

NOM :

PRENOM :

Salle :

AGRÉGATION DE SCIENCES DE LA VIE - SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

CONCOURS EXTERNE – ÉPREUVES D'ADMISSION – session 2025

TRAVAUX PRATIQUES DE CONTRE OPTION DU SECTEUR C

Candidats des secteurs A et B

Durée totale : 2 heures

Géologie du triangle de l'Afar : un aperçu du grand rift Est africain

Les différentes parties sont indépendantes. Certaines questions nécessitent des observations (échantillons macroscopiques et lames minces). Un ordre de passage, affiché au tableau, vous permettra d'accéder aux postes de travail. Organisez-vous en conséquence. **Cependant, la réalisation des ateliers ne conditionne pas la finalisation des différentes parties.**

Partie I. Géodynamique

p. 2 à 9

Durée conseillée : 35 minutes —> 30% des points

Partie II. Pétrologie

p. 10 à 16

Durée conseillée : 45 minutes —> 37% des points

ATELIER 1 (5 mn) – 2 échantillons de roches (macroscopiques)

ATELIER 2 (15 mn) – 2 échantillons de roches (lames minces)

Partie III. Chronostratigraphie et paléontologie

p. 17 à 26

Durée conseillée : 40 minutes —> 33% des points

Les réponses aux questions figureront dans les cadres réservés à cet effet. Vous pouvez disposer d'une calculatrice non programmable.

**AVANT DE REMETTRE VOTRE DOSSIER, VÉRIFIEZ QUE VOUS AVEZ BIEN INDIQUÉ VOS NOM,
PRÉNOM ET NUMÉRO DE SALLE EN TÊTE DE TOUS LES DOCUMENTS.**

Vous devez rendre la totalité des feuilles du dossier

Commentaire général

Le thème général du TP portait sur la géologie du triangle de l'Afar. Des éléments très diversifiés de la géologie de cette région du rift Est Africain (géodynamique, pétrologie magmatique et sédimentaire, stratigraphie, paléontologie) étaient à analyser dans trois parties indépendantes qui pouvaient être traitées dans le désordre. La seconde partie contenait deux ateliers permettant d'évaluer les compétences pratiques des candidats dans des domaines aussi variés que la pétrologie sédimentaire, la micropaléontologie et la pétrologie magmatique.

Le sujet était long, et la réussite de cette épreuve nécessitait une bonne gestion du temps. Un nombre significatif de candidats n'a pu traiter que partiellement au moins une des trois parties du sujet. En revanche, le fait qu'un créneau (horaire et durée imposés) ait été planifié pour les deux ateliers a conduit à ce qu'ils soient systématiquement traités.

Dans la première partie, les candidats devaient rappeler les grandes lignes de la géodynamique de la région à partir des données disponibles dans les documents. On remarque que de nombreux candidats connaissent à peu près le contexte de la région mais n'utilisent pas les documents pour soutenir leur argumentation.

Dans la deuxième partie, l'objectif était d'évaluer les candidats sur leur capacité à étudier et reconnaître des échantillons de roches en macro et microscopie puis à en analyser le contexte de formation.

Dans la troisième partie, les candidats devaient utiliser des données radio-isotopiques et magnétostratigraphiques issues d'une coupe sédimentaire continentale d'âge Pliocène levée dans la région de l'Afar. L'exercice visait à utiliser ces données pour dater deux horizons sédimentaires ayant livré des hominines fossiles de l'espèce Australopithecus afarensis. Il était demandé aux candidats de faire preuve d'un regard critique sur ces datations. Un exercice de paléontologie des vertébrés, réalisé à partir photographies de restes osseux de mammifères collectés dans cette coupe était également proposé. Beaucoup de candidats, pris par le temps, n'ont que partiellement abordé cette dernière partie, probablement parce qu'ils ont choisi de traiter les parties du sujet dans l'ordre de l'énoncé.

NOM :

PRENOM :

Salle :

Le sujet propose d'étudier sous plusieurs aspects une zone géologiquement remarquable de la planète appelée « Triangle de l'Afar », point de jonction triple entre les plaques nubienne à l'ouest, somalienne au sud et arabique au nord-est.

Partie I - Géodynamique

Question I.1 – A partir des données fournies dans le **Tableau 1** :

- Déterminez les vitesses de déplacement des quatre stations GPS proposées. Pour ce faire, du papier calque millimétré vous est fourni.
- Sur la carte de la **Figure 1**, représentez les vecteurs vitesse de déplacement des quatre stations. Vous prendrez pour échelle sur la carte 1mm = 1mm/an

Réponse à la question I.1. Répondre directement dans le Tableau 1 et la Figure 1.

Le calque millimétré est à rendre avec votre copie

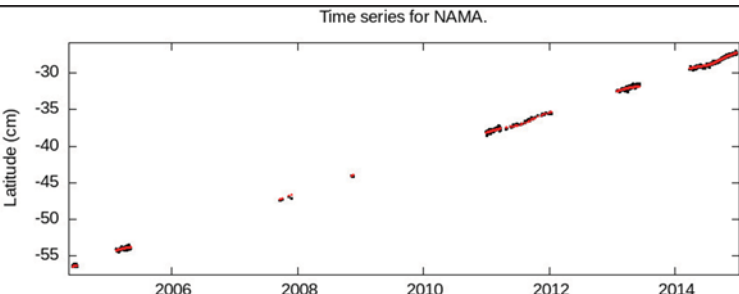
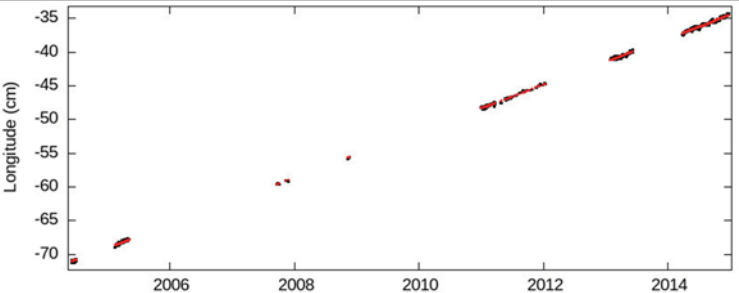
Stations GPS	NAMA	YIBL (mm/an)	BDAR (mm/an)	ROBE (mm/an)
Déplacement latitudinal		31,7	17,4	13,4
Déplacement longitudinal		33,4	22,2	28,6
Vitesse de déplacement (mm/an)	45,1	46,0	28,2	45,1

Tableau 1 – Déplacements latitudinaux et longitudinaux de quatre stations GPS : NAMA, YIBL, BDAR et ROBE (à compléter)

NOM :

PRENOM :

Salle :

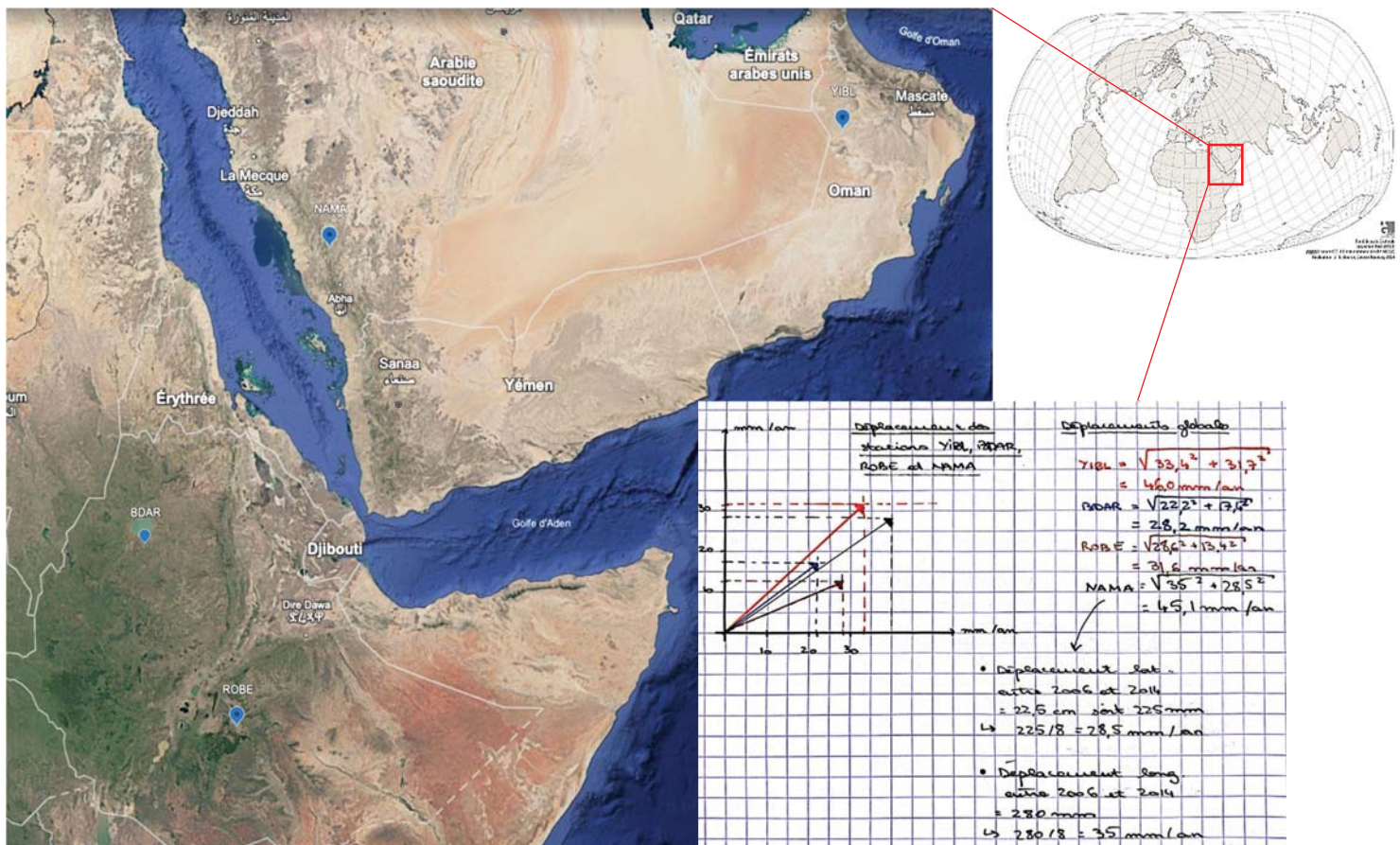


Figure 1 – Emplacements des stations GPS BDAR, YIBL, NAMA et ROBE sur fond de carte topographique

Question I.2 – Conclure sur le contexte géodynamique de la zone étudiée. Exploitez la **Figure 1** en plus des données GPS pour argumenter votre réponse.

Réponse à la question I.2

Arabie et Afrique se déplacent toutes deux vers le NE mais l'Arabie plus rapidement que l'Afrique : la région est donc dominée par un **mouvement de divergence**.

L'observation du relief océanique en mer rouge et dans le golfe d'Aden semble indiquer des ouvertures océaniques via **des dorsales** ce qui corrobore le contexte géodynamique proposé précédemment.

Beaucoup de candidats ont perdu énormément de temps à effectuer leurs calculs et représenter leurs vecteurs dans les bonnes directions, ce qui a abouti trop souvent à des plaques Arabie et Afrique convergentes.

Question I.3 – Quelle(s) information(s) supplémentaire(s) l'étude de la **Figure 2** apporte-t-elle à votre réponse précédente ? Justifiez votre réponse. Vous prendrez soin de rappeler ce que représentent les cercles noirs et blancs de la **Figure 2**.

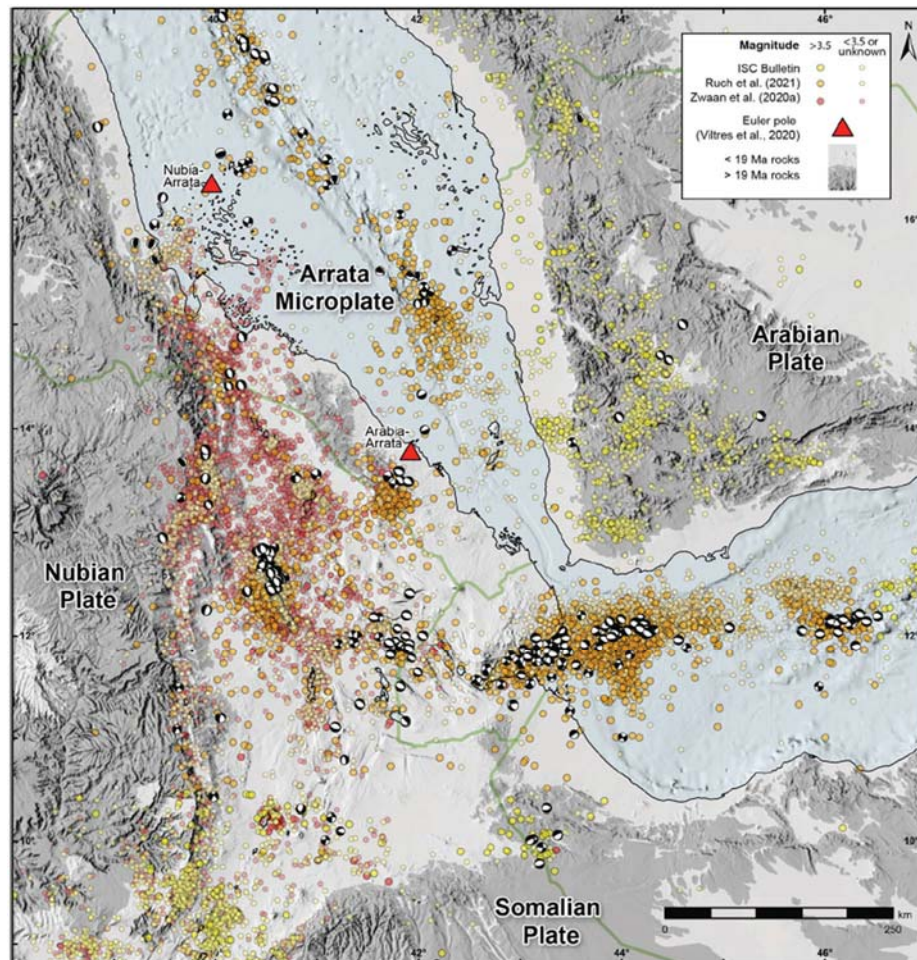


Figure 2 – Carte de la région de l'Afar montrant des séismes et mécanismes au foyer

Réponse à la question I.3

La carte sismotectonique montre une forte densité de séismes autour de la mer Rouge et du rift Ethiopien qui confirme une activité tectonique intense liée à l'extension (contexte de rifting actif).

Les cercles blanc et noir sont des mécanismes au foyer, ils représentent l'orientation de la faille à l'origine d'un séisme et la direction de son glissement.

La majorité marque des failles normales  associées à un contexte extensif ce qui confirme la zone de divergence proposée à la question 1.

Quelques mécanismes  montrent des failles décrochantes le long des dorsales

Question globalement bien traitée, les mécanismes au foyer sont connus des candidats.

Question I.4 – Rappelez le principe de la méthode de tomographie sismique utilisée en **Figure 3**.

Réponse à la question I.4

La tomographie sismique consiste à comparer les temps d'arrivée des différentes ondes sismiques les unes relativement aux autres et à différents endroits du globe, il est ainsi possible de calculer les vitesses de propagation de ces ondes et leurs variations à l'intérieur du globe terrestre.

Les variations de vitesse dans l'espace sont ensuite interprétées comme des variations de température locale ou de composition de la roche (chimique ou minéralogique). La tomographie sismique sert ainsi à cartographier les hétérogénéités du manteau terrestre.

Des anomalies de vitesse positive (par rapport au modèle Prem) supposent des roches plus denses et plus froides (bleu à violet sur le document).

Des anomalies de vitesse négative (par rapport au modèle Prem) supposent des roches moins denses et plus chaudes (jaune rouge à noir sur le document).

Idem question précédente

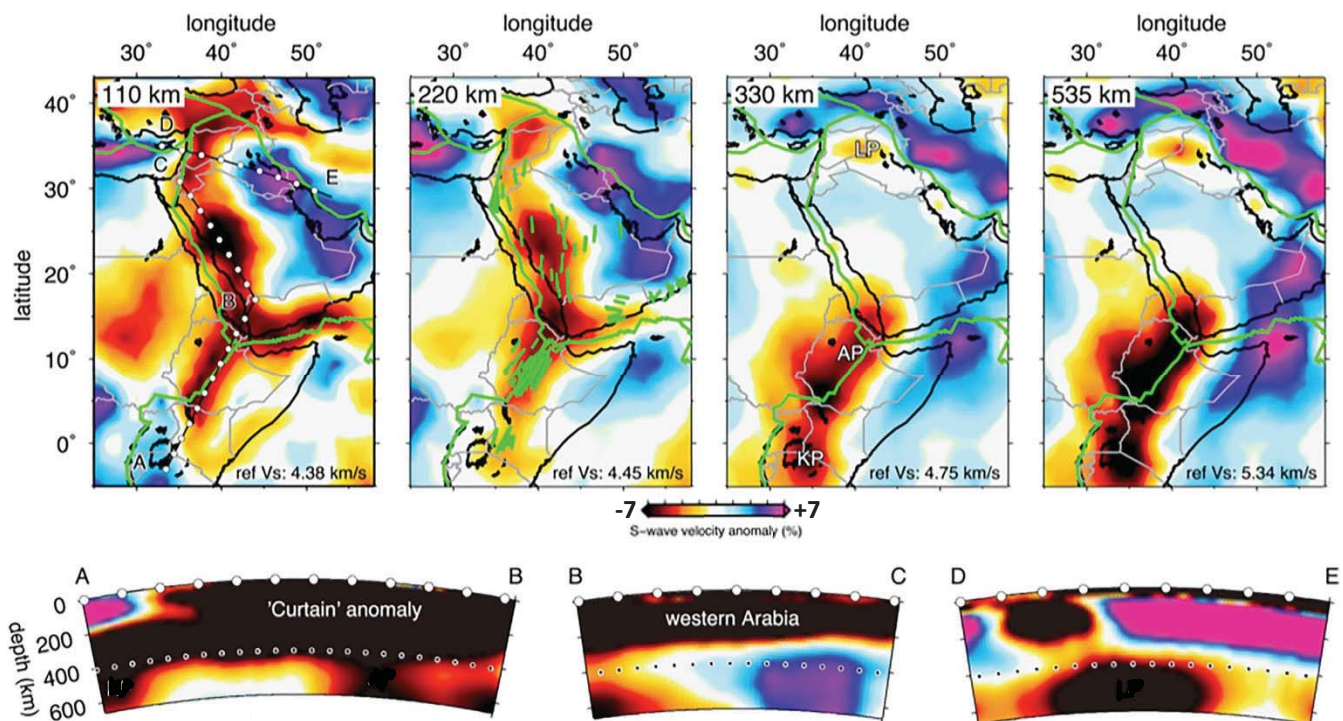


Figure 3 – Modèle de tomographie sismique dans la région du rift est africain (région de l'Afar) en carte (en haut) et en coupe (en bas). Les transects A-B, B-C et D-E sont localisés sur la carte de gauche (Civiero et al., 2022)

Question I.5 – Interprétez les mécanismes présentés en Figure 3.

Réponse à la question I.5

Les 4 cartes représentent la région à différentes profondeurs.

A 110km, on voit des anomalies négatives le long de la mer Rouge dans le rift de l'Afar indiquant une asthénosphère anormalement chaude et peu profonde liée à une remontée mantellique.

A 220-230km l'anomalie persiste et s'étend vers le sud suggérant l'existence d'une plume mantellique profonde alimentant le rift.

A 535 km l'anomalie s'atténue mais persiste ce qui confirme l'origine profonde du panache.

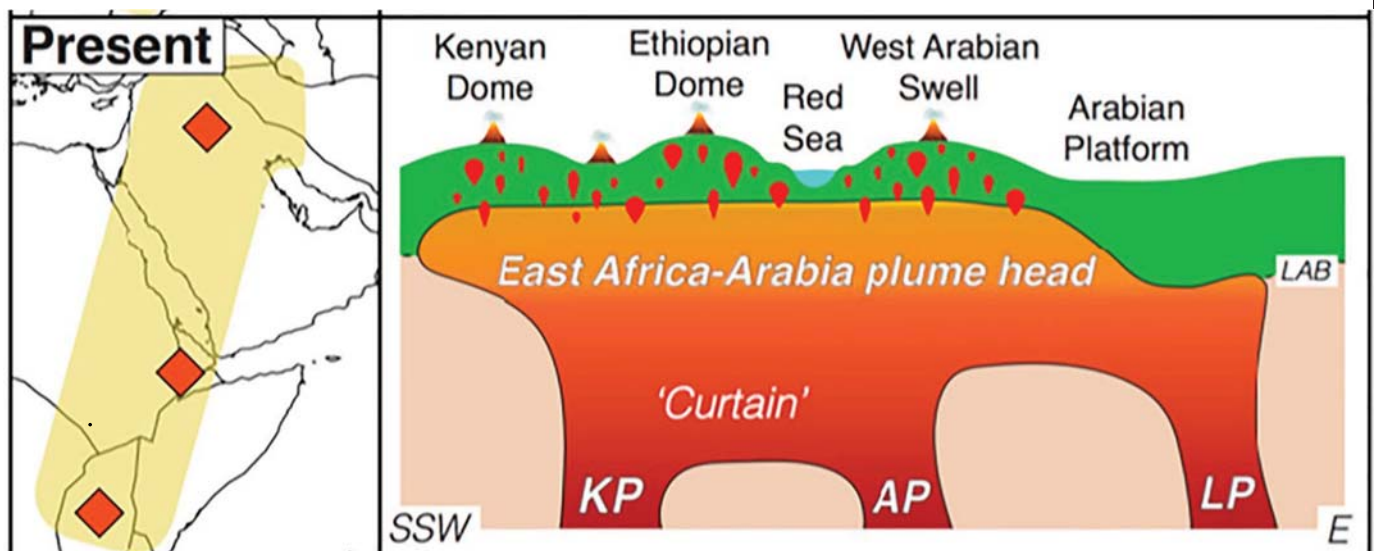
Les coupes verticales confortent cette idée de plume mantellique mais suggèrent qu'il s'agirait de 3 branches ascendantes et non pas d'une seule (Kenyan plume ; Afar plume ; Levant plume : leurs noms n'étaient bien sûr pas explicites !).

Analyse des tomographies maîtrisée par les candidats mais beaucoup ont eu du mal à combiner les informations des 3 tomographies.

Question I.6 – D'après votre réponse à la Question I.5, proposez une interprétation schématique en coupe selon un transect passant par les points KP, AP et LP* (localisation sur la 3^{ème} carte [330 km] de la Figure 3).

**la connaissance de la signification des abréviations des trois points KP, AP et LP n'est pas nécessaire pour répondre à la question.*

Réponse à la question I.6



LAB : lithosphere-asthenosphere boundary

Question très peu traitée ou avec des schémas généraux de point chaud ne correspondant pas à la région étudiée. Il manque quasi systématiquement des échelles verticales.

Question I.7 – En quoi les mécanismes illustrés par les données tomographiques (**Figure 3**) participent-ils à la compréhension du contexte géodynamique de la région ?

Réponse à la question I.7

*Ce panache est une remontée de matériel chaud provenant du manteau profond. Il réchauffe la base de la lithosphère la rendant plus ductile et moins résistante ce qui favorise l'amincissement crustale : **il initie ou renforce l'extension dans la région.***

Bien que la divergence soit aussi causée par la dynamique des plaques, le panache ajoute une force de soulèvement et accélère le processus d'ouverture comme observé dans la région (mer Rouge).

Etude générale et simplifiée de la dépression de l'Afar.

Dans un contexte de divergence, la lithosphère continentale s'amincit par étirement. Pour chaque enveloppe, on définit un coefficient d'étirement $\alpha = E_i/E_f$ où E_i et E_f sont respectivement les épaisseurs initiale et finale de l'enveloppe considérée. On considérera dans cet exercice une lithosphère à l'état initial formée de 29 km de croûte et 90 km de manteau lithosphérique (attention la **Figure 4** n'est pas à l'échelle).

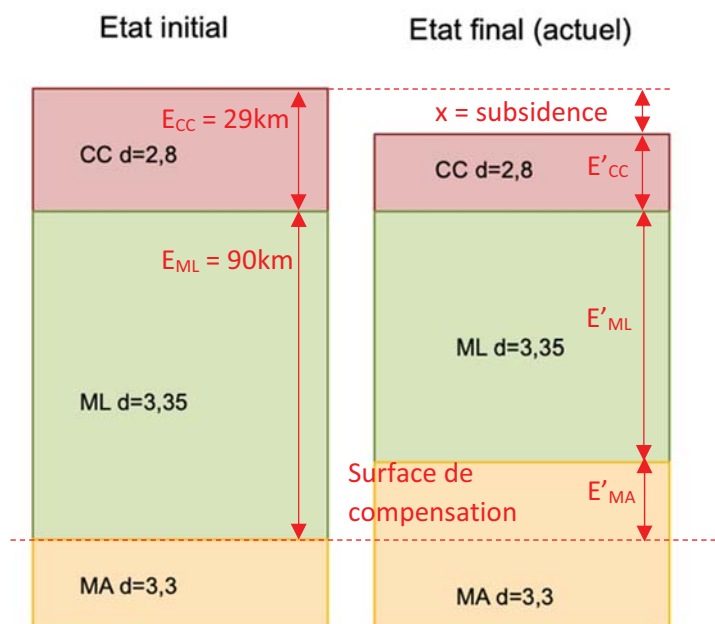


Figure 4 – Densité des enveloppes et représentation schématique de l'épaisseur de la croûte continentale et du manteau lithosphérique (état initial et état actuel) dans la dépression de l'Afar.

CC : croûte continentale ; **ML** : manteau lithosphérique ; **MA** : manteau asthénosphérique ; **d** : densité

On peut poser :

$$\alpha = \frac{E_{CCi}}{E_{CCf}} = \frac{E_{MLi}}{E_{MLf}}$$

Question I.8 – Calculez la subsidence d'une lithosphère continentale étirée d'un coefficient $\alpha = 1,3$. Cette valeur d'étirement peut correspondre à la dépression de l'Afar et est valable tout à la fois pour la croûte et le manteau.

Réponse à la question I.8

Equilibre : $E_{cc} \times d_{cc} + E_{ML} \times d_{ML} = E'_{cc} \times d_{cc} + E'_{ML} \times d_{ML} + E'_{MA} \times d_{MA}$

$$\Leftrightarrow (E_{cc} - E'_{cc}) d_{cc} + (E_{ML} - E'_{ML}) d_{ML} = E'_{MA} d_{MA}$$

on en sait que $\alpha = \frac{E_{cc}}{E'_{cc}} = \frac{E_{ML}}{E'_{ML}} \Leftrightarrow E'_{cc} = \frac{E_{cc}}{\alpha}$ et $E'_{ML} = \frac{E_{ML}}{\alpha}$

Donc $(E_{cc} - \frac{E_{cc}}{\alpha}) d_{cc} + (E_{ML} - \frac{E_{ML}}{\alpha}) d_{ML} = E'_{MA} d_{MA}$

$$\Leftrightarrow E_{MA} = \frac{(1 - \frac{1}{\alpha}) (E_{cc} d_{cc} + E_{ML} d_{ML})}{d_{MA}}$$

$$\text{et } x = E_{cc} + E_{ML} - E'_{cc} - E'_{ML} - E'_{MA}$$

$$\Leftrightarrow E'_{MA} = E_{cc} + E_{ML} - E'_{cc} - E'_{ML} - x$$

Alors : $x = \frac{(E_{cc} + E_{ML})(1 - \frac{1}{\alpha})}{E_{cc} + E_{ML} - E'_{cc} - E'_{ML}} - \frac{(E_{cc} d_{cc} + E_{ML} d_{ML})(1 - \frac{1}{\alpha})}{d_{MA}}$

$$x = (1 - \frac{1}{\alpha}) \left(\frac{E_{cc} + E_{ML}}{d_{MA}} - \frac{E_{cc} d_{cc}}{d_{MA}} - \frac{E_{ML} d_{ML}}{d_{MA}} \right)$$

$$= 1 - \frac{1}{\alpha} \left(E_{cc} \left(1 - \frac{d_{cc}}{d_{MA}} \right) - E_{ML} \left(1 - \frac{d_{ML}}{d_{MA}} \right) \right)$$

Application numérique : $x = (1 - \frac{1}{1,3}) \left(29 \times \left(1 - \frac{2,8}{3,3} \right) - 90 \left(1 - \frac{3,35}{3,3} \right) \right)$
 $= 0,7 \text{ km soit } 700 \text{ m.}$

Question peu traitée. Malgré quelques essais, de trop nombreux candidats aboutissent à des résultats incohérents (jusqu'à 700 km de subsidence). Il n'y a pas de recul critique sur ces réponses incohérentes.

Partie II – Pétrologie

ATELIER 1 : ANALYSE MACROSCOPIQUE DE ROCHES (! attention ! l'atelier 1 est accessible une seule fois, durant maximum 5 minutes consécutives).

Deux échantillons macroscopiques de roches vous sont fournis. Ils ont été collectés dans la région du triangle de l'Afar à Djibouti :

- l'échantillon 1 au niveau du lac d'Asal
- l'échantillon 2 dans une carrière de la vallée de Gobaad.

Les points de collecte de ces deux échantillons ont été photographiés et sont présentés en **Figures 5 et 6** par des flèches rouges.



Figure 5 – Photographie du lac d'Asal dans la dépression de l'Afar à Djibouti



Figure 6 – Photographie de la carrière où a été prélevé l'échantillon 2 (vallée du Gobaad, Djibouti) ©PSPCA

Question II.1 – Identifiez chacune de ces deux roches en justifiant par des éléments diagnostiques pertinents et discutez brièvement de leur habituel contexte de formation.

Réponse à la question II.1

Echantillon 1 : échantillon constitué de cristallisations en couches à fibres parallèles, qui ne fait pas effervescence à HCl, à éclat satiné, rayé par l'ongle (indice 2 dans l'échelle de Mohs) => **gypse fibreux**.

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate de calcium déshydraté, de formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Il désigne également une roche évaporitique constituée principalement du minéral gypse, qui précipite notamment quand l'évaporation provoque une augmentation de la concentration en sulfates de calcium dans l'eau de mer, qui devient trop élevée pour rester en solution. C'est l'empilement de ces cristaux dans la stratigraphie qui conduit à la formation de la roche gypse.

Echantillon 2 : échantillon de roche tendre faiblement consolidée qui s'émiette facilement en fine poudre blanche à grise, et qui ne fait pas effervescence à HCl. L'échantillon est caractérisé par sa grande légèreté (la roche est très peu dense et poreuse). Il s'agit de **diatomite**, composée de silice biogène.

La diatomite est une roche sédimentaire formée entièrement de squelettes siliceux de diatomées (frustules). Les frustules de ces algues unicellulaires marines (diatomées centrales) ou lacustres (diatomées pennales) peuvent s'accumuler sur le fond pour former des boues à diatomées. Après compaction, ces boues peuvent conduire à la formation de la roche diatomite. Les diatomites sont principalement des roches sédimentaires lacustres du Néogène et du Quaternaire (elles sont alors constituées de frustules de diatomées pennales).

Les candidats avaient 5 minutes pour l'analyse pétrologique des deux échantillons macroscopiques. L'échantillon 1 a été généralement bien analysé et interprété. L'identification de l'échantillon 2 s'est révélée souvent plus difficile, de nombreux candidats proposant les diagnostics erronés. Pour les deux échantillons macroscopiques, une démarche démonstrative était attendue avec des diagnostics reposant sur l'aspect, la dureté, la densité, le comportement vis-à-vis des outils à disposition (HCl, plaque de verre, clou en acier). Les contextes de formation attendus pour le gypse et la diatomite ont souvent été trop partiellement explicités.

Question II.2 – Quelle structure géomorphologique observez-vous sur la photographie de la **Figure 5** ? Expliquez succinctement comment une telle structure peut se mettre en place. Vous pourrez illustrer votre réponse par un schéma.

Réponse à la question II.2

L'objet observé est une butte témoin qui se forme par érosion différentielle. On les retrouve principalement dans des zones en surrection, ce qui interroge la présence de celle-ci dans un environnement subsidiant. Comme vue à la question précédente, la roche formant la butte est un gypse qui s'est donc formé dans le lac sous un climat sec. L'altitude de la butte témoin reflète le niveau maximal du lac.

Hypothèses :

- Située sur une épaulement du rift ?
- Lac Asal < niveau marin – niveau de base local qui varie / climat spécifique

Toutes les hypothèses cohérentes ont été valorisées.

Attention, les questions II.3 à II.8 ci-dessous reposent sur l'analyse de deux lames minces (lame n°1 et lame n°2 à étudier sur l'Atelier 2). Vous ne pourrez accéder à l'observation de ces deux lames qu'une seule fois pendant 15 minutes consécutives.

A quelques centaines de kilomètres au sud de la ville de Djibouti, le paysage est principalement composé de roches sédimentaires dans lesquelles la **lame n°1 de l'Atelier 2** a été réalisée.

Dans ce secteur, à proximité du village d'Ali Addé, l'affleurement proposé dans la **Figure 7** dénote. Il est daté du Miocène (19-9,5 Ma), et il repose sur les roches sédimentaires de la lame n°1. La **lame n°2 de l'Atelier 2** a été réalisée à partir d'un échantillon prélevé sur cet affleurement.

Question II.3 – Décrivez et proposez une interprétation de l'affleurement photographié en **Figure 7**. Comment un tel affleurement se met-il en place ? Vous pourrez illustrer votre réponse par un schéma.



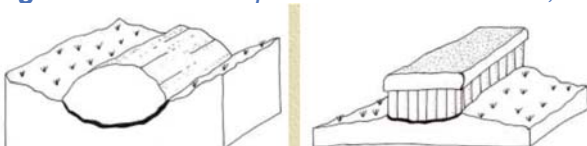
Figure 7 – Photographie d'un affleurement de la région d'Ali Addé dont est issue la lame mince n°2

Réponse à la question II.3

L'affleurement présente des coulées volcaniques prismées (orgues volcaniques). Ce type de géométrie peut s'observer lorsque la lave refroidit dans une vallée (par exemple) en couche épaisse et le refroidissement différentiel progressif entre l'extérieur et l'intérieur de la coulée permet la mise en place d'orgues en base de coulée. Les orgues se forment par rétraction de la lave en fin de refroidissement. Il y a alors diminution de volume liée à la solidification totale de la coulée.

La prismation qui se forme s'effectue perpendiculairement aux surfaces de refroidissement. Il en résulte des orgues verticaux pour une coulée horizontale.

A gauche : mise en place dans une vallée ; **A droite** refroidissement plus érosion



La roche présentée est volcanique et peut être de nature diverse : basalte, phonolite, trachyte, andésite, rhyolite, trachyte... Au vu du contexte extensif on peut pencher pour du basalte ou de la rhyolite si le magma à l'origine s'est différencié dans une chambre volcanique par exemple.

Presque tous les candidats ont reconnu des prismes mais concluent trop vite à des orgues basaltiques sans proposition d'arguments.

ATELIER 2 : ANALYSE DE ROCHES EN LAME MINCE (! **attention ! l'atelier 2 est accessible une seule fois, durant au maximum 15 minutes consécutives).**

La **lame n°1** a été réalisée dans une roche sédimentaire d'âge indéterminé qui fait effervescence à froid à HCl. La **lame n°2** a été réalisée dans un échantillon de roche d'âge Miocène (affleurement photographié en **Figure 7**), reposant sur les roches sédimentaires de la lame n°1.

Question II.4 – Réalisez un dessin d'observation de la lame n°1 et caractérisez la roche dont elle est issue en justifiant votre réponse. Vous indiquerez ensuite le contexte de formation et l'âge de cette roche en justifiant votre réponse.

Réponse à la question II.4 (lame n°1)

*Roche sédimentaire dont la texture est formée de grains liés par de la boue carbonatée (micrite). La micrite constitue moins de 10% de la cimentation. Les éléments figurés ne se sont pas liés ensemble pendant la phase de dépôt. Il s'agit d'un **packstone**.*

*Les éléments figurés sont majoritairement des éléments organisés en loges multiples, de microstructure agglutinée. Ce sont des tests de foraminifères benthiques agglutinés. Certaines sections sont circulaires, d'autres de forme triangulaire. Il s'agit respectivement de sections transversales et axiales de foraminifères à croissance sériée. De l'extérieur vers l'intérieur de la coquille, les sections axiales montrent de fines cloisons dont certaines sont prolongées par des lames épaisses et ondulées, qui se rejoignent au centre de la coquille. Ces foraminifères sont des **Orbitolines**.*

D'autres foraminifères, beaucoup moins abondants, sont visibles. Ce sont des foraminifères à microstructure porcelanée et croissance pelotonnée. Il s'agit de miliolites. Enfin, certains grains sont des fragments de coquilles de mollusques, bivalves notamment.

De par la présence d'Orbitolines et de miliolites, cette roche sédimentaire carbonatée s'est formée dans un contexte de plateforme, plutôt agitée compte tenu du microfaciès sédimentaire. La présence d'Orbitolines indique qu'elle s'est déposée au Crétacé (Barrémien à Cénomaniens).

Les candidats avaient 15 minutes pour l'analyse pétrologique et micropaléontologique des deux lames minces (questions II.4 et II.5).

Concernant la lame 1, les candidats ont fait beaucoup d'erreurs tant dans l'identification taxinomique des éléments figurés que dans l'analyse du microfaciès sédimentaire. Si les rares miliolites présentes dans la lame ont été généralement correctement identifiées, les Orbitolines, qui constituaient la grande majorité des éléments figurés et qui étaient importantes pour le diagnostic chronologique, ont été plus rarement reconnues (beaucoup de confusions avec les Nummulites, les Alveolines, les Orbitolites voir même souvent avec des coraux, des gastéropodes, des diatomées ou coccolithophoridés). Les candidats n'ont quasiment jamais proposé de démarche démonstrative dans l'identification taxinomique des foraminifères (caractéristiques microstructurales et géométriques des tests). Les dessins d'observation proposés ne rendent que trop rarement compte du microfaciès sédimentaire et des caractéristiques microstructurales (agglutinée pour les Orbitolines, porcelanée pour les miliolites) et géométriques des foraminifères. Les candidats ont généralement proposé un schéma plutôt qu'un dessin d'observation. L'interprétation paléoenvironnementale s'est révélée souvent très incomplète voir incohérente avec le contenu micropaléontologique et le microfaciès sédimentaire.

Question II.5 – Réalisez un dessin d'observation de la lame n°2 et caractérisez la roche dont elle est issue en justifiant votre réponse.

Réponse à la question II.5 (lame n°2)

Minéraux à repérer :

- Biotites (bonus : dont de nombreux sont chloritisés)
- Quartz
- Feldspaths alcalins
- (Quelques oxydes ; noirs en LPA)
- Matrice : verre

Roche magmatique à texture microlithique = volcanique

La présence de cristaux de quartz indique une roche acide, ce n'est donc pas du basalte comme proposé précédemment mais plutôt une rhyolite.

Le temps d'observation et de production d'un dessin était court, les candidats ont été valorisés sur leur capacité à représenter efficacement les éléments permettant la diagnose de la roche. A noter que beaucoup de candidats proposent un nom de roche sans diagnose préalable.

La composition chimique de la roche de la **lame mince n°2** (affleurement de la **Figure 7**) est disponible ci-dessous dans le **Tableau 2**.

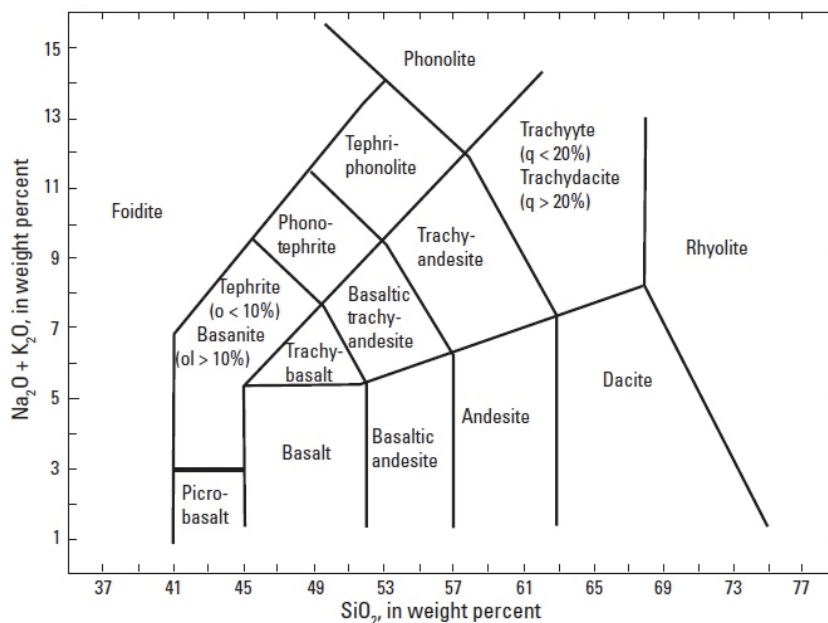
% oxydes	Roche du poste 2, affleurement II.2
SiO ₂	73,66
TiO ₂	0,22
Al ₂ O ₃	13,45
Fe ₂ O ₂	1,25
FeO	0,75
MnO	0,03
MgO	0,32
CaO	1,13
Na ₂ O	2,99
K ₂ O	5,25
H ₂ O	0,78
P ₂ O ₅	0,07

Tableau 2 – Composition chimique de la roche de l'Atelier 2 (lame n°2) et de l'affleurement de la Figure 7.

Question II.6 – A l'aide de vos connaissances, commentez la composition de la roche dont est issue la **lame mince n°2** et confirmez ou infirmez votre réponse à la **Question II.5**.

Réponse à la question II.6

En s'aidant d'un diagramme TAS on peut affirmer que la roche est une rhyolite car %SiO₂ > 70%. Les basaltes ont des %de SiO₂ < à 53%. Cela confirme notre erreur à la question II.3 mais confirme l'identification à la question II.5.



Question globalement bien traitée

A partir de la composition chimique en poids d'oxyde, une composition normative de la roche a été calculée, les résultats sont présentés dans le **Tableau 3**.

Minéraux	Quartz	Corindon	Orthose	Albite	Anorthite	Diopside	Hyperstène	Magnétite	Ilménite	Hématite	Apatite
%	34,18	1,49	20,07	32,12	4,31	0	0,5	2,97	0,19	3,26	0,11

Tableau 3 – Norme CIPW de la roche étudiée

Question II.7 – Rappelez très brièvement la différence entre une composition modale et normative.

Réponse à la question II.7

La composition modale d'une roche correspond aux minéraux effectivement présents dans la roche alors que la composition normative est une composition théorique calculée à partir de l'analyse chimique de la roche (minéraux que la roche aurait pu former si la cristallisation s'était faite dans les conditions standardisées).

Question II.8 – A l'aide de la composition normative, placez la roche de la **lame n°2** dans le diagramme de QAP de la **Figure 8**. Cela corrobore-t-il vos précédentes interprétations ?

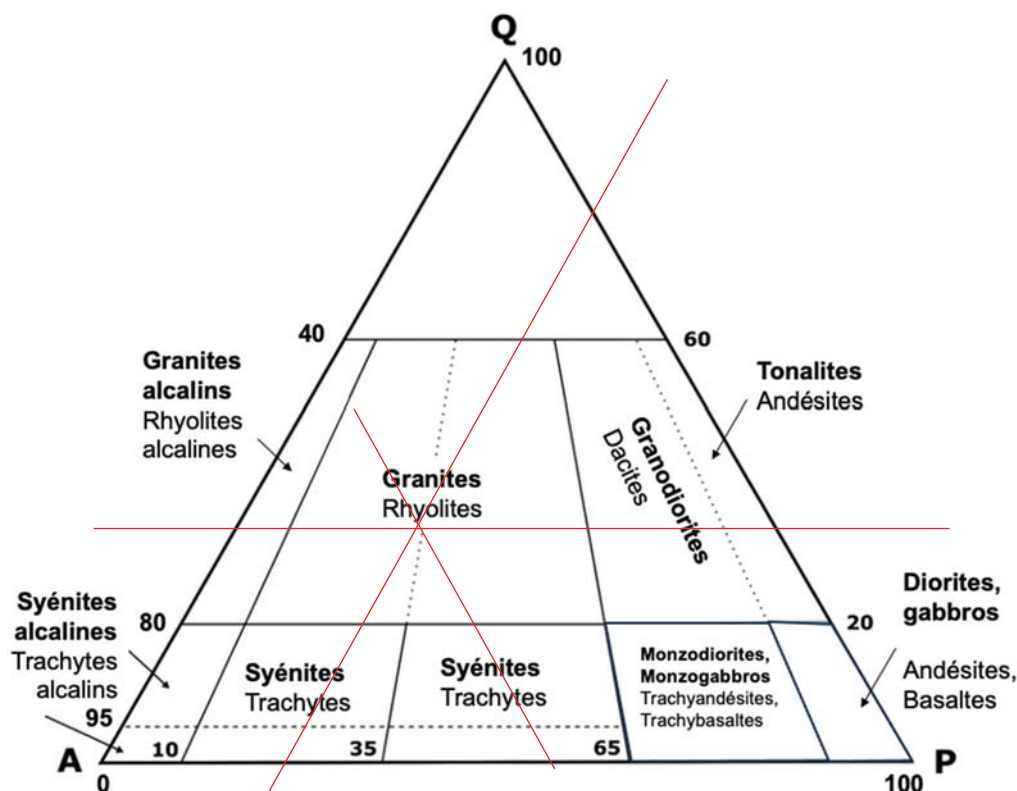


Figure 8 – diagramme QAP

Réponse à la question II.8. La réponse est en partie attendue sur la Figure 8.

Il faut éliminer les minéraux non cardinaux et recalculer les proportions de quartz, feldspaths alcalins et plagioclases sur une base de 100.

Q = 38%

A = 22%

P = 40%

Cette dernière vérification permet de conclure que l'on a bien affaire à une rhyolite

Question peu traitée.

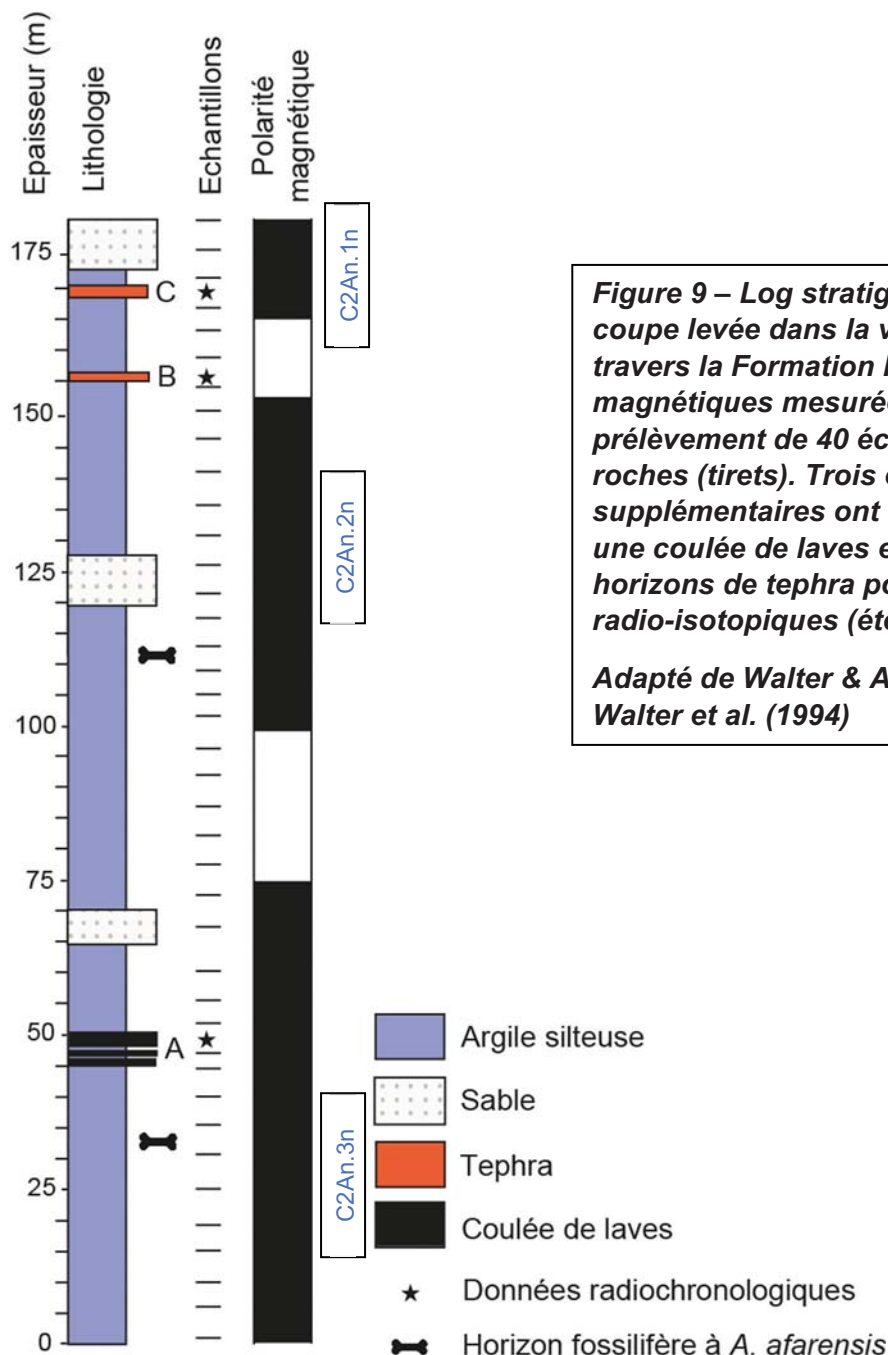
Partie III. Chronostratigraphie et paléontologie

Australopithecus afarensis est une espèce éteinte d'hominine bipède ayant vécu en Afrique de l'Est (principalement en Ethiopie, Kenya, Tanzanie) au Pliocène*. La Formation Hadar dans la région de l'Afar a livré les fossiles les plus abondants et les plus complets d'*A. afarensis*. Plusieurs niveaux de tephra et une coulée de laves sont intercalés dans les sédiments de cette formation sédimentaire.

Dans cet exercice, vous devez réaliser une interprétation chronostratigraphique d'une coupe levée dans la Formation Hadar dans la basse vallée de l'Awash et dater les fossiles qui y ont été collectés.

La **Figure 9** présente le log stratigraphique de la coupe levée dans la Formation Hadar et les résultats d'une étude magnétostratigraphique réalisée à partir du prélèvement et analyse de 40 échantillons de roches (tirets horizontaux sur la **Figure 9**). Sur le log stratigraphique, sont positionnés 3 horizons (une coulée de laves A et deux tephtras B et C) ayant fait l'objet de datations radio-isotopiques (étoiles noires sur la **Figure 9**).

*L'époque Pliocène est comprise entre 5,3 et 2,6 Ma



Question III.1 – D'après la **Figure 10**, déterminez le temps de demi-vie du ^{40}K et du ^{14}C . Vous rappellerez ce qu'est le temps de demi-vie d'un nucléide radioactif.

Réponse à la question III.1.

Le temps de demi-vie d'un isotope radioactif est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux de cet isotope initialement présents se désintègrent naturellement. Lorsque la moitié de l'isotope père a été désintégrée, la quantité restante est égale à la moitié de la quantité initiale. Sur la figure 10, le rapport présent / quantité initiale est donc de 1/2. Il suffit donc de lire directement sur le graphique le temps correspondant au rapport 0.5 pour le ^{40}K et le ^{14}C . Cette valeur est la demi-vie et donne une idée de la vitesse de décroissance radioactive.

Pour ^{40}K : ~1,2 Ga (milliards d'années)

Pour ^{14}C : ~5700 ans

Cette question a été généralement très bien traitée.

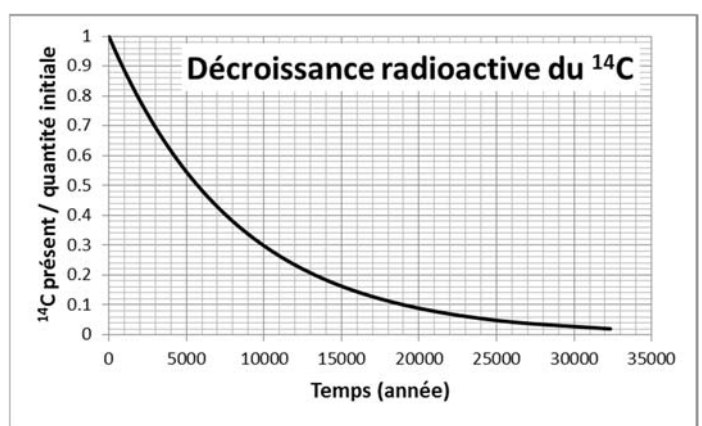
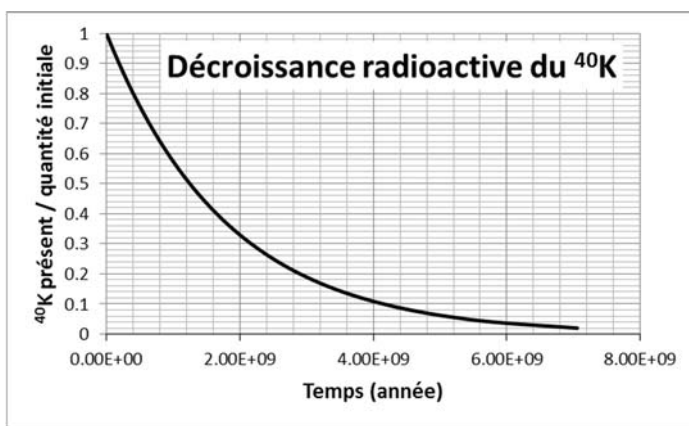


Figure 10 – Courbes de décroissance radioactive du ^{40}K (à gauche) et du ^{14}C (à droite).

Question I.2 – D'après vos connaissances et les **Figures 9 et 10**, déterminez si chacune des deux méthodes basées sur le ^{40}K et le ^{14}C est applicable à la datation des échantillons A, B et C. Vous justifierez votre réponse en énumérant l'ensemble des raisons qui permettent de répondre à la question posée.

Réponse à la question III.2.

La méthode basée sur le ^{14}C n'est pas applicable car :

- elle est fondée sur la mesure de l'activité radiologique du ^{14}C contenu dans la matière organique. Or les échantillons analysés dans la Formation Hadar sont des lave et téphras, démunis de matière organique.
- d'après la courbe de décroissance radioactive du ^{14}C (Figure 10), on voit qu'en quelques dizaines de milliers d'années il ne reste quasiment plus de ^{14}C . Or les téphras et lave de la Formation Hadar sont interstratifiés dans des roches sédimentaires du Pliocène et se sont donc déposés entre 5,3 et 2,6 Ma.

La méthode basée sur le ^{40}K est au contraire applicable car :

- le potassium est abondant dans de nombreux minéraux de roches magmatiques, y compris les coulées de laves et les téphras.
- le ^{40}K se désintègre très lentement (Figure 10). Un échantillon du Pliocène contiendra donc encore une grande quantité de ^{40}K .

Cette question a été globalement bien traitée. De nombreux candidats ont pu fournir une explication complète justifiant du choix du ^{40}K pour la datation des échantillons A, B et C.

Question III.3 – La **Figure 11** présente la relation entre la valeur du rapport $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ et l'âge d'un échantillon silicaté (cristaux de feldspaths, amphiboles, micas). Les rapports $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ mesurés dans les échantillons collectés dans la coulée de laves A et les deux téphras B et C (**Figure 9**) sont donnés ci-dessous dans le **Tableau 4**.

	Roche	Rapport $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$
Echantillon A	Coulée de laves	$2,04 \times 10^{-4}$
Echantillon B	Tephra	$1,81 \times 10^{-4}$
Echantillon C	Tephra	$1,74 \times 10^{-4}$

Tableau 4 – Rapports $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ mesurés dans les échantillons A, B et C de la coupe levée dans la Formation Hadar

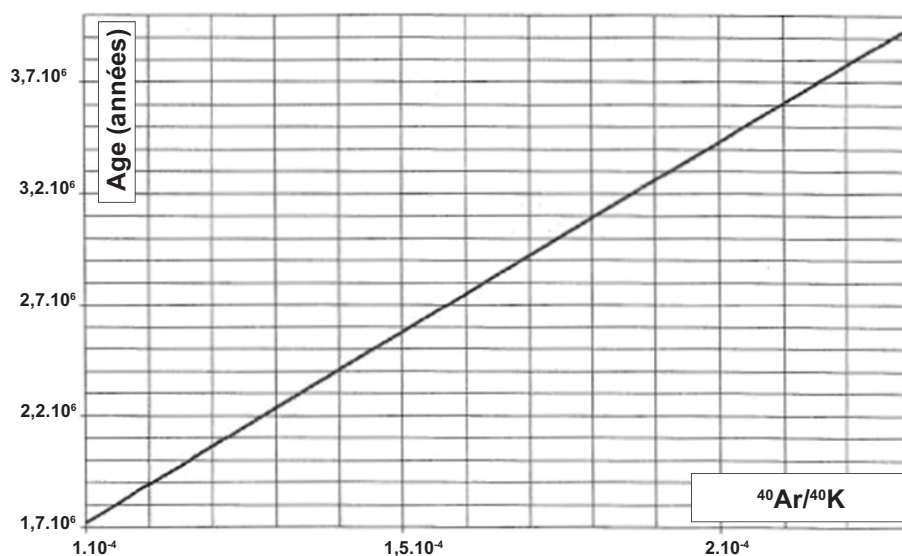


Figure 11 – Relation entre les valeurs mesurées de $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ et l'âge d'un échantillon

A l'aide de la **Figure 11**, déterminez l'âge des échantillons A, B, C.

Réponse à la question III.3.

La lecture de la Figure 11 permet de déterminer les âges de dépôt de la coulée de lave et des téphras.

Echantillon A (coulée de lave) : 3,5 Ma

Echantillon B (téphra) : 3,1 Ma

Echantillon C (téphra) : 3,0 Ma

Cette question a été très bien traitée.

Question III.4 – Dans le cas du couple K-Ar, l'équation de décroissance radioactive est complexe car K se désintègre en Ar (avec une constante de désintégration notée λ_1) mais également en Ca (constante de désintégration notée λ_2).

NOM :

PRENOM :

Salle :

L'équation de désintégration s'écrit :

$$t = \frac{\ln \left(1 + \frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{40}\text{K}} \times \frac{\lambda}{\lambda_1} \right)}{\lambda}$$

avec $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$; $\lambda_1 = 0,581 \times 10^{-10} \text{ an}^{-1}$; $\lambda_2 = 4,962 \times 10^{-10} \text{ an}^{-1}$

A partir de l'équation, calculez les âges des échantillons A, B et C. Vous arrondirez vos résultats à deux décimales. Comparez avec le résultat de la **Question III.3**.

Réponse à la question III.4.

Echantillon A (coulée de lave) : **3,51 Ma**

Echantillon B (téphra) : **3,11 Ma**

Echantillon C (téphra) : **2.99 Ma**

La moitié des candidats a éprouvé des difficultés dans l'utilisation de la calculatrice scientifique, renonçant aux calculs ou aboutissant à des résultats aberrants.

Question III.5 – A partir des âges obtenus pour les échantillons A, B et C, donnez une approximation de l'âge des fossiles d'*Australopithecus afarensis* collectés dans la Formation Hadar de la vallée d'Awash (**Figure 9**). Ces estimations sont-elles cohérentes au regard de vos connaissances sur les hominine fossiles?

Réponse à la question III.5.

La coupe levée dans la Formation Hadar a livré deux horizons fossilifères à *Australopithecus afarensis*, respectivement à ~33 m et ~112 m (Figure 9).

L'horizon fossilifère à ~33 m est situé sous la coulée de lave A. L'âge des fossiles d'*A. afarensis* récoltés à ~33 m est donc **plus ancien que 3,51 Ma**.

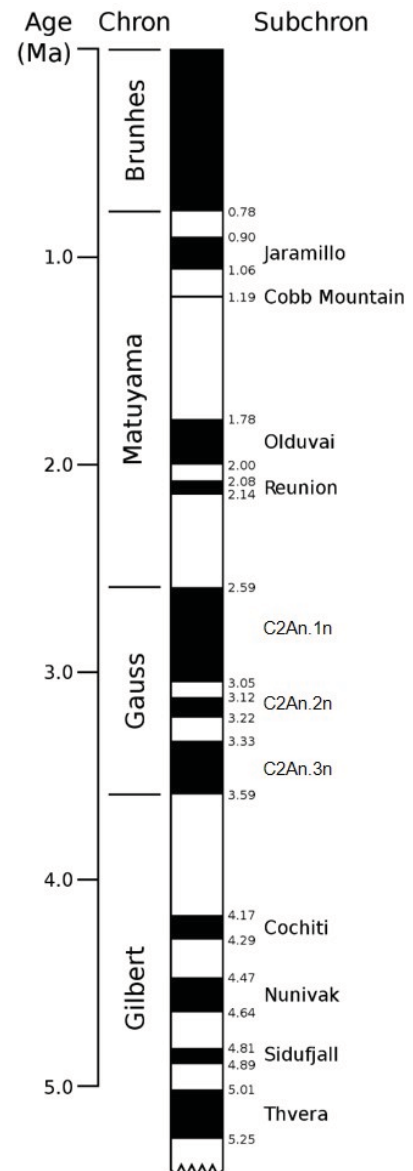
L'horizon fossilifère à ~112 m est situé entre la coulée de lave A et le tephra B. L'âge des fossiles d'*A. afarensis* récoltés à ~112 m est donc compris **entre 3,51 et 3,11 Ma**.

Ces estimations sont cohérentes avec l'histoire des hominine fossiles, le genre *Australopithecus* ayant vécu en Afrique entre ~4,2 Ma (Pliocène supérieur ; *A. anamensis*) et ~2 Ma (Pléistocène inférieur ; *A. sediba*). Elles sont également cohérentes avec l'histoire de l'espèce *Australopithecus afarensis*, dont fait partie « Lucy », documentée pour avoir vécu au **Pliocène supérieur** de ~3,9 Ma à ~2,9 Ma.

Cette question a suscité beaucoup de difficultés. Si des candidats ont réussi à fournir une estimation des âges des deux horizons à *A. afarensis*, très peu ont été capables d'expliquer pourquoi ces âges étaient cohérents avec l'histoire des hominine fossiles.

Une échelle magnétochronologique des inversions magnétiques est fournie en **Figure 12** pour les 5 derniers millions d'années (Pliocène à Actuel).

Figure 12 – Echelle des polarités magnétiques pour les 5 derniers millions d'années (Gradstein et al. 2020). Les polarités magnétiques normales et inverses sont respectivement figurées en noir et en blanc). A gauche sont indiqués les noms des Chrons. A droite sont indiqués les noms des Sous-chrons de polarité normale.



Question III.6 – Rappelez brièvement comment cette échelle des polarités magnétiques a été établie et comment ont pu être datées les inversions magnétiques entre Chrons et Sous-chrons.

Réponse à la question III.6.

Des anomalies magnétiques sont observées depuis la surface des océans. Elles apparaissent sous formes de « bandes » alternativement positives et négatives, parallèles les unes aux autres, symétriques par rapport à l'axe des dorsales. Ces anomalies sont issues de l'acquisition par le magma basaltique remontant à l'axe de la dorsale et refroidi au contact de l'eau de mer d'une aimantation thermorémanente dirigée selon le champ magnétique terrestre. Cette aimantation est si intense qu'elle perturbe le champ magnétique terrestre à la surface même de l'océan. Les âges des inversions magnétiques entre Chrons et Sous-chrons peuvent être calculés en faisant l'hypothèse de vitesses d'expansions océaniques constantes pour une dorsale. Un contrôle paléontologique de la chronologie des inversions magnétiques peut être réalisé soit en datant biostratigraphiquement la base des colonnes de sédiments pélagiques forés/carottés recouvrant les basaltes, soit en déterminant la polarité magnétique de sédiments émergés très bien datés par l'intermédiaire des fossiles et/ou interstratifiés avec des roches magmatiques datables radio-isotopiquement.

Cette question n'a pas suscité de grandes difficultés chez les candidats, même si les réponses ont été généralement incomplètes.

Question III.7 – A l'aide des **Figures 9** et **12** et en utilisant les âges des horizons A, B et C, proposez une interprétation magnétostratigraphique des polarités magnétiques mesurées dans la Formation Hadar. Vous répondrez en indiquant directement sur la **Figure 9** les noms des Sous-chrons de polarité magnétique normale enregistrés sur cette coupe.

Réponse à la question III.7. Directement sur la Figure 9.

Chron GAUSS, Sous-Chrons C2An.3n, C2An.2n et C2An.1n (voir Figure 9).

Cette question a été plutôt bien traitée, mais de nombreux candidats ont interprété les polarités normales comme caractérisant celles du Pléistocène.

Question III.8 – Comment votre interprétation magnétostratigraphique (**Question III.7**) permet-elle de mieux contraindre l'âge des fossiles d'*A. afarensis* collectés dans la Formation Hadar de la vallée de l'Awash ? Proposez une nouvelle estimation des âges des fossiles d'*A. afarensis*.

Réponse à la question III.8.

*L'horizon fossilifère à ~33 m est situé dans un intervalle sédimentaire de polarité magnétique normale correspondant au Sous-chron C2An.3n. L'âge des fossiles d'*A. afarensis* de cet horizon fossilifère est donc compris entre 3,59 Ma (âge de la base du Sous-chron C2An.3n) et 3,51 Ma (âge du niveau de lave A).*

*L'horizon fossilifère à ~112 m est situé dans un intervalle sédimentaire de polarité magnétique normale correspondant au Sous-chron C2An.2n. L'âge des fossiles d'*A. afarensis* de cet horizon fossilifère est donc compris entre 3,22 Ma (âge de la base du Sous-chron C2An.2n) et 3,12 Ma (âge du sommet du Sous-Chron C2An.2n).*

Les candidats ayant réussi leur interprétation magnétochronologique (questions III.7) ont globalement bien réussi à traiter cette question.

Question III.9 – Calculez, en cm.k^{-1} (centimètres par millier d'années), un taux de sédimentation moyen dans un premier temps pour l'intervalle de polarité magnétique normale compris entre 100 et 153 m, et dans un second temps pour l'intervalle de polarité magnétique normale compris entre 0 et 50 m. Vous arrondirez vos résultats à une décimale.

Réponse à la question III.9.

L'intervalle de polarité magnétique normale compris entre 100 et 153 m s'est déposé entre 3.22 et 3.12 Ma (âges des inversions magnétiques correspondant Sous-Chron C2An.2n). 53 m (5300 cm) de sédiments se sont donc déposés en 0,1 Ma (100 ka).

*Le taux de sédiment moyen pour cet intervalle est donc de **53.0 cm.k^{-1}** .*

L'intervalle de polarité magnétique normale compris entre 0 et 50 m a pu se déposer entre 3.59 Ma (âge de la base du Sous-chron C2An.3n) et 3.51 Ma (âge de la lave A). 50 m (5000 cm) de sédiments se sont déposés en au moins 0,08 Ma (80 ka).

*Le taux de sédiment moyen est au minimum de **62,5 cm.k^{-1}** .*

Question très peu traitée par les candidats. Le calcul du taux de sédimentation dans l'intervalle 100-153 m a été beaucoup mieux réussi que celui de l'intervalle 0-50 m (une seule bonne réponse).

Question III.10 – En utilisant les résultats des **questions III.9**, calculez les âges en Ma (millions d'années) des fossiles d'*A. afarensis* collectés. Vous arrondirez vos résultats à deux décimales.

Réponse à la question III.10.

La base du Sous-Chron C2n.2n, située à 100 m, a un âge de 3,22 Ma.

*Les fossiles d'*A. afarensis* ont été collectés à ~112 m, soit 12 m (1200 cm) au dessus de la base du Sous-chron C2n.2n.*

*Le taux de sédiment moyen étant de 53.0 cm.ka⁻¹ dans cet intervalle, les fossiles d'*A. afarensis* sont de 22,64 ka plus jeunes que la base du Sous-chron C2n.2n.*

*Ils sont donc datés de 3,22-0,022 = **3,20 Ma**.*

La coulée de lave A, située à 50 m, a un âge de 3,51 Ma

*Les fossiles d'*A. afarensis* ont été collectés à ~33 m, soit 17 m (1700 cm) en dessous de la coulée de lave A.*

*Le taux de sédiment moyen minimum étant estimé à 62,5 cm.ka⁻¹ dans cet intervalle, les fossiles d'*A. afarensis* sont de 27,2 ka plus anciens que la coulée de lave A.*

*Ils sont donc datés de 3.51+0,027 = **3,54 Ma**.*

*Attention, l'estimation d'âge des fossiles d'*A. afarensis* récoltés à ~33 m repose sur l'hypothèse que l'intégralité du Sous-chron C2n.3n soit enregistrée dans la coupe de la Formation Hadar (voir ci-dessous question III.11.)*

Question très peu traitée par les candidats. Un seul candidat a proposé une réponse juste et complète.

Question III.11 – Discutez de l'ensemble des limites et incertitudes sur ces estimations d'âges.

Réponse à la question III.11.

*Pour calculer l'âge du plus ancien horizon à *A. afarensis* à ~33 m, on a fait l'hypothèse que l'intégralité du Sous-chron C2n.3n était enregistrée dans la coupe étudiée de la Formation Hadar. Il est probable que la base de la coupe sédimentaire soit plus récente que 3.59 Ma et qu'une partie de ce sous-chron ne soit pas représenté par des sédiments.*

*Les deux estimations d'âges des horizons à *A. afarensis* reposent sur l'hypothèse que les taux de sédimentations aient été constants entre les points d'ancrage chronologiques utilisés dans les calculs. Il est plus que probable que ces taux de sédimentation aient varié au cours du temps.*

L'interprétation magnétochronologique est dépendante de la résolution de l'échantillonnage (espacement stratigraphique entre deux échantillons suffissifs prélevés pour la mesure des polarités pagnétiques). La magnétostratigraphie reconstituée pour la coupe de la Formation Hadar repose sur l'analyse de 40 échantillons présentant une résolution d'échantillonnage de plusieurs mètres, et qui est variable.

Question très peu traitée par les candidats.

Question III.12 – Les niveaux fossilifères à *A. afarensis* ont aussi livré de nombreux fossiles d'autres vertébrés. Vous trouverez en **Figures 13** et **14** les photographies de restes fossiles de deux des espèces de vertébrés collectées.

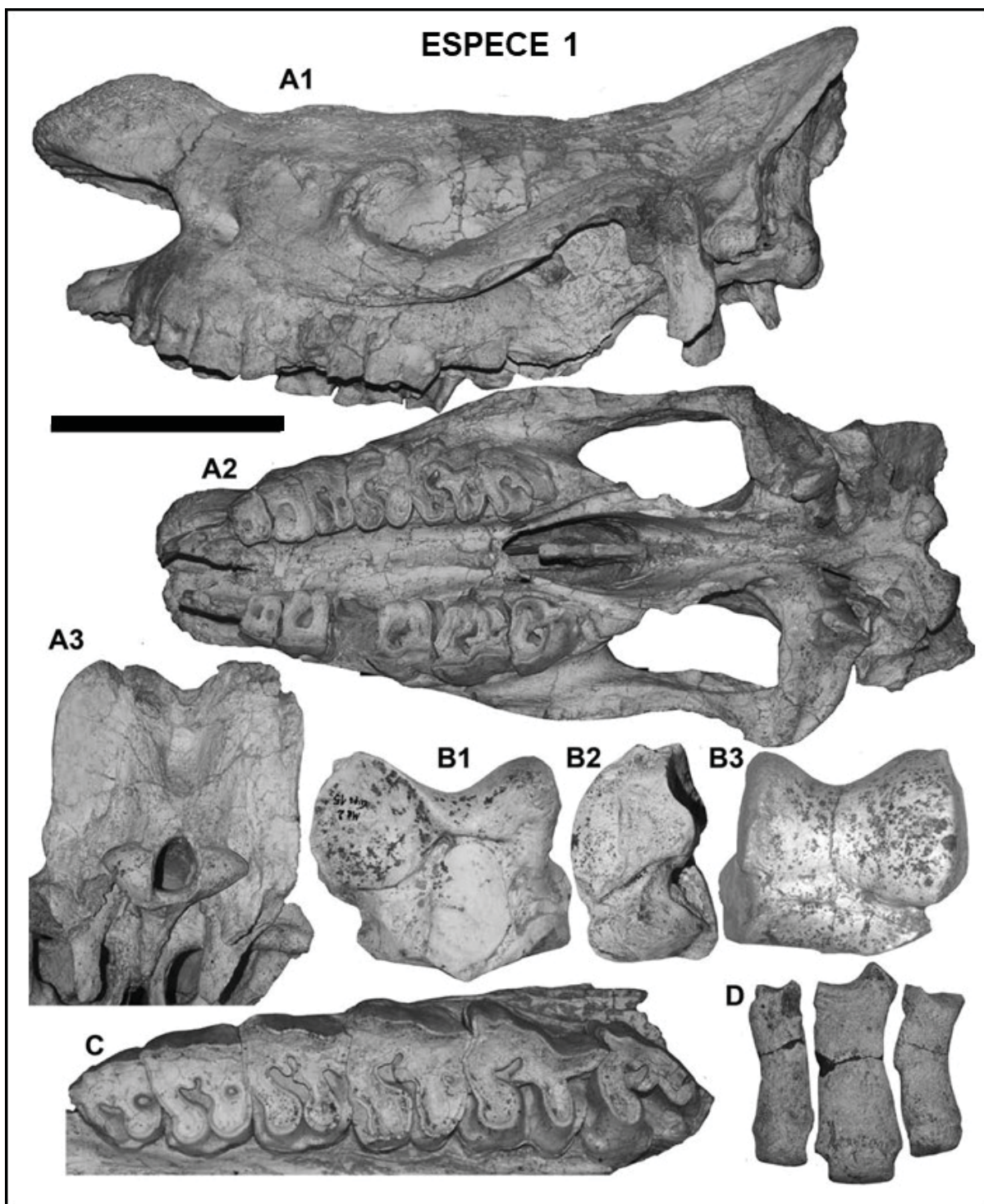
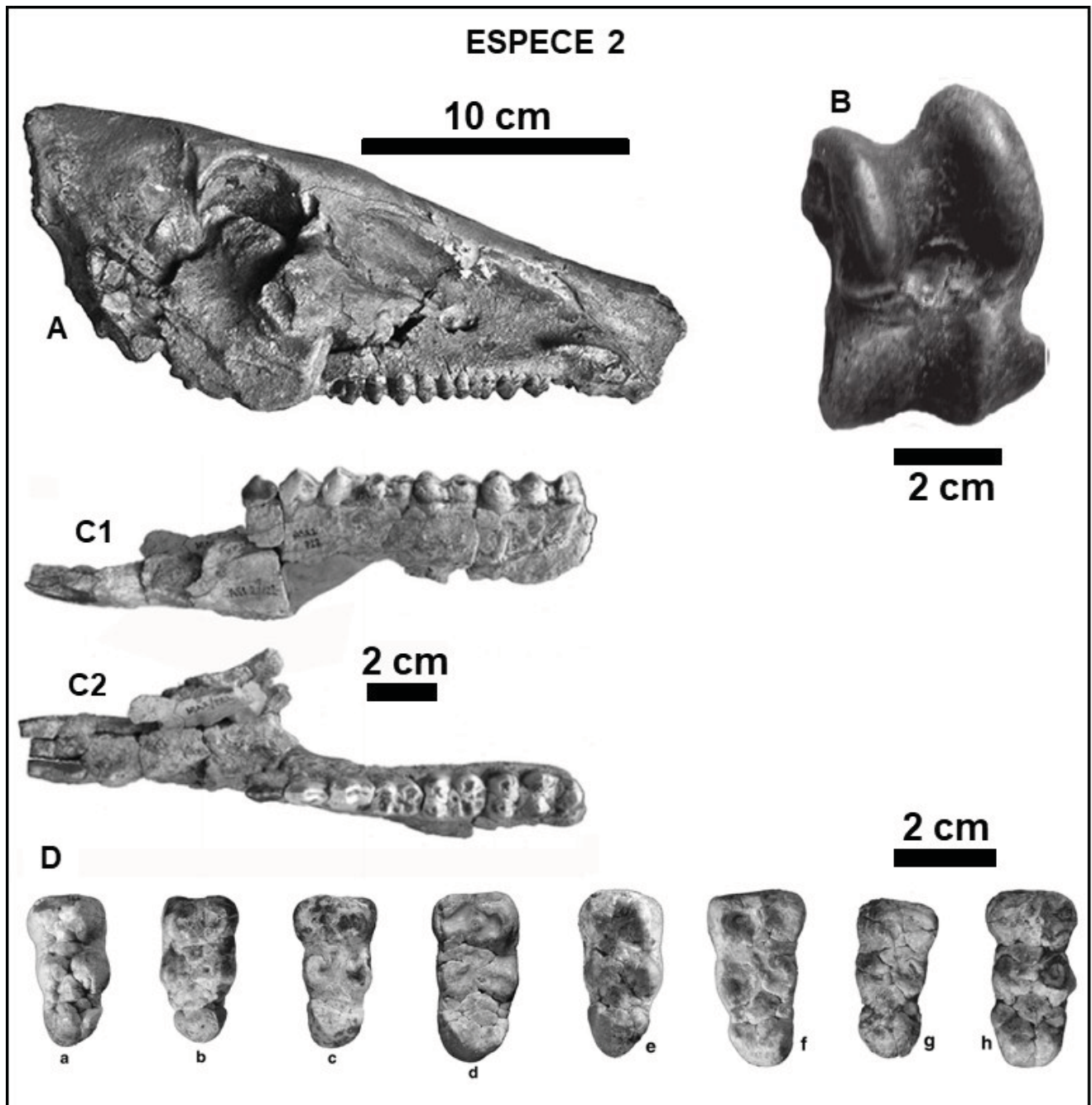


Figure 13 – Fossiles issus d'une même espèce de vertébré, récoltés dans un des niveaux fossilifères à *A. afarensis* de la Formation Hadar (Fillion et al., 2022).

A = crâne ; B = astragale ; C = maxillaire ; D = métapodes.

Pour A et D, l'échelle mesure 20 cm ; pour B et C, la même échelle mesure 10 cm.



**Figure 14 – Fossiles issus d’une même espèce de vertébré, récoltés dans un des niveaux fossilifères à *A. afarensis* de la Formation Hadar (Fillion et al., 2022).
A = crâne ; B = astragale ; C = dentaire ; D = dents isolées.**

Déterminez les noms taxinomiques de ces deux espèces de vertébrés aux niveaux de la classe, de l’ordre et de la famille. Vous prendrez soin de justifier chacun de vos deux diagnostics taxinomiques à partir des caractéristiques observées sur les **Figures 13 et 14**.

Pour l’évaluation de cet exercice, la démarche et les arguments mobilisés pour réaliser les diagnoses des deux espèces fossiles proposées seront tout particulièrement valorisés.

Réponse à la question III.12.

Espèce n°1 :

La dentition est hétérodonite il s'agit d'un vertébré de la classe des **mammifères**. L'astragale présente une simple poulie ce qui exclue les Artiodactyles. Les prémolaires sont molariformes et le membre est mésaxonien (métapodes II-III-IV avec III dominant). Il s'agit donc d'un **Périssodactyle**.

La taille est très importante (longueur du crâne supérieure à 60 cm). Les tubercules des prémolaires et molaires supérieures forment des crêtes continues et ont une forme de croissant (dents lophosélénodontes) avec crochets dans le trigone. Ce mammifère appartient à la famille des **rhinocerotidés**.

Espèce n°2 :

La mandibule est formée d'une seule pièce osseuse (le dentaire) et la dentition est hétérodonite, il s'agit d'un vertébré de la classe des **mammifères**.

L'astragale présente une double poulie, ce mammifère appartient à l'ordre des **Artiodactyles**.

L'astragale présente une double poulie, les poulies sont désaxées, et sa taille est moyenne (~6-8 cm). Il s'agit d'un suine. Les dents présentent des cuspides arrondis (dents bunodontes) avec une couronne basse (dents brachyodontes) et sont multicuspidées. Ce mammifère appartient à la famille des **suidés**.

Question très peu traitée par les candidats. Tout caractère diagnostique proposé de façon cohérente pour une unité taxinomique de la classification a été valorisé. Trois candidats ont abouti au diagnostique "rhinocerotidé", aucun à celui de "suidé".