

Banque BCPST Inter-ENS/ENPC/Mines/Centrale – Session 2025

Rapport relatif à l'épreuve écrite de Sciences de la Terre

Écoles concernées : ENS de Lyon, ENS Paris, ENS Paris-Saclay, ENPC, École des Mines de Paris, Écoles Centrale.

Coefficient de l'épreuve (en % du total d'admission) :

- **ENS de Lyon** : option Sciences de la Terre 13,2 % - option Biologie 6,6 %
- **ENS Paris** : option Sciences de la Terre 3,4 % - option Biologie 1,4 %
- **ENS Paris-Saclay** : 3,1 %
- **ENPC-Mines-Centrale** : 3,8 %

Membres du jury :

Alexandre AUBRAY

Armelle BALDEYROU-BAILLY

Pauline DELORME

Olivier DEQUINCEY

Bertrand GUÉNET

Romain JOLIVET

Marie-Laure PONS

Mathieu SORET

Professeur agrégé, **Aix-Marseille Université**

Professeure agrégée, **École et Observatoire des Sciences de la Terre**

Maitresse de conférences, **École Normale Supérieure**

Professeur agrégé, **École Normale Supérieure de Lyon**

Directeur de recherches, **CNRS, École Normale Supérieure**

Professeur des universités, **École Normale Supérieure**

Chargée de recherches, **CNRS, Aix-Marseille Université**

Chercheur post-doctoral, **École Normale Supérieure**

Remarques générales

Le sujet de cette année abordait le concept d'Anthropocène et les interactions entre les êtres humains et la géosphère. Il était subdivisé en trois parties précédées d'une partie préambule et les questions abordaient différentes thématiques du programme de BCPST, tant sur des aspects naturalistes que sur des aspects physico-chimiques des Sciences de la Terre. La longueur du sujet permettait aux candidats * d'aborder les différentes parties, toutes les questions ont ainsi été traitées au moins une fois.

Certaines copies, trop nombreuses malheureusement, sont peu soignées, présentent des erreurs d'orthographe et de syntaxe et/ou sont écrites en style télégraphique, rendant ainsi difficile la correction. Nous ne saurions que recommander de travailler sur la lisibilité des copies et la mise en exergue des éléments-clés de l'argumentation des réponses aux questions. Cette remarque s'applique aussi aux schémas qui peuvent être proposés en réponse à certaines questions.

Un nombre non négligeable de copies peinent à passer de la présentation de connaissances théoriques à leur utilisation pertinente pour expliquer des observations ou discuter des résultats. Partir des objets de terrain et des données est un essentiel de la démarche démonstrative en Sciences de la Terre. Il est aussi conseillé de travailler sur les liens entre échelles spatiales et temporelles, de l'élément chimique à l'enveloppe, de la seconde au milliard d'années. Ces points pourront permettre d'acquérir un recul critique sur les résultats obtenus, toujours bienvenu quand la réponse proposée est clairement une erreur.

Les membres du jury tiennent à féliciter les copies qui ont su se démarquer, tant sur les aspects naturalistes que physico-chimiques, en démontrant ainsi une belle capacité à réfléchir sur les différents phénomènes géologiques abordés dans le sujet.

Remarques sur la Partie *Préambule*

Cette courte partie avait pour but d'amener les candidats à réfléchir sur les marqueurs pouvant persister dans le registre géologique et ainsi constituer des marqueurs de l'Anthropocène. Si des critères pertinents ont pu être proposés, d'autres ne pouvaient, soit par leur durabilité, soit par leur probabilité de préservation, constituer de bons marqueurs. Rendez-vous dans quelques millions d'années pour vérifier la pertinence de ces critères...

*. L'épreuve et le rapport s'adressent à toutes et tous, mais afin d'en simplifier la lecture, le genre masculin est adopté pour la rédaction

Remarques sur la Partie *Les gisements de lithium, un élément essentiel pour la transition énergétique*

La première partie se concentrait sur des exemples de gisements de lithium et l'utilisation de cet élément et permettait de tester la réflexion sur les notions relatives à la sédimentation, au magmatisme et au métamorphisme tout en discutant de la pertinence de différentes modélisations géochimiques de processus magmatiques.

Le schéma structural de la carte géologique fournie a souvent constitué une copie de la carte et ne permettait pas de dégager les éléments relatifs à la localisation et à la mise en place du gisement de Beauvoir lors de la fin du cycle orogénique varisque. Tous les candidats ne sont pas allés chercher les points des calculs de concentration des différentes questions qui ne nécessitaient que des applications numériques.

Les questions sur le salar et la subduction andine ont montré des connaissances très superficielles sur le magmatisme et la déformation associés à la subduction océanique. De même, le contexte de formation des évaporites en climat aride n'a pas semblé être compris d'un grand nombre de candidats.

Remarques sur la Partie *Les phénomènes sédimentaires et leurs liens avec les activités humaines*

Cette partie avait pour objectif de mettre en lien les connaissances relatives à l'altération-érosion des roches et celles relatives aux modifications anthropiques des enveloppes terrestres pour expliquer la formation des falaises calcaires et leur érosion accrue ainsi que les modifications des processus sédimentaires détritiques.

Si les différents termes relatifs à l'altération-érosion des roches semblent connus, bien peu de copies se sont montrées capables de faire le lien entre les processus à l'échelle du minéral et de la roche et la morphologie observée.

Remarques sur la Partie *Le système climatique actuel et les causes anthropiques du changement climatique*

Cette dernière partie avait pour vocation de tester les connaissances sur l'atmosphère et le changement climatique d'origine anthropique, notamment à travers des modélisations physiques simples.

Si la discussion sur l'argument fallacieux mobilise généralement des éléments pertinents, les questions sur la circulation atmosphérique et sur les saisons montrent des lacunes importantes sur des notions pourtant largement abordées antérieurement dans les cursus de l'enseignement secondaire.

Les modélisations physiques basées sur l'équation de Stefan-Boltzmann ont posé problème à beaucoup de copies, et ce même pour l'utilisation de concepts simples comme l'albédo. Seules de très rares copies arrivent à proposer des éléments pertinents pour la modélisation à N vitres.

Dans la suite, les éléments mentionnés **ne constituent en aucun cas le détail des attendus du barème** mais ont pour vocation d'aider les candidats ainsi que leurs formateurs à préparer les épreuves écrites de Sciences de la Terre de ce concours.

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^{ème} 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).

Subdivisions de l'échelle des temps géologiques : éon – ère – période – époque – âge

Ces subdivisions sont peu connues des candidats et rarement un exemple concret a été proposé. Certaines copies ont voulu refaire l'échelle des temps géologiques ce qui n'était pas ce que demandait la question.

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.

Sédiments anthropiques, $\delta^{13}\text{C}$ négatif, abondance de certains fossiles/rareté d'autres... Bien sûr, la vérification de ces hypothèses restera difficile et fait partie des critiques de l'idée de définir une subdivision basée sur ces marqueurs.

L'enregistrement dans les glaces, souvent proposé, ne peut constituer une archive durable à l'échelle de plusieurs millions d'années.

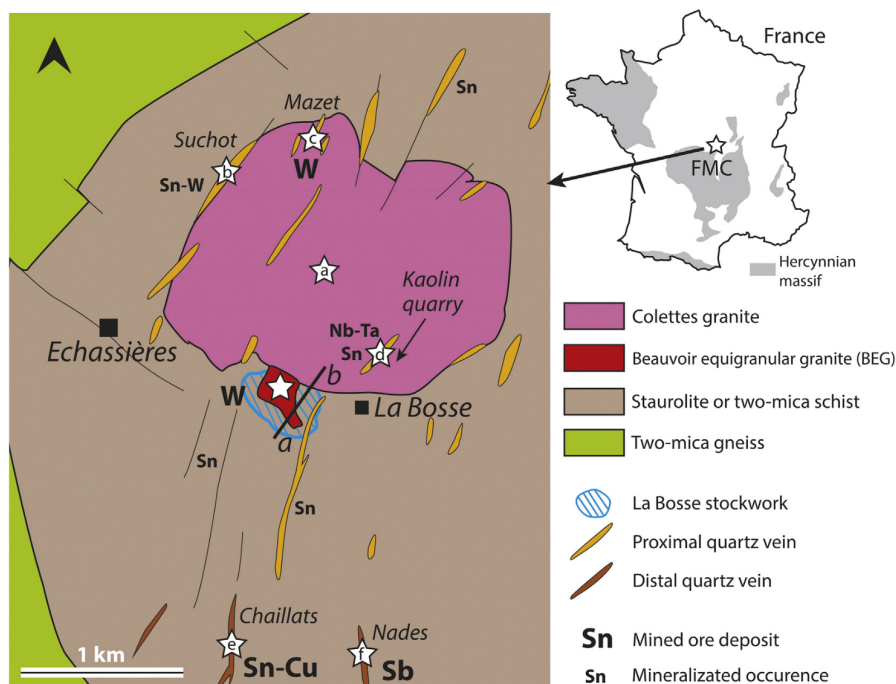
Partie 1 : Les gisements de lithium, un élément essentiel pour la transition énergétique

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'Echassières 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^{ème} 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.



Exemple de schéma – Droits réservés : MONNIER et coll., 2018

La présence des failles et des filons a souvent été oubliée sur les schémas alors que les minéralisations sont, en partie, associées à ces structures.

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.

- Présence de roches métamorphiques à staurotide et sillimanite : typiques du gradient métamorphique MP–M/HT ;
- Migmatites : typiques de la fusion partielle de la croûte continentale.

Le contexte associé est donc la collision continentale ou l'étalement de la chaîne et la cause de la fusion partielle est en lien avec la rééquilibration thermique de la croûte continentale épaissie, en raison de l'augmentation de la quantité d'éléments radioactifs présents dans la croûte continentale.

Beaucoup de candidats ont proposé un métamorphisme de contact lié à la mise en place du granite des Colettes sans prendre en compte le fait que les conditions métamorphiques étaient plus élevées en s'éloignant du granite. Le terme "granite alcalin" a conduit beaucoup de candidats à associer cette roche à l'activité d'un point chaud, plutôt qu'à de la collision continentale ou à de l'étalement de chaîne. Un granite est une roche plutonique donc mise en place en profondeur, il ne forme pas de coulée.

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

- Mise en place des roches métamorphiques dont migmatites ;
- Intrusion des granites (il n'est pas possible de les dater relativement) ;
- Failles remplies par les filons roses et certaines affectent les filons : les deux synchrones (les failles guident la mise en place des filons ?) ;
- Filons de quartz jaunes (postérieurs ou synchrones car directions identiques ou injections plus tardives dans les failles, ces filons étant non minéralisés).

La méthode isochrone basée sur la désintégration du ^{87}Rb en ^{87}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 λ est la constante de désintégration radioactive du système ^{87}Rb – ^{87}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.

L'équation de l'énoncé est une équation de droite dans un graphique $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t = f((^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_t)$. L'âge obtenu est de l'ordre de 312 Ma à ± 15 Ma.

Beaucoup d'âges, plus vieux que l'âge de la Terre ou de l'Univers, ont été proposés, parfois sans critique du résultat.

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.

Le rapport initial est l'ordonnée à l'origine ; il est ici de 0,709, ce qui est plus élevé que la valeur de la chondrite. Cela signe une source enrichie : soit la croûte continentale (mais le rapport est un peu faible), soit un magma issu du mélange entre un magma mantellique et un magma d'origine crustale.

L'utilisation du rapport **initial** pour déterminer la source des magmas n'est que peu connue. De manière surprenante, cette question a conduit certains candidats à proposer que la source du magma était le noyau externe.

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

La kaolinite est une argile T–O issue de l'altération du socle granitique et gneissique; cela peut se produire en climat intertropical (monosiallisation et allitisation), l'altération par les fluides magmatiques chauds peut aussi être responsable de la kaolinisation.

La kaolinite a souvent été confondue avec d'autres minéraux ou des roches (bauxite, évaporite, roche métamorphique...).

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 :

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

$$\begin{aligned}
m_X^{source} &= m_X^{liquide} + m_X^{residu} \\
\frac{m_X^{source}}{m_{tot}} &= \frac{m_X^{liquide}}{m_{tot}} + \frac{m_X^{residu}}{m_{tot}} \\
C_0 &= \frac{m_X^{liquide}}{m_L} F + \frac{m_X^{residu}}{m_R} (1 - F) \\
C_0 &= C_L F + C_R (1 - F) \\
C_0 &= C_L F + C_L \frac{C_R}{C_L} (1 - F) \\
C_0 &= C_L F + C_L D_X (1 - F) \\
C_L &= \frac{C_0}{F + D_X (1 - F)} \\
C_L &= \frac{C_0}{D_X + F(1 - D_X)}
\end{aligned}$$

Le jury n'a pas été dupe quand les équations proposées au départ étaient fausses mais donnaient le résultat juste à l'arrivée.

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

Plus la concentration dans la source est élevée et plus la quantité de lithium sera élevée dans le liquide. Plus le taux de fusion est faible et plus la quantité de lithium sera élevée dans le liquide. Plus le coefficient de partage est faible et plus la quantité de lithium sera élevée, ce dernier point signifie une source plus riche en minéraux avec un faible coefficient de partage.

Le dernier argument n'a pas souvent été proposé.

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.

Le calcul donne une valeur 867 ppm. Critique sur la source : cela voudrait dire que la source est plus riche en Li que la majorité des roches de la croûte et du manteau. Critique sur le modèle : cela suppose un équilibre chimique entre le liquide et le résidu ce qui constitue un modèle simple de production des magmas. Il est possible que la fusion soit un processus plus fractionné ou continu qui pourrait faire intervenir des sources moins riches en lithium.

Dans un second temps, la modélisation portera sur la **cristallisation** 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 coefficient de partage est de 0,0895. Pour 120 ppm, la valeur est de 7947 ppm.

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.

Si le magma cristallise rapidement proche de la surface, tout le liquide va cristalliser et donc r est proche de 0. Si le magma cristallise lentement en profondeur, tout le liquide fractionné va pouvoir se mélanger au magma donc r est proche de 1.

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.

Pour une valeur de 120 ppm, la concentration est de 184 ppm. Pour une valeur de 2500 ppm, la concentration est de 3825 ppm. Ce modèle conduit à un enrichissement moindre du dernier liquide.

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 ?

Il semble que la concentration dans le liquide initial doive être élevée pour obtenir un liquide initial ou final qui en cristallisant donne une roche riche en lithium. Une source de fusion enrichie peut aussi contribuer à un liquide riche en Li. La profondeur de cristallisation peut aussi influencer la teneur en Li.

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.**.

FIGURE 1.3. Morphologie conique haute de plus d'un kilomètre avec incisions par écoulement d'eau, d'un diamètre d'environ 15 km sans cratère sommital. Les roches sont claires au sommet et plus sombres en périphérie. Il y a des dômes en périphérie. Cet édifice est un stratovolcan qui témoigne d'éruptions explosives (et extrusives pour les dômes).

Un cratère sommital a souvent été mentionné alors que le profil topographique ne le montre pas. L'absence d'analyse des dimensions de l'édifice et la non utilisation du profil topographique ont rendu les commentaires très pauvres.

FIGURE 1.4. Série de plis (anti- et synformes) de longueur de 10 à 50 km avec axes des plis N–S. Marqueurs de raccourcissement W–E associé à une tectonique compressive. Avec hypothèse de déformation coaxiale : compression W–E.

Si les plis ont parfois été mentionnés (sans préciser l'orientation et les dimensions), ils n'ont que très rarement donné lieu à une analyse de la déformation et des contraintes potentielles.

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

Magmatisme explosif de subduction lié à la déshydratation de la plaque plongeante qui hydrate le coin de manteau qui fond partiellement. Tectonique compressive dans le même sens que la subduction à l'origine de la chaîne de montagnes liée à une subduction en compression.

L'explication du magmatisme de subduction a souvent été très parcellaire. Pour la tectonique, elle a souvent été associée à une collision suivant la subduction. Les subductions en compression ne semblent pas être connues et les termes "chaîne de montagnes" et "chaîne de collision" semblent être pris comme synonymes. Les réponses montrent des confusions problématiques : croûte / lithosphère, convergence / compression, arc / arrière-arc, zone de fusion partielle / chambre magmatique.

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.

Dépôts blancs dans une dépression = lac salé/éaporites entre les reliefs des Andes (volcans et structures tectoniques). La zone sans végétation signe un climat aride.

La description est rarement faite ou est trop superficielle. En revanche, la réponse a donné lieu à de nombreuses propositions étonnantes déclenchées par la lecture du mot subduction (ou collision) : le salar étant ainsi alternativement un prisme d'accrétion, un bassin avant ou arrière-arc, un bassin molassique... Les éaporites ont parfois été confondues avec de la neige.

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

Carte : gradient décroissant de concentration du SSE vers le NW. Coupe : BB' : gradient horizontal visible en profondeur + une zone enrichie à la base du bassin au SE. Coupe : AA' : valeur la plus élevée au centre . Origine des saumures : ruissèlement depuis le SE (avec peut être un peu d'infiltration profonde ou d'hydrothermalisme pour le fond du bassin).

Rares sont les commentaires quantifiés et précis des documents ce qui rend les interprétations des documents très superficielles. Les quantifications (si elles ne doivent pas donner lieu à une paraphrase du document) sont essentielles à l'analyse scientifique des documents.

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

Les températures ne dépassent pas 12 ° C en été et sont supérieures à 0 ° C en hiver, les précipitations ne dépassent pas 80 mm en début d'année avec une moyenne autour de 15 mm par mois. Cela témoigne d'un climat aride froid.

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.

SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS/INTERPRÉTATIONS : Le lithium est concentré dans les roches magmatiques de subduction, roches différenciées et donc riches en incompatibles. Les quelques précipitations mobilisent le Li des roches et le déposent dans le lac au niveau de la dépression topographique (entre les volcans et les zones plissées). Le climat aride conduit à une forte évaporation responsable de la formation des saumures et des éaporites (et de leur préservation). Remarque : ce mécanisme proposé est simplifié par rapport aux processus complexes de formation (hydrothermalisme, sources de Li...).

Le lien entre formation de la ressource et climat de la zone n'a pas souvent été proposé. L'incompatibilité du lithium n'a pas non plus été utilisée pour proposer un enrichissement dans les rhyolites. Beaucoup de candidats ont confondu les propriétés d'incompatibilité et de solubilité du Li dans les fluides aqueux.

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 utilisé dans les batteries pour stocker l'électricité.

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 ?

Cela nécessiterait d'extraire plus de lithium donc potentiellement d'ouvrir de nouvelles mines et d'exploiter des gisements jusque-là non exploités (parce que plus pauvres en lithium). Comme les voitures électriques ne sont pas composées que de lithium cela suppose aussi l'extraction de plus de métaux composant les voitures électriques (comme le cuivre). D'autres arguments peuvent être mentionnés : augmentation de la production d'électricité...

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.

Etaient observables : le relief avec la différence marne (pentes faibles) et calcaire (abrupt), les blocs massifs éboulés, un cône d'éboulement/glissement de terrain dans les marnes moins compétentes, le couvert végétal dans les marnes, la plateforme d'érosion littorale soumise à la dynamique de la mer. Nom de la morphologie : falaise ; Roches = calcaires (avec diaclases) et marnes (d'autres propositions de roches sédimentaires comme les grès étaient envisageables)

Dans beaucoup de copies, il a été proposé une falaise calcaire (sans remarquer la partie supérieure de la falaise avec les pentes plus faibles) surplombant un chaos granitique. Le granite n'est pas la seule roche à faire des blocs et il est très peu probable de trouver associées ces deux morphologies à cette échelle.

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.

Altération physique : thermoclastie, cryoclastie, haloclastie, fragmentation des roches par les végétaux, impact des galets transportés par les vagues, décompression des falaises. Altération chimique : dissolution des carbonates : $CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightarrow 2HCO_3^- + Ca^{2+}$. Erosion et transport : mobilisation gravitaire, dynamique de la mer : marée, houle, dynamique continentale : ruissèlement, vent.

Beaucoup de réponses se sont contentées de lister des processus mais il a été très rare que la définition des processus soit utilisée pour expliquer ce qui était **observé** sur la photo. Il est important que la connaissance de ces processus ne se limite pas à la théorie mais qu'ils puissent être mobilisés dans l'explication de la formation des paysages.

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 ?

Avec la montée du niveau marin liée au changement climatique (dilatation thermique + fonte des glaces continentales), il y a une augmentation de l'érosion côtière (la hauteur de la partie de la falaise affectée par la dynamique de la mer augmente). Cela menace les infrastructures côtières dont les habitations. Les modifications de la dynamique de l'atmosphère et de l'hydrosphère vont aussi être modifiées ce qui va modifier la dynamique de l'érosion.

Un processus très souvent lu dans les copies est la mise en lien entre la diminution du pH de l'océan et l'altération du calcaire... Il est important que les réponses proposées soient les plus parcimonieuses possible.

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.

Impact sur l'altération (déforestation comme à Haïti, labour...), impact sur l'érosion (plantation d'arbres limitant l'érosion comme au Mont Aigoual, béton sur les affleurements fragmentés, mesure de prévention de l'érosion littorale avec digues et brises-lames comme dans le Nord-Pas-de-Calais...), impact sur le transport : aménagement des cours d'eau avec par exemple construction de barrages (comme les barrages sur le Rhône ou le Nil), impact sur le dépôt : exploitation des gravières, diminution des apports aux deltas (Mékong...), impact sur la diagenèse : compaction liée au poids des villes.

Certaines copies ont répondu à la question en se focalisant sur la sédimentation carbonatée et non détritique.

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.

Discussion sur la première partie : certes le climat a varié mais pas avec cette amplitude pour une si courte échelle de temps même lors de variations abruptes (sauf impacts de météorites). Discussion sur la seconde partie : il existe des arguments montrant l'origine anthropique du CO₂ (diminution du $\delta^{13}\text{C}$ de l'atmosphère par exemple) et autres GES à l'origine de l'augmentation de l'effet de serre et les variations naturelles de l'insolation et de l'activité volcanique ne peuvent pas expliquer les variations actuelles.

Il est aussi à noter que l'implication entre les deux parties de phrases n'a pas de valeur logique.

Les cycles de Milankovitch ne sont pas les seuls facteurs de contrôle des variations du climat à l'échelle des temps géologiques comme proposé dans plusieurs copies.

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.

Mêmes valeurs mais décalage de 6 mois entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud : du aux saisons été/hiver. Les pôles sont les zones de la Terre pour lesquelles le contraste d'insolation est maximal : l'insolation est nulle au niveau des pôles en hiver et la plus élevée en été. Plus la latitude décroît et moins il y a de contraste d'insolation. En hiver, l'insolation décroît de l'équateur vers le pôle, en été, l'insolation croît de l'équateur vers le pôle, aux

équinoxes, il y a symétrie de l'insolation entre l'hémisphère N et l'hémisphère S. Il était possible de noter l'effet de la variation de la distance Terre–Soleil au cours de l'année.

La réponse a souvent donné lieu à juste des schémas sans analyse du document. Et les schémas proposés présentaient parfois de erreurs importantes (absence d'inclinaison de l'axe de rotation, rayons solaires n'arrivant pas à l'infini...). Il est attendu des candidats une maîtrise de l'explication des saisons.

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.

Schémas sur une surface plane et en altitude présentant les cellules de Hadley, de Ferrel et la cellule polaire avec les bons gradients de pression en surface.

Cette question a été peu réussie et le jury déplore de graves erreurs sur le nombre de cellules, la circulation des vents et la position des zones de hautes et basses pressions. La géologie ne se résume pas à la dynamique des enveloppes solides !

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° .

La valeur de la force de Coriolis augmente avec la vitesse de rotation. Sur Jupiter, il y aura plus de cellules de convection par hémisphère (7) que sur Terre, sur Vénus la force de Coriolis n'a quasiment pas d'effet car elle est très très faible : une seule cellule par hémisphère. Remarque : le nombre de cellules est forcément impair.

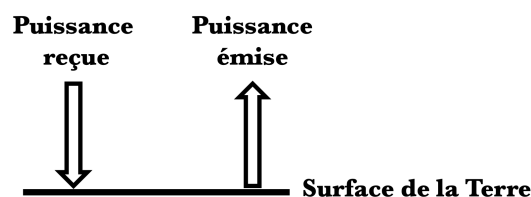
Partie 3.3. : Modélisation de l'effet de serre et de l'impact de l'augmentation des gaz à effet de serre sur celui-ci

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_Σ soit de 342 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 σ désigne la constante de Stefan égale à $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ 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.

A l'équilibre :

$$(1 - A)P_{\Sigma} = \sigma T_{S1}^4$$

Donc :

$$T_{S1} = \left(\frac{(1 - A)P_{\Sigma}}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Cela donne 255 K soit -18 ° C.

Dans cette question, l'albédo n'a parfois pas été considéré ou il a été considéré comme la part du rayonnement absorbé sur la part du rayonnement total arrivant. Cette question et les suivantes ont pu montrer des confusions entre absorption, réflexion, émission.

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

Critique possible : la valeur de l'albédo de 0,3 n'est pas réaliste si la température est de -18 ° C (car plus de glace, moins de végétation) ou pour avoir la température observée, il faudrait un albédo moindre que 0,3.

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.

Cela s'écrit en prenant en compte la puissance émise par la vitre vers la surface de la Terre P_V :

$$(1 - A)P_{\Sigma} + P_V = \sigma T_{S2}^4$$

Or un bilan sur l'atmosphère/la vitre donne :

$$\begin{aligned}(1 - A)P_{\Sigma} + P_V &= 2P_V \\ P_V &= (1 - A)P_{\Sigma}\end{aligned}$$

Ainsi :

$$T_{S2} = \left(\frac{2(1 - A)P_{\Sigma}}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Cela donne 303 K soit 30 ° C.

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

L'atmosphère n'est pas totalement absorbante donc la valeur est surestimée. L'atmosphère n'est pas totalement transparente au rayonnement solaire. Autre argument : il existe des transferts thermiques non radiatifs.

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 ?

Combustion des hydrocarbures ($9,3 \text{ GtC.an}^{-1}$), déforestation ($1,5 \text{ GtC.an}^{-1}$), fabrication du ciment ($0,6 \text{ GtC.an}^{-1}$). La critique vient du fait que ces flux sont inégalement répartis et sont en grande partie causés (historiquement) par les pays du Nord et plus récemment par les pays en voie de développement. De plus, certains flux localisés dans les pays du Sud sont liés à la consommation dans les pays du Nord

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.

Pour l'eau, l'augmentation de la quantité conduit à une augmentation de l'absorption des longueurs d'onde entre 8 et $24 \mu\text{m}$ (donc dans les IR) ; Pour des valeurs maximales de la quantité d'eau, absorption totale entre 24 et $16 \mu\text{m}$, l'absorptivité minimale passe de 0 à 0,4 ; Pour l'eau, peu de changement (augmentation de 0,2 à moins de 0,1 pour quelques pics) pour l'absorptivité entre 4 et $8 \mu\text{m}$. Pour le CO_2 , pas de changement significatif de l'absorptivité quelle que soit la quantité (pics locaux à absorptivité faible). L'augmentation de la quantité d'eau augmente la capacité d'absorption de cette dernière et donc augmente l'effet de serre et la température de surface de la Terre.

L'analyse de ce document a souvent manqué de rigueur conduisant à la conclusion que la tendance était à l'augmentation de l'absorptivité pour les deux gaz sans plus de quantifications.

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

Paradoxe : comme l'absorptivité n'est pas modifiée pour le CO_2 , en raisonnant uniquement sur ce paramètre : l'augmentation de la concentration en CO_2 ne semblerait pas avoir d'effet majeur sur l'effet de serre et donc sur la température de surface de la Terre.

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 γ 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 ρ 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 ?

Equation classique :

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g$$

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

$$\begin{aligned}
d(P^{1-\gamma}T^\gamma) &= d(\text{constante}) = 0 \\
(1-\gamma)T^\gamma P^{-\gamma}dP + \gamma P^{1-\gamma}T^{\gamma-1}dT &= 0 \\
(1-\gamma)TdP + \gamma PdT &= 0 \\
\frac{dT}{dP} &= \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \frac{T}{P}
\end{aligned}$$

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 $-g/c_P$.

L'expression du gradient thermique de l'atmosphère est :

$$\frac{dT}{dz} = \frac{dT}{dP} \frac{dP}{dz}$$

En remplaçant par les expressions des questions précédentes et en utilisant $PV = nRT$:

$$\begin{aligned}
\frac{dT}{dz} &= -\rho g \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \frac{T}{P} \\
\frac{dT}{dz} &= -\rho g \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \frac{V}{nR} \\
\frac{dT}{dz} &= -\rho g \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \frac{VM}{mR} \\
\frac{dT}{dz} &= -\rho g \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \frac{V}{m} \frac{M}{R} \\
\frac{dT}{dz} &= -\rho g \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \frac{1}{\rho} \frac{1}{c_P - c_V} \\
\frac{dT}{dz} &= -g \left(\frac{c_P/c_V - 1}{c_P/c_V}\right) \frac{1}{c_P - c_V} \\
\frac{dT}{dz} &= -g \left(\frac{c_P - c_V}{c_P}\right) \frac{1}{c_P - c_V} \\
\frac{dT}{dz} &= -\frac{g}{c_P}
\end{aligned}$$

Question 3.3.11. : Faites l'application numérique (en °C/km) pour la valeur de la capacité thermique massique de l'air sec : 1 005 J.K⁻¹.kg⁻¹ et de l'air saturé en vapeur d'eau 1 030 J.K⁻¹.kg⁻¹. Commentez la différence entre les deux valeurs et proposez une explication critique de ce résultat.

Air sec : -9,76 °C/km et air humide : -9,52 °C/km. La différence est très faible, le gradient de l'air humide ne prend pas en compte les phénomènes de condensation qui sont exothermiques et augmentent la valeur du gradient thermique dans une atmosphère humide.

Il est rappelé qu'une variation de T en °C ou en K garde la même valeur numérique...

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.

Puisque l'altitude augmente, sa température est plus faible, d'après la loi de Stefan la puissance émise est donc plus faible.

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

La puissance émise est plus faible que la puissance reçue donc l'atmosphère se réchauffe jusqu'au nouvel équilibre. La température à l'altitude d'émission augmente, or comme le gradient thermique est constant, la température de surface s'échauffe aussi.

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.

Avec l'augmentation de température de surface, la quantité de vapeur d'eau augmenterait dans l'atmosphère. Cela entraînerait une augmentation de l'absorption des radiations entre 8 et 16 μm (rétroaction positive). Avec une augmentation de T, la solubilité du CO_2 dans l'océan diminuerait et donc sa concentration dans l'atmosphère augmenterait ce qui augmenterait encore la température et ainsi de suite.

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.

Pour la dernière vitre $P_N = (1 - A)P_{\Sigma}$, pour chaque vitre i ($i \in [1; N - 1]$) : $2P_i = P_{i+1} + P_{i-1}$ donc pour chaque vitre i ($i \in [1; N - 1]$) : $P_i = P_{i+1} + (1 - A)P_{\Sigma}$ ce qui donne $P_0 = (N + 1)(1 - A)P_{\Sigma}$ et donc :

$$T_{SN} = \left((N + 1) \frac{(1 - A)P_{\Sigma}}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

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

Dans ce modèle le gradient dépend du nombre de vitres et uniquement de processus radiatifs, dans le modèle 1 le gradient dépend des processus de convection de l'atmosphère, dans les deux autres modèles, la température est homogène (gradient nul).