tholéitique, le contexte géodynamique de dorsale, immédiatement cité, a permis de présenter aisément un modèle de mise en place des roches A, B et C, à l'axe d'une dorsale médio-océanique. Mais ceux qui ont opté pour une zone de subduction, compte tenu de la reconnaissance d'un magmatisme calco-alcalin, ont pu aussi présenter un modèle de fusion, plus ou moins hydratée étant donné le contexte, et une montée des magmas en surface et en profondeur pour donner tous les types de roches observés, même si l'association des trois termes, périclases, gabbros et laves, est loin d'être systématique dans un arc insulaire (sauf dans les arcs insulaires immatures). La réponse sur la mise en place des roches A, B et C, est parfois redondante avec celle donnée à la question 4.3 qui montre le lien génétique entre ces trois roches. Des candidats, pour préciser la relation entre ces roches, ont alors évoqué la fusion de A, pour produire un magma à l'origine des roches B et C, mises en place en surface ou en profondeur.

4.6. Le taux de fusion partielle peut être estimé entre 13 et 24 %. Ce taux de fusion partielle, relativement élevé, est compatible avec un contexte d'expansion océanique.

La réponse chiffrée est simplement basée sur l'observation du diagramme. Elle n'a pas posé de problème. Plus problématique a été la réponse sur l'interprétation du taux de fusion, réputé plus faible dans les arcs, à cause de la fusion hydratée, que dans les dorsales médo-océaniques. Certains candidats ont été étonnés du taux de fusion qu'ils ont estimé trop important dans un contexte d'arc, et à juste titre.

4.7. Il y donc un processus d'accrétion océanique. On acceptait : formation d'un océan ou expansion océanique au Crétacé (inférieur) entre l'Inde et l'Asie.

Selon l'interprétation du magmatisme à la question 4.4, les réponses ont porté sur l'existence soit d'une accrétion médo-océanique, soit d'une subduction, avec dans ce dernier cas, pour la suite des questions, des effets dévastateurs pour comprendre la succession des événements géologiques, à cause de l'absence d'un océan, dont l'existence aurait été suivie ensuite de deux subductions ! Beaucoup de ceux qui ont reconnu un magmatisme tholéïtique et ensuite un océan, ont très peu indiqué dans le tableau récapitulatif de la question 5, la présence d'un océan. Par contre, la subduction a souvent été signalée au Crétacé inférieur dans ce tableau.

4.8. Les « unités X » sont des ophiolites. Ces fragments de lithosphère océanique sont charriées sur le continent via un chevauchement basal lors d'un processus d'obduction.

De très nombreuses copies ont reconnu la présence d'ophiolites dans cette unité X. Et pourtant de nombreux candidats qui n'avaient pas su reconnaître une péridotite dans l'assemblage d'olivine et d'orthopyroxène de la figure 4.1, ne sont pas revenus ensuite sur la détermination de cette roche A. En ce qui concerne le déplacement des ophiolites en domaine continental, il y a peu de réponse qui indique une obduction. Une mise en place grâce à la tectonique, avec présence de failles, est évoquée. Parfois, les candidats parlent à juste titre de chevauchements et en cela, ils reconnaissent que les ophiolites ont été charriées sur le continent, mais sans évoquer une obduction. Ce mécanisme ne semble pas, à leurs yeux, prioritaire pour la mise en place des ophiolites sur le continent, tout du moins dans le contexte himalayen qu'ils ont eu à considérer. Les candidats parlent plus volontiers d'« exhumation », après un processus plus ou moins obscur qui impliquerait l'enfouissement ou non des ophiolites en profondeur en raison du métamorphisme sous faciès schistes bleus qui les affecte. La question 4.8 portait sur une connaissance générale sur la mise en place d'ophiolite, comme celle de l'Oman, sur le continent. Il faut dire que dans ces conditions, la présence d'ophiolites est liée à une obduction, et les ophiolites sont alors indemnes du métamorphisme de haute pression. Dans le cas himalayen, les roches D et E étudiées dans la question 4.9, dériveraient du fonctionnement d'une zone de subduction. On envisage alors que la croûte océanique enfouie, métamorphisée en faciès schistes bleus, remonte grâce à un processus tectonique que les candidats ont appelé « exhumation » sans en détailler précisément le processus, et s'incorpore, sous forme d'écaillles, aux formations continentales. Dans cet exemple, on ignore s'il y a eu à l'origine obduction partielle ou totale des ophiolites sur le continent, avant l'enfouissement dans une zone de subduction.

4.9. Roche D : on observe une roche métamorphique présentant une paragenèse constituée de cristaux globulaires rouges à bruns et de minéraux vert bouteille. En lame mince, on voit que les minéraux rouges à bruns sont des grenats et que les minéraux verts sont de l'omphacite, un clinopyroxène. La roche présente également quelques amphiboles. La roche D est une éclogite.

- Roche E : la lame mince montre une paragenèse à glaucophane et lawsonite, nous sommes donc face à un schiste bleu.

4.10. Ces roches sont des métabasites. Les protolithes possibles sont donc des roches magmatiques basiques (gabbro, dolérite, basalte).

Les candidats ont reconnu assez facilement l'éclogite. Le schiste bleu leur a posé plus de problèmes quant à sa reconnaissance et à la nature du protolithe, à cause de la présence de quartz en abondance dans la lame mince et de la taille réduite des minéraux. Beaucoup de copies ont indiqué comme protolithe un gabbro sans doute à cause de l'éclogite. Mais de nombreuses autres copies ont reporté un granite comme protolithe des roches métamorphiques, en justifiant leur réponse par la présence de quartz en abondance dans le schiste bleu. Cette réponse semblait, sans doute,

d'autant plus plausible, qu'un magmatisme calco-alcalin avait été reconnu précédemment à partir du diagramme TAS. Certaines copies donnent deux protolithes : un gabbro pour l'éclogite, et un granite pour le schiste bleu...

4.11. La coésite est un polymorphe de  $\text{SiO}_2$  d'ultra haute pression. Dans les inclusions des grenats, on voit localement de la coésite, et du quartz, un polymorphe de  $\text{SiO}_2$  de basse pression. Dans une inclusion fermée,  $\text{SiO}_2$  s'est transformé en coésite ou en quartz au cours des variations de pression. La présence des fractures radiales montre que dans l'inclusion il y avait de la coésite qui s'est ensuite transformée en quartz (polymorphe de plus grand volume molaire car forme de plus basse pression donc moins dense), c'est une évolution rétrograde. Les éclogites sont donc passées par un domaine d'ultra haute pression à coésite, puis l'exhumation a permis le développement du quartz à la place de la coésite ce qui a provoqué la fracturation des minéraux contenant des inclusions de  $\text{SiO}_2$ .

Cette question faisait appel à une certaine culture géologique et au bon sens. Il y a ceux qui se sont intéressés à la signification de la coésite dans le métamorphisme alpin de haute pression. Et ces quelques rares candidats ont pu répondre sur le polymorphisme du quartz et de la coésite ainsi que sur le rétromorphisme qui a conduit à la transformation de la coésite en quartz et ainsi à la fracturation des minéraux environnants. Mais ces candidats sont assez rares. Le plus souvent, il n'y a pas eu de réponse, des réponses partielles, ou pas de réponse correcte. Les réponses ont été parfois très hasardeuses, avec la proposition de processus complexes et hétérogènes, selon que la pression (et la température) monte ou descende. Ainsi, il est signalé l'existence de quartz qui occuperait moins de volume que la coésite, ou celle du remplacement de la coésite par le quartz à haute pression...

4.12. Sur la figure 15, la roche D devait être placée dans le domaine de stabilité de la paragenèse  $\text{Omph} + \text{Grt} + \text{coésite}$  ; la roche E dans le domaine de stabilité  $\text{Gln} + \text{Lws}$ . Le gradient résultant passe par 0, par la zone de stabilité de  $\text{Gln} + \text{Lws}$ , et par la zone de stabilité de  $\text{Omph} + \text{Grt} + \text{coésite}$ , en prenant garde à ne pas dépasser les réactions de transformation de la lawsonite en epidote.

La roche D (éclogite) a été placée, le plus souvent, dans le secteur avec grenat, omphacite et quartz. Quelques candidats l'ont placé, à juste titre, sur la droite entre coésite et quartz ou directement dans le champ de la coésite, à proximité de la droite coésite-quartz. Pour le schiste à glaucophane, la plupart des candidats l'ont bien placé dans le champ lawsonite + quartz + glaucophane. Par contre, le tracé du gradient est un échec total. Diverses courbes ont été tracées, passant par les deux points reportés, et illustrant un métamorphisme prograde, puis rétrograde. Le problème est que ces chemins ne passent jamais par l'origine. Seuls de rares candidats ont tracé une droite passant par l'origine et qui ne recoupe pas le champ de l'épidote.

4.13. On obtient un gradient possible entre 5,8 et 8,7°/km (toutes les valeurs intermédiaires étaient acceptées si elles étaient cohérentes avec le tracé). C'est un gradient HP-BT.

Pour la roche D, la présence de coésite implique une pression d'au moins 2,5 GPa soit 75 km (des profondeurs entre 70 et 80 km étaient validées). Pour la roche E, la pression est comprise entre 0,7 et 2,2 GPa, donc entre 21 et 66 km (des profondeurs minimales descendant jusqu'à 20 et maximales allant jusqu'à 75 km étaient admises).

La valeur du gradient a été rarement estimé, compte tenu de l'absence de tracé correct dans les copies. Des profondeurs extravagantes, parfois jusqu'à 250 km, mais aussi des températures associées peu réalistes sont souvent apparues. Peu de copies reportent le terme de métamorphisme franciscain. D'autres copies indiquent un métamorphisme haute pression – moyenne température à la place de basse température.

4.14. Un protolithe de roches magmatiques basiques subit un enfouissement rapide suivant un gradient HP-BT. On peut donc proposer que le domaine océanique précédemment accrétié au Crétacé subit une subduction océanique à l'Éocène.

Quand elle a été abordée, la réponse à cette question s'est assez facilement imposée et les candidats ont opté pour la subduction.

4.15. Roche F : roche métamorphique présentant une foliation minéralogique organisée en lits minéralogiques clairs et lits minéralogiques sombres. On retrouve du quartz, du plagioclase, de la muscovite et de la biotite, ainsi que des minéraux typiques du métamorphisme : le grenat et la sillimanite. C'est un gneiss.

- Roche G : cette roche présente (sur les deux photos) des lentilles d'une roche claire à texture grenue (probablement de composition granitique) entourée par un liseré de minéraux sombres (des biotites). Le liseré se voit bien sur la photo de gauche. Autour de ces lentilles, la roche présente une foliation classique de gneiss. Nous sommes donc face à une migmatite, dont les lentilles claires représentent le leucosome (produit de fusion), les liserés sombres le mélanosome (résidu de fusion), et la roche foliée le paléosome ou mésosome (roche source). Sur la photographie de droite, on voit que les produits de fusion coalescent et migrent au sein du mésosome.

- Roche H : on voit une roche magmatique à texture grenue, donc une roche plutonique. La minéralogie est faite de minéraux clairs : plagioclase, quartz, feldspath potassique, muscovite et de minéraux sombres visibles uniquement sur la photographie de gauche (ici des tourmalines). Nous observons donc un granite.

Il n'y a pas eu de description ou une description plus que sommaire, en une ligne ; les candidats ont souvent mentionné directement le nom des roches (sans doute faute de temps). On est loin de remplir la page, comme ce fut le cas pour les premières descriptions des roches A, B et C. Dans l'ensemble, le granite a été assez facilement reconnu grâce à sa couleur, son homogénéité et sa composition. De bonnes réponses ont été assez souvent données pour le gneiss, autrement appelé micaschiste ou parfois gabbro, ou tout autre roche... Par contre la reconnaissance de la migmatite a posé des problèmes à de nombreux candidats. En conséquence, la mise en place du granite a été parfois proposée en déconnexion totale de l'histoire des roches métamorphiques F et G, non déterminées. On parle souvent de « schistosité » à la place de « foliation », que ce soit pour le gneiss, la migmatite ou la péridotite. Les injections, voire des formes évoquant des plis, n'ont quasiment jamais été signalées dans la migmatite.

4.16. Les deux droites correspondent à la Discordia et à la Concordia. L'intercept supérieur représente l'âge du protolithe, l'intercept inférieur celui de l'âge du métamorphisme.

La plupart des candidats ont correctement dénommé la droite et la courbe. Ils sont restés beaucoup plus vagues sur les intercepts supérieur et inférieur, se limitant souvent à parler d'ouverture et de fermeture du « système », sans raccrocher ces âges à un stade de formation précis de la roche.

4.17. Un protolithe daté à 454 Ma, c'est-à-dire au Paléozoïque (Ordovicien), a subi un métamorphisme à 24 Ma, soit au Cénozoïque, après l'Éocène (précisément au Miocène) ce qui donne naissance à la roche F (gneiss). Le métamorphisme développe des cristaux de sillimanite, donc de HT ( $T > 650^{\circ}\text{C}$ ). On peut supposer un métamorphisme suivant un gradient MP-HT (dalradien). On en déduit un processus de collision continentale après l'Éocène (ici au Miocène) on acceptait « après la formation des roches D et E ».

4.18. Les gneiss (roches F) se forment par métamorphisme dans un contexte de collision au Miocène, à 24 Ma. Ils atteignent pour certains les conditions de la fusion partielle représentée par les leucosomes des migmatites (roches G) et qui est immédiatement postérieure. L'extraction et le déplacement de ces liquides permet le développement de granites intrusifs (roches H). On observe une anatexie crustale, permettant le recyclage de la croûte continentale et son rajeunissement au cours des grands cycles orogéniques.

Les deux dernières questions ont été assez peu traitées dans les copies et toujours de façon elliptique et incomplète. Au sujet de roche F, il est signalé parfois un à deux métamorphisme(s) qui ont affecté cette roche, au Paléozoïque et à 24 Ma (fin Oligocène - Miocène). Il est assez facilement indiqué, suite à la présence de sillimanite que le métamorphisme était de haute température et que l'on avait affaire plutôt à un métamorphisme dalradien. De très rares copies ont atteint cette partie du sujet. Au sujet de la roche H, l'intrusion de granite semble évidente, donc l'existence d'une anatexie pour la produire est parfois mentionnée. Toutefois le lien entre les trois roches est peu décrit, même si chez certains, les mots métamorphisme et anatexie sont reportés sans autre commentaire. La difficulté à avoir reconnu la migmatite G, peut expliquer cette absence d'évidence de lien entre les trois roches. Mais il y a surtout le fait que les derniers candidats, arrivés à ce stade de rédaction dans leur copie, n'ont plus eu le temps de synthétiser et de présenter correctement leurs réponses et conclusions.

## 5. SYNTHÈSE

La synthèse se résumait à remplir un tableau dans lequel devait apparaître les grandes étapes de l'évolution de la chaîne himalayenne avec : (i) l'expansion océanique au Mésozoïque avec formation de l'océan Téthys entre l'Inde et l'Asie, (ii) le changement de cinématique avec la convergence relative entre l'Inde et l'Asie, accommodée par une subduction océanique au Cénozoïque et des marqueurs métamorphiques, (iii) la disparition du bassin océanique et la collision continentale avec développement d'un métamorphisme MP-HT et (iv) la fusion partielle de la croûte continentale avec le recyclage de celle-ci.

Seulement de rares copies reportent quelques mots placés en face de l'échelle chronologique. Parfois c'est seulement un à deux ou trois mots qui sont reportés tels accrétion, subduction, collision, basalte, échantillons D et E, ou autres. Ces mots ne sont pas accompagnés dans les autres colonnes des processus géologiques qui s'y rapportent. Si l'on place les roches A, B et C dans une colonne, il n'est pas souvent reporté les termes accrétion, tectonique en extension ou encore dorsale... C'est sans doute par manque de temps mais pas que.

Les événements post-oligocènes ont été plus souvent reportés que les précédents, mais de façon tout à fait incorrecte. Plusieurs copies font référence à l'érosion, et assez peu aux accidents tectoniques sur lesquels ils ont eu cependant à réfléchir. La liste des événements anté-oligocènes a été délicate à établir dans le cas où la réponse à la question 4.5 a conduit à choisir l'existence d'un magmatisme calco-alcalin. En conséquence, plusieurs copies signalent deux épisodes de subductions, l'un au Crétacé inférieur à cause du magmatisme calco-alcalin et l'autre à l'Éocène avec le métamorphisme de haute-pression. De rares copies mentionnent l'existence d'une roche au Paléozoïque.

### Commentaires généraux

Le sujet a été jugé long mais très complet impliquant de nombreuses disciplines de la géologie : tectonique, géophysique, pétrographie du magmatisme et du métamorphisme. Il abordait la définition de concepts fondateurs, des descriptions de terrain et de roches, une application chiffrée et des notions de base appliquées à la compréhension de la formation d'un orogène : la chaîne himalayenne. Dans les premières parties, un cinquième du sujet portait sur des questions de cours qui auraient pu être mieux valorisées par nombre de candidats. La partie 4, qui nécessitait des connaissances sur les types de roche inscrits au programme : péridotite, gabbro, basalte, éclogite, gneiss, migmatite, granite et sur les principaux processus magmatiques et métamorphiques se déroulant aux frontières des plaques, dorsales, zones de subduction et zones de collision, a été discriminante. Le sujet était donc très varié et dense, impliquant de ce fait, une capacité à répondre de manière succincte et à synthétiser rapidement toutes les données mentionnées. De nombreux candidats ont sélectionné les questions qui leur semblaient les plus faciles ou qui n'engageaient que de courtes réponses pour clore au mieux leur copie. Ainsi seuls quelques mots-clefs ont pu être jetés dans le tableau synthétique de la question 5. Les questions de cours pouvant parfois s'étendre en raison de leur sujet d'expertise, comme celle sur la lithosphère, les mécanismes au foyer et l'anomalie de Bouguer, des candidats ont parfois perdu beaucoup de temps en y répondant de façon extensive. Par ailleurs, la description des roches peut être aussi chronophage... Au sujet de la pétrographie, on note que, par rapport aux années précédentes, la plupart des candidats ont essayé de hiérarchiser leur réponse sur la description des roches en listant leurs commentaires sur la forme, la texture et la composition minéralogique de celles-ci afin de justifier de la dénomination des roches proposées. Si certains candidats se noient parfois dans les précisions se rapportant à la définition des objets ou principes géologiques, la plupart ont plutôt tendance à donner des réponses elliptiques, incomplètes, voire superficielles. En fait, ces réponses montrent que les principes derrière les questions demandées ou les connaissances de base requises ne sont pas acquis. Des réponses sont parfois totalement incompréhensibles de par la syntaxe, le vocabulaire et le raisonnement : en dépit des difficultés dans l'expression du français, la connaissance scientifique apparaît parfois bien superficielle sur le sujet en question. Malgré la longueur, certains candidats ont su s'adapter, répondre de manière concise aux questions qui ne nécessitait pas de longs développements, intégrer et exploiter les documents proposés et rendre ainsi de très bonnes copies.