

Sciences de la vie et de la Terre

Baccalauréat général 2026 — épreuve de spécialité

Métropole, session 2026 (26-SVTJ1ME1)

Corrigé

Deux exercices

Exercice 1 (7 points)

Sujet — Exercice 1 — Stress et fuite (7 points)

Face à un danger, l'organisme humain se met en état de stress dont l'une des réactions peut consister à prendre la fuite.

QUESTION :

Expliquer comment l'intervention du système nerveux dans la réaction de stress et dans le mouvement volontaire permet à l'organisme de prendre la fuite de manière efficace.

Vous rédigerez un texte argumenté. On attend des expériences, des observations, des exemples pour appuyer votre exposé et argumenter votre propos.

Corrigé

Introduction Un danger (un chien qui attaque, un bruit d'explosion) est un **agent stressant** : une perturbation de l'environnement, physique ou psychique, qui menace l'organisme. Face à lui, l'être humain dispose d'un ensemble de réponses adaptatives, physiologiques et comportementales, rassemblées sous le nom de **stress aigu**, qui lui permettent un comportement approprié : se figer, lutter ou fuir. La fuite est un **mouvement volontaire** : une contraction rapide et coordonnée des muscles squelettiques, commandée par le cerveau. Pour être efficace, elle doit être déclenchée en une fraction de seconde, alimentée en dioxygène et en glucose pendant toute sa durée, précise, puis interrompue lorsque le danger est passé. *Comment le système nerveux, en préparant l'organisme à l'effort puis en commandant le mouvement, rend-il la fuite rapide, puissante et coordonnée ?* Nous verrons comment la réaction de stress aigu prépare l'organisme à l'effort (I), comment le cerveau et la moelle épinière commandent le mouvement de fuite (II), enfin comment l'intégration de ces réponses rend la fuite efficace et durable, avant le retour à l'équilibre (III).

I. La réaction de stress aigu : le système nerveux prépare l'organisme à l'effort 1. La perception du danger et son traitement par le système limbique. Les organes des sens captent le stimulus et élaborent un message nerveux, codé en **fréquence de potentiels d'action**, qui gagne le cerveau par les nerfs sensitifs. L'information est traitée par le **système limbique**, ensemble de structures cérébrales impliquées dans les émotions et la mémoire, et en particulier par l'**amygdale**. L'imagerie fonctionnelle (IRMf) montre que l'amygdale s'active lorsqu'un sujet voit des visages apeurés ou des images menaçantes, et les enregistrements électrophysiologiques situent cette réponse dans les premiers dixièmes de seconde. À l'inverse, une patiente dont les deux amygdales ont été détruites par une maladie génétique rare (la patiente dite S.M., étudiée par l'équipe de Feinstein et Adolphs) ne manifeste aucune peur face à des serpents, des araignées ou des films d'épouvante, alors qu'elle exprime normalement les autres émotions : l'amygdale est indispensable au déclenchement de la réponse de peur, donc de la fuite.

2. Une voie nerveuse très rapide qui libère l'adrénaline. L'amygdale active l'**hypothalamus**, qui commande le **système nerveux autonome sympathique**. En quelques secondes, les nerfs sympathiques accélèrent le cœur et stimulent la **glande médullosurrénale** (partie centrale des glandes surrénales, au-dessus des reins), qui libère dans le sang une hormone, l'**adrénaline**. Le message nerveux (électrique, en fréquence de potentiels d'action) est ainsi relayé par un message hormonal (chimique, en concentration sanguine), qui atteint tous les organes. Des dosages chez des sujets soumis à un agent stresser (saut en parachute, prise de parole en public) montrent que l'adrénaline plasmatique s'élève dans les minutes qui suivent le stimulus, puis retombe rapidement. Les expériences historiques d'Oliver et Schäfer (1895) ont montré qu'un extrait de glande surrénale injecté à un animal élève fortement la pression artérielle ; à l'inverse, un animal privé de ses surrénales ne présente plus qu'une réponse cardiovasculaire atténuée face à un agent stresser.

3. Les effets de l'adrénaline : un organisme prêt à courir. L'adrénaline se fixe sur des récepteurs spécifiques de ses cellules cibles et provoque : l'augmentation de la **fréquence cardiaque** et du volume d'éjection systolique, donc du débit cardiaque ; l'augmentation de la **fréquence respiratoire** et la dilatation des bronches, donc de l'apport en dioxygène ; la **libération de glucose** par le foie (hydrolyse du glycogène), donc une hausse de la glycémie ; enfin une redistribution du sang, par vasoconstriction des territoires digestifs et cutanés et vasodilatation des vaisseaux des muscles squelettiques. C'est la réaction que le physiologiste Walter Cannon a nommée « lutte ou fuite ». **Bilan** : avant même que le premier pas soit fait, le système nerveux a mis en état d'alerte le cœur, les poumons et le foie, et les muscles disposent du dioxygène et du glucose nécessaires à la production d'ATP.

II. Le mouvement volontaire de fuite : la commande nerveuse des muscles

1. Le cortex moteur décide et commande. Le cerveau est formé de neurones et de cellules gliales qui assurent leur fonctionnement. L'exploration du **cortex cérébral** a permis de localiser, dans le lobe frontal de chaque hémisphère, les **aires motrices** à l'origine des mouvements volontaires. Les stimulations électriques réalisées par Penfield lors d'opérations du cerveau déclenchent des mouvements d'une partie précise du corps selon le point stimulé : chaque territoire de l'aire motrice commande une région du corps, ce qui définit une carte motrice (homunculus). L'IRMf confirme que l'aire motrice de l'hémisphère gauche s'active lorsqu'un sujet bouge la main droite, et un accident vasculaire cérébral qui détruit l'aire motrice d'un hémisphère provoque une hémiparésie du côté opposé. Chez l'individu qui fuit, les informations de l'amygdale (danger) et des aires sensorielles (obstacles, direction de la sortie) sont intégrées par les aires préfrontales et prémotrices, qui choisissent le mouvement ; le cortex moteur élabore alors la commande.

2. Des faisceaux descendants jusqu'aux motoneurones. Les messages moteurs partent du cortex par des **faisceaux de neurones** dont les axones « descendent » dans la moelle épinière, en croisant la ligne médiane : l'hémisphère gauche commande la moitié droite du corps. Dans la substance grise de la moelle (corne ventrale), ces neurones établissent une **synapse neuro-neuronale** avec les **motoneurones**. Une section accidentelle de la moelle épinière entraîne une paraplégie : le cerveau est intact, la décision de fuir est prise, mais l'ordre ne parvient plus aux jambes, preuve que la commande transite par la moelle.

3. Le motoneurone intègre et code le message moteur. Le corps cellulaire du motoneurone reçoit des milliers de synapses : excitatrices (glutamate) venues du cortex, inhibitrices (GABA) venues d'interneurones, sans oublier les afférences des fuseaux neuromusculaires du réflexe myotatique. Il en fait la somme, **spatiale** (synapses différentes au même instant) et **temporelle** (messages rapprochés sur une même synapse) ; si le seuil est dépassé, il émet un **message moteur unique**, codé en fréquence de potentiels d'action. Chaque fibre musculaire ne reçoit le message que d'un seul motoneurone : plus la fréquence des potentiels d'action et le nombre de motoneurones recrutés sont grands, plus la contraction est forte – de la marche au sprint.

Pendant la course, les **muscles antagonistes** (fléchisseurs et extenseurs) sont commandés en alternance, et le réflexe myotatique, boucle courte de la moelle, corrige à chaque appui l'étirement des muscles et maintient la posture sans intervention du cerveau.

4. La synapse neuromusculaire déclenche la contraction. L'arrivée des potentiels d'action dans la terminaison du motoneurone provoque l'entrée d'ions calcium et l'exocytose de vésicules d'**acétylcholine**. Le neurotransmetteur diffuse dans la fente synaptique et se fixe sur des récepteurs de la fibre musculaire : le message est alors codé en **concentration de neurotransmetteur**. Il naît un potentiel d'action musculaire qui se propage, ouvre des canaux calciques, libère du calcium du réticulum sarcoplasmique et déclenche le glissement des filaments d'actine et de myosine, aux dépens de l'ATP : le muscle se contracte. Le curare, poison de flèches, bloque les récepteurs de l'acétylcholine : la commande nerveuse est intacte, mais le muscle reste paralysé, ce qui démontre le rôle de cette synapse. **Bilan** : du cortex moteur à la fibre musculaire, une chaîne de neurones et de synapses transmet en quelques dizaines de millisecondes un ordre précis, gradué et adapté à la situation.

III. L'intégration des réponses : une fuite efficace, soutenue, puis un retour à l'équilibre

1. Une réponse hormonale plus lente qui soutient l'effort. L'hypothalamus, tissu nerveux, est aussi une glande : sous l'effet du stress, ses neurones sécrètent la **CRH**, neuro-hormone qui stimule la libération d'**ACTH** par l'hypophyse ; l'ACTH provoque la sécrétion de **cortisol** par la corticosurrénale. C'est l'**axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien**. Les mêmes dosages montrent que le cortisol sanguin n'atteint son maximum que vingt à trente minutes après le stimulus, bien après l'adrénaline : les deux hormones sont libérées de façon différenciée dans le temps. Le cortisol favorise la mobilisation du glucose (synthèse hépatique, épargne par les autres tissus) et inhibe des fonctions non urgentes (digestion, système immunitaire) : il prolonge l'apport d'énergie aux muscles si la fuite dure. Une hypophysectomie supprime cette réponse, l'injection d'ACTH la rétablit.

2. Une boucle de régulation qui ramène l'organisme à son état initial. Le cortisol exerce en retour un **rétrocontrôle négatif** sur l'hypothalamus et l'hypophyse : il freine la sécrétion de CRH et d'ACTH. L'administration d'un analogue du cortisol (la dexaméthasone) fait chuter l'ACTH, preuve de ce rétrocontrôle. Ainsi, une fois le danger écarté, la production de cortisol s'éteint d'elle-même, le système parasympathique ralentit le cœur, et l'organisme retrouve des conditions de fonctionnement durables : c'est la **résilience** du système. Le stress aigu est donc une réponse normale, transitoire et réversible.

3. Un système complexe et perfectible. Les systèmes **nerveux, endocrinien et immunitaire** interagissent au sein d'un **système complexe** : le nerveux déclenche, l'hormonal amplifie et prolonge, et pendant la course le bulbe rachidien ajuste par les nerfs sympathiques le débit sanguin et la ventilation aux besoins des muscles. C'est cette coordination qui fait l'**adaptabilité** de l'organisme. Grâce à la **plasticité cérébrale**, la répétition (entraînement, exercices d'évacuation) renforce les synapses des circuits utilisés : la fuite devient plus rapide et plus sûre.

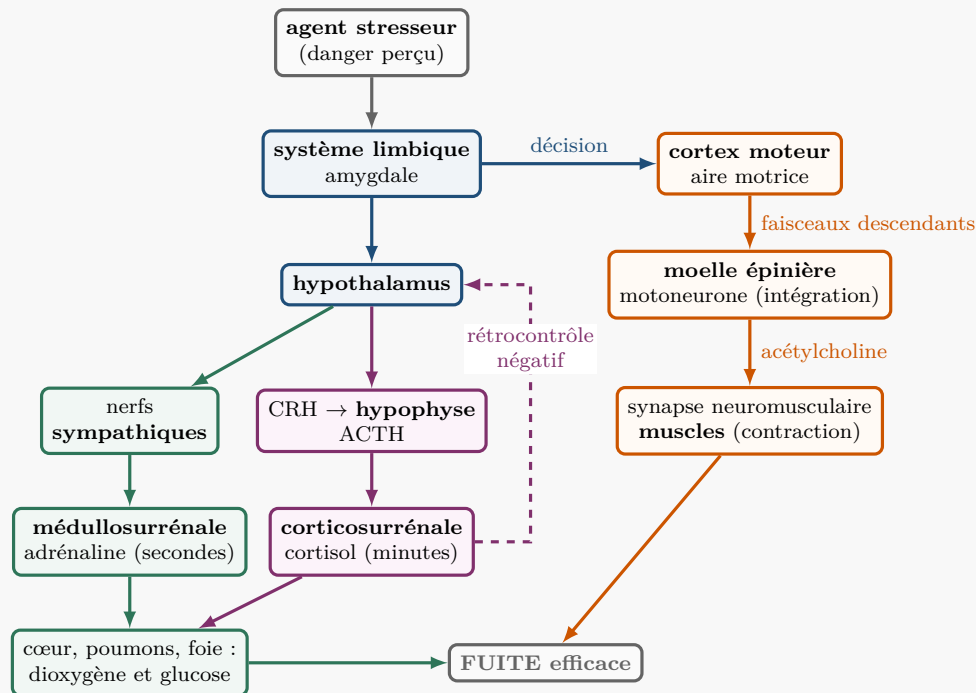


Schéma-bilan : les deux voies par lesquelles le système nerveux rend la fuite efficace – la réaction de stress (voie nerveuse rapide puis voie hormonale) et la commande du mouvement volontaire.

Conclusion La fuite efficace résulte de l'action coordonnée du système nerveux à deux niveaux. D'une part, le système limbique, l'hypothalamus et le système sympathique déclenchent en quelques secondes la libération d'adrénaline, puis, par l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien, celle du cortisol : cœur, ventilation et glycémie sont ajustés pour fournir aux muscles le dioxygène et le glucose de l'effort. D'autre part, le cortex moteur, les faisceaux descendants, les motoneurones et la synapse neuromusculaire transmettent aux muscles un ordre rapide, gradué et précis. Le rétrocontrôle négatif du cortisol garantit le retour à l'équilibre : le stress aigu est une réponse adaptative et réversible. Mais si les agents stressors sont trop intenses ou durables, le cortisol reste élevé et ce même système se dérègle : le stress chronique, ses effets sur l'amygdale, l'hippocampe et le cortex préfrontal, et les moyens, médicamenteux ou non, d'y faire face en sont l'autre versant.

Exercice 2 (8 points)

Sujet — Exercice 2 — Effets d'éruptions volcaniques majeures sur la température atmosphérique (8 points)

La Terre a connu plusieurs périodes au cours desquelles l'activité volcanique a été très intense. Des géologues suggèrent que certaines de ces éruptions volcaniques majeures ont pu entraîner des modifications importantes de la température atmosphérique à différentes échelles de temps.

QUESTION :

Expliquer comment des éruptions volcaniques majeures ont pu provoquer des variations de température atmosphérique à différentes échelles de temps.

Vous organiserez votre réponse selon une démarche de votre choix intégrant des données des documents et les connaissances utiles.

Document 1 : caractéristiques de plusieurs provinces magmatiques géantes

Au cours de l'histoire de la Terre, de nombreux épisodes volcaniques majeurs, d'une durée de quelques centaines de milliers d'années à environ 2 millions d'années, ont eu lieu. Ils ont abouti à la mise en place de provinces magmatiques géantes (trapps), c'est-à-dire de régions de la surface du globe couvertes de roches magmatiques et d'une superficie de plus de 100 000 km².

Caractéristiques et localisations de provinces magmatiques géantes

Nom de la province magmatique géante	Trapps de Sibérie	Trapps CAMP	Trapps du Deccan
Date (Ma = millions d'années)	252 Ma	200 Ma	65 Ma
Volume de roche de la province magmatique géante	4 millions de km ³	2 millions de km ³	2 millions de km ³

Carte du monde (planisphère à graticule de 30°) où les provinces magmatiques géantes sont figurées en gris foncé, sur les continents comme dans les océans, les trois du tableau (Sibérie, CAMP, Deccan) en gras : Columbia River et Caraïbes (Amérique du Nord et centrale), CAMP (de part et d'autre de l'Atlantique central : est de l'Amérique du Nord, ouest de l'Afrique, nord de l'Amérique du Sud), Atlantique Nord, Paraná et Etendeka (Amérique du Sud et Afrique australe), Karoo, Éthiopie-Yémen, Madagascar, Sibérie, Emeishan (Chine), Deccan et Rajmahal (Inde), Kerguelen, Broken Ridge, Ontong Java, Manihiki et Hikurangi (Pacifique), Reine Maud et Ferrar (Antarctique) (document reproduit dans le sujet PDF).

Source : Boesch, Q. (2022). Climatologie : À la découverte des climats passés, présents et futurs de notre planète. De Boeck supérieur

Document 2 : produits émis lors des épisodes volcaniques majeurs

Document 2a : nature des roches formées

La formation des provinces magmatiques géantes serait la conséquence de la remontée de grandes quantités de roches chaudes du manteau qui fondent partiellement à l'approche de la surface. Le magma formé s'épanche à la surface donnant naissance en refroidissant à des basaltes, roches magmatiques silicatées. Les différentes éruptions aboutissent à la superposition de nombreuses couches de basaltes (voir photographie). En milieu continental, les reliefs ainsi formés sont ensuite soumis à l'altération.

Photographie des trapps du Deccan (Inde) : vue aérienne en noir et blanc d'un relief montagneux dont les versants forment des gradins ; chaque marche horizontale correspond à une couche de basalte, et l'empilement en compte plusieurs dizaines sur toute la hauteur du versant. Une échelle verticale de 30 m est indiquée en bas à droite (document reproduit dans le sujet PDF).

Source : Boesch, Q. (2022). *Climatologie : À la découverte des climats passés, présents et futurs de notre planète*. De Boeck supérieur

Document 2b : nature des gaz émis

Les épisodes volcaniques qui ont conduit à la mise en place de provinces magmatiques géantes ayant eu lieu il y a plusieurs millions d'années, il est difficile d'accéder à la composition des gaz émis lors de ces éruptions. Il est cependant possible d'analyser les gaz libérés lors d'épisodes volcaniques actuels de même type mais d'ampleur bien moindre, comme ceux du volcan Kilauea, situé dans l'océan Pacifique, afin d'avoir une idée de la composition des gaz émis lors des éruptions majeures.

Composition des gaz émis par le volcan Kilauea le 25/03/2018 (diagramme circulaire du sujet, transcrit en tableau)

Gaz	Proportion
Vapeur d'eau	37 %
CO ₂	49 %
SO ₂	12 %
Autres gaz	2 %

Quand du dioxyde de soufre (SO₂) est présent dans l'atmosphère, il peut réagir avec du dioxygène et de l'eau et former des gouttelettes d'acide sulfurique appelées aérosols soufrés qui peuvent persister dans l'air avant de retomber au sol lors de précipitations. Dans l'atmosphère, ces aérosols ont la capacité de renvoyer l'énergie solaire, ce qui a un effet sur l'albédo terrestre global.

Après une éruption volcanique, une fraction significative de CO₂ peut rester dans l'atmosphère.

Source : d'après Symonds, RB, Rose, WI, Bluth, GJ, & Gerlach, TM (1994). *Études des gaz volcaniques : méthodes, résultats et applications*. Mineralogical Society of America, 30, 1-66

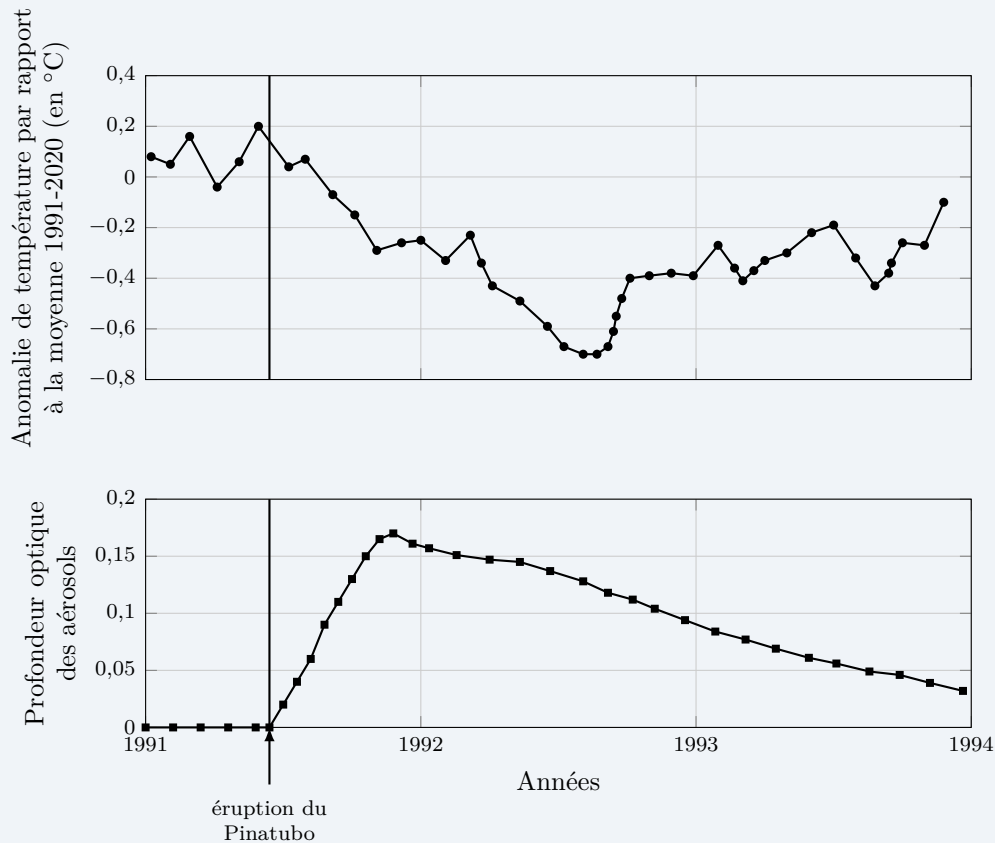
Document 3 : étude de l'éruption du volcan Pinatubo de 1991

La dernière éruption du volcan Pinatubo (Philippines) a eu lieu du 15 juin au 2 septembre 1991 mais l'activité intense n'a duré que quelques jours consécutifs au mois de juin. Plusieurs paramètres ont été évalués, avant et après cette éruption, afin notamment de comprendre comment une telle éruption pouvait modifier le climat à court terme :

- le volume de roches volcaniques mis en place a été estimé à environ 10 km³ ;
- la quantité de SO₂ émise a été estimée à 17 millions de tonnes ;
- les anomalies de température et la profondeur optique des aérosols soufrés, qui reflète la quantité d'aérosols soufrés présents dans l'atmosphère, sont présentées dans le document 3a. Plus la profondeur optique des aérosols est élevée, plus il y a d'aérosols soufrés dans l'atmosphère ;

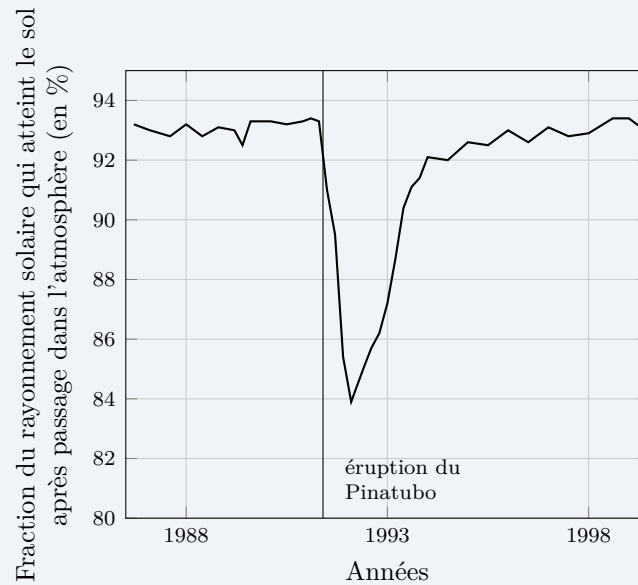
- la fraction de rayonnement solaire qui atteint le sol à la station de Mauna Loa (Hawaï, Pacifique), après passage dans l'atmosphère, est présentée dans le document 3b.

Document 3a : mesures des anomalies de température et de la profondeur optique des aérosols dans l'atmosphère avant et après l'éruption du Pinatubo à l'échelle mondiale (courbes redessinées, valeurs lues sur le graphique du sujet)



Les anomalies de température sont calculées par rapport à la moyenne des températures pour la période 1991-2020, qui sert de référence. Une anomalie positive de température signifie que la température est supérieure à la température de référence, et une anomalie négative signifie que la température est inférieure à la température de référence.

Document 3b : mesure de la transmission du rayonnement solaire à travers l'atmosphère (courbe moyenne redessinée, valeurs lues sur le graphique du sujet ; les points de mesure individuels, dispersés autour de la courbe, ne sont pas reproduits)



Les points représentent les différentes mesures réalisées. La courbe en trait plein représente la moyenne des mesures.

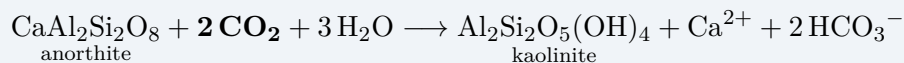
Sources : Burton, M. R., Sawyer, G. M., & Granieri, D. (2013). Deep carbon emissions from volcanoes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 75(1), 323-354. Douglass, D. H., & Knox, R. S. (2005). Climate forcing by the volcanic eruption of Mount Pinatubo. *Geophysical Research Letters*, 32(5), 2004GL022119. Dutton, E. G., & Bodhaine, B. A. (2001). Solar irradiance anomalies caused by clear-sky transmission variations above mauna loa : 1958–99. *Journal of Climate*, 14(15), 3255-3262.

Document 4 : devenir des roches silicatées

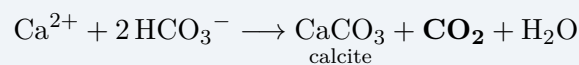
Lorsque des roches comme le basalte, contenant des minéraux silicatés telle l'anorthite, se retrouvent en surface, elles subissent une altération chimique sous l'effet des précipitations (étape 1 sur le schéma). Les ions produits par l'altération sont transportés par les cours d'eau (étape 2 sur le schéma) jusque dans des bassins de sédimentation où certains d'entre eux vont former des carbonates comme la calcite, constituant notamment les calcaires (étape 3 sur le schéma). Lors de ces étapes, des réactions chimiques faisant intervenir le CO_2 ont lieu : l'une utilise le CO_2 atmosphérique et l'autre libère du CO_2 .

Schéma : coupe d'un paysage, d'un relief montagneux (à gauche) à un bassin de sédimentation (à droite) ; un nuage de pluie au-dessus du relief porte la légende « ① Altération de silicates », une flèche qui descend la pente vers le bassin la légende « ② Transport d'ions en solution », et une coquille déposée au fond du bassin la légende « ③ Précipitation de carbonates » (document reproduit dans le sujet PDF).

Altération de l'anorthite (silicate présent dans le basalte) en kaolinite :



Précipitation de la calcite (un carbonate) :



Source : Boesch, Q. (2022). *Climatologie : À la découverte des climats passés, présents et futurs de notre planète*. De Boeck supérieur

Document 5 : chronologie des effets prédominants d'une éruption volcanique majeure sur la température atmosphérique

Après un épisode volcanique, de nombreux facteurs peuvent influencer la température atmosphérique mondiale. Tous n'agissent pas de façon prédominante aux mêmes échelles de temps, c'est-à-dire pas en même temps et pas sur les mêmes durées.

Frise (valeurs lues sur le schéma du sujet) : un axe logarithmique « Temps après l'épisode volcanique (en années) » gradué de 0,1 à 10^7 porte trois barres horizontales aux extrémités estompées : « aérosols soufrés » d'environ 0,1 à 10 ans ; « variation importante et rapide de concentration en CO_2 dans l'atmosphère » d'environ 10 à 10^4 ans ; « altération des silicates » d'environ 10^4 à 10^7 ans (document reproduit dans le sujet PDF).

Source : Wever, P. de, David, B., Néraudeau, D., & Broutin, J. (2010). *Paléobiosphère : Regards croisés des sciences de la vie et de la terre*. Muséum national d'histoire naturelle Société géologique de France Vuibert

Corrigé

Introduction La température moyenne de l'atmosphère résulte du **bilan radiatif** de la Terre : le rayonnement solaire absorbé, qui dépend de l'**albédo** (fraction réfléchi vers l'espace), et le rayonnement infrarouge retenu par les **gaz à effet de serre**, parmi lesquels le CO_2 . Tout ce qui modifie l'un de ces deux termes modifie la température. Les éruptions volcaniques majeures, qui ont édifié les provinces magmatiques géantes, injectent des gaz dans l'atmosphère et laissent en surface d'immenses volumes de roches : par quels mécanismes ont-elles fait varier la température, et pourquoi à des échelles de temps différentes ? Démarche : caractériser l'ampleur de ces éruptions et leurs produits (documents 1 et 2), étudier un cas actuel bien mesuré, le Pinatubo, pour l'effet à court terme des aérosols (document 3), puis les effets du CO_2 (document 2b et connaissances) et de l'altération des silicates à long terme (document 4), enfin ordonner ces effets dans le temps (document 5).

Document 1 — des éruptions d'une ampleur planétaire **Ce que je vois** : les trapps couvrent chacun plus de 100 000 km^2 et représentent des volumes de roche considérables : 4 millions de km^3 pour la Sibérie (252 Ma), 2 millions de km^3 pour le CAMP (200 Ma) et pour le Deccan (65 Ma). Chaque épisode a duré de quelques centaines de milliers d'années à 2 millions d'années. La carte montre une vingtaine de provinces réparties sur tous les continents et dans tous les océans. **Ce que j'en déduis** : ces éruptions n'ont rien de commun avec un volcan actuel : le Deccan représente $2 \times 10^6 / 10 = 2 \times 10^5$ fois le volume émis par le Pinatubo (document 3), et l'activité s'est poursuivie pendant des durées géologiques. Les produits émis ont donc pu modifier l'atmosphère entière, et longtemps. Les trois dates coïncident d'ailleurs avec des limites majeures des temps géologiques (fin du Permien, du Trias, du Crétacé), marquées par des crises de la biodiversité : un indice de perturbations globales de l'environnement.

Document 2 — deux types de produits : des roches silicatées et des gaz **Ce que je vois (2a)** : le magma, issu de la fusion partielle du manteau, donne des **basaltes**, roches silicatées ; la photographie du Deccan montre un empilement de plusieurs dizaines de coulées d'une dizaine de mètres chacune (l'échelle de 30 m ne couvre qu'une petite fraction de la hauteur du versant), soit des centaines de mètres de basalte, soumis en milieu continental à l'altération. **Ce que je vois (2b)** : les gaz du Kilauea, volcan basaltique actuel pris comme analogue, sont composés de 49 % de CO_2 , 37 % de vapeur d'eau, 12 % de SO_2 et 2 % d'autres gaz. Le SO_2 forme avec le dioxygène et l'eau des gouttelettes d'acide sulfurique, les **aérosols soufrés**, qui persistent dans l'air jusqu'à leur lessivage par les précipitations et qui renvoient l'énergie solaire ; une fraction significative du CO_2 reste dans l'atmosphère. **Ce que j'en déduis** : par **principe d'actualisme**, un volcanisme actuel de même nature (effusif, basaltique) renseigne sur la composition des gaz anciens, inaccessible directement. Une éruption majeure libère donc

deux agents aux effets opposés : des aérosols soufrés qui augmentent l'albédo (refroidissement) et du CO₂, gaz à effet de serre (réchauffement) – la vapeur d'eau, elle, retombe en pluie en quelques jours et n'a pas d'effet durable. Elle laisse en outre en surface une masse énorme de basalte frais, riche en silicates calciques, exposée à l'altération : ce troisième produit agira sur le CO₂ à long terme (document 4).

Document 3 — le Pinatubo, un cas mesuré : refroidissement à court terme par les aérosols **Ce que je vois (3a) :** avant l'éruption (janvier-juin 1991), la profondeur optique des aérosols est nulle et l'anomalie de température oscille entre environ $-0,05$ et $+0,2$ °C ($+0,2$ °C au moment de l'éruption). Dès l'éruption, la profondeur optique croît jusqu'à un maximum d'environ 0,17 vers la fin de 1991, cinq mois après, puis décroît lentement : 0,16 début 1992, 0,09 début 1993, 0,03 début 1994. L'anomalie de température diminue à partir de l'été 1991 : environ $-0,25$ °C début 1992, un minimum d'environ $-0,7$ °C au milieu de 1992, un an après l'éruption, puis une remontée irrégulière : vers $-0,4$ °C fin 1992, entre $-0,2$ et $-0,45$ °C en 1993, $-0,1$ °C fin 1993. Entre la valeur au moment de l'éruption et le minimum, la baisse atteint $0,2 - (-0,7) = 0,9$ °C (valeurs lues à $\pm 0,05$ °C près ; environ 0,8 °C si l'on part de la moyenne du premier semestre 1991, proche de $+0,1$ °C). **Ce que je vois (3b) :** à Mauna Loa, la fraction du rayonnement solaire atteignant le sol, stable autour de 93 % de 1987 à juin 1991, s'effondre en quelques mois jusqu'à un minimum d'environ 84 % sur la courbe moyenne (certaines mesures descendent à 82 %) au début de 1992, puis remonte : 87 % début 1993, 90 % au milieu de 1993, 92 % en 1994, 93 % à partir de 1996. La perte au minimum est de $93 - 84 = 9$ points, soit près de 10 % de l'énergie solaire incidente ($9/93 \approx 0,1$) en moins au sol.

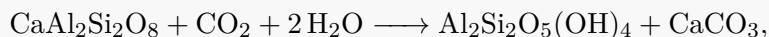
Ce que j'en déduis : les 17 millions de tonnes de SO₂ ont formé un voile d'aérosols soufrés qui a réfléchi vers l'espace une partie du rayonnement solaire : l'albédo a augmenté, l'énergie absorbée par la surface a diminué, le bilan radiatif est devenu négatif et la température moyenne du globe a baissé. La chronologie est cohérente avec ce mécanisme : hausse des aérosols, chute de la transmission, puis baisse de la température avec quelques mois de retard dus à l'inertie thermique des océans. Les aérosols étant lessivés par les précipitations, la profondeur optique retombe en deux à trois ans et l'anomalie de température n'est plus que de $-0,1$ °C fin 1993 : l'effet est transitoire, à l'échelle de **quelques années**. *Ce que le correcteur attend :* ne pas conclure qu'il « a fait moins de 0 °C » (une anomalie négative est un écart à une moyenne, pas une température) ; ne pas se contenter de la corrélation entre les courbes, mais l'appuyer sur le mécanisme physique (albédo, bilan radiatif), la mesure indépendante de la transmission (3b) et l'ordre des événements. Pour un trapp, chaque éruption a pu produire un refroidissement de ce type, répété tant que le volcanisme a duré – sans extrapolation chiffrée, le Pinatubo étant un volcan explosif, qui injecte son SO₂ plus haut (dans la stratosphère) qu'un volcanisme effusif.

Document 2b et connaissances — le CO₂ accumulé réchauffe à moyen terme

Ce que je vois : le CO₂ est le gaz le plus abondant des émissions (49 %), et une fraction significative en reste dans l'atmosphère après l'éruption. **Ce que j'en déduis :** le CO₂ est un gaz à effet de serre : il absorbe le rayonnement infrarouge émis par la surface et en renvoie une partie vers le sol. Contrairement aux aérosols, il n'est pas lessivé en quelques années ; il n'est retiré que lentement, par dissolution dans l'océan (siècles à millénaires), puis par l'altération des roches (dizaines de milliers d'années et plus, document 4). Pendant un épisode volcanique de 10^5 à 2×10^6 ans, les émissions successives s'ajoutent donc plus vite qu'elles ne sont retirées : la concentration de CO₂ augmente, l'effet de serre s'intensifie et la température moyenne s'élève. Ce réchauffement ne domine qu'une fois les aérosols retombés et persiste tant que le CO₂ excédentaire n'est pas retiré, soit de quelques dizaines à quelques milliers d'années après chaque éruption – et bien davantage à l'échelle d'un trapp entier. C'est la logique retenue pour le climat chaud du **Crétacé** : une intense activité magmatique (dorsales très actives, puis

trapps du Deccan en fin de période) y a maintenu une teneur en CO_2 élevée.

Document 4 — l'altération des silicates consomme le CO_2 à long terme **Ce que je vois :** l'altération de l'anorthite par l'eau de pluie consomme 2 CO_2 par formule d'anorthite et libère des ions Ca^{2+} et HCO_3^- ; transportés jusqu'à un bassin, ces ions précipitent en calcite, ce qui rend 1 CO_2 . **Ce que j'en déduis :** le bilan des deux étapes s'écrit



soit, pour chaque anorthite altérée, une molécule de CO_2 retirée de l'atmosphère et stockée durablement dans un carbonate, réservoir géologique du carbone pour des millions d'années. L'altération d'une province de 2 à 4 millions de km^3 de basalte frais, riche en silicates calciques, constitue donc un puits de CO_2 considérable, mais lent : la pluie doit attaquer la roche, les rivières transporter les ions, les carbonates précipiter ; il agit sur des durées de 10^4 à 10^7 ans (document 5). La concentration de CO_2 diminue, l'effet de serre s'affaiblit et la température baisse. Ce mécanisme est de plus une **rétroaction négative** : le réchauffement dû au CO_2 intensifie le cycle de l'eau et accélère les réactions d'altération, donc la consommation de CO_2 , ce qui ramène la température vers sa valeur initiale. C'est le même processus qui explique la glaciation du Carbonifère-Permien (altération de la chaîne hercynienne, jointe à l'enfouissement de matière organique dans le charbon) et le refroidissement du Cénozoïque (altération des chaînes tertiaires).

Document 5 — trois effets qui se relaient dans le temps **Ce que je vois :** les aérosols soufrés dominant de 0,1 à 10 ans après l'épisode, la variation de CO_2 de 10 à 10^4 ans, l'altération des silicates de 10^4 à 10^7 ans (limites lues sur l'axe logarithmique, aux bords estompés près). **Ce que j'en déduis :** les trois mécanismes identifiés se relaient, chacun prédominant à son échelle ; le document confirme l'ordre déduit des documents 2, 3 et 4 et chiffre les échelles de temps, résumées dans le tableau ci-dessous.

Mise en relation

Échelle de temps	Agent (documents)	Mécanisme	Effet
années (0,1 à 10 ans)	aérosols soufrés issus du SO_2 (2b, 3)	albédo accru, moins d'énergie solaire absorbée	refroidissement (Pinatubo : baisse de 0,9 °C)
décennies à 10^4 ans	CO_2 accumulé (2b, 5)	effet de serre intensifié	réchauffement
10^4 à 10^7 ans	altération des basaltes (2a, 4, 5)	CO_2 piégé dans les carbonates, effet de serre réduit	refroidissement

Une éruption volcanique majeure agit ainsi sur les deux termes du bilan radiatif, à trois échelles de temps emboîtées : le SO_2 agit d'abord, par l'albédo, dans le sens du froid (Pinatubo : baisse de 0,9 °C en un an, retour vers la référence en deux à trois ans), effet qu'un trapp actif pendant des centaines de milliers d'années répète à chaque éruption ; le CO_2 , gaz majoritaire au retrait lent, s'accumule et l'emporte ensuite dans le sens du chaud ; enfin la province basaltique elle-même, par son altération, consomme ce CO_2 et ramène le climat vers son état initial.

Conclusion Les éruptions volcaniques majeures ont donc modifié la température atmosphérique par deux leviers, l'albédo et l'effet de serre, en trois temps : refroidissement de quelques années (aérosols soufrés), réchauffement de quelques dizaines à quelques milliers d'années (CO_2 accumulé), refroidissement de plusieurs millions d'années (altération des roches silicatées, qui piège ce CO_2 dans les carbonates). Ces mécanismes naturels, reconstitués grâce au principe d'actualisme et à l'exemple du Pinatubo, sont ceux-là mêmes qui éclairent la perturbation actuelle : le CO_2 d'origine humaine est émis en un siècle, à un rythme que ni l'océan ni l'altération des roches ne peuvent compenser avant des milliers d'années.