

**ÉCOLES NORMALES SUPÉRIEURES  
ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES  
ÉCOLE DES MINES DE PARIS  
ÉCOLES CENTRALE**

**CONCOURS D'ADMISSION SESSION 2025**

**FILIÈRE BCPST**

**COMPOSITION DE SCIENCES DE LA TERRE**

Épreuve commune aux ENS de Lyon, Paris, Paris-Saclay, à l'ENPC, aux Écoles centrale et  
aux Mines Paris

Durée : 4 heures

L'utilisation des calculatrices est autorisée pour cette épreuve.

-L'épreuve est composée de 4 parties indépendantes (dont la partie Préambule)  
qui peuvent être traitées dans l'ordre souhaité.

-La qualité de la rédaction, la concision des réponses et le respect des consignes seront pris en  
compte dans l'évaluation.

\*\*\*

**Tournez la page S.V.P.**

Le sujet comprend 15 pages numérotées de 1 à 15.

## Anthropocène et exemples d'interactions activités humaines – géosphère

*Le terme d'Anthropocène a été proposé dans les années 2000 par le prix Nobel de Chimie, Paul Crutzen et son collègue Eugène Stoermer pour conceptualiser le fait que les activités humaines ont un impact sur la planète Terre. Cette notion est notamment étudiée et discutée par les stratigraphes, par les champs disciplinaires des sciences physiques et naturelles mais aussi des sciences humaines et sociales et rencontre un certain écho dans les médias (avec certaines critiques et des propositions de nomenclatures alternatives).*

Ce sujet propose d'aborder quelques thématiques des sciences de la Terre, en lien avec le concept d'Anthropocène et plus largement avec les interactions entre êtres humains et géosphère, à travers différents exemples et approches des champs des Sciences de la Terre.

---

### Préambule : la proposition de l'Anthropocène comme nouvelle époque géologique

Avant le rejet de la proposition d'adoption de l'Anthropocène comme subdivision officielle de l'échelle des temps géologiques en mars 2024, la commission internationale de stratigraphie et le groupe de travail sur l'Anthropocène avaient proposé que l'Anthropocène soit définie comme une nouvelle époque géologique succédant à l'Holocène et débutant dans la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle.

**Question P.1. :** Rappelez les subdivisions chronologiques de l'échelle des temps géologiques en vous basant sur un exemple de votre choix (il n'est pas attendu de dates chiffrées).

Plusieurs localités, comme le lac Crawford au Canada, avaient été proposées comme GSSP (*Global boundary Stratotype Section and Point*) potentiels.

**Question P.2. :** Proposez, en les justifiant, deux marqueurs de l'Anthropocène qui pourraient être observés dans le registre géologique dans plusieurs dizaines de millions d'années.

---

### Partie 1 : Les gisements de lithium, un élément essentiel pour la transition énergétique

#### Partie 1.1. : Les gisements magmatiques de lithium

**Un exemple de gisement : géologie du granite de Beauvoir (Allier)**

Le granite de Beauvoir, appartenant au complexe granitique d'Echassière dans l'Allier, est actuellement exploité pour le kaolin.

**Question 1.1.1. :** A l'aide de l'extrait de la carte géologique de Gannat au 1/50 000<sup>ème</sup> et de sa légende (**FIGURE 1.1.**), réalisez un schéma structural de la zone. Sur ce schéma, vous indiquerez les différentes substances utiles présentes. Vous réunirez les unités qui vous semblent pouvoir être associées et vous mettrez en exergue les informations liées à la présence de lithium.

**Question 1.1.2. :** Au vu des roches présentes et à supposer qu'elles se soient mises en place dans la même gamme d'âges, quel contexte géodynamique est responsable de la formation des roches de cette zone? Justifiez votre réponse en montrant pourquoi le contexte proposé explique les marqueurs observés.

**Question 1.1.3. :** En vous aidant de votre schéma structural, proposez une chronologie de la mise en place des différentes roches observées.

La méthode isochrone basée sur la désintégration du  $^{87}\text{Rb}$  en  $^{87}\text{Sr}$  est décrite par l'équation suivante :

$$\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_t = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_0 + \left(\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}\right)_t (e^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

Où  $t$  est relatif aux rapports actuels correspondant à la durée de fermeture du système chronométrique, 0, au moment de la fermeture du système chronométrique et  $\lambda$  est la constante de désintégration radioactive du système  $^{87}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Sr}$  égale à  $1,42 \times 10^{-11} \text{ an}^{-1}$ .

**Question 1.1.4. :** A l'aide des analyses données dans le **TABLEAU 1** et du papier millimétré fournis en **ANNEXE** (qui n'est pas à rendre avec la copie), et en expliquant brièvement votre démarche, déterminez l'âge du granite de Beauvoir.

**Question 1.1.5. :** Sachant que le rapport isotopique ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) de la Terre globale est de 0,705, quelle(s) peu(ven)t être la(es) source(s) magmatique(s) à l'origine de ce granite? Justifiez.

**Question 1.1.6. :** A l'aide de vos connaissances, proposez une origine potentielle de la kaolinite observée.

### Modélisation des teneurs en lithium des liquides lors des processus magmatiques

Dans un premier temps, la modélisation portera sur la **fusion partielle** et son influence potentielle sur la teneur en lithium des magmas formés.

Soit  $C_0$ , la **concentration d'un élément X dans la source du magma**,  $C_L$ , sa **concentration dans le liquide**,  $F$ , le **taux de fusion** et  $D_X$  le **coefficient de partage de l'élément X entre le résidu solide et le liquide**. Le coefficient de partage désigne le rapport de la concentration de l'élément d'intérêt dans le résidu solide sur celle dans le liquide magmatique ( $C_R/C_L$ ). En fonction des minéraux, le coefficient de partage liquide-roche est exprimé par la moyenne pondérée des coefficients de partage des différents minéraux soit la relation suivante :

$$D_X = \sum_i p_i D_X^i \quad (2)$$

Où  $p_i$  est la proportion du minéral dans la roche comprise entre 0 et 1 et  $D_X^i$  les coefficients de partage entre le minéral  $i$  et le liquide pour l'élément  $X$  d'intérêt.

Les coefficients de partage du lithium Li entre différents minéraux et liquide sont donnés dans le tableau suivant :

Minéral	Coefficient de partage $D_{Li}^i$
Quartz	0,01
Orthose	0,05
Plagioclase	0,1
Biotite	0,55
Muscovite	0,19

La teneur en lithium dans les roches les plus abondantes des croûtes et du manteau n'excède pas 120 ppm, elle peut ponctuellement atteindre des valeurs plus élevées dans les métasédiments. Les concentrations sont exprimées en masse de l'élément sur la masse totale de la source, du liquide ou du résidu. Les gisements magmatiques d'intérêt ont des teneurs minimales de l'ordre de 3500 ppm.

**Question 1.1.7. :** En supposant un équilibre chimique entre le liquide et le résidu de fusion partielle et en partant d'un bilan de masse sur l'élément X dans la source, le liquide et le résidu, montrez que la concentration dans le liquide est exprimée par :

$$C_L = \frac{C_0}{D_X + F(1 - D_X)}$$

**Question 1.1.8. :** A partir de l'équation obtenue, quelles conditions peuvent expliquer la formation d'un liquide riche en lithium ? Justifiez.

**Question 1.1.9. :** En supposant un coefficient de partage de 0,24 pour un métasédiment, pour des taux de fusion de 1%, quelle doit être la concentration de la source pour avoir un gisement dont l'exploitation est économiquement rentable ? Commentez la valeur obtenue en proposant une critique portant sur la source potentielle et une autre sur le modèle.

Dans un second temps, la modélisation portera sur la **crystallisation** d'un magma et son influence potentielle sur la teneur en lithium.

La cristallisation fractionnée en système fermé peut être expliquée par un modèle de distillation de Rayleigh :

$$C_{LR} = C_{L0}R^{D_X-1} \quad (3)$$

Où  $C_{LR}$  désigne la concentration dans le liquide restant après cristallisation,  $C_{L0}$ , la concentration dans le liquide initial,  $R$ , la fraction de liquide résiduel et  $D_X$ , le coefficient de partage précédemment défini.

**Question 1.1.10. :** En supposant un magma initial de teneur 120 ppm et la cristallisation d'un granite de composition 30% de quartz, 30% d'orthose, 25% de plagioclase, 10% de muscovite et 5% de biotite, donnez la teneur en lithium du dernier pourcentage de liquide à cristalliser.

Le modèle de distillation de Rayleigh n'étant pas réaliste, d'autres modèles plus complexes ont été proposés. Dans le modèle suivant, il est supposé l'existence d'une zone de solidification entre le granite solide et le magma liquide. Dans cette zone une proportion  $r$  du liquide issu de la cristallisation retourne dans le magma non fractionné tandis que le reste est piégé dans la zone de solidification. Ce processus est modélisé par l'équation :

$$C_{LR} = C_{L0}R^{\frac{r(D_X-1)}{D_X(1-r)+r}} \quad (4)$$

**Question 1.1.11. :** Quelle gamme de valeurs de  $r$  prendriez-vous pour un magma cristallisant très proche de la surface ? Quelle gamme de valeurs prendriez-vous pour un magma profond dans la croûte continentale ? Justifiez.

**Question 1.1.12. :** En supposant toujours un magma initial de teneur 120 ppm et la cristallisation d'un granite de composition 30% de quartz, 30% d'orthose, 25% de plagioclase, 10% de muscovite et 5% de biotite, donnez la teneur en lithium du dernier pourcentage de liquide à cristalliser dans ce modèle avec une valeur de  $r$  égale à 0,01. Faites le même calcul pour une teneur de 2500 ppm. Comparez avec le résultat obtenu par le modèle de distillation de Rayleigh.

**Question 1.1.13. :** En bilan de ces modélisations sur la fusion partielle et la cristallisation, quelle(s) condition(s) semble(nt) favoriser l'obtention d'un liquide riche en lithium à teneur économiquement exploitable ?

## Partie 1.2. : Les gisements sédimentaires de lithium : exemple des salars andins

Une des principales zones d'origine du lithium utilisé dans le monde provient du "triangle du lithium" (Argentine – Chili – Bolivie) dans la chaîne de subduction des Andes en Amérique du Sud. Le salar d'Uyuni, qui est un bassin sédimentaire, est la plus grande de ces zones d'où est extrait le lithium.

**Question 1.2.1. :** Décrivez le plus précisément possible et interprétez les structures géologiques observables sur les **FIGURE 1.3.** et **FIGURE 1.4.** Leur localisation est donnée sur la **FIGURE 1.2.**

**Question 1.2.2. :** Expliquez le plus précisément possible le lien entre ces structures et le contexte géodynamique des Andes.

**Question 1.2.3. :** A partir de la **FIGURE 1.2.** et des réponses précédentes, décrivez les caractéristiques morphologiques de la zone du salar d'Uyuni visibles sur la photographie.

**Question 1.2.4. :** Réalisez un commentaire de la **FIGURE 1.5.** Quelle interprétation en faites-vous ?

**Question 1.2.5. :** Explicitez les informations apportées par la **FIGURE 1.6.**

**Question 1.2.6. :** A partir de vos réponses précédentes, proposez un fonctionnement de la dynamique sédimentaire du salar d'Uyuni. Votre réponse intégrera le fait que le lithium est un élément incompatible lors des processus magmatiques.

### **Partie 1.3. : L'utilisation du lithium pour la transition énergétique**

Le lithium est actuellement principalement originaire d'Amérique du Sud et d'Australie.

**Question 1.3.1. :** Citez un cas précis de l'utilisation du lithium dans le cadre de la transition énergétique.

Le lithium est notamment un élément utilisé dans la construction de voitures électriques.

**Question 1.3.2. :** A supposer, dans un scénario très simple, que toutes les voitures à moteur thermique françaises du parc automobile actuel soient remplacées dans le futur par des voitures électriques, quelles conséquences sur l'exploitation et l'utilisation des ressources cela causerait-il ?

---

## **Partie 2 : Les phénomènes sédimentaires et leurs liens avec les activités humaines**

### **Partie 2.1. : Un exemple des phénomènes d'altération-érosion sur le littoral normand**

La **FIGURE 2.1.** présente une des morphologies typiques du littoral normand. La photographie est prise à **marée basse.**

**Question 2.1.1. :** Réalisez un schéma interprétatif de la photo de la figure mettant en évidence les résultats des différents processus d'altération-érosion visibles. Vous nommerez la morphologie visible et vous vous aiderez de la topographie pour proposer des noms aux roches formant la vue.

**Question 2.1.2. :** Explicitez et expliquez les différents processus d'altération-érosion-transport expliquant la dynamique du relief visible sur cette photographie. Votre réponse devra mettre en lien les observations faites dans la question précédente et les processus mentionnés.

**Question 2.1.3. :** En quoi ce type de morphologie est-elle impactée par le changement climatique actuel ? En quoi cet impact peut-il constituer un risque pour l'être humain ?

### **Partie 2.2. : L'impact des activités humaines sur les processus sédimentaires détritiques**

**Question 2.2.1. :** Dans un paragraphe concis, à l'aide d'une réflexion se basant sur vos connaissances sur les processus de la sédimentation détritique, vous expliquerez comment les activités humaines peuvent impacter les processus sédimentaires détritiques : de la production de la particule à la diagenèse du sédiment. Un exemple localisé est attendu pour un des processus sédimentaires, pour les autres, vous pouvez vous limiter à l'explication.

## Partie 3 : Le système climatique actuel et les causes anthropiques du changement climatique

### Partie 3.1. : Préliminaire : une réponse à un argument climatosceptique

**Question 3.1.1. :** Parmi les arguments climatosceptiques, il en est un qui énonce que *le climat a toujours changé au cours de l'histoire de la Terre donc le changement actuel n'a rien à voir avec l'être humain*. Expliquez en quatre ou cinq phrases en quoi cet argument est un argument fallacieux en discutant les deux parties de la proposition.

### Partie 3.2. : L'insolation de la Terre et ses conséquences

**Question 3.2.1. :** Commentez la **FIGURE 3.1.** En vous aidant de schémas judicieusement choisis, expliquez ce qui est observé à l'équateur et aux pôles.

**Question 3.2.2. :** Réalisez un schéma présentant sur un hémisphère de la Terre les circulations atmosphériques en surface et leurs liens avec les zones de basses et hautes pressions ainsi qu'un schéma de ces mêmes circulations sur un profil en altitude en fonction de la latitude.

**Question 3.2.3. :** Sachant que Jupiter tourne sur elle-même en 9h 43 minutes et Venus en 243 jours, que vous attendez-vous à observer sur l'organisation de l'atmosphère de ces planètes ? Justifiez votre réponse. Remarque : ces deux planètes ont une inclinaison proche de  $3^\circ$ .

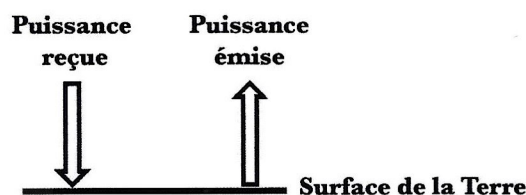
### Partie 3.3. : Modélisation de l'effet de serre et de l'impact de l'augmentation des gaz à effet de serre sur celui-ci

L'objectif de cette partie est de montrer en quoi **l'augmentation de la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère** est responsable d'une augmentation des températures à la surface du sol. Pour cela, différentes modélisations seront proposées et leur pertinence sera discutée.

Supposons que la **puissance solaire reçue par unité de surface au niveau du sommet de l'atmosphère terrestre**  $P_\Sigma$  soit de  $342 \text{ W.m}^{-2}$  et que l'**albédo**  $A$  (c'est à dire la quantité d'énergie réfléchie sur la quantité d'énergie totale reçue) de la Terre soit de 0,31. Il est rappelé que pour un corps noir (c'est à dire qui absorbe tout le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit), la puissance émise  $P_E$  par unité de surface peut être décrite par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$P_E = \sigma T^4 \quad (5)$$

Où  $\sigma$  désigne la constante de Stefan égale à  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  et  $T$  la température du corps en K. Dans la suite il sera **supposé que tous les objets considérés sont des corps noirs à l'équilibre (ils ne se réchauffent pas et ils ne se refroidissent pas)**. Il sera aussi considéré que le Soleil émet dans le visible et la Terre dans l'infrarouge (autour de  $10 \mu\text{m}$  de longueur d'onde). La surface de la Terre et la forme de l'atmosphère seront considérées comme planes (cf. schéma suivant).



**Question 3.3.1. :** Déterminez l'expression de la température de la surface de la Terre  $T_{S1}$  en supposant une Terre sans atmosphère. Faites l'application numérique.

**Question 3.3.2. :** Au vu de la valeur de la température obtenue, expliquez quelle valeur de paramètre utilisée peut être critiquée ?

## Modélisation de l'effet de serre par une vitre simple et estimation de la température de surface terrestre

Dans la suite, l'atmosphère sera considérée comme une vitre plane totalement transparente aux longueurs d'onde du visible et totalement opaque aux longueurs d'onde infrarouges. Cette vitre se comporte comme un corps noir.

**Question 3.3.3.** : En vous aidant d'un schéma, déterminez la nouvelle température de la surface du sol  $T_{S2}$ . Réalisez l'application numérique.

**Question 3.3.4.** : Proposez deux explications à la valeur élevée obtenue.

### Prise en compte de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre : modèle 1

Les deux principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau  $H_2O$  et le dioxyde de carbone  $CO_2$ .

**Question 3.3.5.** : Donnez les trois principaux flux anthropiques de  $CO_2$  dans l'atmosphère. En quoi la localisation et l'histoire de ces flux est argument justifiant la critique philosophique/anthropologique de l'Anthropocène définie comme époque à partir de laquelle l'être humain laisse une trace dans le registre géologique ?

La capacité d'absorption d'une longueur d'onde donnée est appelée absorptivité. Elle est comprise entre 0 (pas d'absorption) et 1 (absorption totale).

**Question 3.3.6.** : En analysant la **FIGURE 3.2.**, décrivez l'effet de l'augmentation de la teneur en vapeur d'eau et en dioxyde de carbone dans l'atmosphère sur l'absorptivité de l'atmosphère.

**Question 3.3.7.** : Quel résultat *a priori* paradoxal montre ce document ?

Pour résoudre ce paradoxe, la modélisation précédente va être affinée. Le gradient de température avec l'altitude peut être expliqué par les phénomènes convectifs affectant l'atmosphère.

Dans un premier temps, l'objectif est de déterminer le gradient thermique de l'atmosphère. En considérant l'atmosphère comme un gaz parfait, sa détente adiabatique (= sans échange de chaleur) est exprimée par la relation :

$$P^{1-\gamma}T^\gamma = \text{constante} \quad (6)$$

Où  $P$  désigne la pression,  $T$  la température et  $\gamma$  le rapport entre la capacité thermique massique à pression constante sur la capacité thermique massique à volume constant ( $c_P/c_V$ ). La masse volumique de l'atmosphère sera appelée  $\rho$  et  $g$  désignera la valeur de l'accélération de la pesanteur égale à  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ .

**Question 3.3.8.** : Quelle relation lie la variation de pression dans l'atmosphère avec l'altitude ?

**Question 3.3.9.** : A l'aide la relation (6), montrez que la relation suivante lie  $dP$  et  $dT$  :  $\frac{dT}{dT} = \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \frac{T}{P}$ .

**Question 3.3.10.** : En utilisant l'équation d'état des gaz parfaits et la relation liant, pour les gaz parfaits, la capacité thermique massique à pression constante et la capacité thermique massique à volume constant :

$$c_P - c_V = \frac{R}{M} \quad (7)$$

avec  $R$  est la constante des gaz parfaits et  $M$  la masse volumique du gaz, démontrez que la valeur du gradient thermique de l'atmosphère est égale à  $-g/c_P$ .

**Question 3.3.11. :** Faites l'application numérique (en °C/km) pour la valeur de la capacité thermique massique à pression constante de l'air sec :  $1\,005\text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$  et de l'air saturé en vapeur d'eau  $1\,030\text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ . Commentez la différence entre les deux valeurs et proposez une explication critique de ce résultat.

Dans la suite, il sera supposé que le **gradient thermique reste constant dans l'atmosphère**. Pour expliquer les conséquences de l'augmentation de la quantité de gaz à effet de serre, il faut utiliser le fait que les basses couches de l'atmosphère absorbent totalement le rayonnement et donc que dans une zone appelée "zone aveugle", le rayonnement émis par l'atmosphère n'atteint pas l'espace. A partir d'une certaine altitude, avec la diminution de quantité de gaz à effet de serre, le rayonnement émis par l'atmosphère atteint l'espace, cette altitude est appelée altitude d'émission. L'augmentation de la quantité de gaz à effet de serre augmente l'altitude d'émission. Au niveau de l'altitude d'émission, la puissance émise est égale à  $(1 - A)P_{\Sigma}$ . Ce principe est schématisé en **FIGURE 3.3.**

**Question 3.3.12. :** Comparez qualitativement la valeur de la puissance émise à la nouvelle altitude d'émission par rapport à la valeur initiale de cette puissance en supposant que la température dans l'atmosphère n'a pas encore varié par rapport à la situation initiale.

**Question 3.3.13. :** Expliquez en quoi cette nouvelle altitude d'émission conduit à un échauffement de la surface de la Terre.

**Question 3.3.14. :** Au vu de vos connaissances sur les phénomènes climatiques et en vous aidant des questions précédentes, quel phénomène serait observé avec uniquement des rétroactions positives ? Justifiez votre réponse.

### **Prise en compte de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre : modèle 2**

Dans cette partie, pour prendre en compte l'effet de l'augmentation des gaz à effet de serre, il sera supposé que l'atmosphère est constituée de  $N$  vitres transparentes aux longueurs d'onde du visible et absorbant chacune totalement les rayonnements infrarouges. Les symboles des grandeurs restent les mêmes que dans les parties précédentes.

**Question 3.3.15. :** En écrivant les relations d'équilibre entre puissance émise et puissance reçue pour chaque vitre, à l'aide d'un schéma, déterminez la température au sol  $T_{SN}$  pour un modèle qui prendrait en compte  $N$  vitres.

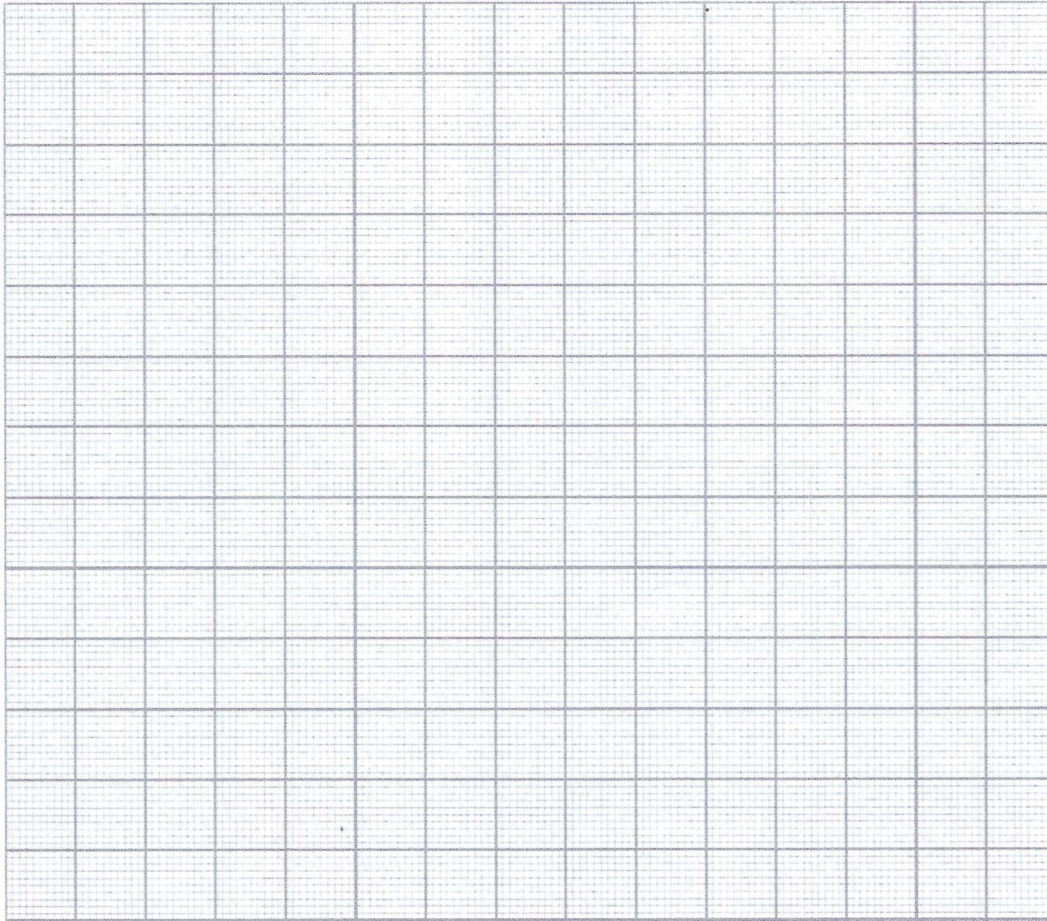
**Question 3.3.16. :** De quoi dépend le gradient thermique de l'atmosphère dans ce modèle ? Comparez avec les autres modèles.

\*\*\* FIN DU SUJET \*\*\*

ANNEXE

$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
65,88	0,99703
112,8	1,2127
24,79	0,82288
95,28	1,1349
31,35	0,84730
58,89	0,97269
62,43	0,98663

TABLEAU 1.1. – Analyses isotopiques en Rb et Sr du granite de Beauvoir. Duthou et Pin., 1987



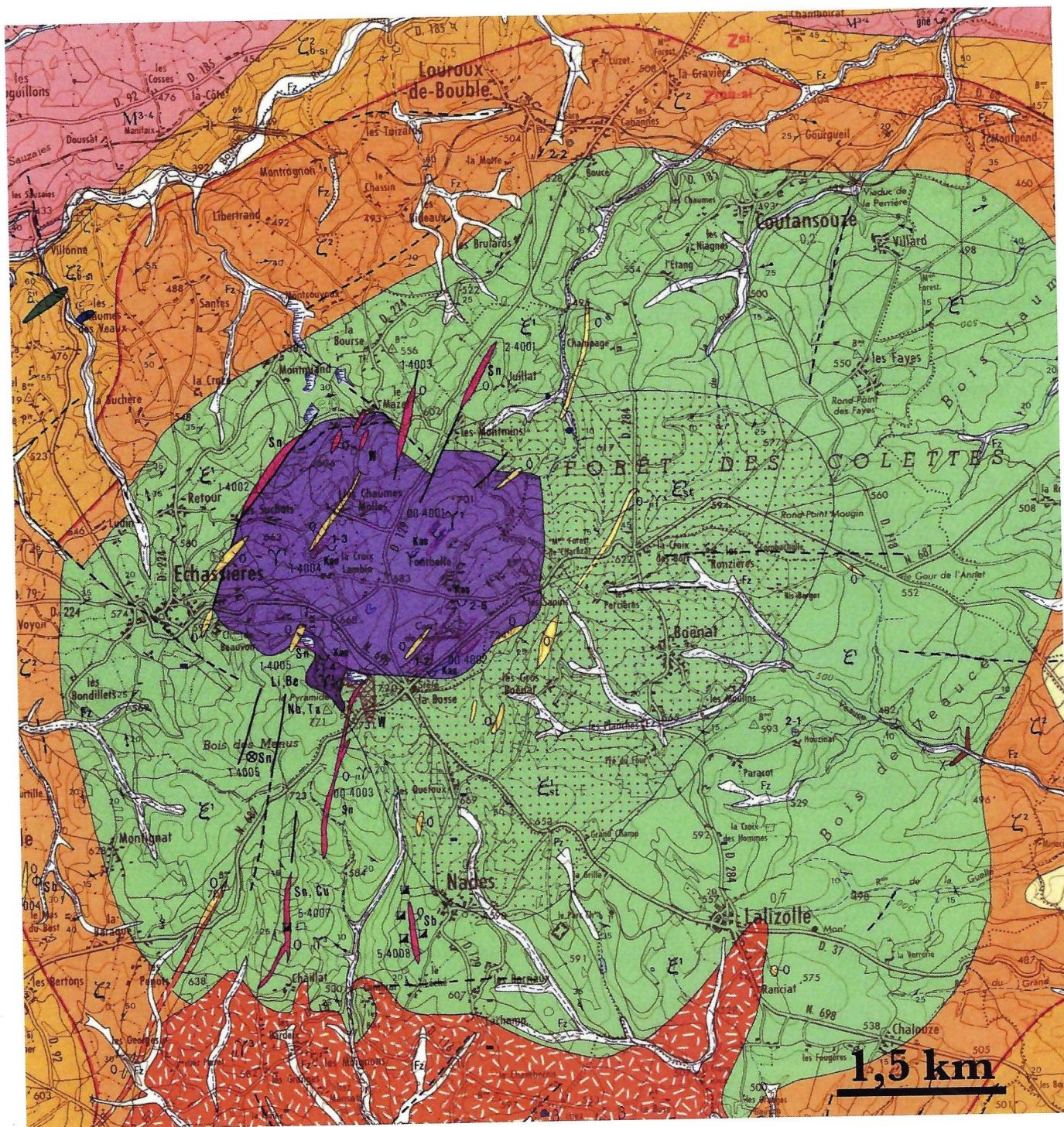
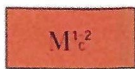
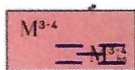


FIGURE 1.1. – Extrait de la carte géologique de Gannat au 1/50 000<sup>ème</sup>. Droits réservés : BRGM.

**Migmatites :**

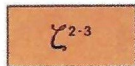


Migmatites à cordiérite : gneiss et granites à cordiérite



Migmatites sans cordiérite : embréchites sans hornblende ou avec hornblende ( $M^{3,4}$ ), restites de leptynite, de gneiss à biotite, granites.

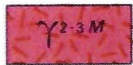
**Groupe de Rochefort :**



Gneiss fins, laminés, gris ou rubéfiés, à quartz, plagioclase et biotite.

**FORMATIONS PLUTONIQUES**

**à l'Ouest du Sillon houiller :**

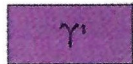


Granite calco-alcalin de Montmarault

**à l'Est du Sillon houiller :**



Microgranite subalcalin porphyrique de Pouzol-Servant et filons microgranitiques



Granite alcalin à muscovite des Colettes

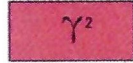


Albitite de Beauvoir

Massif d'Echassières

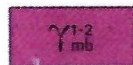


Granite porphyroïde

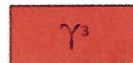


Granite aplitique ; à nodules tourmaliniques ( $\gamma^2$ )

Massif de Champs



Granite à muscovite et biotite de Vernusse et de la gare de Lapeyrouse



Granite calco-alcalin à biotite de Chantelle



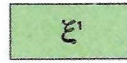
Lamprophyres et diabases



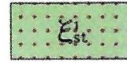
Quartz

**FORMATIONS CRISTALLOPHYLLIENNES (attribuées au Protérozoïque)**

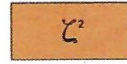
**Groupe de la Sioule (Ectinites) :**



Micaschistes à deux micas, micaschistes leucocrates, chloritoschistes



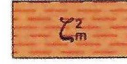
Micaschistes à staurotide



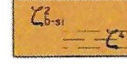
Gneiss à deux micas



Gneiss à deux micas et sillimanite



Orthogneiss à muscovite



$\zeta^{b-si}$  - Gneiss à biotite et sillimanite

$\zeta^a$  - Gneiss amphiboliques



Amphibolites



Serpentinites



Calcaires métamorphiques



Quartzites métamorphiques

50

50

50

20

20



Foliation avec indication du pendage en degrés

Foliation verticale

Foliation horizontale

Axe de pli avec indication du plongement en degrés

Axe de pli horizontal

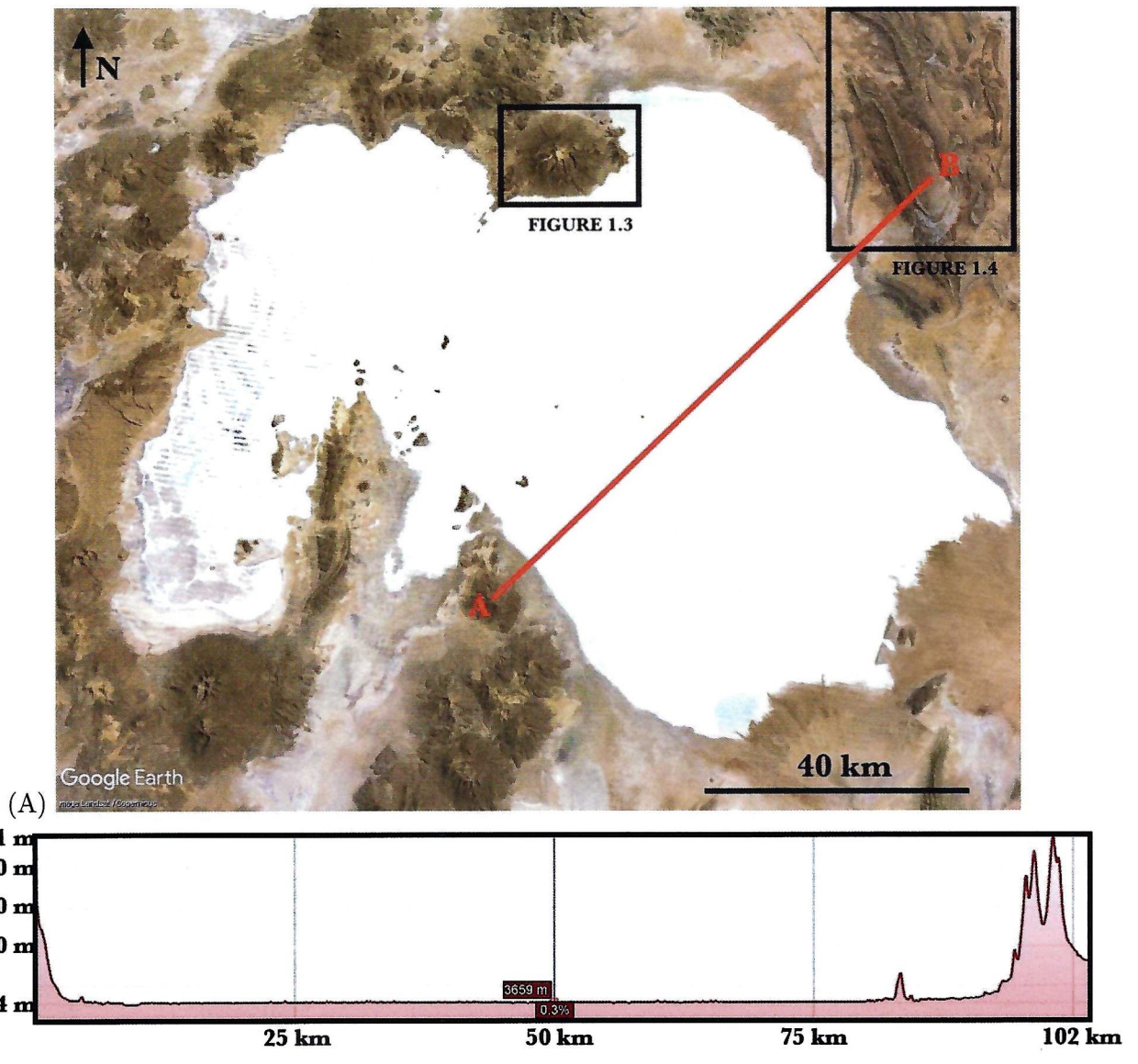
Isograde de disparition de la muscovite

**RESSOURCES DU SOUS-SOL ET EXPLOITATIONS**

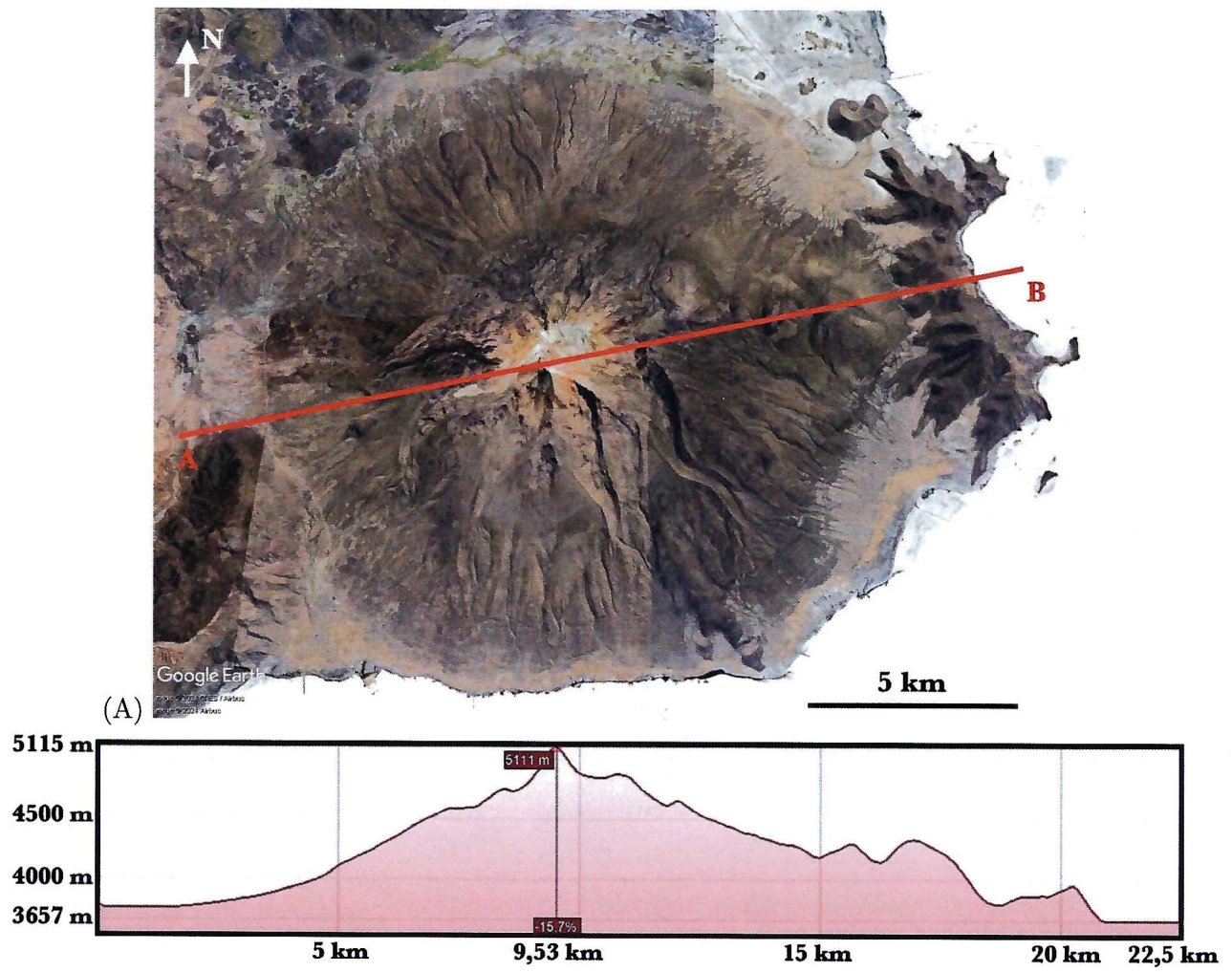
Sn	Etain	◇	Gîte de morphologie non précisée
Sb	Antimoine	◇ 1 / 2	Filons minéralisés :
W	Wolfram	◇ 1 / 2	1 - orienté d'extension réduite
Nb, Ta	Niobium - Tantale	◇ 1 / 2	2 - en grandeur réelle
Be	Beryllium	⊗ 1 / 2	Stockwerks
Li	Lithium	⊗ 1 / 2	1 - de petite dimension, ou non délimité
Cu	Cuivre	⊗ 1 / 2	2 - en grandeur réelle
Ba, F	Baryte et fluorite	⊗ 1 / 2	Minéralisation disséminée
pyr	Pyrite	(W)	Zone à "volantes" (ex : wolfram)
5-4002	Numéro d'archivage des gîtes minéraux au Service géologique national		

Cal	Calcaire	gne	Gneiss
grv	Graviers	Kao	Kaolin
grn	Granite	Sch	Schistes carbonés et silice
⊠	Ancien puits de mine	⊠	Ancienne galerie
∪ 1 / 2	Carrière à ciel ouvert : 1 - en activité 2 - abandonnée		
1.0 / g^2,3	Epaisseur en mètre de la formation affleurante sur substrat déterminé		

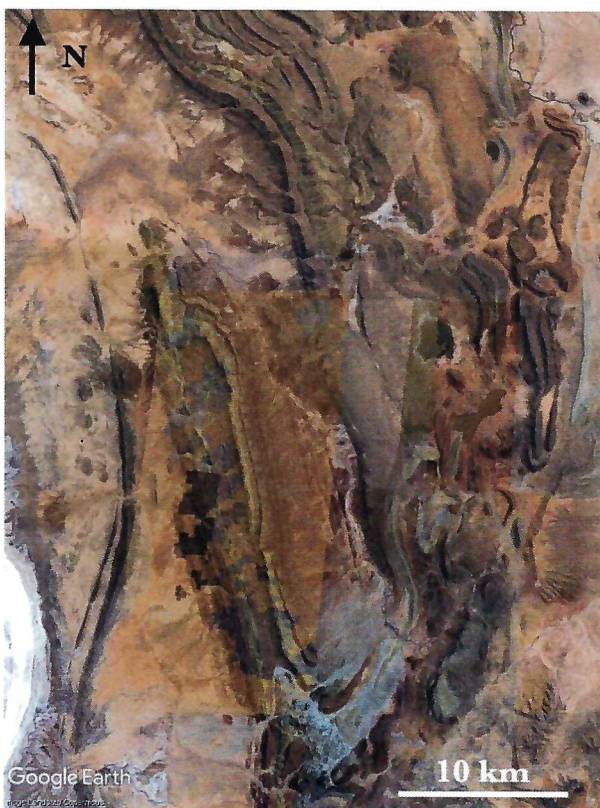
FIGURE 1.1. - (suite) Extrait de la légende de la carte géologique de Gannat au 1/50 000<sup>ème</sup>. Droits réservés : BRGM. Remarque : cristallophyllien = métamorphique.



**FIGURE 1.2.** – (A) Image satellite acquise par la constellation de satellites Landsat du salar d’Uyuni. Le trait rouge localise le profil topographique Sud Ouest – Nord Est. Les cadres localisent les **FIGURE 1.3.** et **FIGURE 1.4.**. (B) Profil topographique Sud Ouest – Nord Est du salar d’Uyuni (attention les échelles horizontale et verticale sont différentes). Droits réservés : *Google Earth*, 2024, modifié.



**FIGURE 1.3.** – (A) Détail de la **FIGURE 1.2.** en image satellite acquise par la constellation de satellites Landsat. Le trait rouge localise le profil topographique Ouest – Est. (B) Profil topographique Ouest – Est de la zone (attention les échelles horizontale et verticale sont différentes). Droits réservés : *Google Earth*, 2024, modifié.



**FIGURE 1.4.** – Détail de la **FIGURE 1.2.** en image satellites acquises par la constellation de satellites Landsat. Droits réservés : *Google Earth*, 2024, modifié.

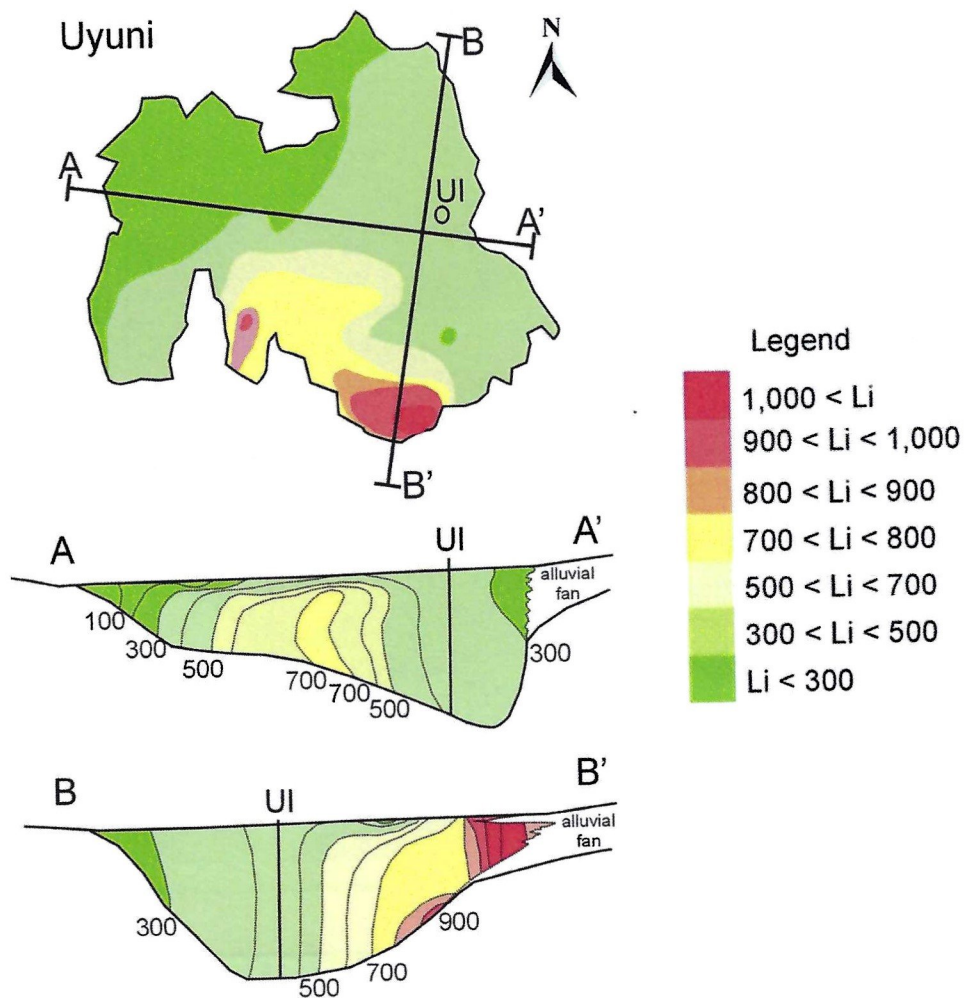


FIGURE 1.5. – Courbes d'isoconcentration en Li des saumures du salar d'Uyuni en  $\text{mg.L}^{-1}$  et coupes dans le salar. Steinmetz et Salvi, 2021.

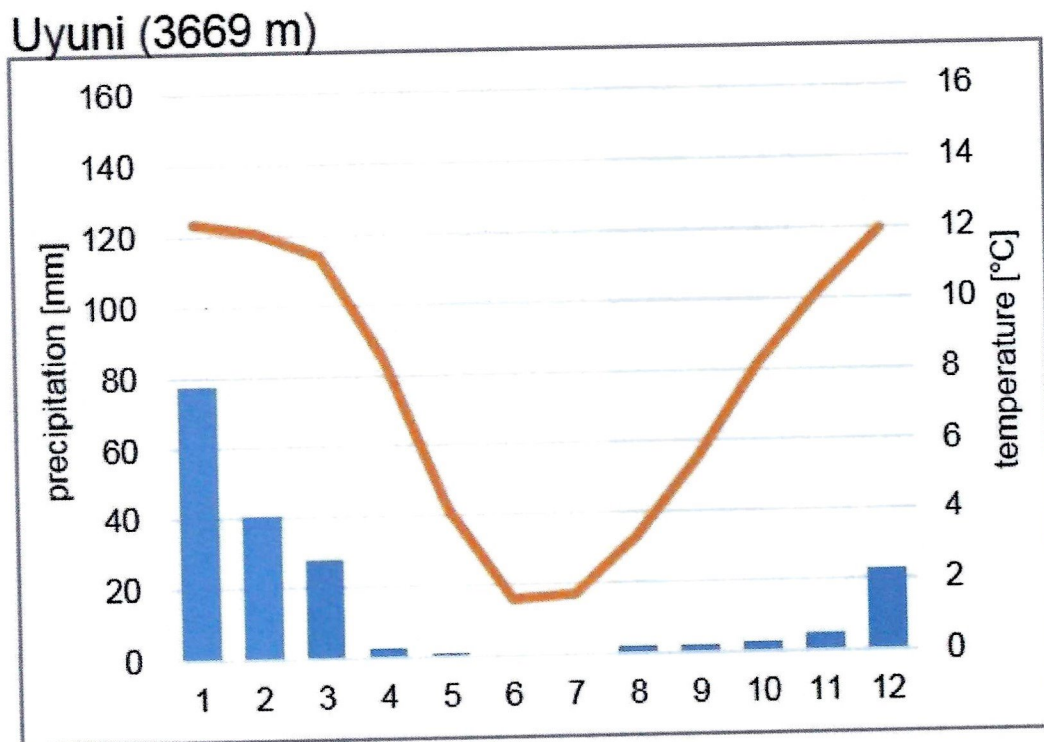
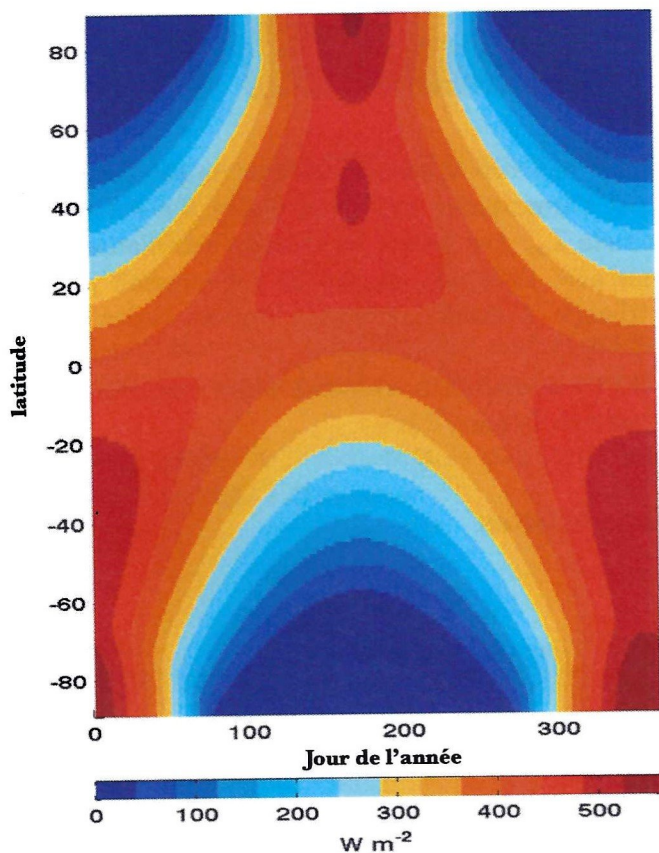


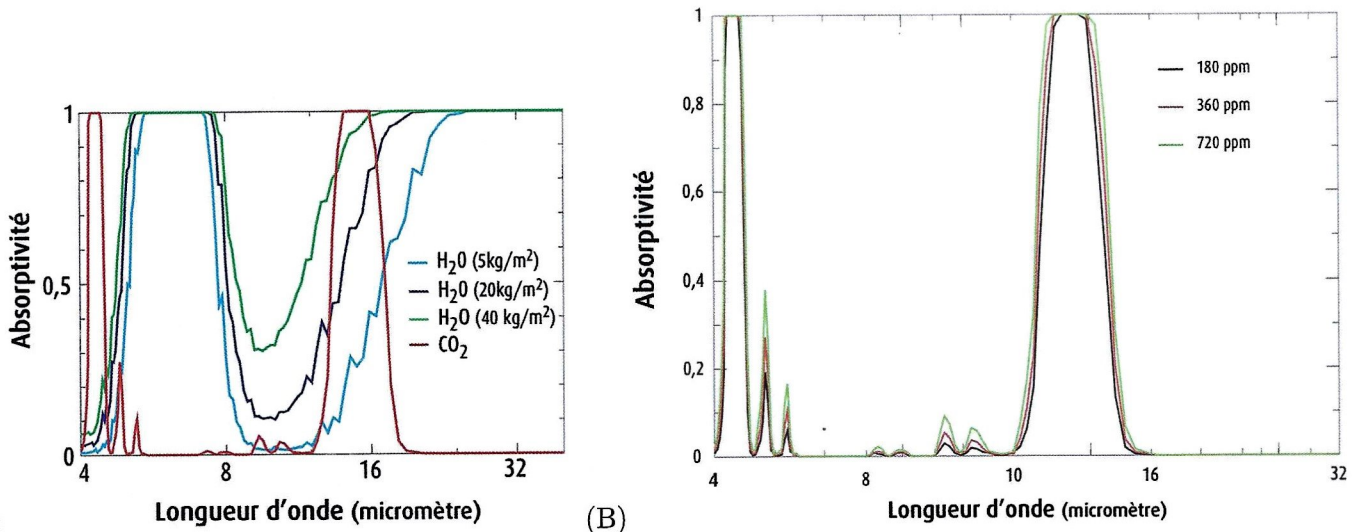
FIGURE 1.6. – Diagramme ombrothermique de la zone d'Uyuni (altitude : 3669 m). Histogrammes bleus = précipitations, courbe orange = températures. Schmidt, 2019.



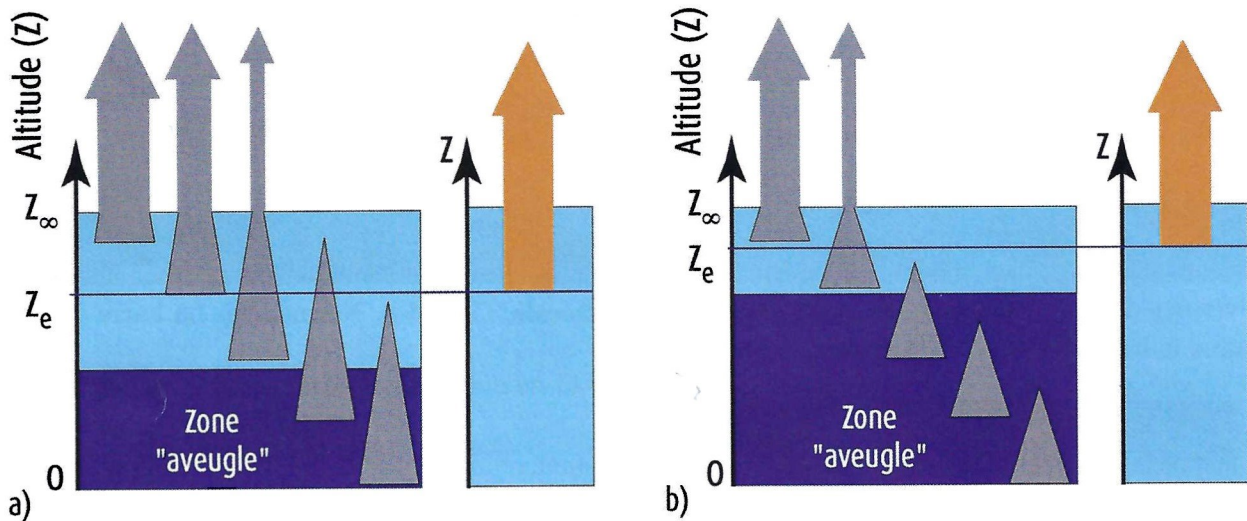
**FIGURE 2.1.** – Photographie d'une morphologie littorale, Calvados, Normandie. La barre verticale jaune indique une hauteur d'environ 4 m.



**FIGURE 3.1.** – Insolation journalière en  $W.m^{-2}$  en fonction de la latitude et du jour de l'année sur la période 1951–2010 au sommet de l'atmosphère. Stine et Huybers, 2012, modifié.



(A) (B)  
**FIGURE 3.2.** – (A) Dépendance spectrale de l'absorptivité pour 3 valeurs de contenu en vapeur d'eau : 5, 20 et 40 kg/m<sup>2</sup>. (B) Dépendance spectrale de l'absorptivité pour trois valeurs de concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère (si ce gaz était le seul gaz absorbant) : 180, 360 et 720 ppm. Dufresne et Treiner, 2011



**FIGURE 3.3.** – Pour les deux figures a) et b), à gauche, représentation schématique de l'évolution du rayonnement émis vers le haut par la surface et par l'atmosphère pour 4 altitudes. La surface est à l'altitude 0 et le sommet de l'atmosphère à l'altitude Z<sub>∞</sub>. Les formes en triangle schématisent la diminution progressive de l'intensité du rayonnement avec l'altitude, du fait de l'absorption par l'atmosphère, pour un rayonnement émis à la base du triangle. À droite, en orange, représentation de l'altitude d'émission correspondante.

a) le schéma correspond à une atmosphère de référence ; b) le schéma correspond à une atmosphère pour laquelle la quantité d'absorbant a augmenté. Dufresne et Treiner, 2011.

\*\*\* FIN DES FIGURES ET ANNEXES \*\*\*