

GÉOLOGIE

Durée : 3 heures

Les calculatrices programmables et alphanumériques ne sont pas autorisées. Les téléphones portables, "smartphones" et tout autre objet connecté doivent être éteints avant le début de l'épreuve et ne doivent en aucun cas être utilisés même à titre de montre.

L'usage de tout ouvrage de référence et de tout document est strictement interdit.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il en fait mention dans sa copie et poursuit sa composition. Dans ce cas, il indique clairement la raison des initiatives qu'il est amené à prendre.

Les candidats doivent respecter les notations de l'énoncé et préciser, dans chaque cas, la numérotation de la question posée.

La rédaction se fera uniquement à l'encre bleue ou noire et l'utilisation du blanc correcteur et effaceur est interdite. Les découpages et collages sur la copie sont interdits.

Une grande attention sera apportée à la clarté de la rédaction et à la présentation des différents schémas.

Attention ! Les figures 2, 5, 15 et le tableau 1 (en annexe) sont à rendre avec votre copie, sans découpage ni collage.

Pour certaines questions associées aux figures à rendre, les commentaires sont à rédiger exclusivement dans le cadre prévu à cet effet pour chaque document. Tout texte écrit hors des cadres ne sera pas pris en compte.

QUELQUES ASPECTS DE LA GÉOLOGIE DE L'HIMALAYA – TIBET

L'Himalaya-Tibet constitue la chaîne montagneuse la plus imposante observable à la surface du globe (Fig. 1). Elle résulte de la collision entre deux plaques lithosphériques : les plaques indienne et eurasiatique. Cette collision qui s'initie à la fin du Crétacé voire au début du Cénozoïque résulte de la dérive progressive vers le nord de la plaque indienne depuis la dislocation du Gondwana au Jurassique.

1. L'HIMALAYA-TIBET, UNE FRONTIÈRE DE PLAQUES (2,5 points)

1.1. Détaillez l'ensemble des caractéristiques de l'enveloppe terrestre appelée « la lithosphère ».

1.2. Définissez une plaque lithosphérique. Décrivez le mouvement d'une plaque lithosphérique à la surface du globe.

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

1.4. Quel est le mouvement relatif de la plaque Inde par rapport à la plaque Eurasie dans cette région ? Caractérissez la direction et la norme de ce mouvement relatif.

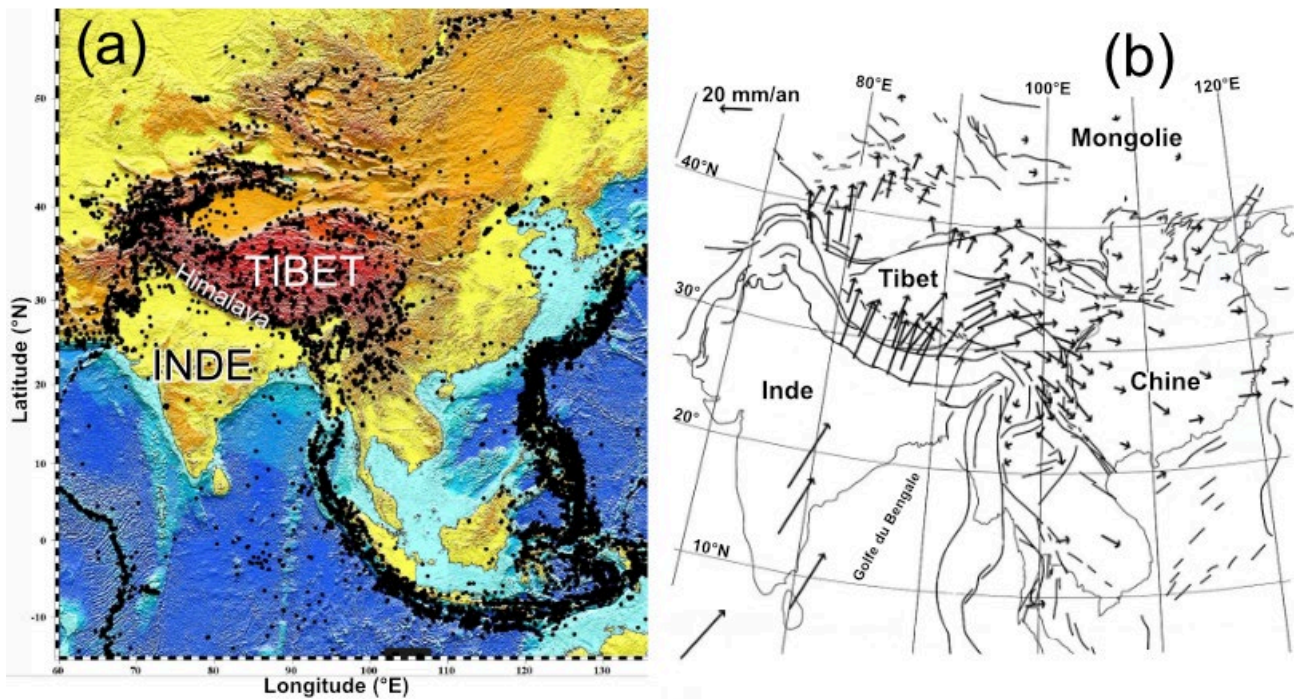


Figure 1. (a) Topographie et sismicité en Asie. Les teintes bleues correspondent à la bathymétrie. Les teintes jaunes à rouges indiquent des altitudes positives ; en jaune, les altitudes inférieures à 1000 mètres, en rouge les altitudes supérieures à 3000 mètres. Les points noirs représentent les séismes. **(b)** Déplacement mesuré par GPS, à Eurasie fixe. La longueur des flèches indique la quantité de déplacement horizontal (échelle sur la figure en haut à gauche).

2. LA DÉFORMATION DANS L'HIMALAYA–TIBET (6,5 points)

2.1. La figure 2 montre des mécanismes au foyer dans la chaîne himalayenne. Qu'est-ce qu'un mécanisme au foyer, et comment est-il construit (aidez-vous d'un dessin pour étayer votre explication) ? Comment en déduit-on le mouvement ayant eu lieu sur la faille lors du séisme ?

2.2. Sur la figure 2, déterminez les jeux de faille majoritairement observés dans la chaîne himalayenne (zone en gris).

2.3. Dessinez sur la figure 2 (**à rendre**) les directions de raccourcissement et d'allongement en Himalaya déterminées grâce à ces mécanismes au foyer.

2.4. Déduisez-en et dessinez la direction des trois contraintes principales (Indiquez la direction du Nord sur votre dessin). Quel est le régime tectonique prévalant dans la chaîne himalayenne ?

Les structures tectoniques principales en Himalaya sont le Chevauchement Central Himalayen (CCH), le Chevauchement Principal Himalayen (CPH) et le Chevauchement Frontal Indien (CFI), représentées sur la figure 3.

2.5. Définissez et caractérisez une faille inverse et un chevauchement. Réalisez un dessin comparatif pour étayer votre réponse.

2.6. Quel est le taux de raccourcissement horizontal accommodé par ces trois chevauchements majeurs (Fig. 3) ? Ce taux de raccourcissement peut-il absorber l'ensemble du déplacement relatif entre l'Inde et l'Eurasie ? Quantifiez votre réponse.

2.7. Sur la figure 2, repérez les deux grands types de mécanismes au foyer majoritaires s'exprimant au sud et au centre du Tibet. Délimitez directement sur la figure 2 (**à rendre**) les deux zones où se produisent chacun de ces types de mécanismes au foyer. Légendez les ajouts effectués sur la figure.

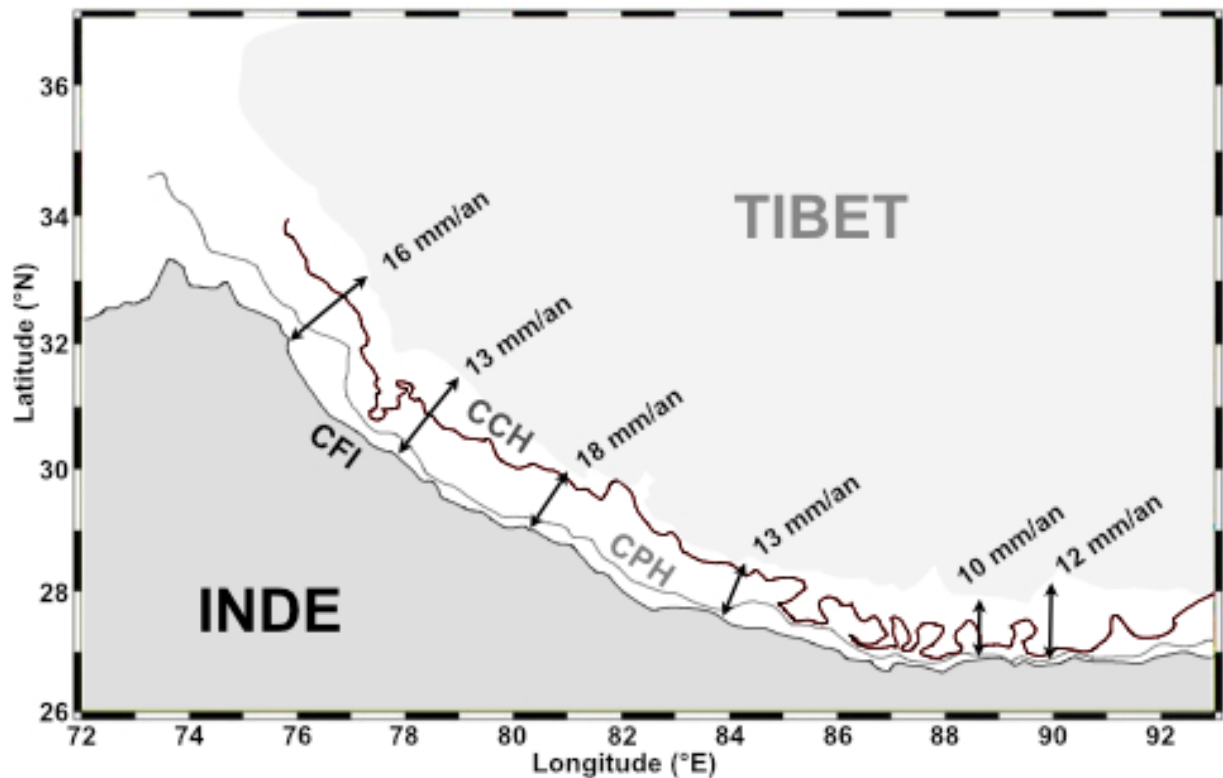


Figure 3. Taux de raccourcissement le long de l'arc himalayen, déterminés par GPS. CCH = Chevauchement Central Himalayen ; CPH = Chevauchement Principal Himalayen ; CFI = Chevauchement Frontal Indien.

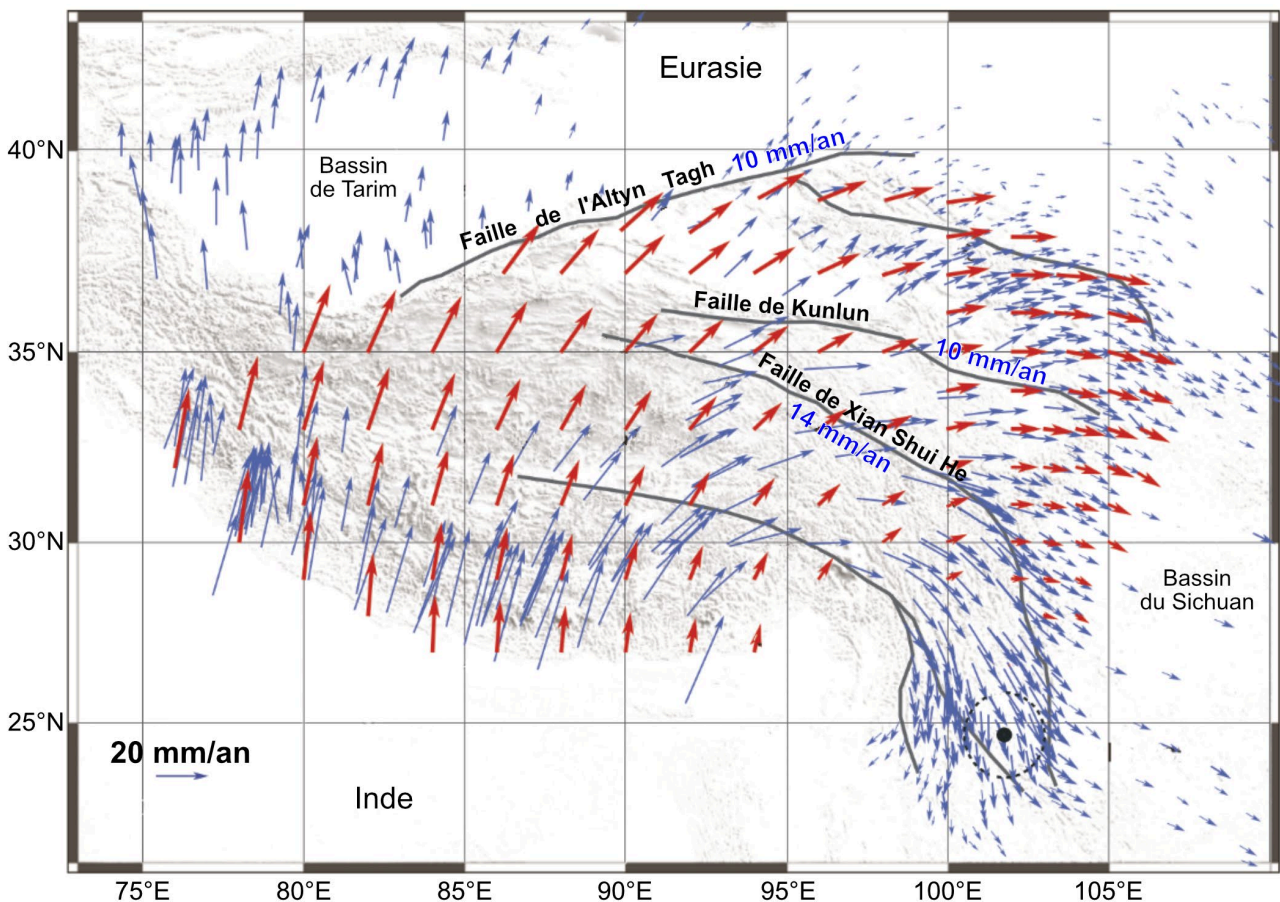


Figure 4. Carte montrant le champ de vitesses déterminé par GPS (flèches bleues) dans et autour du plateau tibétain. Les flèches rouges représentent la rotation globale du plateau. Les traits noirs pleins représentent les principales failles actives du plateau. Les valeurs en bleu indiquent les vitesses de déplacement horizontal estimées sur chacune des trois failles considérées.

On s'intéresse d'abord à la zone centrale du Tibet dont vous avez déterminé le régime tectonique général dans la question précédente. Dans cette zone, trois failles principales seront étudiées : la faille du Kunlun, la faille de l'Alty n Tagh et la faille de Xian Shui He (Fig. 4).

2.8. Déterminez les jeux de chacune de ces trois failles à partir des figures 2 et 4.

2.9. Interprétez ces déplacements horizontaux enregistrés au centre du Tibet (Fig. 4) en vous appuyant sur votre réponse à la question 2.6. On n'omettra pas d'utiliser les valeurs quantifiées du déplacement.

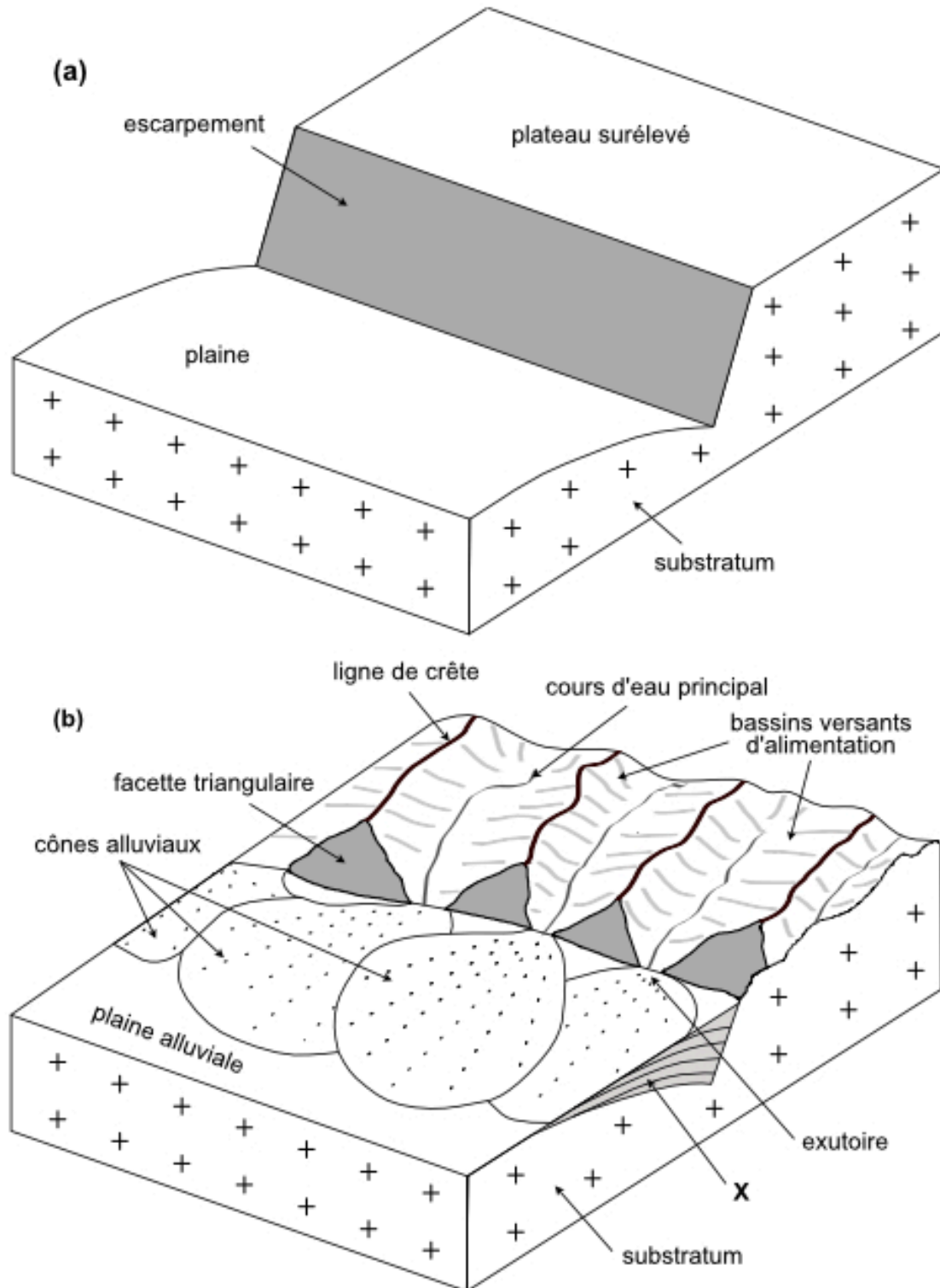


Figure 6. Évolution morphologique. (a) Morphologie initiale d'une région présentant un escarpement abrupt. (b) Morphologie de la même région suite à son érosion.

On s'intéresse maintenant à la région sud du Tibet dont vous avez déterminé le régime tectonique dans la question 2.7. On rencontre dans cette région des paysages dont la photographie de la figure 5 est un exemple.

2.10. La figure 6 vous propose une évolution de ce type de paysage. Décrivez les mécanismes d'évolution du paysage de la figure 6a vers la figure 6b.

Légendez sur la photographie atténuée les différentes parties du paysage de la figure 5 (**à rendre**).

2.11. Réalisez un dessin illustrant le mécanisme de formation de l'escarpement initial avant érosion. Légendez le dessin proposé.

2.12. Sur la figure 6b, un élément est légendé « X ». Nommez cet élément et détaillez son mécanisme de formation. Vous illustrerez ce mécanisme grâce à trois dessins se succédant dans le temps.

2.13. Une famille de failles majeures du sud du Tibet est représentée en rouge sur la figure 7. À l'aide de vos réponses aux questions 2.7 et 2.11, déterminez quelles sont les structures tectoniques représentées sur cette figure 7.

2.14. Déduisez-en et dessinez les directions des axes de la déformation et celles des contraintes principales dans le sud du Tibet. (Indiquez la direction du Nord sur votre dessin). Concluez sur le régime tectonique prévalant dans cette région.

2.15. Proposez un mécanisme expliquant le développement de ce régime tectonique dans une chaîne de collision épaisse.

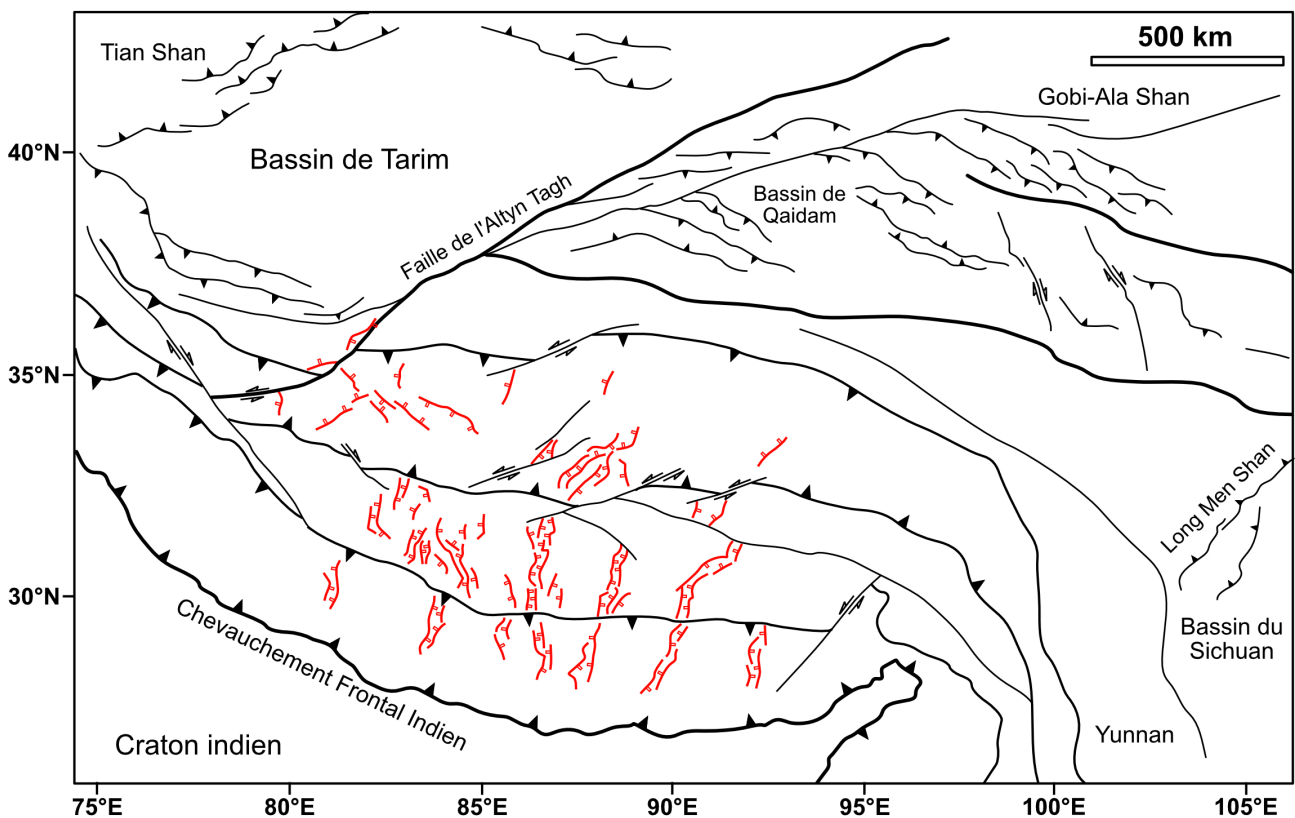


Figure 7. Schéma structural de l'Himalaya-Tibet. En rouge, sont représentées les failles d'intérêt.

3. L'ÉQUILIBRE ISOSTATIQUE EN HIMALAYA-TIBET (3 points)

3.1. Énoncez le principe d'isostasie.

3.2. En supposant la région de l'Himalaya-Tibet à l'équilibre isostatique, et en considérant une altitude moyenne de 6000 mètres, déterminez la profondeur du Moho sous cette région. On prendra comme masses volumiques : $2,8 \text{ g/cm}^3$ pour la croûte continentale et $3,3 \text{ g/cm}^3$ pour le manteau lithosphérique. La croûte choisie comme référence est celle du continent indien, qui a une épaisseur de 40 km.

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

3.4. La figure 8 montre la profondeur estimée du Moho sous l'Himalaya-Tibet, obtenue grâce à des méthodes sismologiques. Comparez avec le résultat obtenu à la question 3.2. Qu'en concluez-vous ?

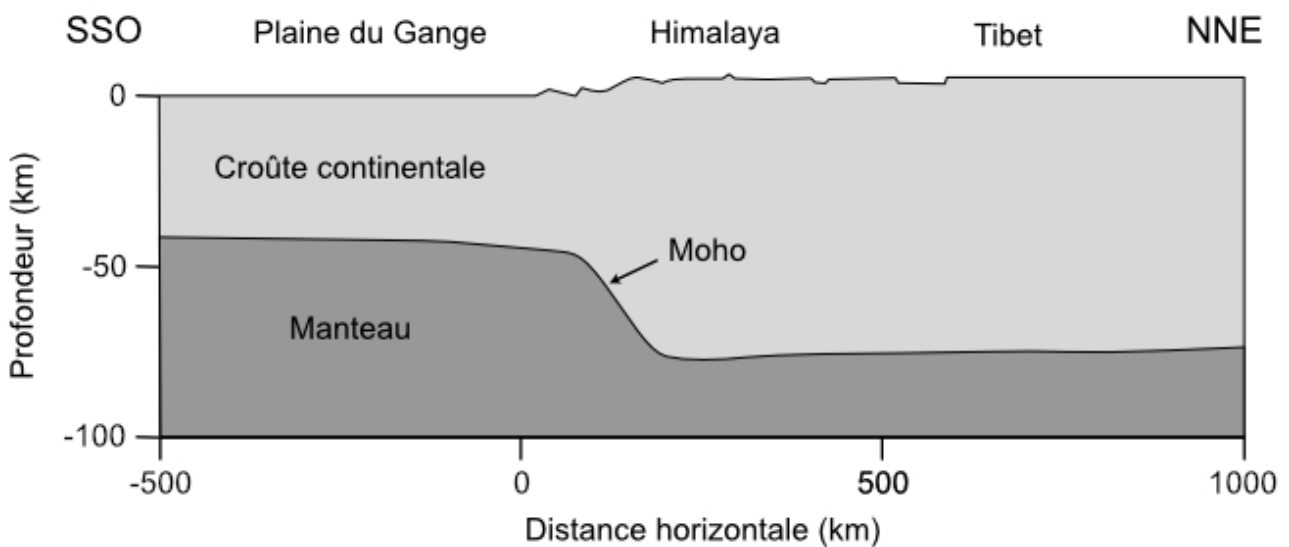


Figure 8. Profondeur du Moho sous l'Inde et l'Himalaya-Tibet.

La figure 9 montre l'anomalie gravimétrique de Bouguer sous l'ensemble Himalaya-Tibet.

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

La figure 9 montre, en pointillés, l'anomalie de Bouguer mesurée sur un transect SSO-NNE, depuis la plaine du Gange jusqu'au nord du Tibet. Elle est comparée avec la valeur de cette anomalie de Bouguer dans un modèle où les reliefs sont compensés par l'isostasie locale via un modèle d'Airy. La distance « 0 » indique la position du front de chevauchement de la chaîne himalayenne.

3.6. Qu'est-ce que le modèle d'Airy ? Appuyez-vous sur un schéma.

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

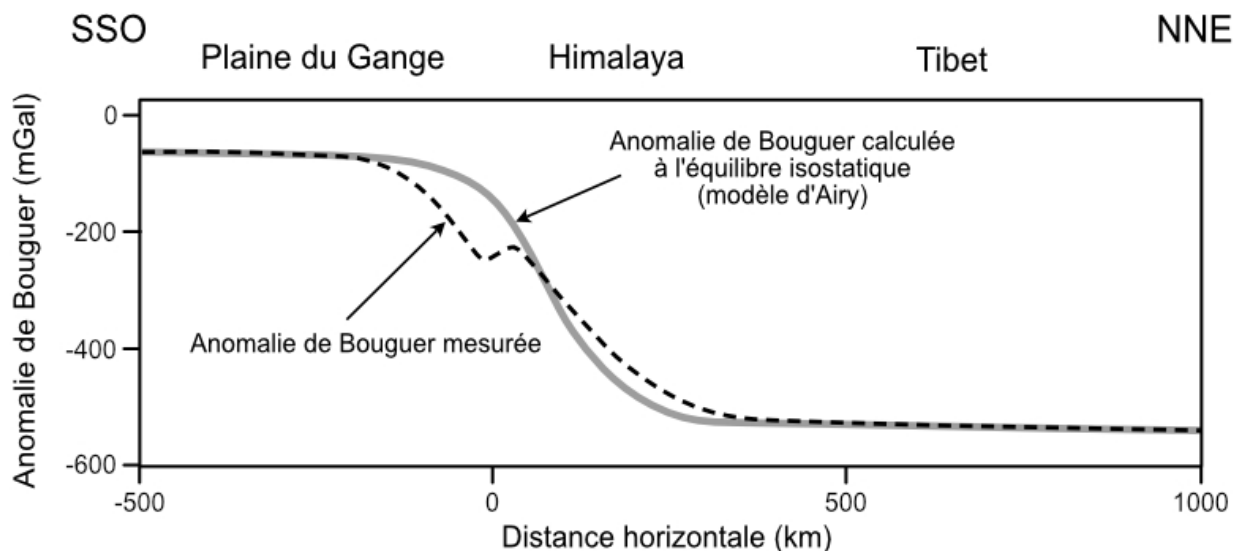


Figure 9. Anomalie de Bouguer. Trait pointillé : valeur de l'anomalie de Bouguer à travers le nord de l'Inde et l'Himalaya-Tibet. Trait plein : anomalie de Bouguer calculée dans un modèle d'équilibre isostatique d'Airy.

4. LES PROCESSUS DE STRUCTURATION DU DOMAINE HIMALAYA-TIBET (6,5 points)

Les principaux chevauchements himalayens déjà évoqués (CCH, CPH et CFI, Fig. 3) ainsi qu'une quatrième structure tectonique majeure appelée « détachement sud-tibétain » (DST, Fig. 10) permettent de séparer l'Himalaya en quatre ensembles géologiques distincts du Sud au Nord : un bassin d'avant-pays ; le bas Himalaya ; le haut Himalaya ; le domaine sédimentaire téthysien (Fig. 10).

Dans le « domaine sédimentaire téthysien », on rencontre des unités représentées en violet sur la figure 10 et légendées « unités X ». La figure 11 montre des photographies de roches rencontrées dans ces « unités X ».

- 4.1. Décrivez et nommez les roches A, B et C visibles sur ces photographies (une page maximum).
- 4.2. Quels sont les mécanismes et les conditions de mise en place de la roche B ?
- 4.3. Expliquez la présence associée des roches A et C au regard de votre réponse pour la roche B.

La figure 12 montre la teneur en alcalins (K_2O+Na_2O) relativement à la teneur en silice (SiO_2) dans les roches A, B et C vues précédemment.

- 4.4. Sur la figure 12, que représente le trait pointillé ? À quelle série magmatique appartiennent ces roches ?
- 4.5. En utilisant les réponses aux questions 4.1 à 4.4, déterminez dans quel contexte géodynamique se forme habituellement l'association de ces trois roches. Détaillez les mécanismes permettant, dans ce contexte, de former chacune de ces trois roches.
- 4.6. On rencontre dans la roche A des minéraux accessoires appelés spinelles. En utilisant la figure 13, estimez le taux de fusion partielle subi par la roche A. Votre résultat est-il compatible avec le contexte géodynamique déterminé en question 4.5 ?

4.7. L'âge des roches magmatiques contenues dans ces « unités X » a été estimé entre 120 et 130 Ma, c'est-à-dire du Crétacé inférieur. Concluez sur le processus géodynamique actif entre l'Inde et l'Asie à cette époque.

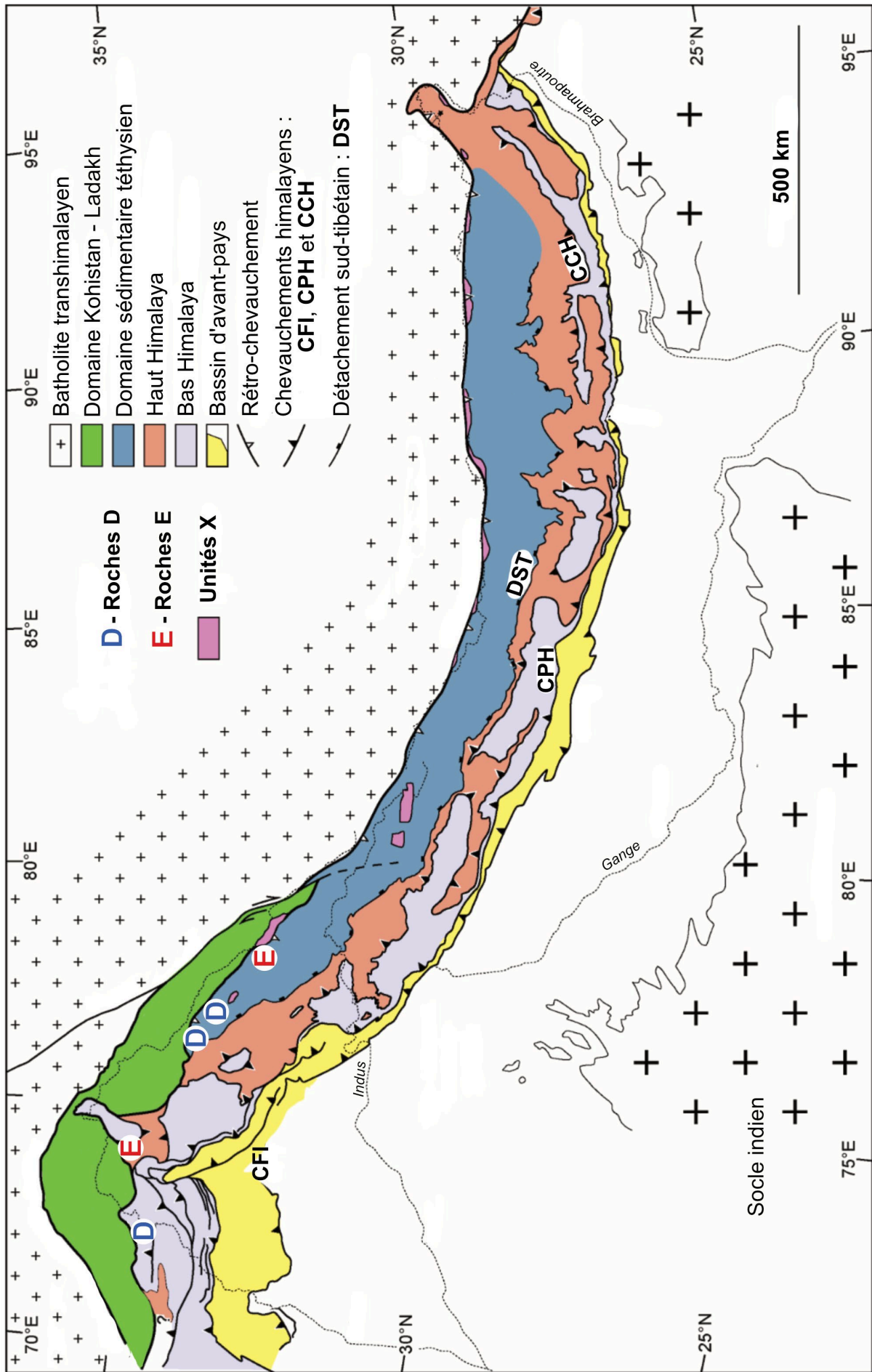


Figure 10. Carte géologique de l'Himalaya.

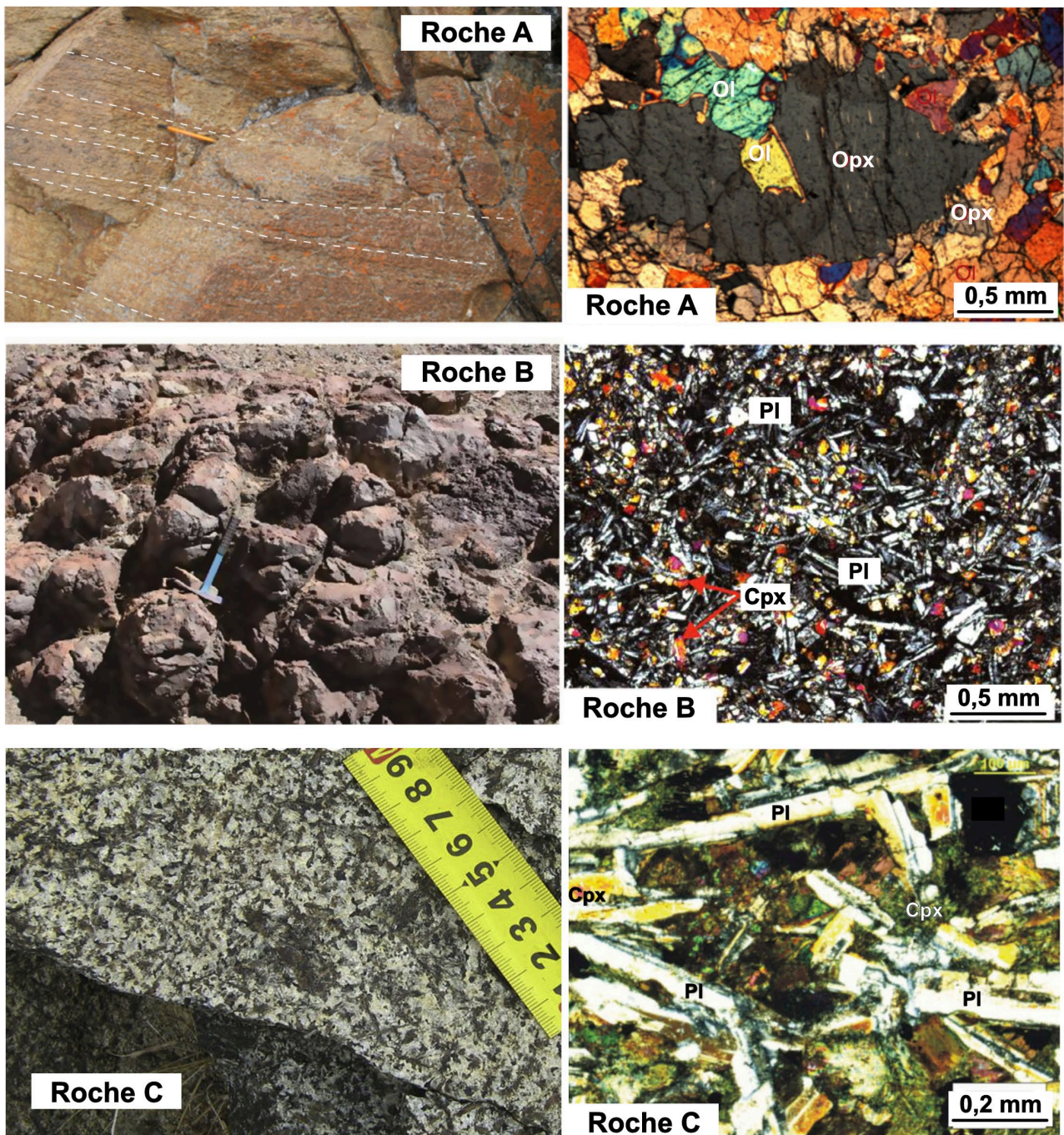


Figure 11. Affleurements et lames minces (en lumière polarisée analysée) de roches des « unités X » (Fig. 10).

En haut à gauche : affleurement de la roche A, les tiretés blancs surlignent l'alignement des minéraux sombres ; en haut à droite : lame mince de la roche A.

Au milieu à gauche : affleurement de la roche B ; au milieu à droite : lame mince de la roche B.

En bas à gauche : affleurement de la roche C ; en bas à droite : lame mince de la roche C.

Ol : olivine ; Opx : orthopyroxène ; Pl : plagioclase ; Cpx : clinopyroxène.

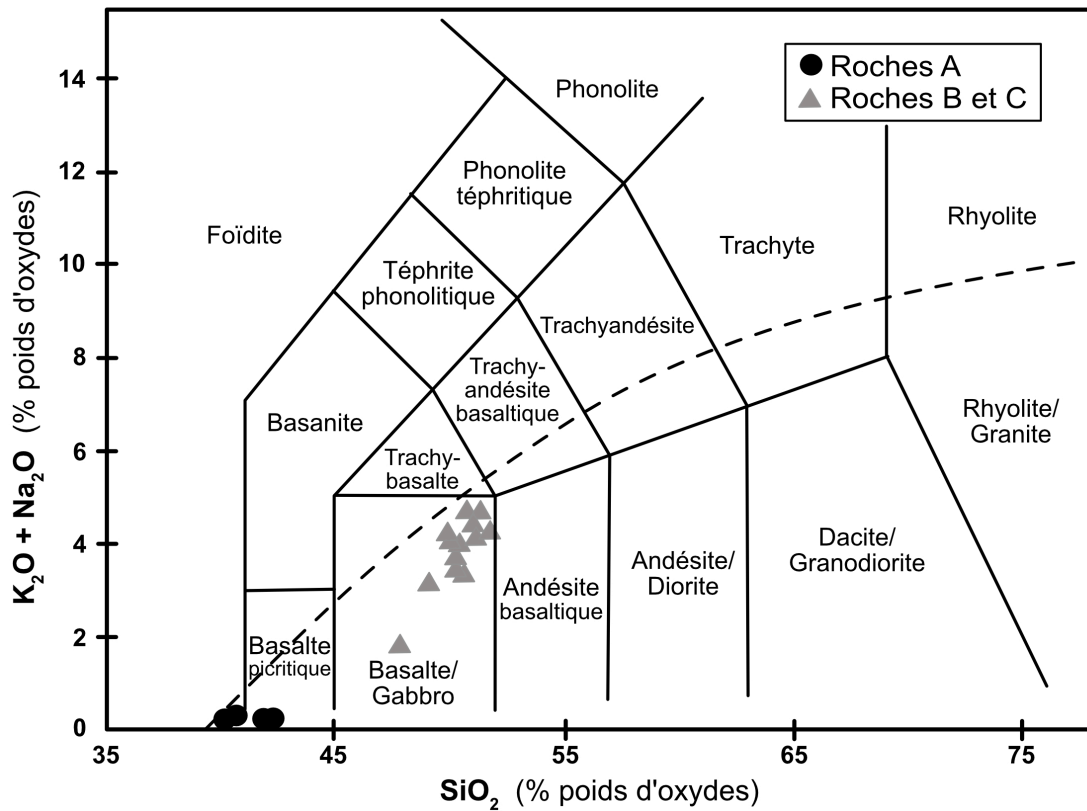


Figure 12. Diagramme TAS alcalins / silice d'échantillons de roches A (points noirs) et de roches B et C (triangles gris).

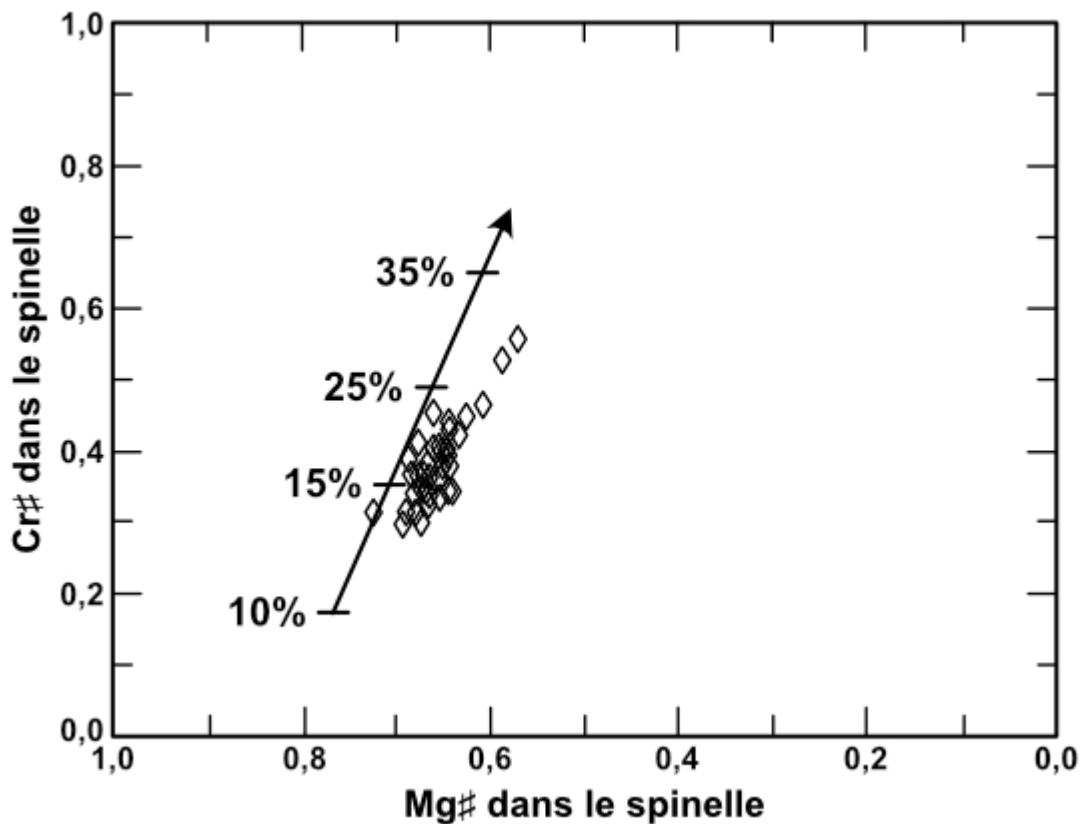


Figure 13. Géochimie des roches A. $Cr\# = Cr/(Cr+Al)$; $Mg\# = Mg/(Fe+Mg)$. La flèche noire montre la composition théorique des spinelles en fonction du taux de fusion partielle subi par la roche. Les losanges correspondent à la composition des spinelles de la roche A.

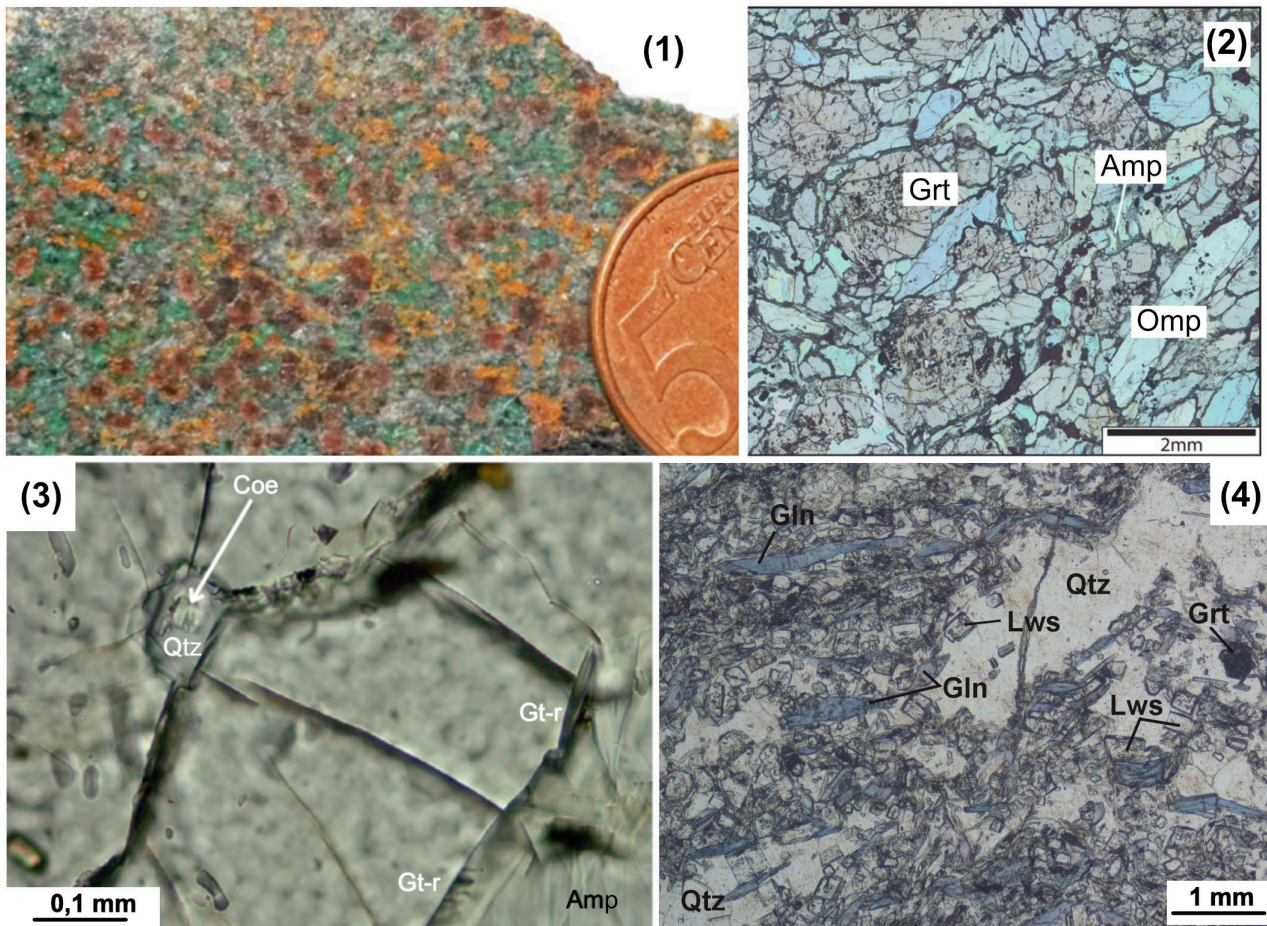


Figure 14. Échantillons de roches : Roche D présentée (1) à l'échelle macroscopique et (2) en lame mince (en lumière polarisée analysée = LPA). (3) : inclusion dans un grenat de la roche D. (4) : lame mince de la roche E (en LPA).

Grt : grenat ; Gt-r : bord extérieur d'un grenat (« Garnet rim ») ; Omp : omphacite (pyroxène vert) ; Qtz : quartz ; Coe : coésite ; Gln : glaucophane ; Lws : lawsonite ; Amp : amphibole.

4.8. Comment appelle-t-on ces « unités X », constituées des roches A, B et C, quand elles affleurent en domaine continental ? Quel processus permet leur déplacement en domaine continental ?

Dans l'ensemble « domaine sédimentaire téthysien » et dans le nord du Haut Himalaya (Fig. 10), on rencontre des roches notées D et E présentées sur la figure 14.

4.9. Décrivez et nommez ces roches à partir des photographies 1, 2 et 4 de la figure 14 (une page maximum).

4.10. Quel peut être le protolithe de ces roches métamorphiques ?

4.11. La photographie 3 de la figure 14 montre une inclusion fermée dans un grenat. Cette inclusion contient deux phases : le quartz et la coésite de même composition chimique SiO_2 . Qu'est-ce que la coésite ? Interprétez la présence de ces deux minéraux dans l'inclusion en terme d'évolution pression-température. Expliquez la présence des fractures radiales visibles à partir de l'inclusion.

4.12. Replacez ces roches D et E dans le diagramme de la figure 15 (**à rendre**) . Tracez sur la figure 15 le gradient métamorphique de cette région.

4.13. Calculez la valeur de ce gradient et nommez-le. Jusqu'à quelle profondeur peut-on estimer que chacune de ces roches a été enfouie ?

4.14. Les roches D et E sont datées entre 43 et 55 Ma, c'est-à-dire de l'Éocène. Déduisez des réponses aux questions 4.10, 4.11, 4.12 et 4.13 le processus géodynamique actif à cette époque.

Dans la zone du « Haut Himalaya » (Fig. 10), on rencontre les roches notées F, G et H présentées sur la figure 16.

4.15. Décrivez et nommez les roches F, G et H de la figure 16 (une page maximum).

On étudie les zircons, minéraux accessoires présents dans les roches de type F. La figure 17 représente les rapports isotopiques Pb/U mesurés dans ces zircons. Les ellipses s'alignent sur une droite représentée en trait fin. Cette droite intersecte la courbe en trait gras en deux points, nommés intercepts supérieur et inférieur.

4.16. Comment appelle-t-on la droite en trait fin ? Comment appelle-t-on la courbe en trait gras ? Que représentent dans ce type de diagramme l'intercept supérieur et l'intercept inférieur ?

4.17. À partir des photographies de la figure 16 et des âges donnés par la figure 17, déterminez quels mécanismes sont enregistrés dans cette roche F et à quelle époque. En vous appuyant sur la présence de sillimanite dans la roche, proposez un domaine de conditions pression-température d'équilibre. Déduisez le contexte géodynamique de mise en place de cette roche.

4.18. Les roches de type H sont datées entre 17 et 21 Ma, elles sont donc légèrement plus jeunes que la roche F. Établissez les mécanismes reliant les roches F, G et H. Quel grand processus affectant la croûte continentale est documenté ici ?

5. SYNTHÈSE (1,5 points)

Dans le tableau 1 (**à rendre**), listez les marqueurs et résumez les grandes étapes de l'évolution de la chaîne himalayenne.

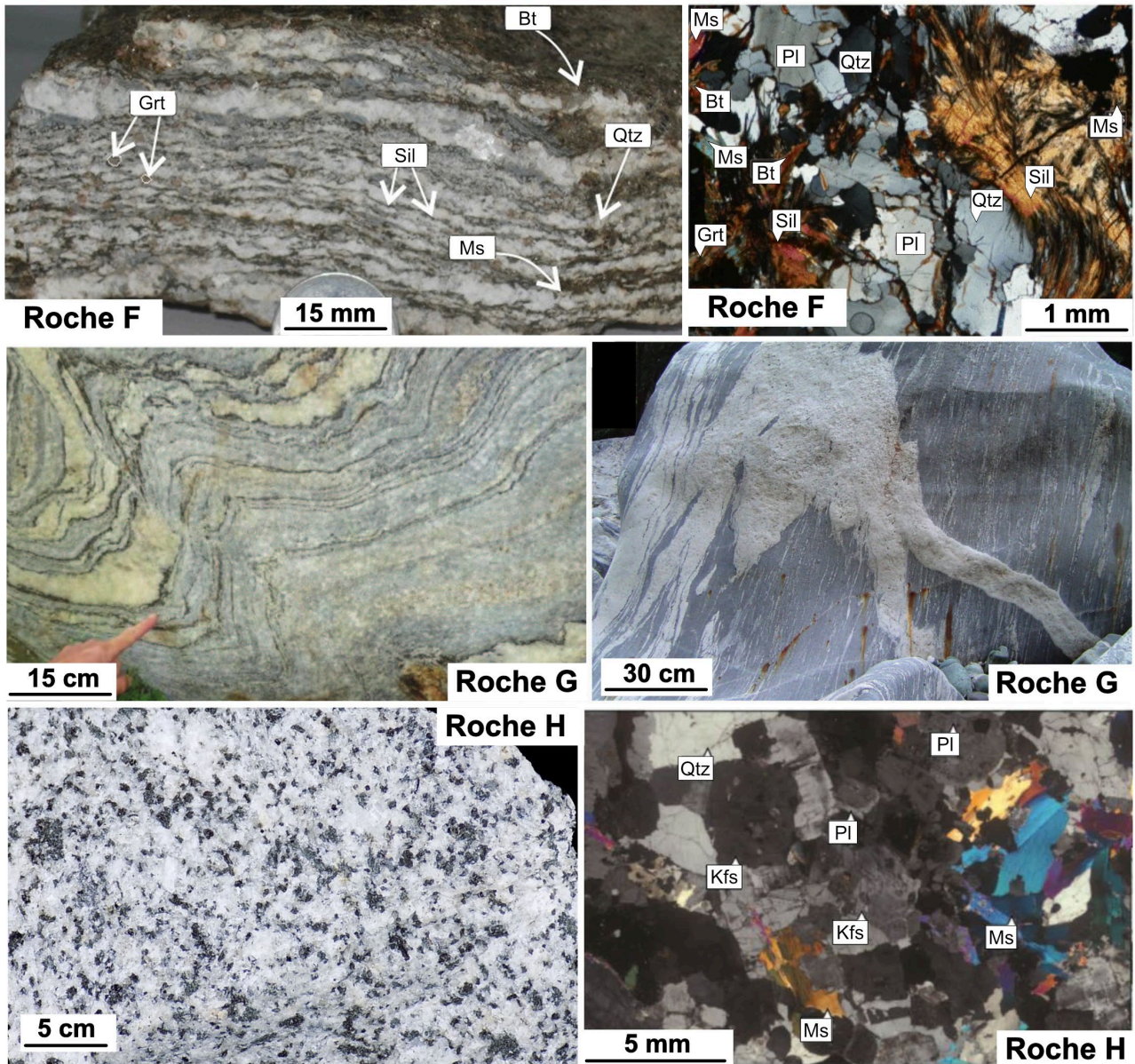


Figure 16. Échantillons et lames minces (en lumière polarisée analysée) des roches F, G et H. En haut à gauche : échantillon de la roche F ; en haut à droite : lame mince de la roche F. Au milieu à gauche et à droite : affleurements de la roche G. En bas à gauche : échantillon de la roche H ; en bas à droite : lame mince de la roche H. Qtz : quartz ; Pl : plagioclase ; Ms : muscovite ; Bt : biotite ; Sil : sillimanite ; Grt : grenat ; Kfs : feldspath potassique.

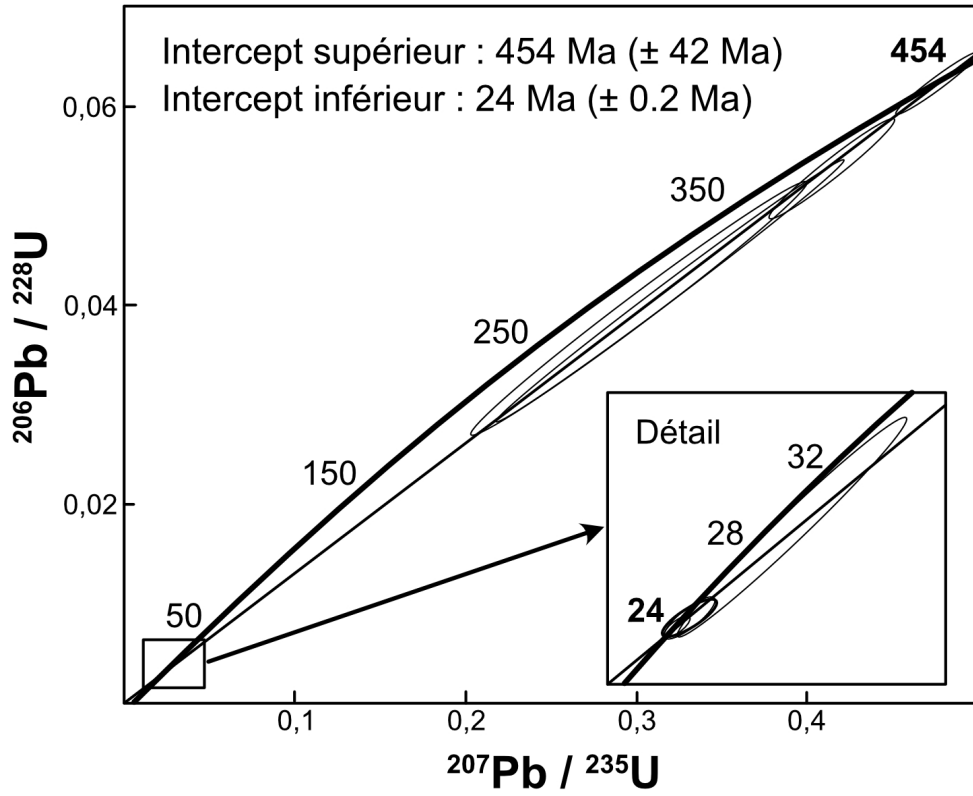


Figure 17. Diagramme Pb/U de zircons d'une roche de type F. Les valeurs chiffrées des intercepts sont données sur la figure.