

## Devoir surveillé n°4

Samedi 18 janvier 2025

### Épreuve d'analyse de documents de géologie

#### Exercice 1 – Le Groenland, une île de l'Atlantique Nord

*Question 1 - Utilisez les informations apportées par le document 2, ainsi que vos connaissances, pour proposer une explication aux mouvements verticaux observés sur le document 1. Votre réponse s'accompagnera de schémas explicatifs.*

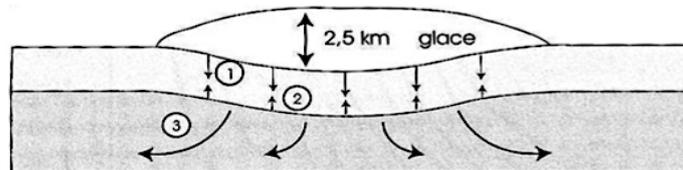
Le document 1 montre que le Groenland s'est soulevé entre 2003 et 2008 (il continue d'ailleurs de se soulever actuellement). Ce soulèvement est particulièrement important sur la côte ouest et sur la côte sud-est, où il atteint  $9 \text{ mm.a}^{-1}$  par endroits.

Le document 2 montre qu'il y a 18 000 ans, le Groenland était entièrement recouvert par la calotte glaciaire installée sur une grande partie de l'hémisphère nord. L'installation de cette glace a produit une surcharge qui a entraîné un enfoncement vertical de la lithosphère dans l'asthénosphère, jusqu'à ce que l'équilibre isostatique soit atteint.

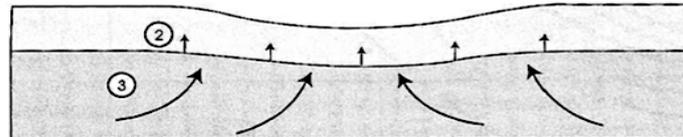
Cette calotte glaciaire a maintenant en grande partie disparu, et seulement les trois quarts du territoire groenlandais en sont recouverts.

La fonte de la glace, en particulier au niveau des côtes qui n'en sont plus couvertes, entraîne un allègement de la lithosphère, et donc un déséquilibre isostatique. L'équilibre va être rétabli grâce à un soulèvement vertical de la lithosphère. Ce soulèvement est très lent (plus lent que la fonte des glaces) en raison de l'importante viscosité de l'asthénosphère, et il se poursuit encore aujourd'hui.

**Il y a 18000 ans, le Groenland est recouvert de glace, et se trouve à l'équilibre isostatique grâce à l'enfoncement de la lithosphère dans l'asthénosphère.**



**Depuis 18000 ans, la fonte de la glace entraîne un déséquilibre isostatique. La lithosphère se soulève jusqu'à ce qu'un nouvel état d'équilibre isostatique soit atteint.**



*Question 2 - Expliquez ce qu'est le géoïde, et comment on le construit.*

Le géoïde est la surface équipotentielle de pesanteur qui passe par le niveau zéro des mers.

En domaine océanique, le géoïde coïncide avec la surface d'équilibre de la mer en l'absence de courants et de vents.

Le géoïde marin est établi par altimétrie satellitaire : on mesure l'altitude de la surface des océans par rapport à la surface de l'ellipsoïde de référence. Le géoïde continental est construit grâce à des mesures satellitaires du vecteur  $g$ .

*Question 3 - Utilisez l'ensemble des informations apportées par les documents 1 à 3, ainsi que vos connaissances, pour proposer une explication aux variations de hauteur du géoïde observées dans la région.*

La forme du géoïde dépend de la répartition des masses sous sa surface : un excès de masse par rapport à ce que décrit le modèle PREM se manifeste par une « bosse » du géoïde = la surface du géoïde est plus élevée que celle de l'ellipsoïde de référence. À l'inverse, un déficit de masse par rapport à ce que décrit le modèle PREM se manifeste par un « creux » du géoïde = la surface du géoïde est plus basse que celle de l'ellipsoïde de référence.

Le document 3 montre que la surface du géoïde dans la région du Groenland s'est enfoncée de 1 à 4 mm/an entre 2003 et 2008. Cet enfoncement du géoïde est particulièrement important dans les régions qui se soulèvent (document 1) et qui ne sont donc pas du tout à l'équilibre isostatique. Il est dû à la diminution de la masse du Groenland causée par la fonte des glaces dans cette zone. La fonte des glaces est bien plus rapide que la compensation par l'asthénosphère ductile : il y a donc un déficit de masse, qui va perdurer jusqu'à l'équilibre.

**Question 4 - Expliquez ce qu'est l'anomalie de Bouguer.**

L'anomalie de Bouguer est la différence entre la valeur de g mesurée avec un gravimètre puis corrigée dans les zones de relief (en tenant compte l'altitude du lieu de mesure, de l'attraction exercée par la matière située sous le lieu de mesure et de l'attraction exercée par le relief environnant) et la valeur de g théorique donnée par l'ellipsoïde de référence.

**Question 5 - Interprétez les valeurs de l'anomalie de Bouguer observées sur le document 5.**

Proposez une coupe de la lithosphère sur l'axe AB (axe est-ouest à 71,5°N) en analysant précisément les 4 flèches numérotées 1 à 4.

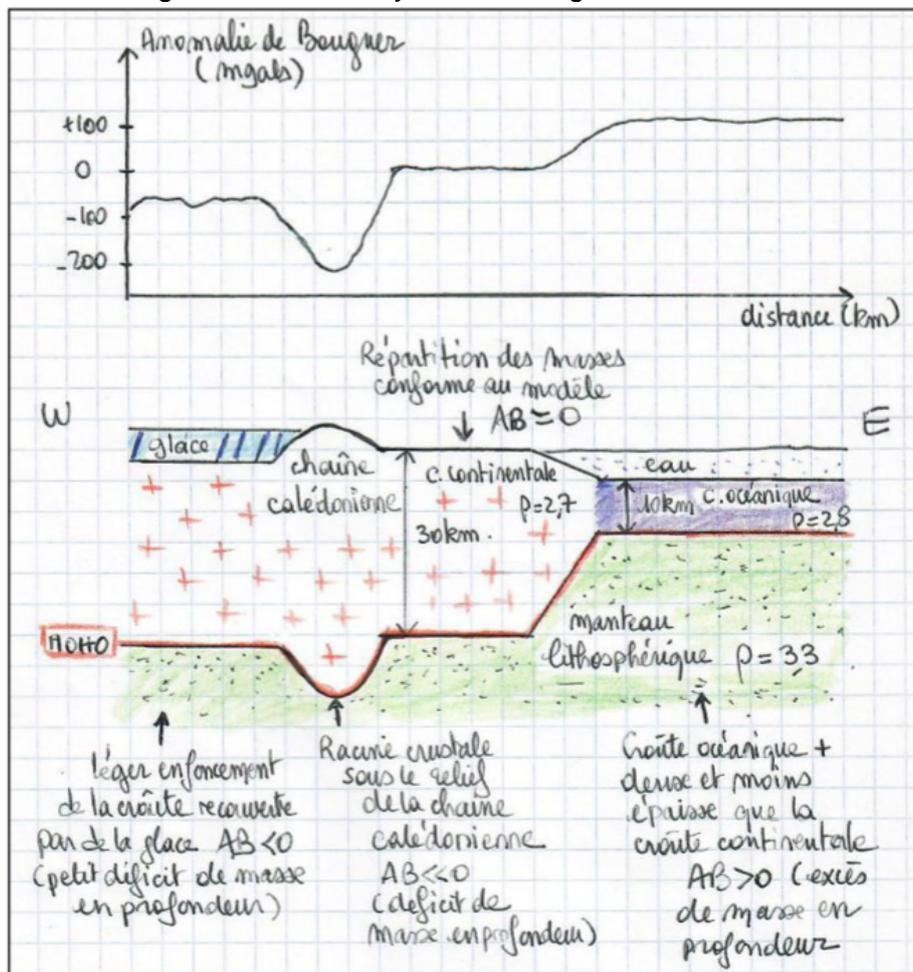
Sur le document 5 on constate que l'anomalie de Bouguer est assez fortement positive au niveau de l'océan Atlantique, au point 4 (+ 100 mgals), nulle en bordure du continent (point 3), fortement négative dans la zone en relief correspondant à la chaîne calédonienne, au point 2 (- 200 mgals), et faiblement négative (entre -100 et 0 mgals) plus à l'ouest, dans la zone 1 de faible altitude recouverte par la glace.

Une anomalie de Bouguer nulle nous indique que les structures profondes sont conformes au modèle PREM (croûte continentale de 30 km d'épaisseur) : c'est le cas du point 3.

Une anomalie positive indique un excès de masse en profondeur par rapport à ce modèle. C'est le cas du point 4 qui correspond à la zone de lithosphère océanique, avec une croûte océanique peu épaisse sur un manteau moins profond.

Une anomalie négative indique au contraire un déficit de masse en profondeur. Dans le cas du point 2, le relief de montagnes est associé en profondeur à une racine crustale : la croûte continentale, peu dense, est à la place du manteau donc la masse est moins grande que celle du modèle PREM.

Au point 1, les questions précédentes ont montré qu'il y avait un déficit de masse lié au déséquilibre isostatique dû à la fonte de la glace : l'anomalie y est donc négative.

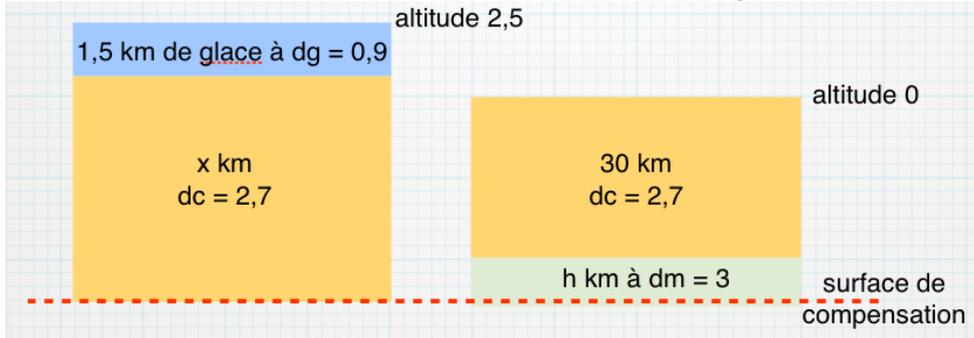


Question 6 – On supposera que l'ensemble du Groenland est à l'équilibre isostatique. La situation de référence sera le point 3, avec une CC de 30 km d'épaisseur. À l'aide des documents 4 et 5 :

a) estimez l'épaisseur de la glace au point 1.

D'après le document 4, on observe que la glace est épaisse d'environ 1,5 km et possède une altitude de 2,5 km.

b) calculez l'épaisseur de la croûte continentale sous la glace au point 1.



Dans l'hypothèse d'un équilibre isostatique, d'après le principe d'Airy, on a égalité des pressions exercées sur la surface de compensation. Si on simplifie les pressions par la gravité  $g$ , il reste :

$$1,5 \cdot dg + x \cdot dc = 30 \cdot dc + h \cdot dm \quad \text{et le bilan des altitudes est } 1,5 + x = 2,5 + 30 + h$$

Donc  $x = h + 31$ . On remplace  $x$  par  $h + 31$  dans l'égalité des pressions :

$$1,5 \cdot dg + h \cdot dc + 31 \cdot dc = 30 \cdot dc + h \cdot dm$$

$$1,5 \cdot dg + dc = h \cdot (dm - dc)$$

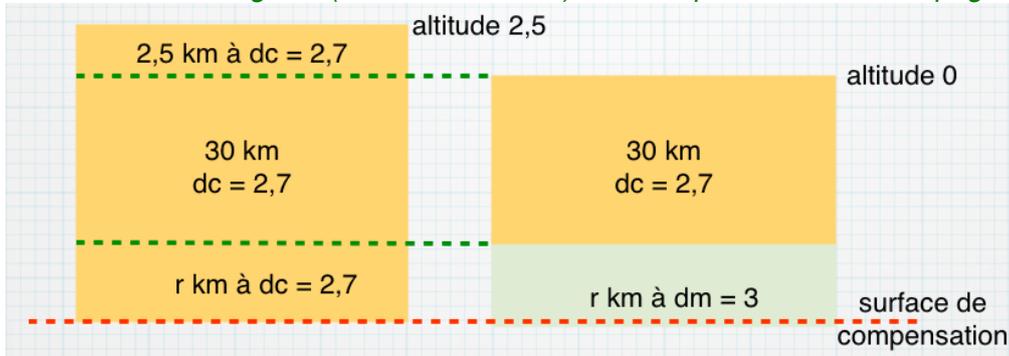
$$1,5 \times 0,9 + 2,7 = 0,3 h$$

$$1,35 + 2,7 = 0,3 h = 4,05$$

$$h = 12 \text{ km} \quad \text{donc } x = 31 + 12 = 43 \text{ km}$$

La croûte fait 43 km d'épaisseur.

c) calculez l'épaisseur de la croûte continentale sous la chaîne calédonienne, dans sa zone la plus élevée non recouverte de glace (2 500m d'altitude). Votre réponse sera accompagnée de schémas explicatifs.



D'après le principe d'Airy, on a égalité des pressions exercées sur la surface de compensation. Si on simplifie les pressions par la gravité  $g$ , et si on ne compte pas la pression exercée dans les deux cas par les 30 km de croûte, on obtient l'égalité suivante :

$$(r + 2,5) \cdot dc = r \cdot dm$$

$$\text{soit } r = 2,5 \cdot dc / (dm - dc)$$

$$r = 2,5 \times 2,7 / 0,3 = 5 \times 2,7 / 2 \times 0,3 = 13,5 / 0,6 = 135 / 6 = (3 \times 45) / (3 \times 2) = 22,5 \text{ km}$$

La croûte continentale a donc une épaisseur de  $2,5 + 30 + 22,5 = 55 \text{ km}$ .

## Exercice 2 – Reconstitution paléogéographique de la formation des Pyrénées

### 2.1. Étude des mouvements relatifs de l'Ibérie et du bloc Corso-sarde par rapport à l'Eurasie

Question 1 – À partir d'arguments tirés de la figure 1,

• datez l'âge de l'ouverture de l'Océan Atlantique au large de l'Irlande puis au large du sud de la péninsule ibérique ;

Irlande : 110 Ma

Ibérie : 125 Ma

- quantifiez puis comparez les vitesses d'ouverture des deux zones précédentes de leur ouverture jusqu'à 80 Ma environ ;

Irlande : de 110 à 80 Ma, soit en 30 Ma, la distance mesurée est de 100 km

vitesse =  $10000000 \text{ cm} / 30 \cdot 10^6 \text{ années} = 10^7 / 3 \cdot 10^7 = 0,3 \text{ cm/an}$

Ibérie : de 125 à 80 Ma, soit en 45 Ma, la distance est de 500 km

vitesse =  $5 \cdot 10^7 \text{ cm} / 45 \cdot 10^6 \text{ années} = 1,1 \text{ cm/an}$

La vitesse d'expansion est 3 à 4 fois plus rapide au sud.

- expliquez en quoi ces observations sont compatibles avec l'apparition d'une grande faille en décrochement, dont vous préciserez le jeu. Proposez un âge d'apparition de cette grande faille.

décalage des deux blocs qui ont des vitesses différentes => cassure => faille décrochante sénestre ici

Le décalage se voit sur les isochrones 80 Ma : il est d'environ 150 km. La faille a dû apparaître très tôt, entre 125 et 110 Ma, lorsque seule la région à la latitude de l'Ibérie était en expansion.

**Question 2 – Précisez la direction et le sens du mouvement de l'Ibérie entre 125 et 80 Ma. Vous pouvez vous appuyer sur les isochrones atlantiques pour décrire le sens du mouvement.**

En utilisant les isochrones des fonds océaniques, on peut imaginer un déplacement de l'Ibérie sur un axe ONO-ESE allant vers l'Est-Sud-Est, perpendiculairement aux isochrones.

**Question 3 – Identifiez la structure géologique orientée d'Est en Ouest dans le Golfe de Gascogne. Dated la période de son activité. Proposez une origine à son apparition.**

Il s'agit d'un rift ayant été actif en dorsale entre 120 et 85 Ma.

Il peut s'agir d'un rift passif lié au décrochement : l'Ibérie se déplace vers l'ESE alors que la France se déplace vers l'Est. Il y a donc un contexte extensif dans la région du Golfe de Gascogne.

L'origine de ce rift est donc le décrochement sénestre et l'expansion de l'Atlantique un peu vers le Sud, en lien avec une dorsale atlantique faisant un coude.

**Question 4 – À partir d'arguments tirés de la figure 1 :**

- comparez la vitesse de l'ouverture de la partie Ouest du Golfe de Gascogne avec sa partie Est ;

En comparant la production de lithosphère océanique entre 120 et 85 Ma, il y a une largeur 4 fois plus grande à l'Ouest qu'à l'Est donc comme la durée est la même, cela signifie que la vitesse est 4 fois supérieure à l'Ouest qu'à l'Est.

- déduisez en un mouvement relatif entre l'Ibérie et le reste de l'Europe ;

Une rotation dans le sens anti-horaire.

- proposez une conséquence de ce mouvement sur la morphologie de la chaîne pyrénéenne (la figure 3 montre la topographie de la chaîne).

La collision va résulter d'un mouvement de l'Ibérie vers le Nord, percutant le Sud de la France, et générant une grande barre de collision d'Est en Ouest.

**Question 5 – À partir d'arguments tirés de la figure 1 :**

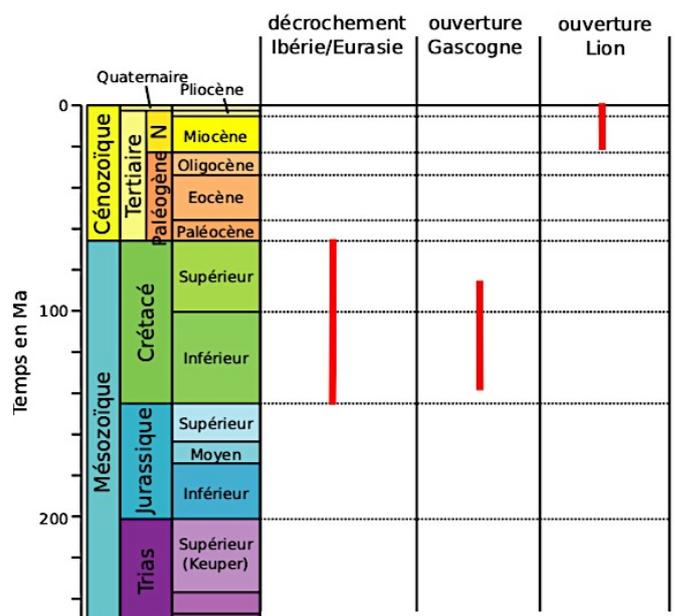
- datez l'ouverture du Golfe du Lion : 20 Ma.
- reportez les périodes d'ouverture des deux golfes dans la frise chronologique de l'annexe ;
- proposez une position du bloc Corso-Sarde avant l'ouverture du Golfe du Lion ;

Le bloc Corso-Sarde était dans la continuité du continent, au Sud de la France : la Sardaigne était dans la continuité était des Baléares : il y a eu ensuite une rotation anti-horaire.

- reliez l'histoire géologique des reliefs observés d'une part dans les Pyrénées et d'autre part en Corse et Sardaigne (figure 1).

Au cours de la collision pyrénéenne, la Corse et la Sardaigne étaient alignées avec les Pyrénées et ont subi les mêmes déformations dues à la rotation collisionnelle (de l'ouverture du Golfe de Gascogne).

Puis, ce bloc corso-sarde a été dissocié de l'axe pyrénéen avec l'ouverture du Golfe du Lion. La Corse et la Sardaigne faisaient partie de la même plaque que l'Ibérie.



## 2.2. Analyse gravimétrique

Question 6 – La figure 2 donne la topographie et des mesures gravimétriques dans la zone Pyrénéenne :

- rappelez le principe permettant l'obtention de l'anomalie à l'air libre et de l'anomalie de Bouguer ;

Dans tous les cas, le calcul est fait après mesure réelle de la valeur de  $g$  et la valeur de  $g$  sur l'ellipsoïde de référence (=  $g$  théorique)

- anomalie à l'air libre = différence entre la valeur de  $g$  mesurée **corrigée par l'effet d'altitude** et la valeur de  $g$  de référence (sur l'ellipsoïde de référence)

- anomalie de Bouguer = différence entre la valeur **mesurée de  $g$  corrigée** et la valeur de  $g$  de référence (sur l'ellipsoïde de référence)

La correction de Bouguer s'appuie sur la correction topographique (déviation par les reliefs voisins) et la correction de plateau (effet des roches en plus ou en moins par rapport à l'ellipsoïde de référence).

- expliquez la valeur de l'anomalie à l'air libre au niveau des Pyrénées (zone 1 sur la figure 3) ;

L'anomalie à l'air libre est positive, entre + 100 et + 200 mgal dans la zone 1. La correction a bien été faite en fonction de l'altitude mais il reste l'effet de la grande masse de roche (sommets de plus de 3 000 m), absente du modèle de référence qui induit une valeur de  $g$  plus grande que dans le modèle de l'ellipsoïde.

- expliquez les valeurs des anomalies de Bouguer au niveau des Pyrénées (zone 1), à proximité des côtes dans le Golfe du Lion (zone 2) et au large (les deux zones 3 sur la figure 3) ;

Zone 1 = l'anomalie de Bouguer est négative (de l'ordre de - 50 mgal) : cela signifie un déficit de masse par rapport au modèle PREM. Il s'agit sans doute de la racine crustale : la croûte étant moins dense que le manteau, la présence de la racine diminue localement la masse.

Zone 2 = l'anomalie de Bouguer est légèrement positive, de l'ordre de +50 à + 100 mgal. Il pourrait s'agir d'une zone d'amincissement crustal : du manteau est remonté, générant un excès de masse dans cette lithosphère continentale.

Zone 3 = l'anomalie de Bouguer vaut + 600 mgal. Le domaine correspond à la lithosphère océanique, avec une croûte fine et un manteau très superficiel, générant un fort excès de masse par rapport au modèle.

- proposez une hypothèse pour expliquer l'anomalie positive de la zone 4, qui couvre une partie du pays Basque français et du Béarn.

Il pourrait s'agir d'une remontée locale du manteau, une croûte amincie (c'est le cas, 24 km) ou une accumulation d'un matériau anormalement dense dans cette zone.

## Exercice 3 – Datation de la Scandinavie

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

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  $\lambda$ .

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

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 – Déterminer l'âge de la roche d'Åreskutan en utilisant les données obtenues sur le terrain. Le résultat concorde-t-il avec les autres sites ?

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

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

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

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

or  $\lambda = \ln 2 / T$

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

Åreskutan :  $t = 12 \times 0,84 / (0,7 \times 36) = 0,84 / 2,1 = 0,4 \text{ Ga} = 400 \text{ Ma}$  sous-estimé d'environ 5% soit 20 Ma (approximatif, sinon 424 Ma avec calculatrice et sans approximation)

Oui, c'est concordant.

*Question 4 – À quelle ère correspond cet âge (ou ces âges) ? Citer un fossile susceptible d'être trouvé dans les roches sédimentaires de l'unité géologique étudiée.*

400 Ma correspond au Paléozoïque (Silurien pour être précis). Des Trilobites peuvent être trouvées.

## 2) La méthode de la Concordia

*Question 5 – Expliquer l'intérêt de baser la datation 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.

*Question 6 – Placer les données sur les diagrammes de Concordia fournis en annexe (3 diagrammes sont fournis, à vous de choisir le ou les plus judicieux). En déduire l'âge de formation des paragneiss.*

Les points obtenus constituent 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 7 – 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.