

Devoir surveillé n°7

Lundi 22 mai 2023

Épreuve d'analyse de documents de géologie

durée : 1h45 heures

Exercice 1 – Quelques ressources normandes

durée conseillée : 1 heure

(inspiré du sujet G2E 2021)

PARTIE 1. PROCESSUS D'ALTERATION EN DOMAINE TEMPÉRÉ

Le granite de Flamanville en Normandie (Figures 1a et 1b) présente une composition qui s'écarte de celle des granites classiques. Il s'agit en fait d'un monzogranite, roche plus riche en feldspaths alcalins, orthose (KAlSi_3O_8) et plagioclases sodiques ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), et plus pauvre en quartz, qu'un granite.

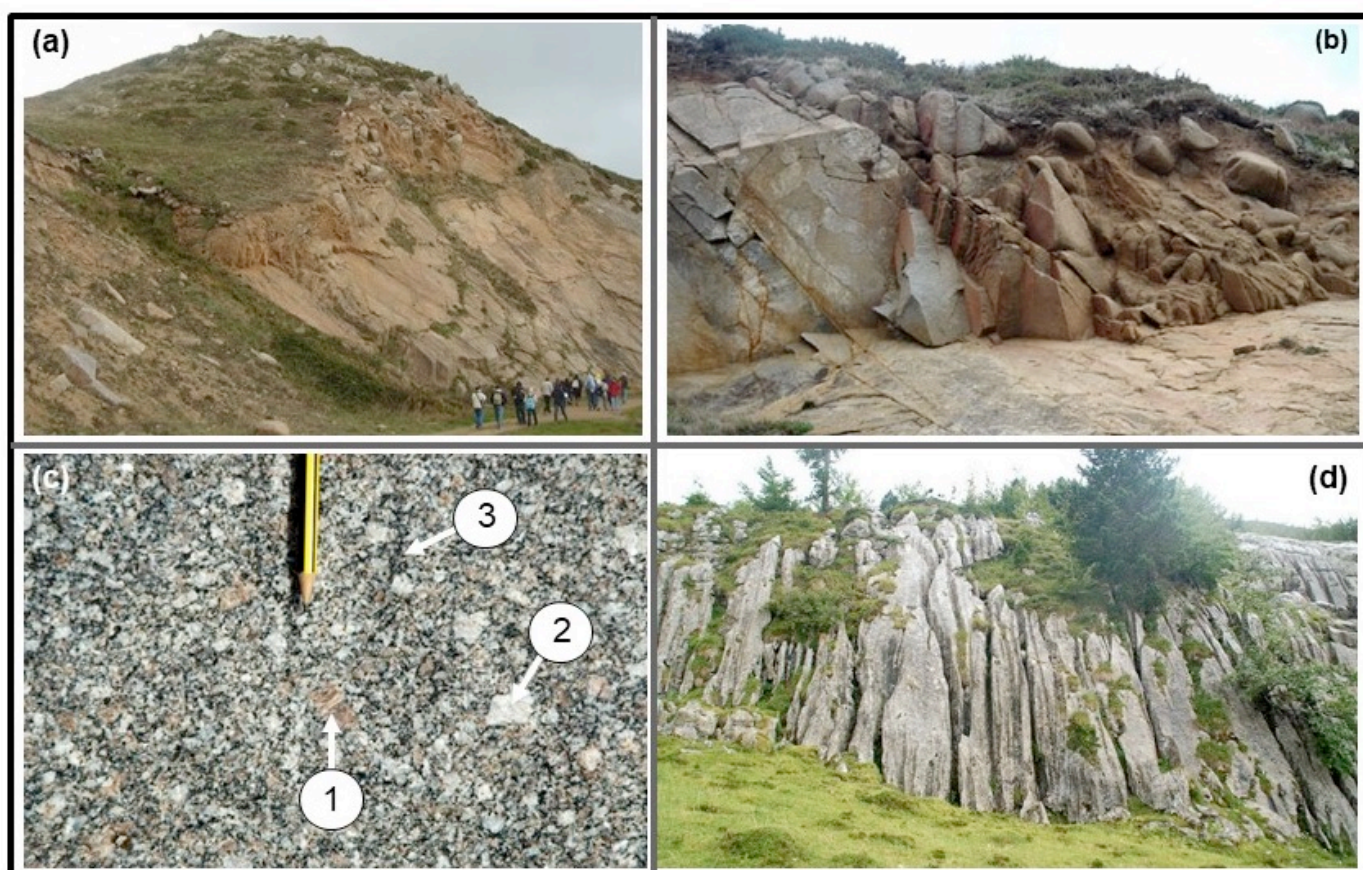


Figure 1. Altération des granites et des calcaires en milieu tempéré.

1a et b : Affleurements du monzogranite de Flamanville (Manche) avec ses zones d'altération.

1c : Aspect du granite frais [1, orthose ; 2, feldspaths calco-sodiques ou plagioclases ; 3, minéraux sombres avec biotites et amphiboles]. Le quartz est présent mais difficilement identifiable sur la photographie.

1d : Calcaire crétacé du massif de La Pierre Saint-Martin (Pyrénées-Atlantiques).

Question 1a – Décrivez les composantes de l'affleurement du granite de Flamanville (photos 1a et 1b) depuis le bas vers le haut.

Une coupe-type montre de bas en haut :

- la roche mère saine, c.à.d., le granite, peu fracturé, formant une dalle où marchent les visiteurs ;

- la roche mère altérée avec, à l'intérieur, des **diaclasses**, fortement inclinées, centimétriques à métriques, qui délimitent des masses anguleuses et permettent de dégager des blocs de granite plus ou moins arrondis ;
- l'arène sableuse riche en quartz, peu développée ;
- un horizon humifère peu épais avec une végétation basse.

Question 1b – Précisez les différents processus de l'altération. Quel est le nom de l'argile prédominante obtenue dans ce secteur ?

L'altération peut être divisée en deux processus :

- mécanique = désagrégation des grains qui conduit à la formation d'une arène meuble, au sein duquel subsistent des blocs résiduels arrondis conservant l'architecture de la roche saine. Il s'agit ici d'ARÉNISATION avec ou non CRYOCLASTIE (peu probable en Normandie).
- chimique avec hydrolyse des silicates en argiles (ARGILISATION) et dissolution des éléments chimiques solubles.

L'argile prédominante issue de l'altération du granite dans ce secteur correspond à l'illite qui est une argile de type T-O-T (deux couches de tétraèdres encadrent une couche d'octaèdres). Cette néoformation d'argile résulte d'une réaction de BISIALLITISATION.

Question 2 – La figure 1d montre un affleurement de calcaire crétacé, à La Pierre Saint-Martin dans les Pyrénées. Décrivez brièvement l'affleurement. Nommez le modelé de surface observé.

L'affleurement de calcaire crétacé des Pyrénées forme une paroi en relief qui est fortement inclinée et dégagée, en grande partie, de son couvert végétal. La paroi a une longueur d'une quinzaine de mètres pour 5 à 10 m de haut environ ; elle est découpée par des dépressions rectilignes à courbes, assez profondes, plus ou moins larges, qui suivent la pente de l'affleurement.

La largeur de ces dépressions peut atteindre la dizaine de cm. Il peut s'agir de diaclasses qui ont été élargies par l'altération chimique du calcaire (dissolution des carbonates).

Les incisions laissent subsister, sur la paroi verticale, entre elles des arêtes aiguës subparallèles les unes aux autres (succession de sillons et de crêtes).

Le modelé de surface observée correspond à une structure karstique donnant des morphologies de type 'lapiez'.

Question 3 – Caractérissez le processus chimique qui aboutit à la disparition des calcaires. On donnera l'équation de l'équilibre des carbonates. Quels sont les principaux facteurs qui peuvent contrôler cette réaction sous climat tempéré ?

Le processus chimique qui aboutit à la disparition des calcaires est la DISSOLUTION, liée aux eaux de ruissellement en climat tempéré. La dissolution des carbonates peut s'écrire :



Facteurs influençant la dissolution :

- diminution de pH (milieu acide),
- diminution de température (environnement froid),
- une grande quantité d'eau,
- un temps de contact eau – roche élevé,
- l'abondance de CO_2 peuvent favoriser la dissolution des carbonates, de même que la sous saturation des eaux en ions Ca^{2+} .

PARTIE 2. FORMATION DES ÉVAPORITES

Les évaporites actuelles peuvent se former dans des lagunes évaporitiques, appelées 'sebkra', bien connues sur le pourtour africain et au-delà, le long du golfe persique (Figure 2a). La plupart des sebkra sont récentes et la hauteur cumulée des couches de sel est de l'ordre de quelques mètres.

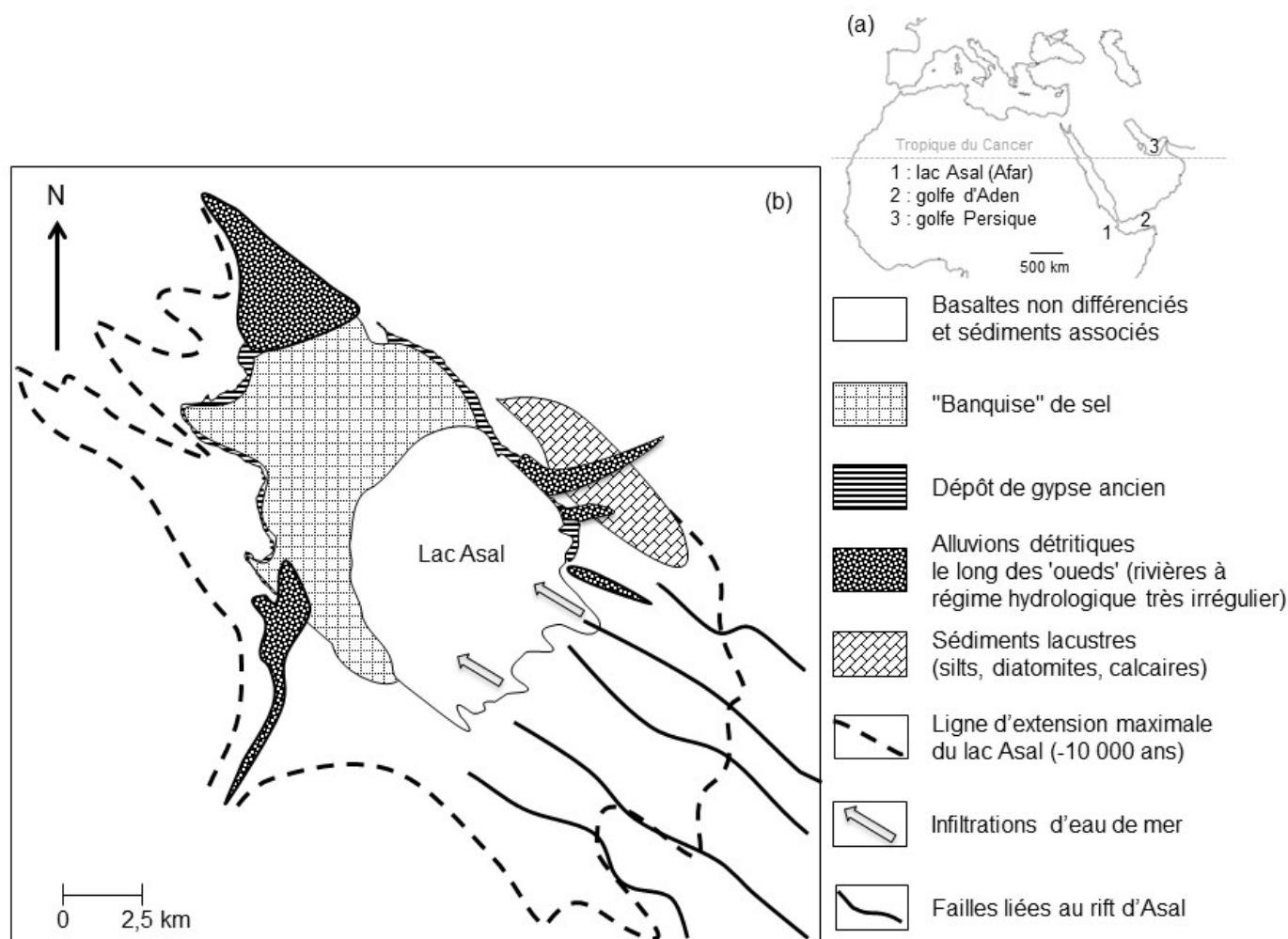


Figure 2. Environnements évaporitiques actuels.

2a : Carte de localisation des différents secteurs d'étude (1 à 3).

2b : Carte géologique du lac Asal actuel, situé dans le rift d'Asal qui appartient à la zone de rift des Afars au Nord-Est de l'Afrique. La limite du lac Asal il y a 10 000 ans est symbolisée par les traits pointillés.

Question 4 – Définissez le terme "évaporite".

Les évaporites sont des roches formées par sursaturation d'eau de mer dans des environnements arides, parmi lesquelles on rencontre majoritairement : calcaires, gypse, halite ou sel gemme, sylvite. Elles résultent d'un phénomène de précipitation chimique directe ne faisant pas intervenir les êtres vivants. Les évaporites se forment dans des contextes variés, mais on les rencontre majoritairement en marge du littoral, ou dans des lacs salés. Les évaporites précipitent par ordre de solubilité croissante.

Question 5 – En vous appuyant sur les documents suivants (figure 3 et Tableau 1), indiquez quel est l'ordre de précipitation des principaux solutés formés par évaporation d'une saumure.

La densité de la saumure en cours d'évaporation augmente d'une valeur de 1 à plus de 1,3.

Donc on peut lire la suite des sels qui précipitent au cours de l'évaporation. La succession est la suivante : (1) carbonates de calcium, (2) sulfates de calcium hydraté (gypse), (3) sel gemme (halite), (4) sulfate de magnésium avec les chlorures de potassium (KCl) et de magnésium (MgCl₂), et (5) in fine, différents sels de bromure.

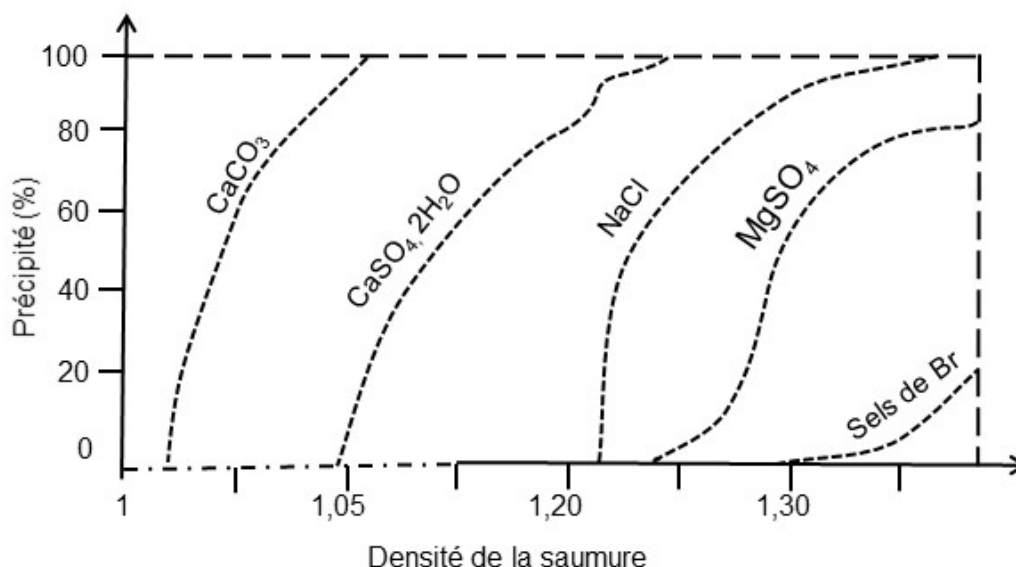


Figure 3. Pourcentage des sels précipités dans une saumure en cours d'évaporation. Les sulfates de magnésium précipitent en même temps que les chlorures de potassium et de magnésium.

Minéral	Composition	Densité
Calcite	CaCO ₃	2,71
Magnésite	MgCO ₃	3
Dolomite	CaMg (CO ₃) ₂	2,9
Halite	NaCl	2,16
Gypse	CaSO ₄ 2 H ₂ O	2,31
Anhydrite	CaSO ₄	2,9
Sylvite	KCl	1,98
Carnallite	KMgCl ₃ 6 H ₂ O	1,6
Sédiments non consolidés		2
Sédiments consolidés		2,5 à 2,6

Tableau 1. Composition et densité des principaux minéraux évaporitiques comparés à ceux de sédiments meubles ou compactés.

Question 6 – Sachant que pour une tranche d'eau de mer de 1 m, on obtient par évaporation une couche de 12,9 mm de sel gemme (NaCl), et une couche de 0,1 mm de carbonates, quelle est la hauteur d'eau nécessaire pour obtenir respectivement une couche de 25 m de sel et une couche d'un mètre de carbonates ? Comparez les valeurs à la profondeur du lac Asal, qui varie entre 20 et 7 m selon la saison. Qu'en déduire ?

Il s'agit d'écrire simplement deux règles de proportionnalité :

- pour le sel gemme, on a $25 \times 1000 / 12,9 \approx 2\ 000$ m de hauteur d'eau ;

- pour les carbonates, on a $1 \times 1000 / 0,1 = 10\ 000$ m, soit 10 km de hauteur d'eau.

Ces valeurs sont très supérieures à celles de la profondeur du lac Asal : il s'agit donc d'un processus itératif avec des arrivées intermittentes d'eau et des phases d'évaporation, qui se cumulent.

Question 7 – Quel est le type d'alimentation en eau salée du lac Asal (voir la figure 2b) ?

Le lac Asal est séparé de la mer par une barrière de basalte faillé. Les failles et l'émission de basaltes résultent du fonctionnement du rift. Les basaltes étant imperméables, l'eau ne peut circuler que grâce aux failles du rift. On constate que le réseau d'infiltration d'eau de mer est parallèle aux failles du rift. En conséquence, le lac Asal étant situé dans la zone du rift, qui est extrêmement faillé, on peut envisager la pénétration d'eau de mer grâce aux fractures profondes du rift qui relie la côte de la mer Rouge au lac à l'intérieur des terres.

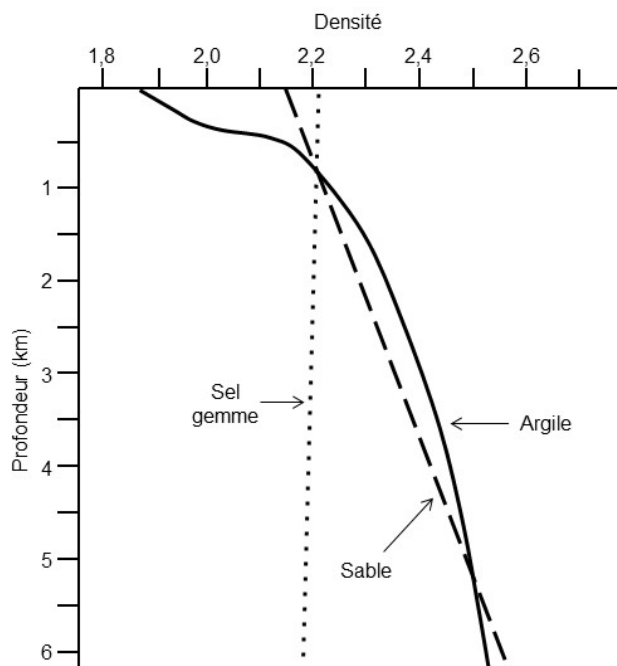


Figure 4. Évolution de la densité de trois types de sédiments : argile, sable et sel gemme avec la profondeur.

Question 8 – Comparez l'évolution de la courbe représentative des argiles avec celles du sable, en particulier dans les premiers 500 mètres (figure 4). Quels sont les facteurs responsables de l'évolution des argiles avec la profondeur ? Comment nomme-t-on le phénomène géologique au cours duquel a lieu une telle évolution ? Quelle particularité montre la courbe du sel gemme ?

Sable : la relation entre densité et profondeur est linéaire. L'augmentation régulière de la densité avec la profondeur est liée à la compaction mécanique des grains de sable et à la réduction de la porosité et de la perméabilité qui sont toutefois très limitées dans le cas des sables qui vont donner des roches gréseuses plus ou moins poreuses.

Les **argiles** montrent, pour une profondeur inférieure au km, une très forte augmentation de la densité avec la profondeur qui ne peut pas être expliquée uniquement par la diminution de porosité mais aussi par la modification de la structure des argiles qui perdent l'eau interfoliaire. De plus, les feuillets d'argile sont réarrangés sous l'effet de la pression de charge. Pour des profondeurs inférieures à 1 km, l'augmentation régulière de la densité est plus faible avec l'augmentation de la pression de charge.

• L'augmentation de la densité des sables et des argiles a lieu lors de la diagenèse.

Le nom du processus, la **DIAGENÈSE**, est rarement cité. Souvent aucun mécanisme n'est signalé, et la page reste blanche, ce qui a largement surpris les correcteurs.

Sel : on n'observe pas d'évolution pour le sel gemme (éventuellement une baisse de densité liée à T).

PARTIE 3. DÉFORMATION DES FORMATIONS ÉVAPORITIQUES

La déformation des gisements de sel est en grande partie liée aux propriétés physiques et mécaniques du sel gemme.

La figure 5 illustre le comportement du sel gemme (a) et d'un calcaire (b) auxquels une contrainte déviatorique est appliquée à différentes températures.

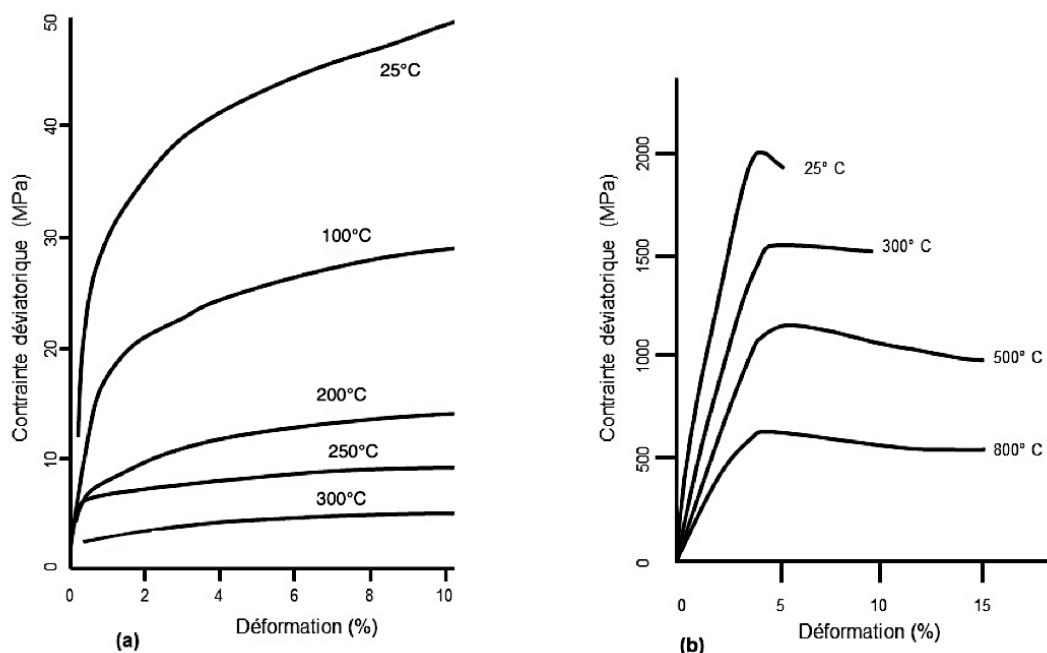


Figure 5. Courbes contrainte-déformation pour le sel gemme (a) et le calcaire (b).

Question 9 – Que peut-on déduire des courbes contrainte-déformation quant au comportement du sel (figure 5a) ?

Le domaine **élastique** est réduit jusqu'à moins de 1% de déformation.

Au-delà, la déformation devient **plastique**, même à faible température et pour de faibles contraintes déviatoriques. Il y a, aux plus faibles températures (25°C et 100°C), une augmentation de plus en plus accusée de la déformation.

À partir de 200°C, la déformation plastique est plus nette, et montre un **fluage** dès l'application d'une contrainte déviatorique (courbe sub-horizontale).

La rupture ne semble pas être atteinte.

Pour toutes ces raisons, le sel gemme est donc très **ductile**.

Question 10 – Que dire de la plasticité du sel gemme par rapport à celle du calcaire (figure 5b) ? Argumentez.

La déformation du calcaire et son fluage apparaissent pour de plus fortes contraintes déviatoriques (1 500 contre moins de 10 MPa à 300°C !) et le plus souvent à plus fortes températures que dans le cas du sel gemme. Le seuil de plasticité est bien défini pour les calcaires soulignant ainsi la différence de comportement entre déformation élastique et déformation plastique.

Le sel gemme est plus plastique que le calcaire.

Question 11 – Quel peut être le comportement d'une couche de sel gemme, située sous des sédiments consolidés, compte tenu des propriétés décrites à la question précédente et de la densité du sel gemme (voir le Tableau 1 et la figure 4) ? Quels sont les facteurs qui peuvent être à l'origine du comportement envisagé, et/ou qui le facilitent ?

La densité du sel gemme est de 2,16 et celle des sédiments consolidés de 2,5 à 2,6. Donc naturellement, le sel gemme moins dense aura tendance à remonter par rapport aux sédiments consolidés.

Cette remontée nécessite une déchirure dans la couche de sédiments consolidés pour amorcer le mouvement ascendant.

Ensuite les propriétés plastiques du sel gemme, même à basse température font que le sel va pouvoir fluer au sein de la déchirure. La différence de densité va alors pouvoir jouer pleinement son rôle pour que le sel s'échappe vers la surface et forme une morphologie en dôme ou en colonne (diapir, tectonique salifère).

La figure 6 montre une coupe dans la mine d'Asse (Allemagne) qui fut l'une des mines de sel les plus importantes au XIX^{ème} siècle, exploitant les formations salifères du Zechstein.

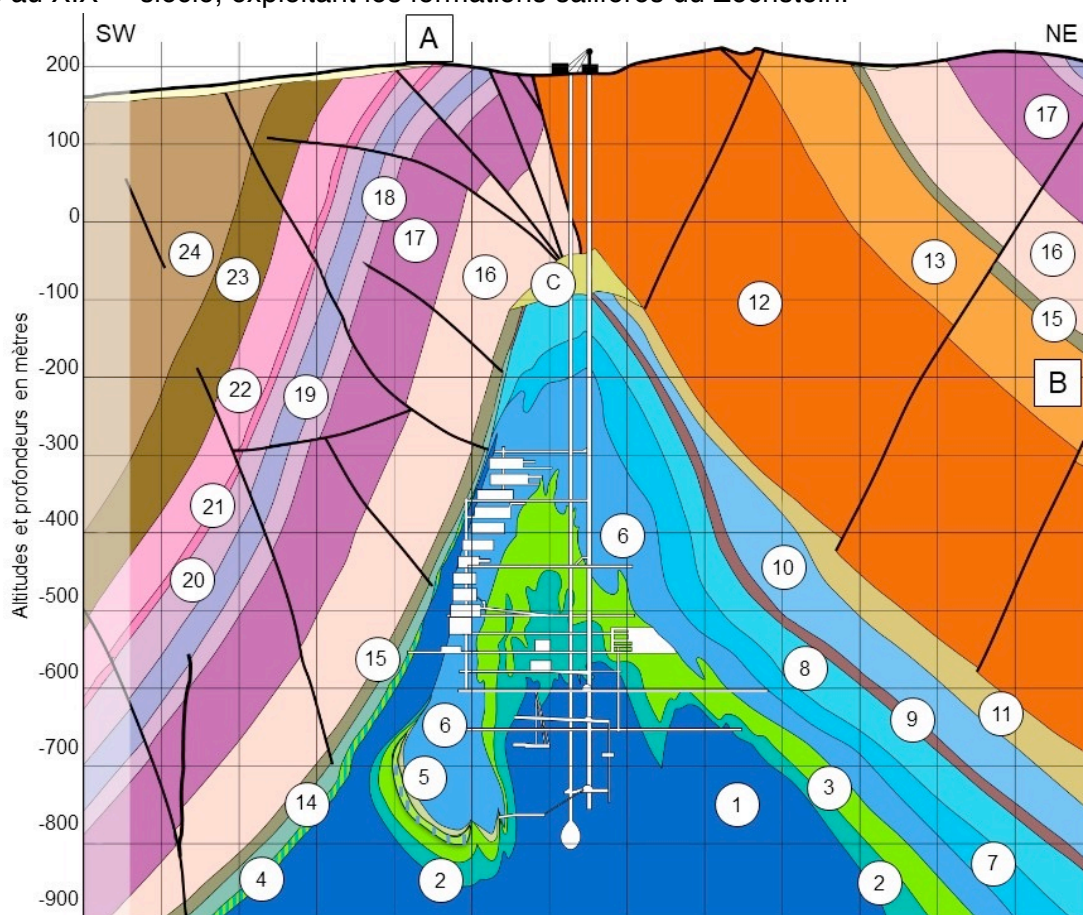


Figure 6. Coupe de la mine d'Asse en Basse-Saxe, Allemagne

La nature et l'âge des différents niveaux rencontrés de 1 à 24 sont reportés dans le tableau 2 ci-dessous. Les traits noirs sont des failles. Rectangles et traits blancs représentent les puits et zones exploitées dans le Permien salifère.

Périodes	Lithostratigraphie		Lithologies
		C	Chapeau du gisement avec mélange de roches (sels et encaissant)
Trias supérieur	Keuper moyen	24	Marnes
	Keuper inférieur	23	Marnes
Trias moyen	Muschelkalk supérieur	22	Calcaires à Cératites
		21	Calcaires à entroques
	Muschelkalk moyen	20	Marnes supérieures
		19	Marnes avec formations salifères
Muschelkalk inférieur	18	Marnes inférieures	
Trias inférieur	Buntsandstein supérieur	17	Calcaire coquillier
		16	Grès
	Buntsandstein moyen	15	Anhydrite rouge
		14	Sel gemme rouge
Buntsandstein inférieur	13	Grès	
Permien	Zechstein	Z5b	11 Anhydrite prédominante et sel gemme
		Z5a	10 Sel gemme et anhydrite à la base
			9 Argiles et anhydrite
		Z4	8 Sel gemme
			7 Anhydrite
		Z3	6 Sel gemme
			5 Anhydrite et sédiments variés
		Z2	4 Sels de potasse et de magnésium
			3 Sels de potasse
			2 Niveau de transition avec différents sels, plus ou moins riches en Na et K
		1	Couche principale de sel gemme massif

Tableau 2. Succession stratigraphique de la mine d'Asse.

Question 12 – Quelle est la nature des failles immédiatement situées sous le point A ? Indiquez le mouvement de part et d'autre d'un plan de faille (figure 6, à rendre).

[Vous disposez de la figure 6 légendée afin d'avoir tous les éléments pour répondre aux questions. En annexe, vous trouverez la même figure en version "transparente" et nettoyée de toute légende, afin de pouvoir indiquer directement vos réponses aux différentes questions.]

Immédiatement sous le point A, il s'agit de failles normales.

On identifie très bien le décalage (rejet) du toit de l'horizon 17 par rapport aux couches surincombantes.

Question 13 – Quelle est la nature de la faille située au voisinage du point B, vers le Nord-Est de la coupe, entre les numéros 13 et 16 ? Indiquez le mouvement de part et d'autre du plan de faille (figure 6, à rendre).

Il s'agit d'une faille inverse, bien mise en évidence par le rejet entre les couches 12 et 13 par exemple.

Question 14 – Pourquoi ces différentes failles ne se prolongent-elles pas dans le Permien ?

Les failles ne se prolongent pas dans le Permien en raison des propriétés de fluage des évaporites qui ne permettent pas la rupture des couches de sel dans les conditions P et T des roches. Il y a donc amortissement des failles.

Exercice 2 – Datation de la chaîne scandinave durée conseillée : 25 min

(tiré de la publication de Claesson, *Contrib Mineral Petrol* (1987) 97:196-204)

La Scandinavie est parcourue par une longue chaîne de montagnes qui traverse du NNO vers le SSE. Une vaste zone de paragneiss s'étend sur plus de 700 km de long (zone grisée de la carte de la figure 1). Cinq sites ont été étudiés de façon à dater cet immense massif de roches.

Deux méthodes de datation absolue sont utilisées : la méthode K/Ar et la méthode de la Concordia.

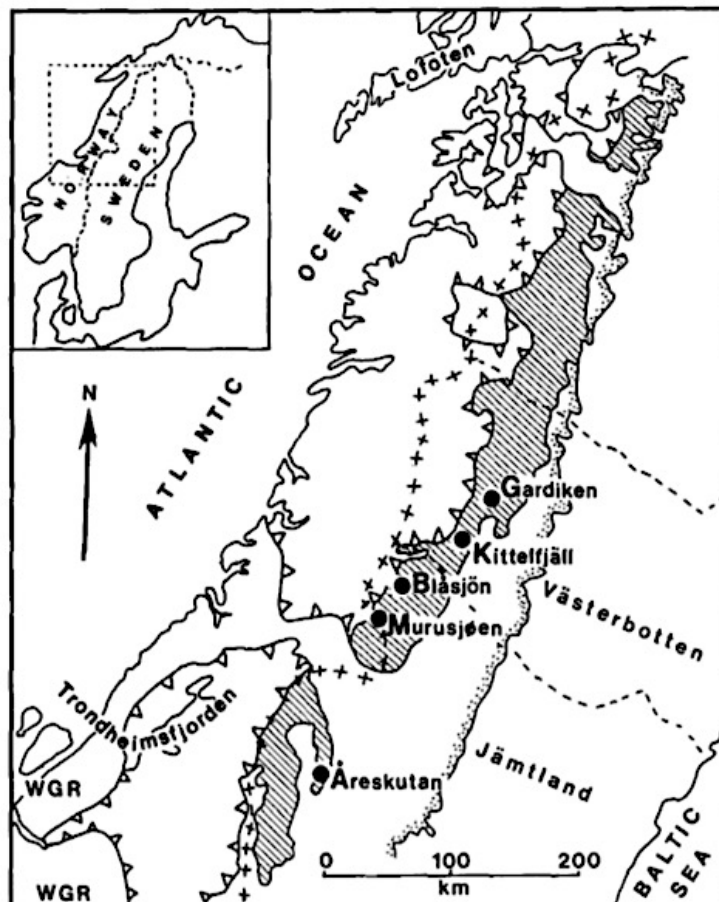


Figure 1 - Carte de la Scandinavie montrant la vaste chaîne de montagnes abritant les gneiss étudiées et positionnant les sites étudiés.

1) La méthode $^{40}\text{K} / ^{40}\text{Ar}$

Le Potassium ^{40}K se désintègre en éléments fils ^{40}Ar et ^{40}Ca , à raison de 1 désintégration en ^{40}Ar pour 9 désintégrations en ^{40}Ca . Le ^{144}Nd est l'isotope majoritaire correspondant à l'élément Néodyme. La datation des paragneiss scandinaves a été réalisée par cette méthode.

Question 1 – En notant P la quantité actuelle d'élément père et F la quantité actuelle d'élément fils, établir l'égalité (1) reliant F, F_0 , P et l'âge noté t. La constante de désintégration sera notée λ .

$$\frac{dP}{dt} = -\lambda \cdot P \text{ donc } \frac{dP}{P} = -\lambda \cdot dt$$

Si on intègre entre la fermeture du système et aujourd'hui, alors P_0 devient P durant le laps de temps t.

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = -\lambda \cdot t \text{ et donc } P = P_0 e^{-\lambda t} \text{ ce qui équivaut à } P_0 = P e^{\lambda t}$$

Or la quantité F correspond à la quantité initial F_0 à laquelle s'ajoute ce qui s'est désintégré de P.

$$\text{Donc } F = F_0 + (P_0 - P) \Rightarrow F = F_0 + P \cdot (e^{\lambda t} - 1)$$

Question 2 – Discuter le choix du couple $^{40}\text{K} / ^{40}\text{Ar}$ en trouvant un avantage et un inconvénient à son utilisation.

L'avantage est que l'on sait que $F_0 = 0$. L'inconvénient est le fait qu'il y a des fuites d'argon dès que la roche est chauffée car le gaz s'échappe des mailles cristallines.

Question 3 – Écrire la relation (1) adaptée pour le couple K / Ar. Déterminer l'âge des roches d'Åreskutan en utilisant les données obtenues sur le terrain. L'âge obtenu concorde-t-il avec Gardiken et Murusjöen ?

Donnée : période $T = 1,2 \text{ Ga}$.

On procèdera à la simplification $e^{\lambda t} \approx \lambda t + 1$ et à l'approximation $\ln(2) = 0,7$.

Échantillon	Nombre d'atomes de ^{40}K	Nombre d'atomes de ^{40}Ar	Âge mesuré
Åreskutan	$3,601 \cdot 10^{19}$	$8,411 \cdot 10^{17}$	
Gardiken	$1,820 \cdot 10^{19}$	$4,268 \cdot 10^{17}$	417 Ma +/- 20
Murusjöen	$2,118 \cdot 10^{19}$	$4,957 \cdot 10^{17}$	426 Ma +/- 19

Seule une réaction sur 10 conduit à l'Argon donc ne pas oublier le 0,1.

$$^{40}\text{Ar} = 0,1 \cdot ^{40}\text{K} \cdot (e^{\lambda t} - 1)$$

$$^{40}\text{Ar} = 0,1 \times ^{40}\text{K} (e^{\lambda t} - 1) = 0,1 \times \lambda t \times ^{40}\text{K}$$

$$\text{or } \lambda = \ln 2 / T$$

$$\text{donc } t = 10 \times T \times ^{40}\text{Ar} / (\ln 2 \cdot ^{40}\text{K}) = 10 \times T \times ^{40}\text{Ar} / 0,7 \cdot ^{40}\text{K}$$

$$\text{Åreskutan : } t = 12 \times 0,84 / (0,7 \times 36) = 0,84 / 2,1 = 0,4 \text{ Ga}$$

Oui, c'est concordant.

2) La méthode de la Concordia

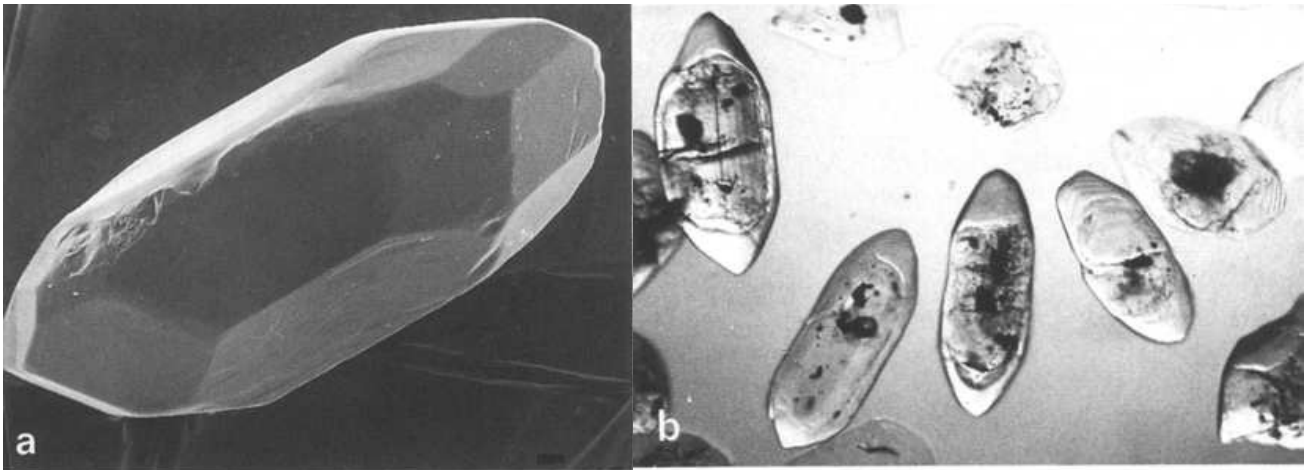


Figure 2 – Image de microscopie électronique à balayage (a) et microscopie photonique (b) de cristaux de zircon tirés de l'échantillon de Blasjön. Le cristal sur l'image a mesure 160 μm de long. Les cristaux de l'image b mesurent entre 150 et 200 μm .

Question 4 – Expliquer l'intérêt de baser la datation Uranium/Plomb sur les zircons.

Les minéraux de **zircon** adoptent un comportement particulier : lorsqu'ils cristallisent, à 900°C, leur réseau cristallin est incompatible avec l'élément fils radiogénique donc le plomb diffuse hors du zircon. Ainsi, $(^{206}\text{Pb})_0 = (^{207}\text{Pb})_0 = 0$. Le système se ferme donc au passage sous 900°C (ce qui équivaut à la température de cristallisation d'un granite). Cela réduit donc les équations et facilite les mesures du temps.

Les données collectées sur les zircons de Murusjön donnent les valeurs suivantes :

échantillon	1	2	3	4
$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}\right)_t$	0,56	1,76	1,94	2,62
$\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}\right)_t$	0,071	0,151	0,163	0,209

Question 5 – Placer les données sur les diagrammes de Concordia fournis en annexe. En déduire l'âge de formation des paragneiss.

Les points obtenus indiquent une droite qui coupe la Concordia à deux âges : 420 Ma et 1,5 Ga environ. La formation des paragneiss date donc de 1,5 Ga.

Question 6 – L'âge des paragneiss est-il concordant avec celui obtenu avec la datation par K/Ar ? Expliquer les résultats obtenus en tenant compte des deux modes de datations.

Non, les paragneiss indiquent un âge d'environ 400 Ma. Il y a donc eu réouverture du système vers 400 Ma suite à un épisode de métamorphisme, ayant conduit à :

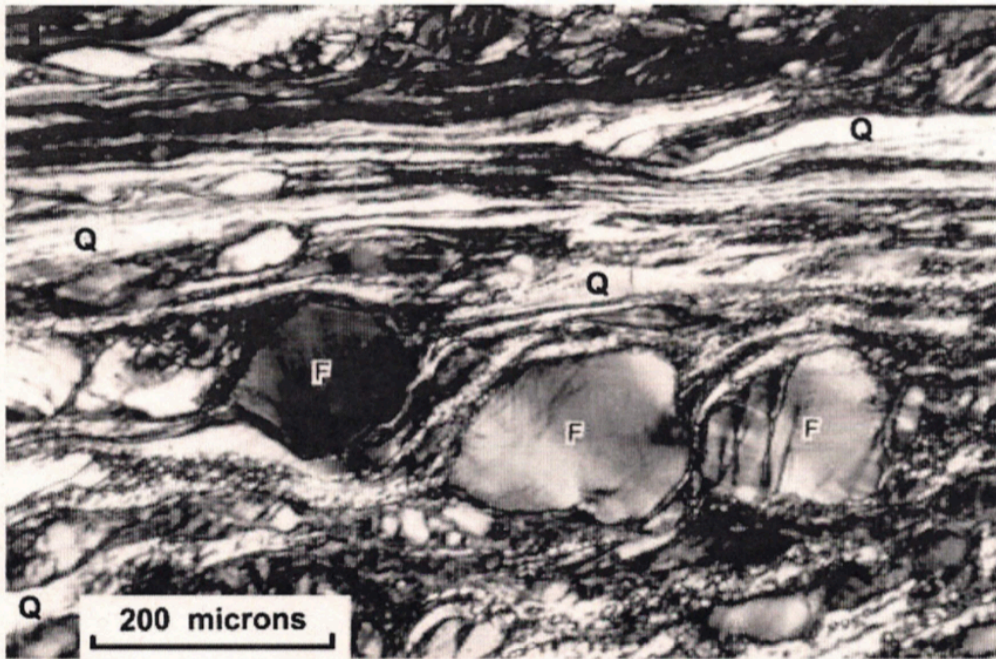
- une fuite des éléments fils de plomb emprisonnés dans les zircons ;
- une fuite d'argon dans les minéraux des paragneiss.

Il y a donc eu une histoire géologique de la roche, peut-être lors de la collision à l'origine de la chaîne scandinave.

Exercice 3 – Analyse d'une roche en place

durée conseillée : 10 min

Réaliser un schéma interprétatif et proposer les ellipsoïdes des déformations finies ainsi que des contraintes (si cela est possible). Préciser le type de déformation observée.



La figure illustre la microstructure optique d'une mylonite quartzo-feldspathique à 350°C.
Q = quartz et F = feldspath

Il s'agit d'une déformation continue de type cisaillement simple de type dextre.
 Seule l'ellipsoïde des déformations finies peut-être construite.
 Oz est presque vertical par rapport à la photo. Ox est presque horizontal (vers l'ENE).