

## **5.2 Composition sur un sujet de géologie**

SESSION DE 2008

---

**CONCOURS EXTERNE  
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS CERTIFIÉS  
ET CONCOURS D'ACCÈS À DES LISTES D'APTITUDE (CAFEP)**

**Section : SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE**

**COMPOSITION SUR UN SUJET DE GÉOLOGIE**

Durée : 5 heures

---

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.*

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.**

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

**Remarques importantes**

1 – Le sujet comprend 10 documents.

2 – Seront prises en compte dans la notation : la clarté de la présentation, la précision et la rigueur de l'analyse des documents, les illustrations personnelles et la rigueur des raisonnements.

3 – Certaines figures pourront être jointes à la copie si le candidat considère que des annotations en surcharge constituent des éléments appréciables de réponse aux questions. Il devra alors les coller sur la copie.

## **Les évolutions récentes et futures du climat**

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) fait la synthèse, depuis 2001, de ses travaux dans une série de rapports. Le sujet proposé s'appuie, entre autres, sur quelques-uns des nombreux documents scientifiques de ces rapports.

*Vous rédigerez un exposé sur les évolutions récentes et futures du climat. Cet exposé devra s'appuyer sur l'exploitation des documents proposés et devra répondre aux questions ci-dessous. Il sera structuré selon un plan organisé sur deux niveaux (I. A., I. B...) au moins.*

### **Introduction**

L'introduction de votre exposé présentera les documents ainsi que l'ordre dans lequel vous envisagez de les utiliser.

### **Analyse des documents :**

#### **Document 1 : Variations de la teneur atmosphérique de CO<sub>2</sub> sur différentes échelles de temps.**

Votre commentaire des courbes comprendra notamment :

- les techniques analytiques utilisées pour déterminer la teneur en CO<sub>2</sub> sur les différentes échelles de temps.
- des précisions sur les objets sur lesquels ces mesures ont été réalisées.

#### **Document 2 : Taille des réservoirs du cycle court du carbone et flux entre réservoirs.**

Votre exploitation comprendra notamment un schéma du cycle court du carbone précisant les différents réservoirs, leur taille et les flux qui les relient. Vous replacerez les émissions industrielles sur ce schéma.

Vous déterminerez :

- l'augmentation annuelle de la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère,
- les temps de résidence du carbone dans le réservoir « terres émergées » et dans le réservoir « océan ».

Vous mentionnerez les processus qui contrôlent les échanges de carbone.

#### **Document 3 : Simulations régionales du changement climatique.**

**Document 4 : Ecart à la moyenne du niveau marin global d'après les observations des satellites altimétriques TOPEX/Poseidon et Jason-1.**

Votre commentaire de ces données précisera notamment la technique de l'altimétrie par satellite.

**Document 5 : Fluctuations relatives de la longueur de quatre glaciers du massif du Mont-Blanc depuis 1870.**

Votre commentaire du document devra être accompagné d'un schéma d'un glacier de montagne présentant son organisation et ses éléments constitutifs, en veillant à définir les termes utilisés.

Vous préciserez les facteurs qui contrôlent les bilans de masse d'un glacier de montagne.

**Document 6 : Evolution des températures à différentes échelles de temps.**

Votre commentaire de ces courbes devra préciser :

- les méthodes utilisées pour estimer les températures,
- la signification des barres d'erreur et de la dispersion des valeurs.

**Document 7 : La courbe SPECMAP obtenue pour les derniers 800 ka.**

Votre exploitation comprendra notamment :

- une définition du rapport  $\delta^{18}\text{O}$ ,
- un schéma de principe de l'outil d'analyse qui permet de le déterminer,
- la (ou les) signification(s) de ce rapport.

Vous préciserez quels processus peuvent être à l'origine des variations de ce rapport au cours du temps.

**Document 8 : Températures moyennes dans l'atmosphère actuelle.**

Vous ferez une représentation graphique des informations contenues dans le document sur un schéma légendé et commenté de l'atmosphère terrestre. Ce schéma présentera la stratification et l'évolution de la composition de l'atmosphère avec l'altitude.

En une page maximum, vous expliquerez ce qu'est l'effet de serre, ses principaux acteurs et leurs localisations dans l'atmosphère.

**Document 9 : Simulations globales du changement climatique.**

Vous préciserez la sensibilité des modèles climatiques aux différents scénarios d'émission des gaz mentionnés, grâce à une analyse méthodique des entrées et des sorties des modèles présentés.

Des différentes émissions prises en compte, laquelle (ou lesquelles) vous semble(nt)-t-elle(s) cruciale(s) ?

Quels phénomènes sont responsables de la hausse du niveau des mers envisagée ?

Pour illustrer ce point de manière quantitative, vous évalueriez la hausse du niveau moyen des mers que provoquerait la fonte de 1% des inlandsis. Les valeurs suivantes pourront être utilisées :

Surface totale de la Terre :  $5,1 \cdot 10^8 \text{ km}^2$

Volume total des inlandsis :  $38 \cdot 10^6 \text{ km}^3$

Densité de la glace : 0,9

**Document 10 : Relevés des changements dans la composition atmosphérique.**

Votre exploitation comprendra notamment la définition du forçage radiatif, en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

**Conclusion**

Une conclusion d'une page maximum est attendue. Elle récapitulera les faits et arguments utilisés dans les études des évolutions du climat récent, et les prévisions de ses évolutions à venir.

## Légendes des documents :

**Document 1** : Variations de la teneur atmosphérique de CO<sub>2</sub> sur différentes échelles de temps. (a) Mesures directes du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. (b) Teneur en CO<sub>2</sub> des carottes glaciaires antarctiques de Vostok. (c) Teneur en CO<sub>2</sub> des carottes glaciaires antarctiques du Taylor Dome. (d) et (e) Teneurs en CO<sub>2</sub> déduites géochimiquement des roches sédimentaires (d'après Rapport du Groupe de Travail I du GIEC, IPCC, Summary for Policymakers, 2007).

**Document 2.** Taille des réservoirs du cycle court du carbone et flux entre ces derniers. Les valeurs sont exprimées en Petagrammes (10<sup>15</sup> g) de carbone (d'après Houghton, 2003).

**Document 3** : Simulations régionales du changement climatique (d'après le Rapport du Groupe de Travail I du GIEC, Christensen *et al.*, 2007)

**3A** : Changements des cycles annuels de température et de précipitations pour l'Arctique (valeurs moyennes pour les latitudes supérieures à 60°N). Différences entre les valeurs moyennes calculées pour la période 2080-2099 pour le scénario A1B et les valeurs moyennes pour la période 1980-1999. Trait noir : médiane des valeurs des 21 modèles utilisés, domaine hachuré : dispersion des résultats des différents modèles.

**3B** : Changements des températures et des précipitations annuelles sur l'Afrique. Différences entre les valeurs moyennes calculées pour la période 2080-2099 pour le scénario A1B et les valeurs moyennes pour la période 1980-1999.

**Document 4** : Ecart à la moyenne du niveau marin global d'après les observations des satellites altimétriques TOPEX/Poseidon et Jason-1. Les points (ronds blancs pour TOPEX/Poseidon, carrés noirs pour Jason-1) correspondent aux estimations brutes tous les 10 jours. La courbe grise représente un lissage sur 60 jours. La droite noire illustre la corrélation linéaire des données. Le niveau de référence est celui de 1997 (Nerem *et al.*, 2006)

**Document 5** : Variations (en m) de la longueur de quatre glaciers du massif du Mont-Blanc depuis 1870. Les distances sont mesurées entre le front du glacier et un point fixe situé en amont du front actuel du glacier (Francou et Vincent, 2007). Une augmentation de la distance mesurée indique un allongement du glacier tandis qu'une diminution de cette distance indique un raccourcissement du glacier.

**Document 6** : Evolution des températures à différentes échelles de temps (d'après le Rapport du Groupe de Travail I du GIEC, IPCC, 2007: Summary for Policymakers).

**6A** : Ecarts à la moyenne relevés dans les températures annuelles combinées de l'air à la surface des terres émergées et à la surface de la mer de 1861 à 2000. Les barres représentent les incertitudes sur les valeurs. La courbe noire donne une tendance lissée sur plusieurs années.

**6B** : Reconstitutions des températures moyennes de l'hémisphère Nord à partir des cercles de croissance des arbres, des coraux, de carottes glaciaires, de relevés historiques et de données instrumentales pour la période 1000-1999.

La courbe noire représente une tendance lissée des valeurs brutes, la zone hachurée représente la dispersion des valeurs mesurées.

**Document 7 :** La courbe SPECMAP obtenue pour les derniers 800 ka par la synthèse des variations normalisées du  $\delta^{18}\text{O}$  de cinq carottes de sédiments océaniques (Daniel *et al.*, 2000).

**Document 8 :** Températures moyennes dans l'atmosphère actuelle. Les valeurs de température sont mesurées à différentes altitudes dans l'atmosphère actuelle.

**Document 9 :** Simulations globales du changement climatique (d'après le Rapport du Groupe de Travail I du GIEC, Christensen *et al.*, 2007)

**9A :** Emissions anthropiques de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$  pour six des scénarios prospectifs envisagés par le GIEC.

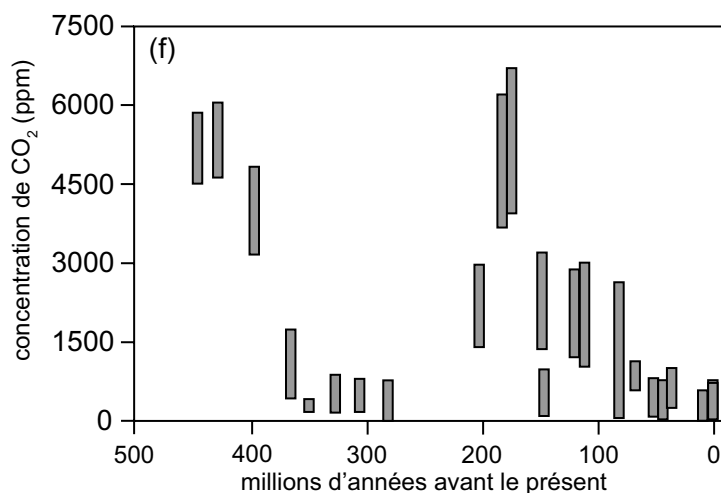
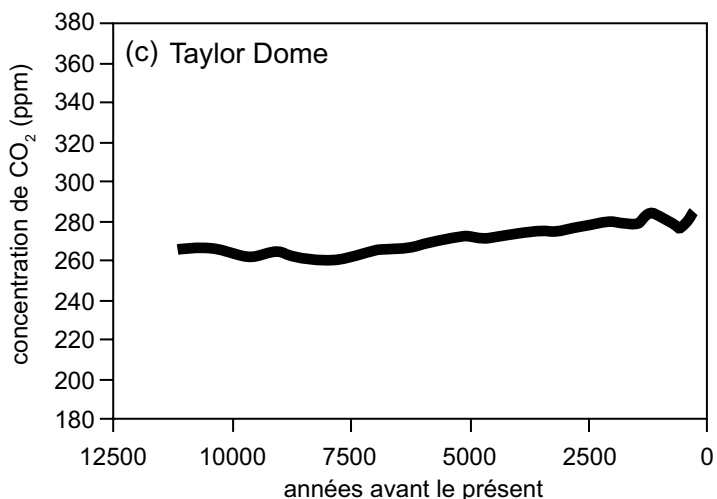
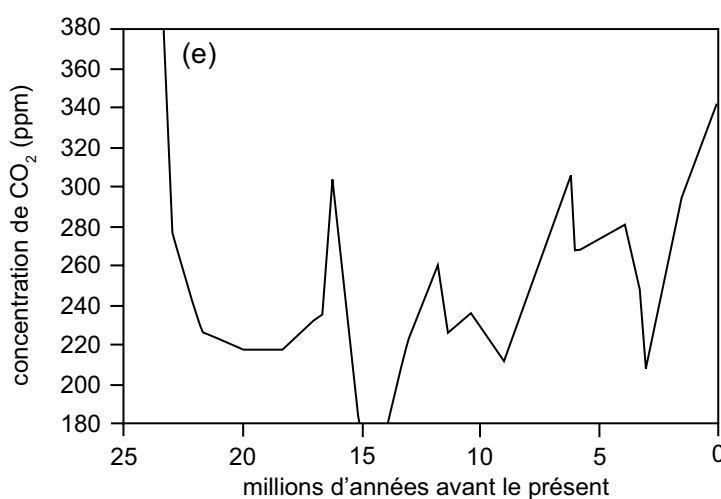
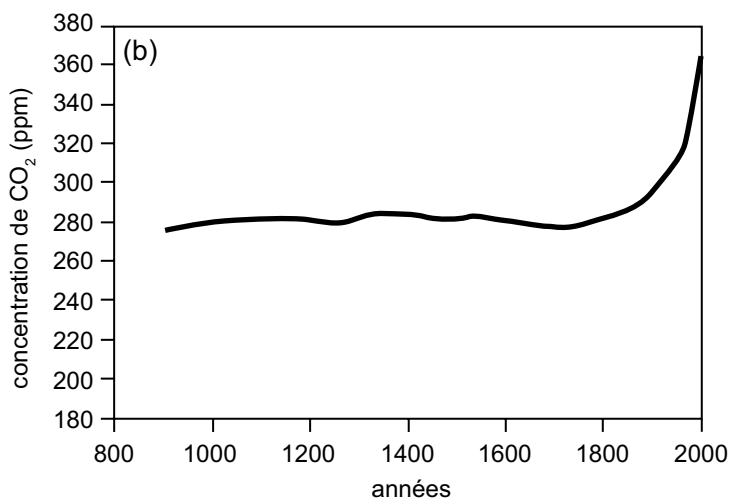
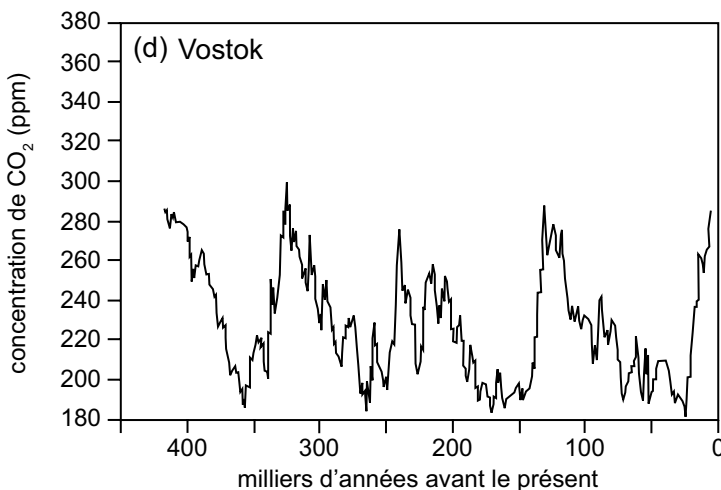
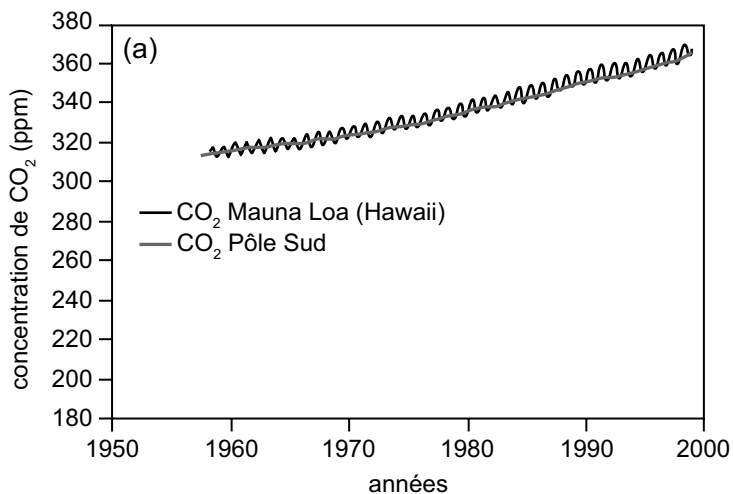
**9B :** Résultats d'un modèle simple. En haut : projections de la température moyenne mondiale pour les six scénarios présentés en document 9A. En bas : projections du niveau moyen des mers pour les mêmes scénarios. Les zones hachurées représentent l'enveloppe des résultats obtenus par plusieurs modèles pour tous les scénarios envisagés par le GIEC.

**Document 10 :** Relevés des changements dans la composition atmosphérique (d'après le Rapport du Groupe de Travail I du GIEC, *IPCC, 2007: Summary for Policymakers*). Teneurs atmosphériques en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  au cours des 1000 dernières années et forçages radiatifs équivalents. Les données tirées des carottes glaciaires et des névés à plusieurs emplacements en Antarctique et au Groenland sont complétées par les échantillons atmosphériques prélevés directement depuis des dizaines d'années (trait noir pour le  $\text{CO}_2$ ; ces données sont incorporées à la courbe en trait fin représentant la moyenne mondiale annuelle pour le  $\text{CH}_4$ ).

### Source des documents

- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. et Whetton, P. (2007). Regional Climate Projections. *In* : Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. et Miller, H.L. (éds.), *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Daniel, J.-Y., Brahic, A., Hoffert, M., Schaaf, A. et Tardy, M. (2000). – *Sciences de la Terre et de l'univers*. Vuibert, Paris, 634 p.
- Francou, B. et Vincent, C. (2007). – *Les glaciers à l'épreuve du climat*. IRD Éditions et Belin, Paris, 274 p.
- Houghton, R.A. (2003). – The contemporary carbon cycle. *In* : Holland, H.D. et Turekian, K.K. (éds.), *Treatise on Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, 8, p. 473-513.
- IPCC (2007). – Summary for Policymakers. *In* : Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. et Miller, H.L. (éds.), *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Nerem, R.S., Leuliette, E. et Cazenave, A. (2006). – Present-day sea-level change : A review. *C. R. Geoscience*, 338, p. 1077-1083.





# Document 1

---

***Réservoirs de carbone (Pg C) :***

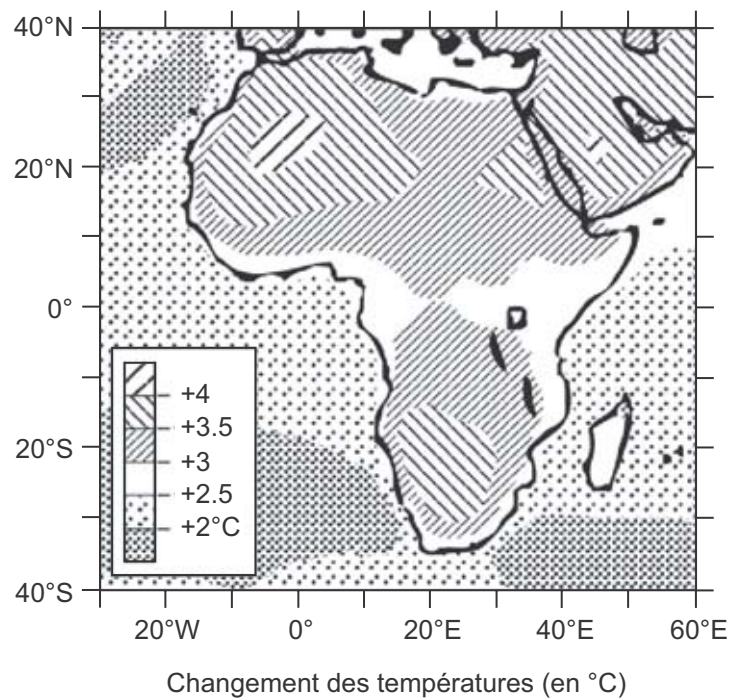
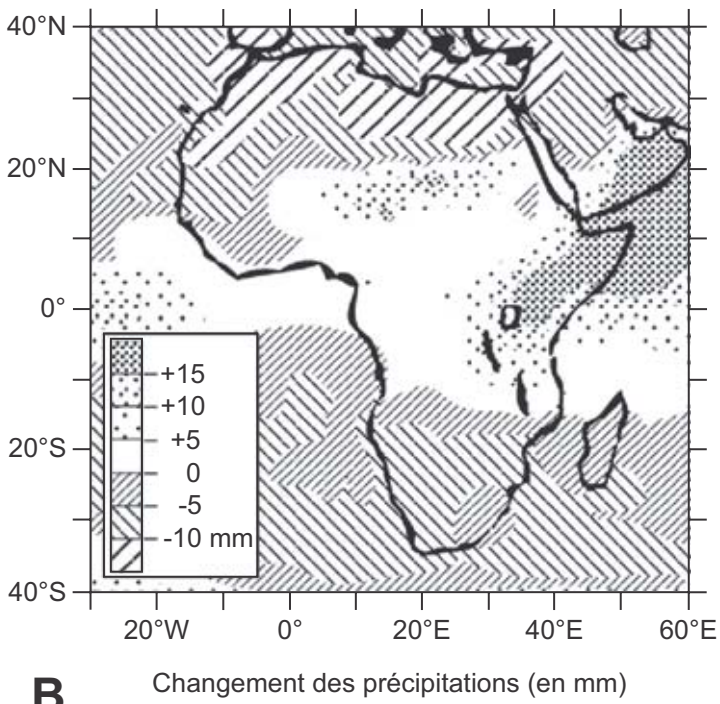
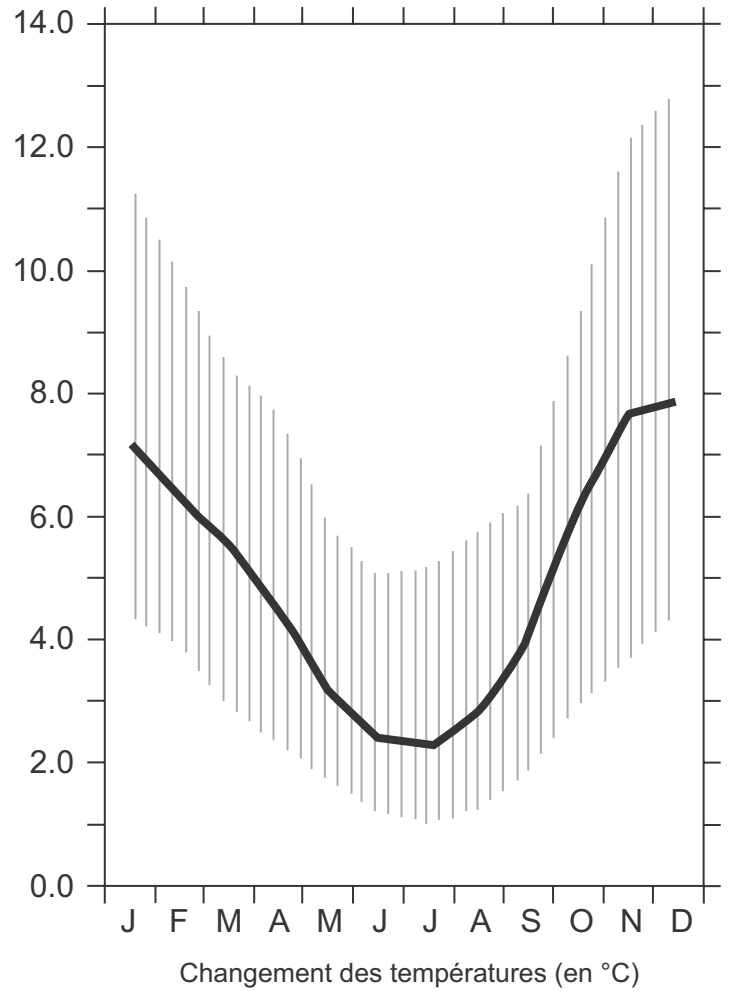
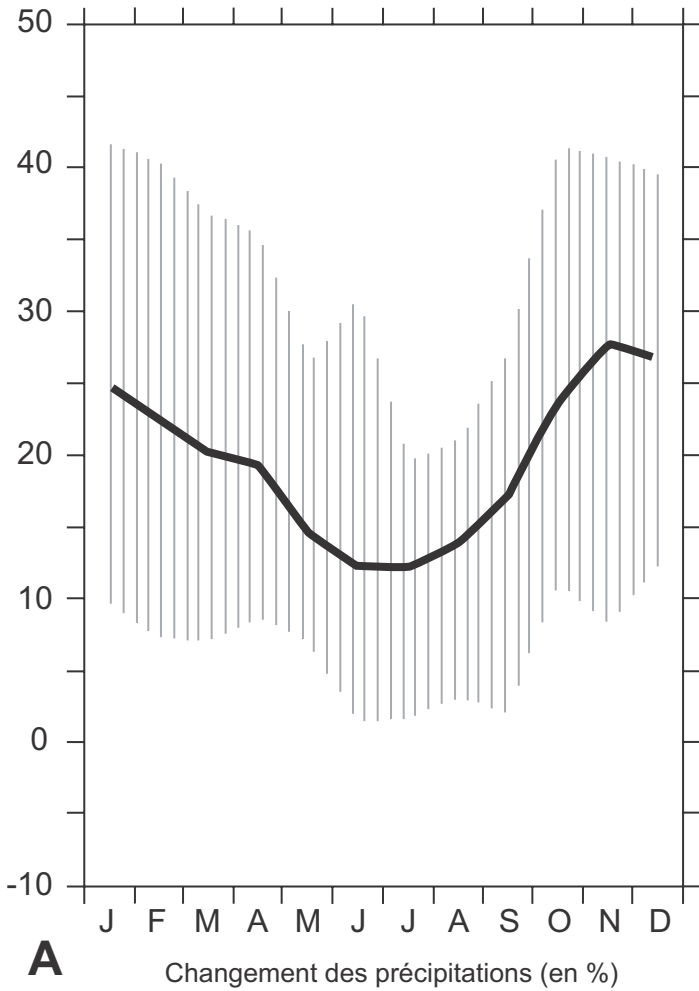
Atmosphère :	780
Terres émergées :	2 000
végétation	500
sols	1 500
Océan :	39 000
eaux de surface	1000
eaux profondes	38 000
Réserves de combustibles fossiles :	10 000

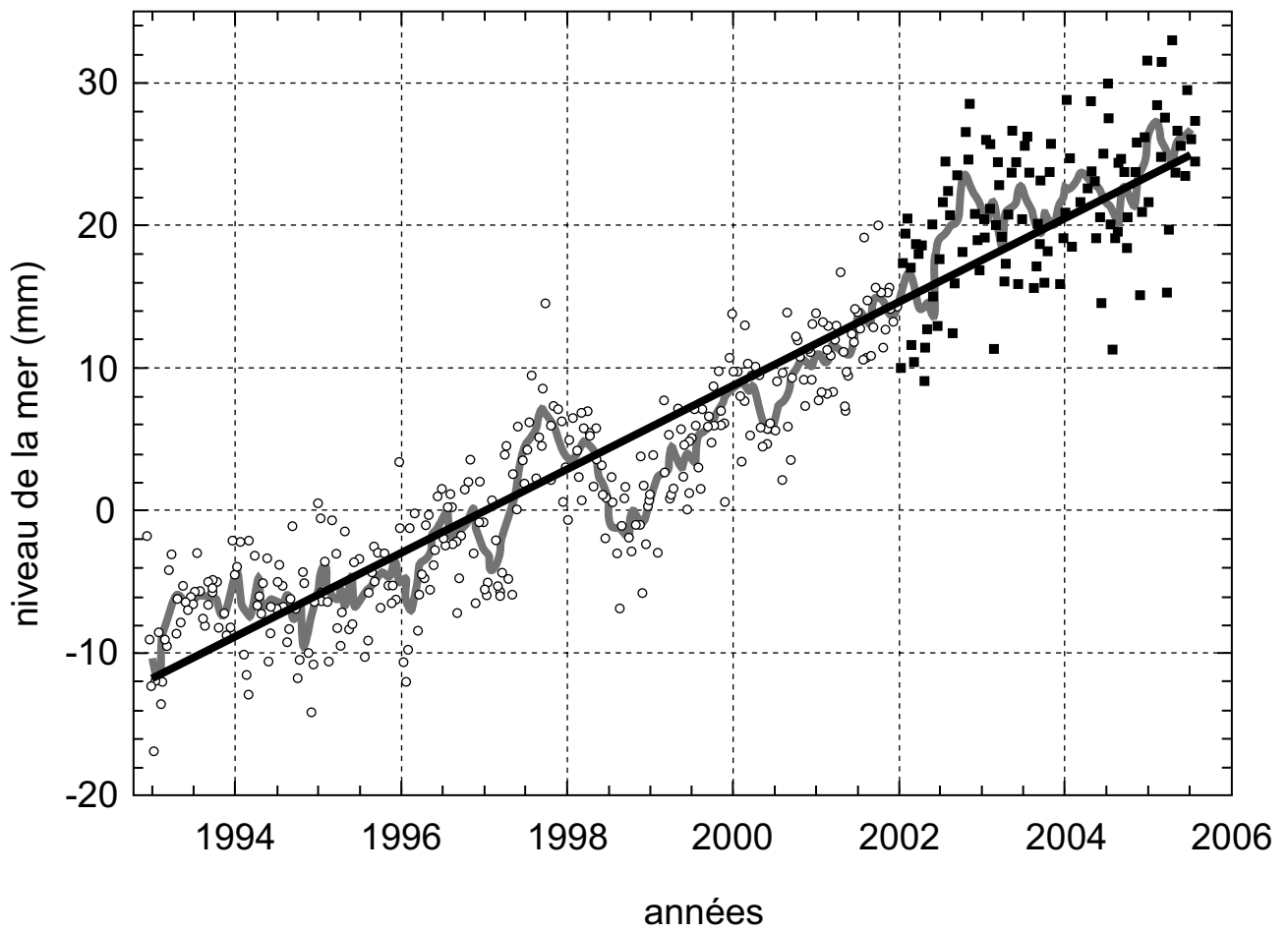
***Flux annuels (Pg C . an<sup>-1</sup>) :***

émissions industrielles	7
atmosphère → océan	90
océan → atmosphère	88
atmosphère → terres émergées	120
terres émergées → atmosphère	118

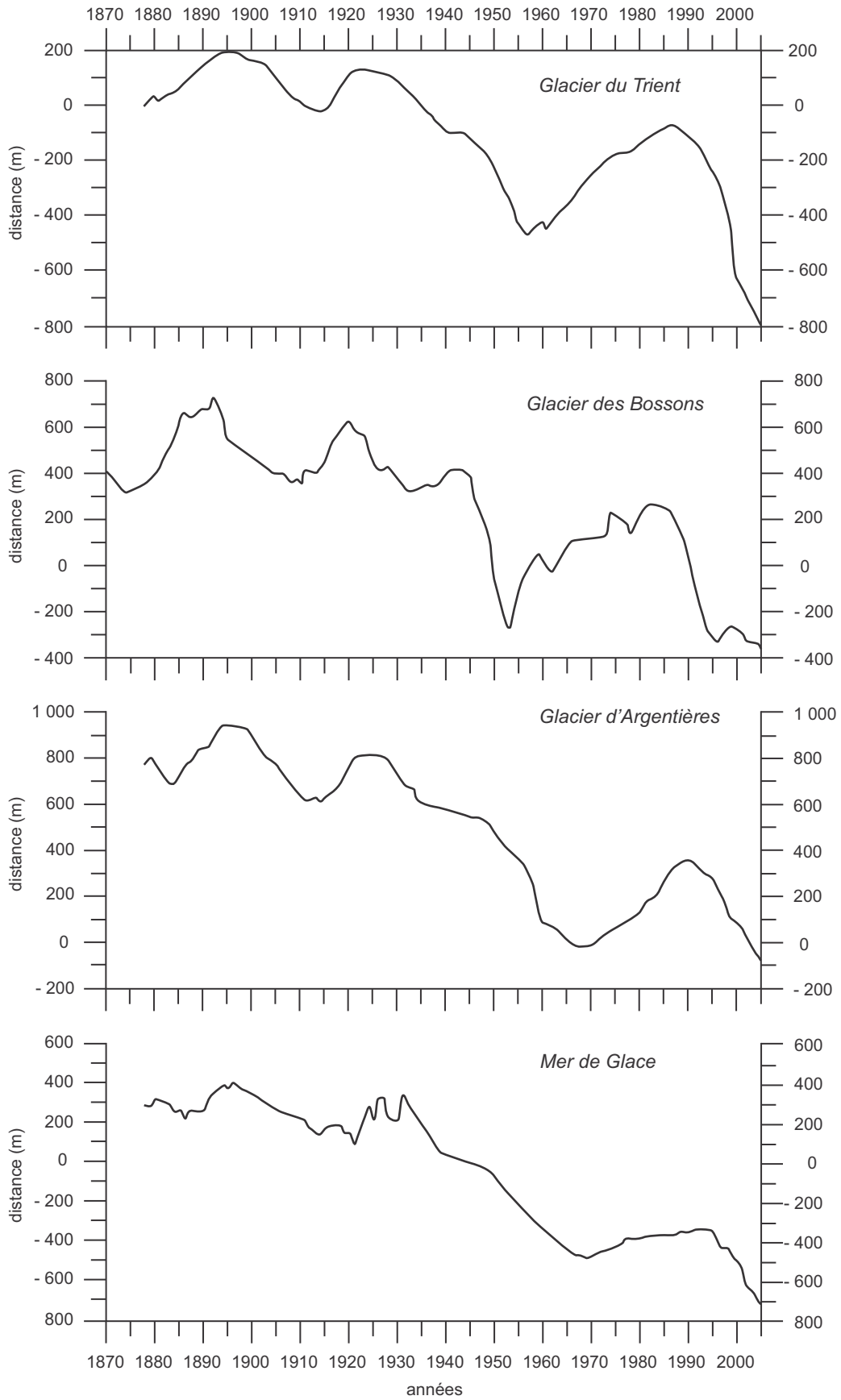
---

**Document 2**

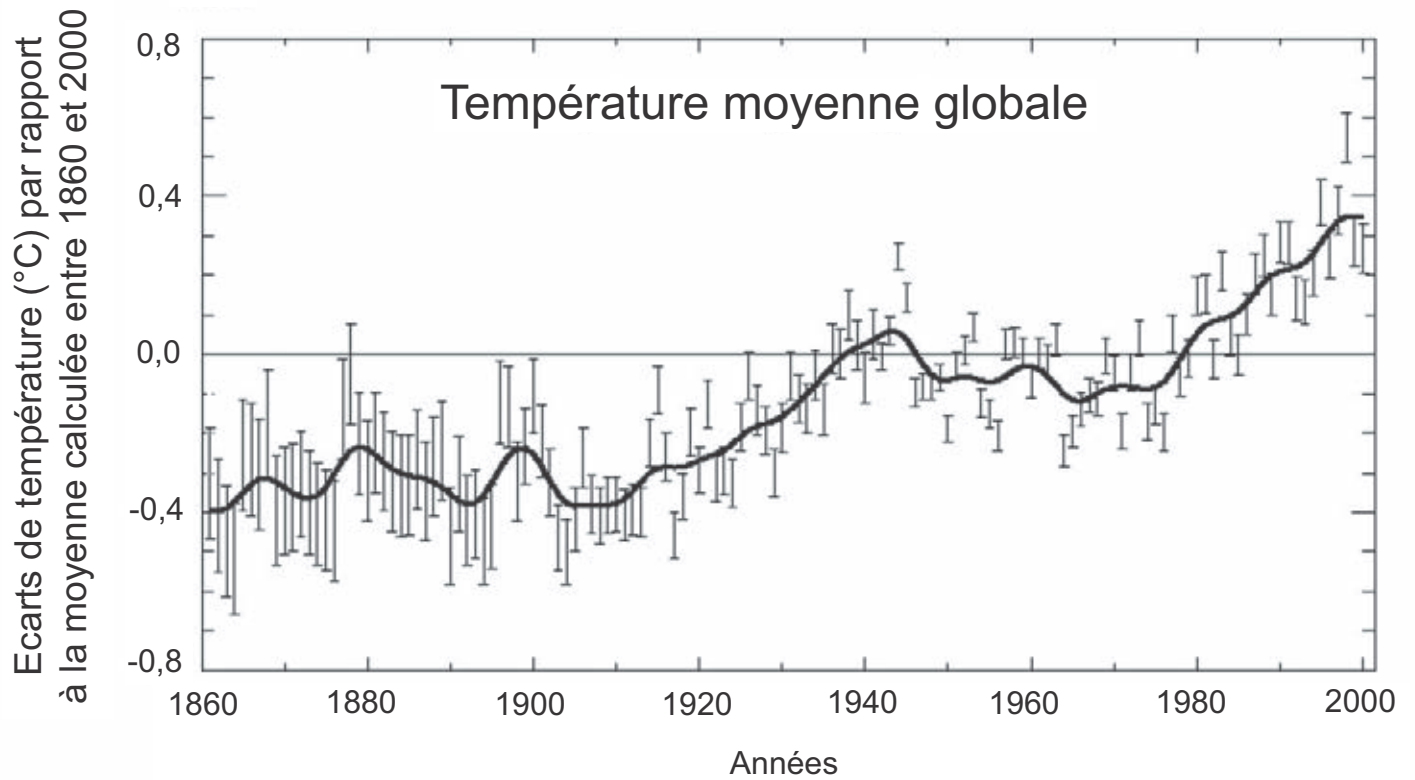
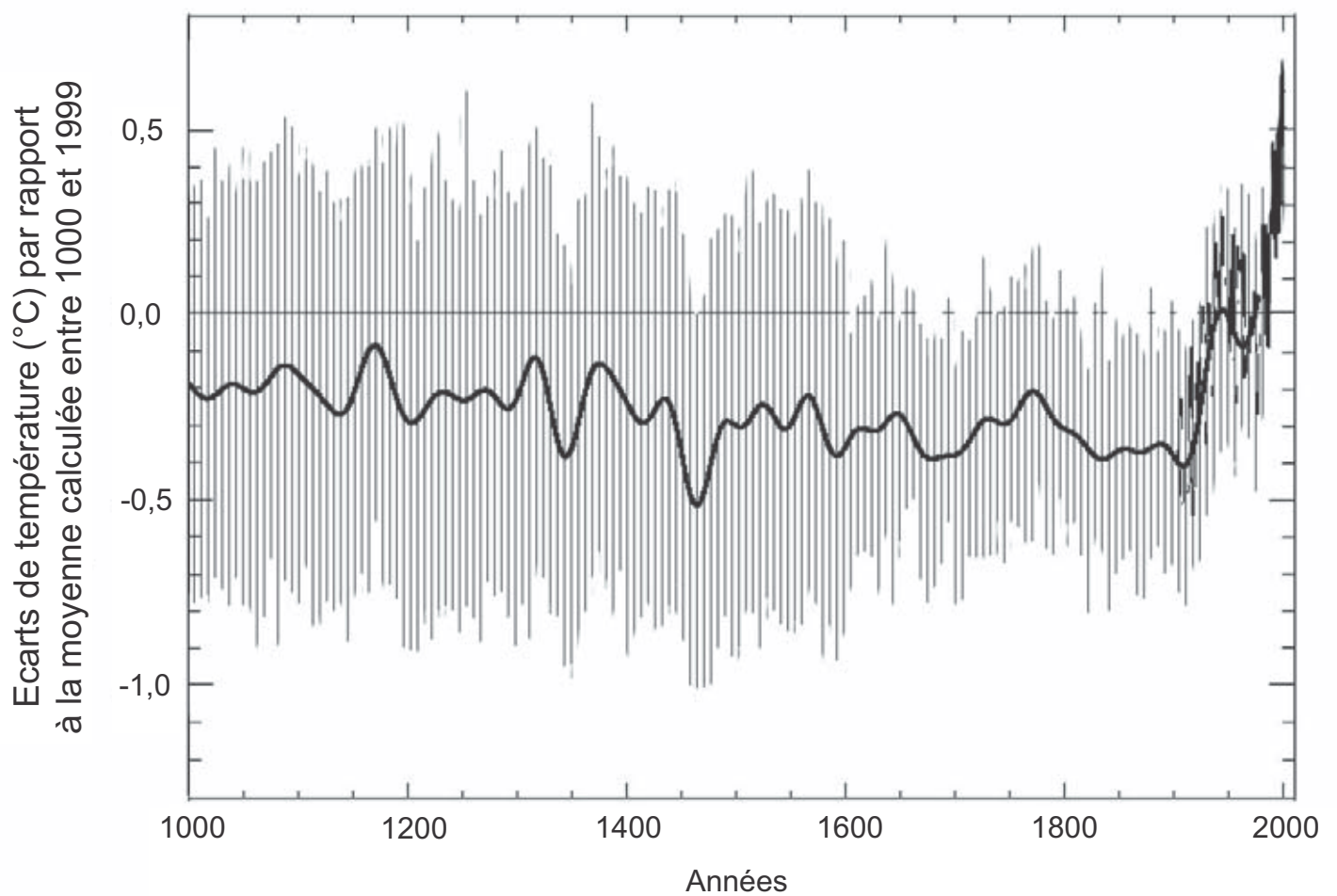


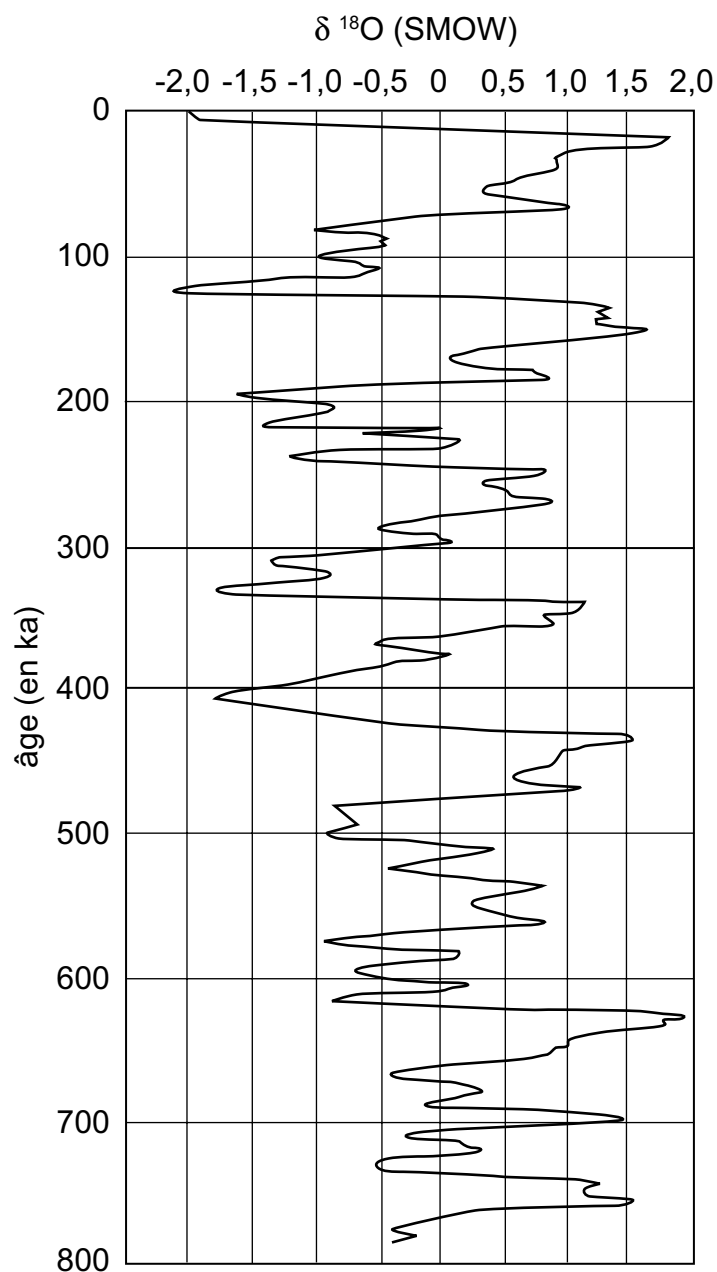


## Document 4



**Document 5**

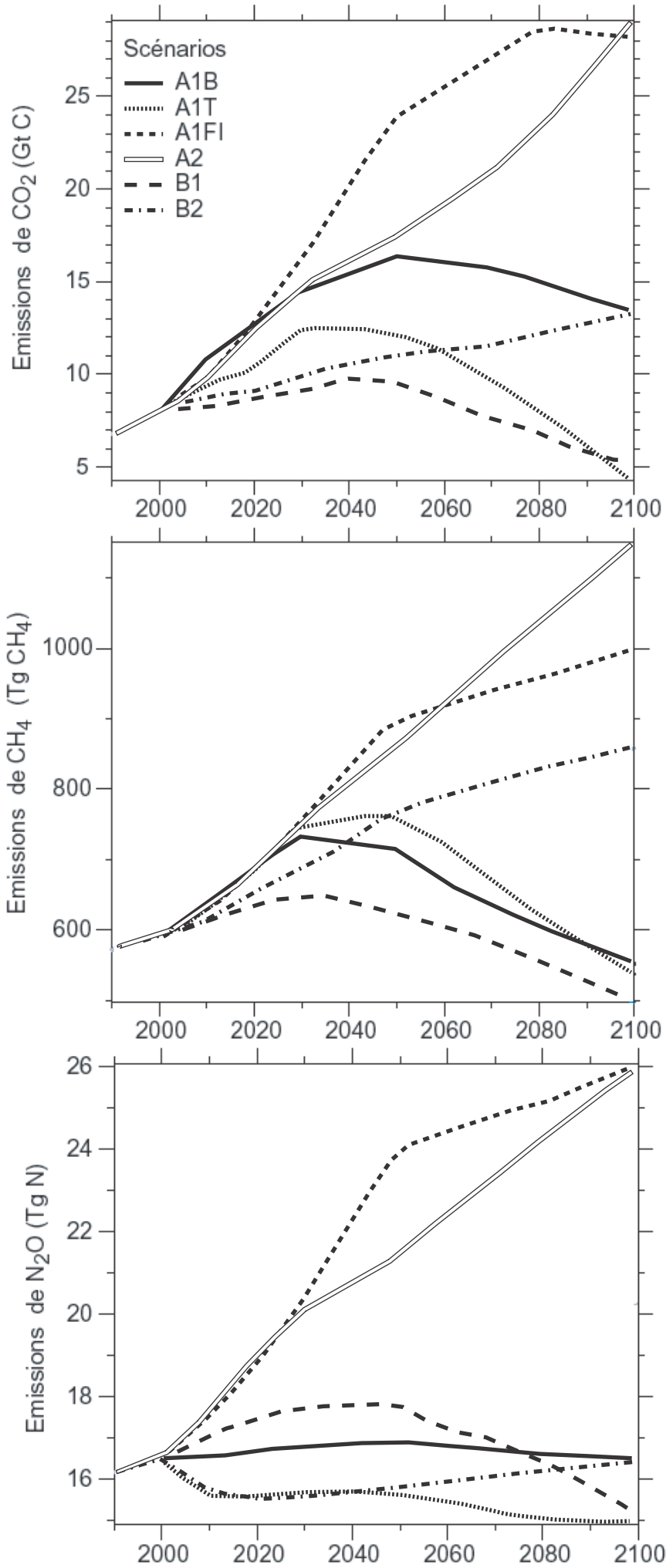
**6A****6B**



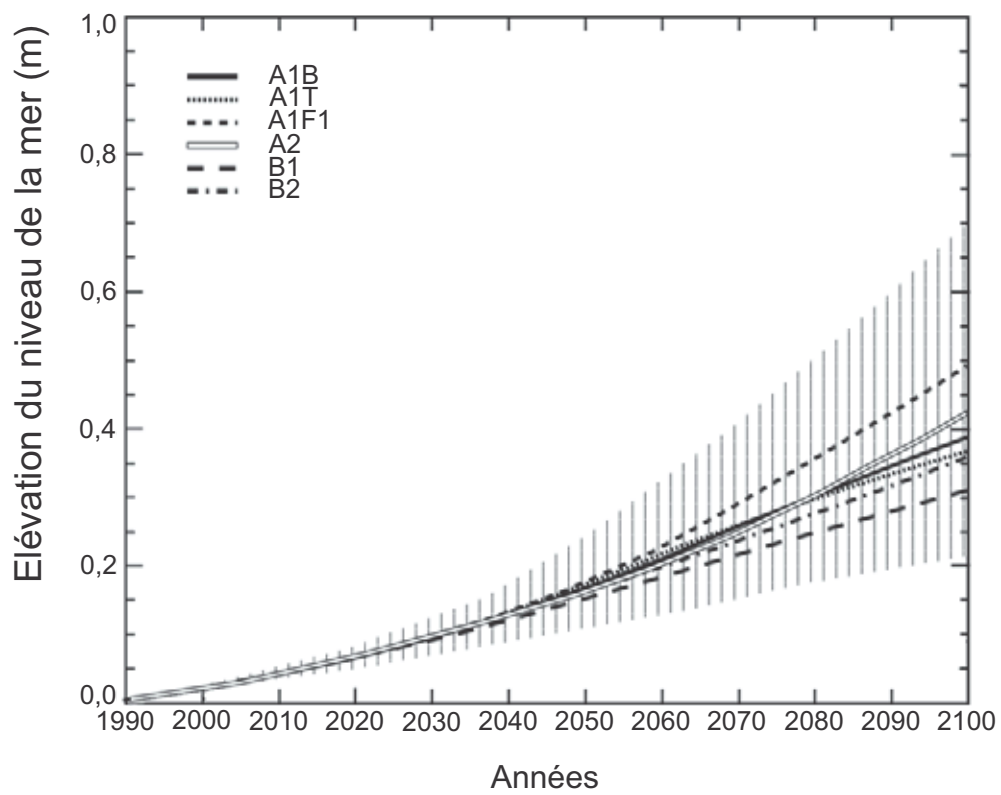
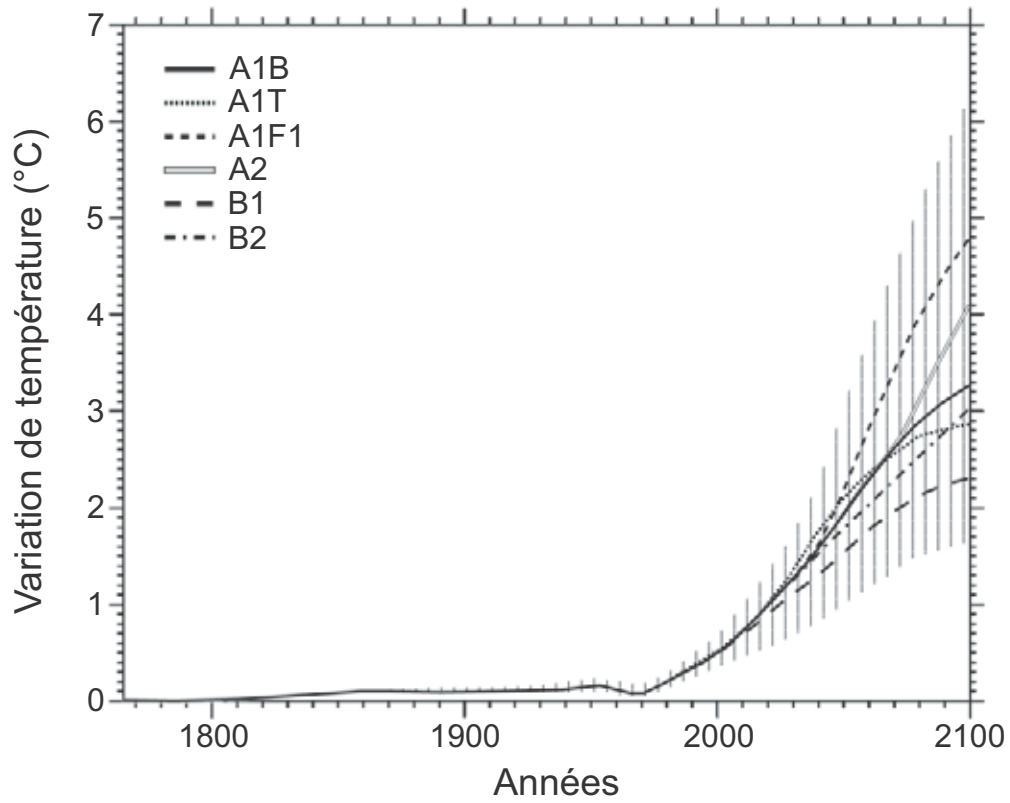
## Document 7

altitude (km)	5	11	15	20	33	49	59	74	87	99	115	133
température (°C)	-11	-37	-43	-42	-24	-4	-17	-64	-98	-87	-18	51

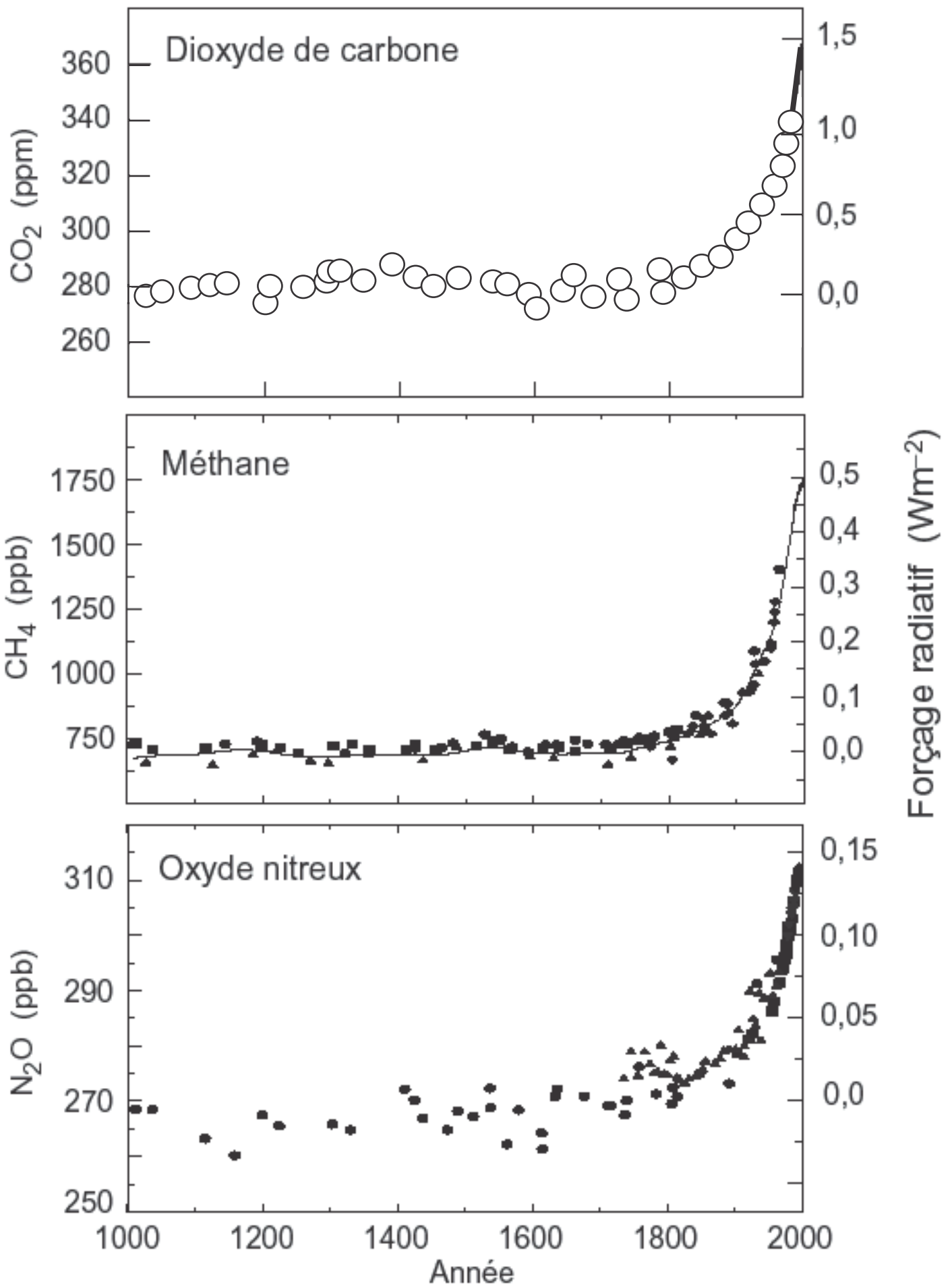
## Document 8







Concentration atmosphérique



*Le sujet proposé était centré sur les évolutions récentes et futures du climat et basé sur les données présentées et les modèles proposés par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC). Il était demandé aux candidats de construire une composition sur cette thématique en se basant sur l'exploitation de 10 documents. Ces derniers présentaient des données sur l'évolution de différents paramètres (températures, teneurs atmosphériques en CO<sub>2</sub>, évolution actuelle du niveau de la mer, modèles pour le siècle futur...). Les candidats devaient articuler leur devoir selon une démarche scientifique logique autour de trois grands thèmes : (1) l'analyse des données réelles, (2) la discussion des mécanismes responsables des changements climatiques et (3) l'analyse critique des modèles proposés pour l'évolution future du climat.*

*Le corrigé présenté ici est une solution parmi d'autres. Même si le temps imparti ne permettait sans doute pas de couvrir tout le sujet de façon aussi poussée, la démarche des candidats devait s'en rapprocher. Les mots ou définitions soulignés étaient expressément attendus, les passages en italiques n'étaient pas exigés.*

*Un cinquième des points était dévolu à l'introduction et à la conclusion, au choix du plan et des illustrations non explicitement demandées dans les questions, ainsi qu'à l'orthographe et à la syntaxe. Sur ce dernier point, nombre de copies montrent un niveau de langage incompatible avec la fonction d'enseignant. Au-delà des fautes d'orthographe et de grammaire qu'une relecture attentive aurait dû éliminer, certaines fautes dénotent une méconnaissance grave des termes mêmes du sujet. A ce titre, carbone ne prend qu'un n et atmosphère ne prend qu'un h ... gaz ne prend pas de s au pluriel et une glacière n'est que rarement un objet scientifique ...*

## **Introduction**

*L'écriture d'une introduction reste un exercice extrêmement difficile pour les candidats au CAPES. Beaucoup débutent leur exposé par des considérations dignes d'échanges de comptoir sur le temps ou les saisons qui se dérèglent. Outre la confusion flagrante entre météorologie et climatologie que de telles maladresses révèlent, elles n'apportent rien au propos. Une idée simple était de partir d'une définition du climat, idée partagée par un nombre non négligeable de candidats.*

*Il était demandé aux candidats de préciser l'ordre dans lequel ils envisageaient d'utiliser les documents. De ce point de vue, si la mention du contenu de chacun des documents était utile, la restitution intégrale des légendes n'était pas attendue et constituait même une perte de temps.*

Les **documents 4, 5 et 6** sont les enregistrements des variations de paramètres qui permettent d'apprécier directement ou indirectement le changement récent du climat global. Ils permettent de mettre en évidence ce changement et de le comparer en amplitude et en vitesse aux variabilités naturelles observées sur des périodes récentes ou plus longues (**document 7 et 1**). Les documents **1 et 10** présentent les variations des concentrations atmosphériques de certains gaz à effet de serre. La compréhension des mécanismes de contrôle et d'évolution du climat nécessite de préciser les liens qui existent entre ces mécanismes et les concentrations des gaz à effet de serre. Pour cela le **document 10**, avec la notion de forçage radiatif, ainsi que les documents **8 et 2** permettent d'aborder les problématiques de l'effet de serre et de la régulation du climat par le cycle du carbone. Une fois ces mécanismes présentés on peut finalement s'attacher à leur prise en compte dans des modèles prédictifs globaux (**document 9**) ou régionaux (**document 3**).

Plusieurs permutations des documents étaient possibles, mais certaines combinaisons révélèrent des mécompréhensions quant à leur nature ou une démarche peu logique. Beaucoup de copies commençaient par exemple par le document 1 sans que le plan ne justifie ce choix. De nombreux candidats ont traité le document 3 avant le document 9, alors que le premier s'appuie sur un des scénarios du second.

## 1. Evolution actuelle des constantes climatiques.

### 1.1. Les témoins géologiques d'un changement climatique.

#### 1.1.1. Le recul actuel des glaciers alpins.

Un glacier est une masse de glace d'ampleur hectométrique ou plus, permanente à l'échelle humaine, et qui se déforme (écoulement) sous son propre poids. Suivant les cas, les glaciers ont une forme en coupole (calotte polaire, cap glaciaire cantonné au sommet des montagnes), forment des langues glaciaires de versant, des amas suspendus à une paroi inclinée (glacier suspendu), ou se développent dans des vallées (glacier de vallée, le type « classique » des grands glaciers de montagne ; **Figure 1**) qui acquièrent alors un profil en auge au cours du temps du fait de l'érosion et des dépôts glaciaires. Dans le cas le plus souvent décrit, les glaciers prennent naissance dans des cirques par l'accumulation de la neige qui s'accroche aux versants (névé). La neige se transforme en glace sous l'effet du tassement résultant des précipitations neigeuses récurrentes au niveau du cirque. Au-delà de la rimaye (zone de crevasses), la masse de glace s'écoule dans la vallée sous l'effet de son propre poids pour former une langue de glace. La masse de glace, proche de son point de fusion, se déforme de façon ductile<sup>1</sup>. L'interface entre la semelle glaciaire et le substratum sert de drain à l'écoulement de l'eau qui finit par sourdre à l'extrémité de la langue glaciaire. Des lacs sous-glaciaires peuvent également se former. L'alternance de zones basales de dégel et de regel conduit à l'écoulement irrégulier de la glace.

Les glaciers présentent une morphologie particulière (**Figure 1**). En aval de la rimaye, la langue glaciaire est une zone d'accumulation où l'alimentation du glacier, amorcée dans le cirque, se poursuit par les précipitations neigeuses d'altitude, par les apports du givre en surface et par le vent. L'existence de seuils au niveau du substratum conduit à une déformation cassante de la glace et au développement de crevasses, voire de séracs (blocs de glace désolidarisés) dans les zones de plus forte pente. L'aval de la langue glaciaire est une zone d'ablation où la fonte est favorisée par des températures plus clémentes et le vent.

Les glaciers ont un fort pouvoir érosif qui conduit à la formation de moraines (masses détritiques transportées par le glacier). Elles se développent à la base (moraine de fond), sur les bords (moraine latérale), au front de la langue glaciaire (moraine frontale), ou encore au point de contact avec un glacier juxtaposé (moraine centrale). Un système de drainage évacue les eaux de fonte<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> La masse de glace, proche de son point de fusion, se déforme par un mécanisme de fluage. Dès lors, la moindre augmentation de pression à la semelle en réponse à la présence d'une protubérance du substratum favorise la fusion (dégel) de la glace et facilite l'écoulement. À l'inverse, la langue glaciaire subit une décompression à l'aplomb des dépressions ; elle s'accompagne d'un regel de la semelle glaciaire.

<sup>2</sup> Dans la vallée, au-delà de la zone de fonte frontale du glacier, un système fluvio-glaciaire se développe au niveau d'une plaine d'inondation (= sandur). Il est alimenté par les eaux de fonte et, parfois, par les débâcles lors de la vidange de lacs sous-glaciaires (jökulhlaups).

Il est conseillé de numéroter les figures, ce qui simplifie la lecture des copies et permet des renvois à des figures éloignées. De trop nombreux candidats pratiquent le schéma « timbre-poste » ou, plus grave pour de futurs enseignants de SVT, omettent de les légender, de les orienter et d'en préciser l'échelle.

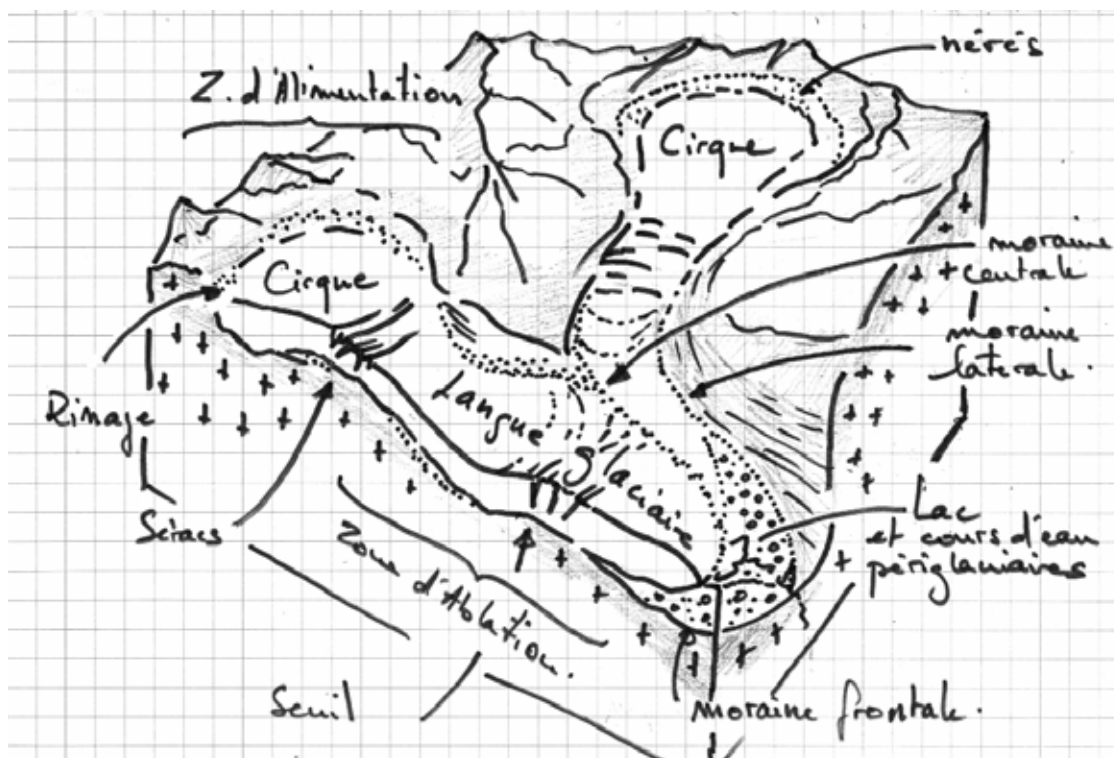


Figure 1 : Schéma de la morphologie d'un glacier.  
Une langue glaciaire peut mesurer plusieurs dizaines de kilomètres.

Le **document 5** révèle que la longueur des glaciers alpins (massif du Mont Blanc) varie au cours du temps (période 1870-2005). Les augmentations marquent les avancées, et les diminutions les reculs des glaciers. Ces variations traduisent l'évolution du bilan de masse des glaciers. Il s'exprime en  $m^3$  ou en tonnes de glace, et peut être positif ou négatif. Les facteurs de contrôle du bilan de masse sont principalement d'origine climatique (variation des températures et de l'intensité des précipitations neigeuses). Le bilan de masse des glaciers peut être utilisé comme marqueur des variations climatiques.

La tendance générale d'évolution se traduit par un recul des glaciers, même si le glacier des Bossons montre une courte crue entre 1911 et 1920, mais l'amplitude et la durée des phases de crue (particulièrement marquée pour la période 1970-1990) et de recul varient selon les cas. Depuis 1870, le recul absolu est d'environ 800 m pour chacun des glaciers du massif du Mont-Blanc, soit une décroissance de  $6 \text{ m.an}^{-1}$  en moyenne.

Dans l'ensemble, les maxima et les minima coïncident pour les quatre glaciers ; leur évolution est similaire. Des décalages dans le temps existent cependant. En effet, le glacier des Bossons réagit plus vite que les autres ; son temps de réponse est plus court que pour les autres glaciers. De plus, amplitude et durée des phases d'évolution varient d'un glacier à l'autre. Ces phénomènes suggèrent l'existence de conditions locales qui, outre le climat général de la région, influencent l'évolution des langues glaciaires.

*Les commentaires de courbes, nombreux dans les attendus de ce devoir, n'étaient rétribués dans le barème que s'ils étaient rigoureux et quantitatifs. De longues pages de considérations approximatives : « les glaciers avancent un peu puis reculent beaucoup ... » ne rapportaient pas de points. Un commentaire scientifique, chiffré était attendu. Une première étape discriminante fut la lecture des axes des documents. Un nombre non négligeable de candidats ont disserté sur des variations du niveau de la mer en mètres ou des recul des glaciers en millimètres. Ce type de confusion est sans doute symptomatique d'une méconnaissance des ordres de grandeur des phénomènes envisagés.*

### **1.1.2. Les variations actuelles du niveau de la mer.**

Les satellites permettent de déterminer les altitudes des continents et des océans et leurs variations (topographie dynamique), ainsi que les anomalies gravimétriques (dérivée première du champ de gravité) par rapport au géoïde et à l'ellipsoïde de référence. *Les orbites des satellites sont connues depuis la Terre avec une précision inférieure au cm.* La technique de mesure des altitudes est basée sur l'effet Doppler (variation de la fréquence des ondes en fonction du déplacement de la source) des ondes radar à haute fréquence qui se réfléchissent à la surface (cas du satellite TOPEX-Poseidon par exemple qui mesure l'altitude instantanée de la surface des océans). Les données altimétriques globales sont obtenues avec une précision qui permet de déterminer des variations moyennes de l'ordre du millimètre par an. Les valeurs moyennes présentées sur le **document 4** sont obtenues à la suite du *lissage des données brutes*. Les mesures brutes sont obtenues tous les dix jours et lissées dans un premier temps sur 60 jours (courbe en grisé). Ce traitement du signal permet de s'affranchir des effets des marées et de la houle. Cependant cette courbe des données lissées présente des oscillations à caractère sinusoïdal<sup>3</sup> au cours du temps, d'une amplitude de 5 mm avec un maximum en octobre. Les données reportées sur le document 4 permettent de déterminer une augmentation moyenne de la surface des océans de l'ordre de 3 mm.an<sup>-1</sup> pour la période 1993-2005 à partir de la pente de la droite de régression linéaire des données. Cependant cette augmentation mériterait d'être comparée à des valeurs plus anciennes pour mettre en évidence une accélération de cette hausse du niveau marin.

*Si de nombreux candidats ont pensé à illustrer cette explication d'un schéma de principe de l'altimétrie satellitaire, nombre de ces schémas relevaient plus du « cartoon » que du schéma scientifique. Les ondes radar utilisées en altimétrie satellitaire ne pénètrent pas dans l'eau ... on ne mesure donc pas la hauteur du niveau des mers en mesurant l'épaisseur de la tranche d'eau.*

*Parmi les maladresses fréquentes, l'empressement à faire le lien entre la hausse du niveau moyen des mers et la fonte des glaciers alpins menait à des conclusions malheureuses. Les tentatives d'explication de ce lien de cause à effet par des schémas représentant des « modèles » plus ou moins sophistiqués où l'on faisait fondre des glaçons dans un cristallin, étaient évidemment déconseillées !*

### **1.1.3. L'augmentation des températures.**

Le **document 6A** montre les écarts à la moyenne des températures globales directement mesurés par des thermomètres. Les barres d'erreurs représentent les incertitudes

---

<sup>3</sup> Il s'agit là de la signature des saisons océaniques. Les effets du rythme des saisons sur l'océan se traduisent par une dilatation thermique des eaux de surface, des apports d'eaux douces (fonte des neiges, condensation des eaux atmosphériques et ruissellement des eaux souterraines) et des variations de l'évaporation et des précipitations sur l'océan, qui sont autant de facteurs de modification cyclique de la densité des eaux de surface.

dues aux thermomètres, qui semblent de plus en plus précis. La courbe lissée du **document 6A** montre une augmentation de 0,8 °C sur les 140 dernières années. Des oscillations de 0,2 °C d'amplitude sont visibles sur des périodes de 10 ans environ (variabilité décennale), une période de refroidissement peut être reconnue entre 1945 et 1970, mais la tendance au réchauffement est clairement au-dessus des barres d'erreur et des oscillations à haute fréquence de la variabilité décennale.

Il semble donc que les grandeurs qui permettent d'évaluer les températures à l'échelle globale ou locale montrent une augmentation rapide de celle-ci sur le dernier siècle. Ce phénomène est-il dû aux activités humaines ou existe-t-il des équivalents anciens ? Pour cela il faut comparer ces variations en amplitude et en vitesse aux enregistrements des paléoclimats.

*Un des problèmes majeurs curieusement posé par les figures 6A et 6B fut la lecture de valeurs relatives. De nombreux candidats ont expliqué que les températures étaient négatives dans l'hémisphère Nord jusqu'en 1950 !*

## **1.2. L'importance relative du changement climatique actuel à la lumière des changements climatiques passés.**

### **1.2.1. Les changements à l'échelle du dernier millénaire.**

Le **document 6B** ajoute à des valeurs instrumentales directes d'autres relevés « historiques » et des estimations indirectes des températures. Les vitesse de croissance des arbres et des coraux dépendent de la température de leur environnement, c'est-à-dire de l'air et de l'eau. En mesurant ces grandeurs pour des périodes de température connue, on peut étalonner des paléothermomètres et évaluer les températures enregistrées par les arbres vieux ou fossiles ou les coraux. En juxtaposant toutes les mesures effectuées, on peut penser atteindre les valeurs moyennes pour la région concernée. Les calottes glaciaires montrent des accumulations de glace sur plusieurs centaines de milliers d'années. La chimie de l'eau et des inclusions gazeuses contenues dans la glace permet de remonter indirectement à la température (en mesurant le  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau par exemple, selon le principe expliqué plus loin). En datant les glaces (*par des méthodes absolues ou en modélisant les écoulements dans les calottes polaires*) on peut donc proposer une courbe température – temps.

A l'échelle du millénaire, les incertitudes sont beaucoup plus grandes qu'à l'échelle du siècle, mais des tendances claires se dégagent dans la courbe lissée du **document 6B**. La température moyenne de l'hémisphère Nord a diminué de 0,2 °C entre 1000 et 1900 avec des oscillations de  $\sim 0,2$  °C d'amplitude et des périodes de l'ordre de la centaine d'année (variations séculaires). Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, la hausse de 0,8 °C visible sur le document 6A est clairement identifiable. Cette hausse est plus grande que l'incertitude maximale sur les données anciennes et n'a pas d'équivalent au cours du dernier millénaire.

### **1.2.2. Les changements à l'échelle des temps géologiques.**

Parmi les archives climatiques, les rapports isotopiques de l'oxygène sont un outil précieux. L'élément oxygène possède trois isotopes stables (de nombres de neutrons différents, impliquant une masse atomique différente) dont les deux plus abondants sont l'oxygène 16 ( $^{16}\text{O}$ , 99,8 %) et l'oxygène 18 ( $^{18}\text{O}$ , 0,2 %). Lors des processus géologiques, un fractionnement de ces deux isotopes se produit en raison de leurs masses différentes. L'évaporation de l'eau de mer favorise la concentration de l'isotope léger  $^{16}\text{O}$  dans les nuages.

La condensation favorise quant à elle l'enrichissement des eaux de pluie en  $^{18}\text{O}$ . En raison de la circulation générale atmosphérique, les nuages, qui migrent depuis la zone d'évaporation intertropicale (zone de production majeure des nuages) vers les pôles, se délestent progressivement de leurs molécules d'eau enrichies en  $^{18}\text{O}$  lors des précipitations qui accompagnent leur trajet vers les hautes latitudes. Dès lors, les précipitations neigeuses aux pôles seront enrichies en  $^{16}\text{O}$ .

La détermination du rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  présente donc l'intérêt de rendre compte de ce mécanisme de fractionnement. On mesure les faibles fluctuations (exprimées en ‰) par rapport à des standards (std) différents selon le matériel analysé. Le rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  est exprimé par un écart ( $\delta$  en ‰) au standard utilisé selon la relation suivante :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{éch}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{std}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{std}}} \times 1000$$

éch : échantillon dosé (eau ou carbonate)

std : standard – SMOW (Standard Mean of Ocean Water)

On détermine les rapports isotopiques à l'aide d'un spectromètre de masse (**Figure2**). Cet appareil permet de séparer les isotopes d'un même élément et d'en déterminer les proportions relatives nécessaires à l'établissement du rapport. Les atomes de l'élément (purifié) sont ionisés dans une chambre à vide par chauffage sur un filament de tungstène soumis à une haute tension, puis accélérés dans un champ électrique. Le faisceau d'ions passe alors dans un champ magnétique. Les ions sont alors déviés de leur trajectoire initiale en fonction de leur masse, la déviation étant d'autant plus forte que leur masse est faible. Le collecteur reçoit les ions en fonction de leur trajectoire, et les courants électriques correspondant à chaque faisceau d'ions de chaque isotope permettent d'en déterminer les abondances relatives.

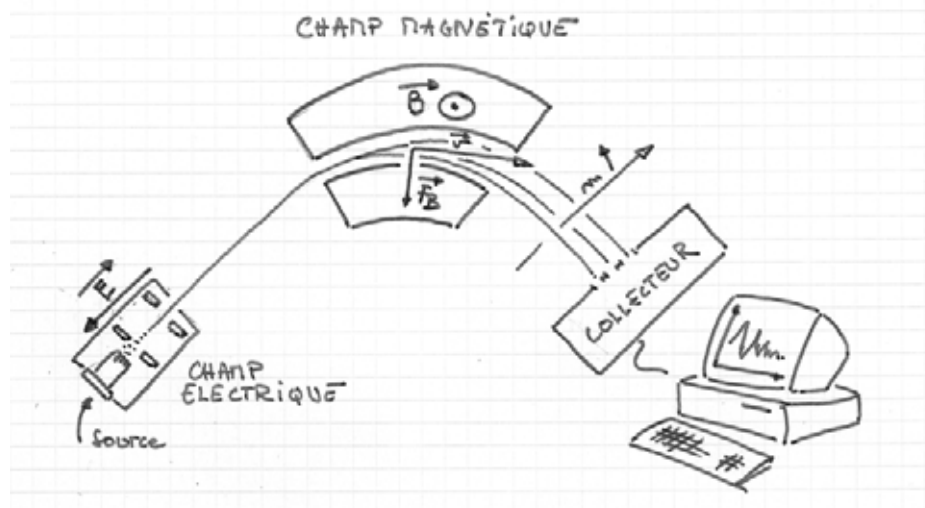


Figure 2 : Schéma d'un spectromètre de masse

Dans le cas présent, le  $\delta^{18}\text{O}$  présente un intérêt paléoclimatologique. En effet, lors des périodes glaciaires, de grandes quantités d'eau (des précipitations) sont stockées au niveau des calottes polaires (inlandsis) et des glaciers de montagne. Ce faisant, le rapport  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux océaniques s'en trouvera corrélativement augmenté et constitue un outil robuste pour l'étude



des variations des volumes de glace à la surface de la Terre, elles-mêmes liées aux variations des températures globales.

Puisque la composition isotopique des eaux océaniques doit varier en fonction de l'évolution du climat, il est possible de reconstituer ces fluctuations en déterminant les rappports  $\delta^{18}\text{O}$  par analyse des tests carbonatés des organismes marins (des foraminifères planctoniques dans le cas présent) qui vivaient dans ces eaux. Le rapport isotopique de l'oxygène des carbonates offre une fonction de transfert pour déterminer les paléotempératures à l'aide d'équations thermométriques empiriques du type :

$$T^{\circ}\text{C} = 16,9 - 4,2 (\delta_c - \delta_w) + 0,13 (\delta_c - \delta_w)^2$$

avec :  $\delta_c$  :  $\delta^{18}\text{O}$  des carbonates,  $\delta_w$  :  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau. (*l'équation précise n'était pas demandée*)

La géochimie isotopique de l'oxygène a permis de construire la courbe d'évolution des variations du  $\delta^{18}\text{O}$  des carbonates de carottes marines (courbe SPECMAP ; **document 7**). Cette courbe révèle l'enregistrement sédimentaire des variations climatiques des 800 000 dernières années. Les valeurs du  $\delta^{18}\text{O}$  oscillent entre +2 et -2 ‰. Les baisses des valeurs du  $\delta^{18}\text{O}$  sur la courbe témoignent de périodes climatiques relativement chaudes, alors que leurs valeurs positives marquent les périodes glaciaires du Pléistocène. L'examen de la courbe suggère la succession de 9 épisodes glaciaires entrecoupés de stades interglaciaires. Le stade glaciaire le plus récent est l'un des plus froids de la période considérée.

En définitive, les rapports isotopiques de l'oxygène permettent d'appréhender les variations climatiques sur des périodes longues (ici le Quaternaire récent). Leurs variations résultent de deux causes distinctes mais couplées : (1) l'effet glaciaire qui conduit à l'enrichissement en  $^{18}\text{O}$  des eaux océaniques (et à son appauvrissement dans les glaces polaires) et (2) les variations des températures des eaux océaniques. *Ces deux causes conjointes interviennent respectivement pour 75 % (effet glaciaire) et 25 % (température des eaux) dans les variations du  $\delta^{18}\text{O}$ .*

*Cette partie du problème fut globalement bien traitée, de nombreux candidats ont même étayé leur propos d'un schéma de principe du fractionnement isotopique entre les calottes polaires et l'océan. De nombreuses copies confondent néanmoins la dernière déglaciation et la hausse de température imputable aux activités anthropiques. C'est encore la confusion dans les ordres de grandeur et les échelles de temps qui apparaît ici.*

### **1.3. Les corrélations entre les variations climatiques et les concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre.**

#### **1.3.1. Les variations des teneurs atmosphériques des gaz à effet de serre à l'échelle du dernier millénaire.**

Le **document 10** montre les évolutions des concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone, du méthane et de l'oxyde nitreux sur le dernier millénaire. L'ordre de grandeur de la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  (environ 300 parties par million, soit  $3 \cdot 10^{-4}$ ) est bien supérieur aux concentrations en méthane (1000 ppb soit  $10^{-6}$ ) et en oxyde nitreux (300 ppb soit  $3 \cdot 10^{-7}$ ), mais les trois courbes montrent des tendances comparables. Alors que leurs teneurs semblent stables de 1000 à 1800, elles augmentent de façon exponentielle depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle. La concentration en  $\text{CH}_4$  a plus que doublé en 200 ans pour atteindre 1500 ppb et la teneur en  $\text{N}_2\text{O}$  est passée de 270 à 315 ppb soit une augmentation de l'ordre de 15 %.

Ces augmentations semblent liées aux activités humaines, mais une comparaison aux variations naturelles serait nécessaire pour soutenir cette hypothèse. Le **document 1** permet cette vérification pour le CO<sub>2</sub>.

### 1.3.2. Les concentrations du CO<sub>2</sub> à différentes échelles de temps.

Le **document 1** présente les variations de la teneur atmosphérique de CO<sub>2</sub> sur différentes échelles de temps. Les teneurs actuelles de CO<sub>2</sub> sont déterminées par dosage atmosphérique direct. Pour la période Quaternaire, elles sont obtenues par l'analyse des bulles d'air piégées dans les glaces polaires (inlandsis du Groenland et d'Antarctique pour les 400 000 dernières années). Pour les périodes plus anciennes, les concentrations en CO<sub>2</sub> sont approchées par l'analyse des carbonates (détermination géochimique), l'estimation de leurs volumes et de leurs taux d'accumulation.

L'examen de l'évolution de cette teneur depuis 1950 (**document 1a**) montre qu'elle est passée de 320 à 370 ppm (parties par million). Il s'agit là d'une augmentation de l'ordre de 16 % en 50 ans. La tendance est encore plus marquée si on la considère depuis 1850 (**document 1b**), l'augmentation totale est alors de 90 ppm par rapport au « bruit de fond » de la teneur atmosphérique de CO<sub>2</sub> (280 ppm) au cours de l'Holocène (**document 1c**), soit de plus de 30 % en 150 ans. *On observe en outre une discrète baisse de la concentration du CO<sub>2</sub> pour la période 1550-1850 AD qui correspond au petit âge glaciaire.*

À plus grande échelle, sur les 25 derniers millions d'années (**document 1e**), les variations sont du même ordre de grandeur que celles observées dans le Quaternaire récent, avec une chute importante autour de 15 Ma<sup>4</sup>. Les variations sont en revanche beaucoup plus marquées sur l'ensemble du Phanérozoïque (**document 1f**), avec des teneurs qui peuvent osciller entre les niveaux actuels (valeur minimale) et plus de 0,6 % de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, aux incertitudes de détermination près. Au cours du Paléozoïque inférieur, les teneurs importantes décroissent pour atteindre, au Paléozoïque supérieur, des valeurs relativement faibles. Le second maximum (teneur atmosphérique de CO<sub>2</sub> environ 20 fois supérieure à l'actuelle) de concentration est d'âge créacé puis les concentrations décroissent au cours du Cénozoïque pour atteindre leurs valeurs actuelles<sup>5</sup>.

Finalement l'augmentation actuelle est du même ordre de grandeur que les variations naturelles des teneurs atmosphériques de CO<sub>2</sub> au cours des cycles glaciaires-interglaciaires du Quaternaire récent (**document 1d**) mais, comme pour la température, l'augmentation sur les 150 dernières années est beaucoup plus rapide que les fluctuations naturelles qui se déroulent sur des échelles de temps plus longues. Il semble donc qu'une modification rapide et sans équivalent connu de la machine climatique terrestre soit en cours.

Les modifications du climat sont parallèles aux augmentations des teneurs atmosphériques en certains gaz. Pour faire le lien entre ces deux changements, il est nécessaire de comprendre un mécanisme essentiel de contrôle de la température à la surface de la Terre : l'effet de serre.

*Le commentaire du document 1 fut rarement bien mené par les candidats. Certains s'enlisèrent dans des considérations désordonnées autour des différentes courbes, d'autres au contraire ne commentèrent que quelques courbes apparemment au hasard sans utiliser toutes*

---

<sup>4</sup> à 15 Ma, il y a le volcanisme de la province magmatique de la Columbia River, à moins que ça ne corresponde à quelque événement orogénique « pompeur » de CO<sub>2</sub> ?

<sup>5</sup> La décroissance au Paléozoïque inférieur est la réponse à l'importante érosion des chaînes varisques (altération des silicates = puits de CO<sub>2</sub>). Le second maximum d'âge créacé est la signature de l'importante activité des dorsales océaniques (forte libération de CO<sub>2</sub> d'origine mantellique).

les échelles de temps et toutes les amplitudes du signal visibles sur les différentes courbes. Les candidats mélangent trop souvent description des courbes et explication de leurs tendances. Expliquer la variabilité de la courbe de Mauna Loa par une activité cyclique du point chaud est une erreur aussi fréquente qu'étonnante.

## 2. Le contrôle de l'évolution des climats par les gaz à effet de serre.

Avant de se focaliser sur les gaz à effet de serre étudiés dans les documents proposés, un rappel de la structure thermique de l'atmosphère est nécessaire.

### 2.1. La structure thermique de l'atmosphère.

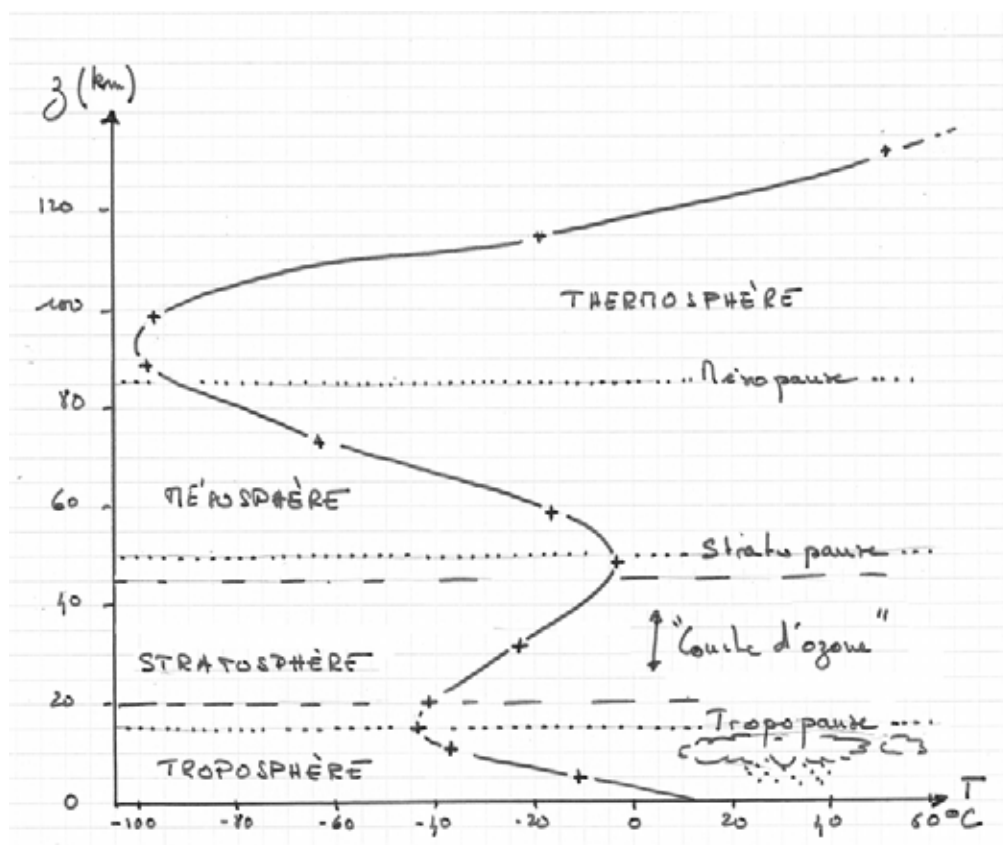


Figure 3 : Stratification et profil de température de l'atmosphère

L'atmosphère terrestre est composée en moyenne de 78 % de  $N_2$ , 21 % de  $O_2$ , ~ 1 % de Ar et 0,03 % de  $CO_2$ . Il faut ajouter à cela de l'eau sous ses trois états. La répartition de ces gaz n'est pas uniforme, elle est stratifiée, à cause des différences de masses molaires des gaz et des réactions photochimiques dans la haute atmosphère. En fait 80 % de la masse de l'atmosphère est concentrée dans ses 20 premiers kilomètres. La **figure 3** donne les principales strates de l'atmosphère et leurs limites. Les valeurs de température données en **document 8** sont reportées sur ce graphe. De la base vers le sommet, on distingue la troposphère du sol à une quinzaine de kilomètres, riche en eau, ... la stratosphère de 15 à 50 km, où se situe la couche d'ozone  $O_3$ . On distingue ensuite la mésosphère, de la thermo- ou ionosphère limitées par la mésopause à environ 90 km. À ces altitudes, la pression est très faible et seules quelques traces de gaz ionisés sont décelables par les ballons sondes ou par leur rayonnement. Les maxima et minima du profil vertical de température déterminent ces

limites, la tropopause est un minimum thermique autour de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la stratopause est un maximum, proche de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  et la mésopause est un dernier minimum proche de  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ces différents gradients s'expliquent par plusieurs phénomènes. Le maximum thermique au sommet de la stratosphère est dû à la couche d'ozone. En effet, l'ozone a la propriété d'absorber la lumière ultraviolette (il nous en protège !) et de restituer cette énergie sous forme d'infrarouges et de chaleur. L'augmentation de température vers le sol dans la troposphère est due à la réémission d'une partie de l'énergie lumineuse reçue par le sol vers l'atmosphère. C'est entre autre l'albédo et le rayonnement infrarouge du sol et des océans qui génèrent ce gradient thermique décroissant dans la troposphère. C'est parce qu'elle est un minimum thermique que la tropopause est aussi la limite supérieure des masses d'eau de type cumulus.

L'augmentation de température dans la thermosphère est due aux faibles pressions et à l'ionisation des gaz sous l'effet du rayonnement solaire.

On voit donc que la composition de l'atmosphère et sa structure thermique sont liées. Parmi les mécanismes mis en jeu, l'effet de serre est primordial.

*Les points offerts dans le barème pour la réalisation correcte du graphique de la figure 3 n'ont pas été attribués à tous les candidats. Le choix d'une échelle adéquate et le tracé propre d'une courbe restent malheureusement des critères de sélection au niveau CAPES. Seuls quelques pourcents des copies corrigées mentionnent l'asthénosphère comme un étage possible de l'atmosphère ...*

## 2.2. Les gaz à effet de serre.

Un gaz à effet de serre est un gaz capable d'absorber de la lumière dans certaines longueurs d'onde et de la restituer (essentiellement sous forme de rayonnement infrarouge), à ce titre l'ozone est un gaz à effet de serre. Cependant la plupart des gaz montrant ces propriétés, c'est-à-dire le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde nitreux, mais aussi la vapeur d'eau, et certains composés soufrés. Ces gaz sont essentiellement concentrés dans la basse atmosphère. Ceux-ci absorbent une partie du rayonnement solaire incident et une partie du rayonnement réémis par la surface terrestre pour le réémettre dans le spectre infrarouge et générer une hausse de température locale. L'effet de serre est un phénomène naturel, responsable des températures de la surface terrestre proche du point triple de l'eau (elles seraient de  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  en moyenne sur Terre sans ces gaz).

L'axe des ordonnées à droite des courbes du document 10 est gradué en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , grandeur homogène à celle d'un flux thermique et donne le forçage radiatif du aux augmentations des teneurs en gaz à effet de serre. Ce forçage radiatif représente la quantité d'énergie incidente qui provoquerait le même échauffement que la présence du gaz à effet de serre à telle ou telle concentration. Ainsi l'augmentation récente de la teneur en  $\text{CO}_2$  engendre un forçage radiatif équivalent à  $1,5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  à comparer aux  $340\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  de la constante solaire. On s'aperçoit que si les teneurs en  $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$  sont beaucoup plus faibles que la teneur en  $\text{CO}_2$ , leurs augmentations récentes sont responsables de forçages radiatifs comparables (3 fois inférieur pour le  $\text{CH}_4$ , et 10 fois pour le  $\text{N}_2\text{O}$ ). Le forçage radiatif total dû à ces trois gaz est de l'ordre de  $2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Il semble donc que l'augmentation des températures moyennes globales puisse être expliquée par l'augmentation des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre, tels que  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$ . Si les activités humaines sont une source évidente de tels types de gaz, les mécanismes qui modulent leurs concentrations atmosphériques font intervenir différents réservoirs.

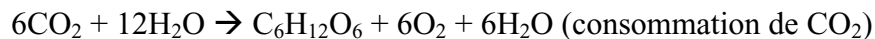
De nombreux candidats ont accompagné cette explication d'un bilan radiatif de l'atmosphère. Si l'idée était bonne, la réalisation de schémas extrêmement complexes, avec des flèches de couleurs, d'épaisseurs différentes mais souvent sans légende, était moins intéressante. Les candidats ayant expliqué le phénomène d'effet de serre sans pour autant réciter tout le cours qui contient l'explication ont eu le maximum de point, sans y passer trop de temps. Si le principe de l'effet de serre est globalement connu, de nombreuses explications confondent réémission et réflexion. L'ozone stratosphérique est trop souvent mélangé aux gaz à effet de serre troposphériques.

### 2.3. Le contrôle des échanges de CO<sub>2</sub> entre les différents réservoirs.

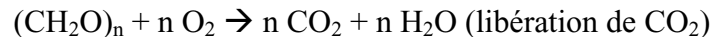
Les processus qui contrôlent les échanges de carbone en surface et sur de courts intervalles de temps sont : la photosynthèse, la respiration, la dégradation de la matière organique, le métabolisme des organismes qui précipitent un squelette carbonaté, l'altération des silicates et l'équilibre des carbonates. *On néglige ici les échanges avec le manteau par le volcanisme et le métamorphisme, et les effets des réactions photochimiques qui se produisent dans la haute atmosphère.*

On peut résumer ces mécanismes par les quelques réactions bilan suivantes qui consomment ou libèrent du CO<sub>2</sub> :

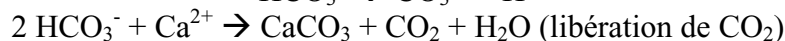
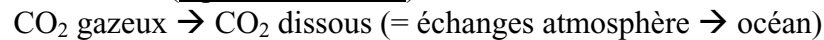
- la photosynthèse (équation attendue) :



- la respiration :

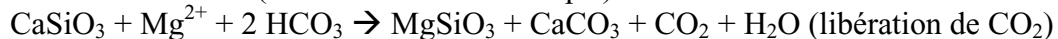


- l'équilibre des carbonates (équation attendue) :



(Remarque : au final la précipitation d'une mole de calcite consomme une mole sur deux de CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau. Les réactions qui contrôlent l'équilibre des carbonates sont réversibles dans les processus de surface).

- l'altération des silicates (cas de la croûte océanique) :



- l'altération des silicates (avec production d'ions hydrogénocarbonates) :



Seulement une réaction du type « altération » était attendue.

Les valeurs données dans le **document 2** (1 Pg = 1 Gt) peuvent être synthétisées sur le schéma de la **figure 4**. Le flux net pour un réservoir peut être obtenu en faisant la somme algébrique des entrées et des sorties de ce réservoir. Pour l'atmosphère, le flux net vers les terres émergées et de -2 Gt/an, c'est ce qu'on appelle la « pompe biologique », le flux net

vers les océans est aussi de  $-2$  Gt/an. Le flux (à sens unique) du réservoir fossile vers l'atmosphère est dû à leur combustion par les industries et les transports et il représente  $+7$  Gt/an. Au total, 3 Gt s'accumulent donc chaque année dans l'atmosphère<sup>6</sup>. On peut déduire de la taille et du flux net d'un réservoir, le temps de résidence du carbone dans ce réservoir selon la formule (simple ! ) :

$$\text{Temps de résidence (en années)} = \frac{\text{Taille du réservoir (en Gt)}}{\text{Flux (en Gt/an)}}$$

Pour le réservoir océan, le flux brut moyen est de 89 Gt/an, le temps de résidence du carbone dans les océans est donc de l'ordre de 450 ans, et pour le réservoir terres émergées, une valeur de flux de 119 Gt/an donne un temps de résidence de 16 ans. Ces temps de résidence nous donnent un ordre de grandeur des temps de réaction des pompes continentales et océaniques, l'océan semblerait réagir plus lentement que les terres émergées. La façon dont les différents réservoirs vont réagir à la modification du réservoir atmosphérique va contrôler l'ampleur de l'impact humain sur le climat.

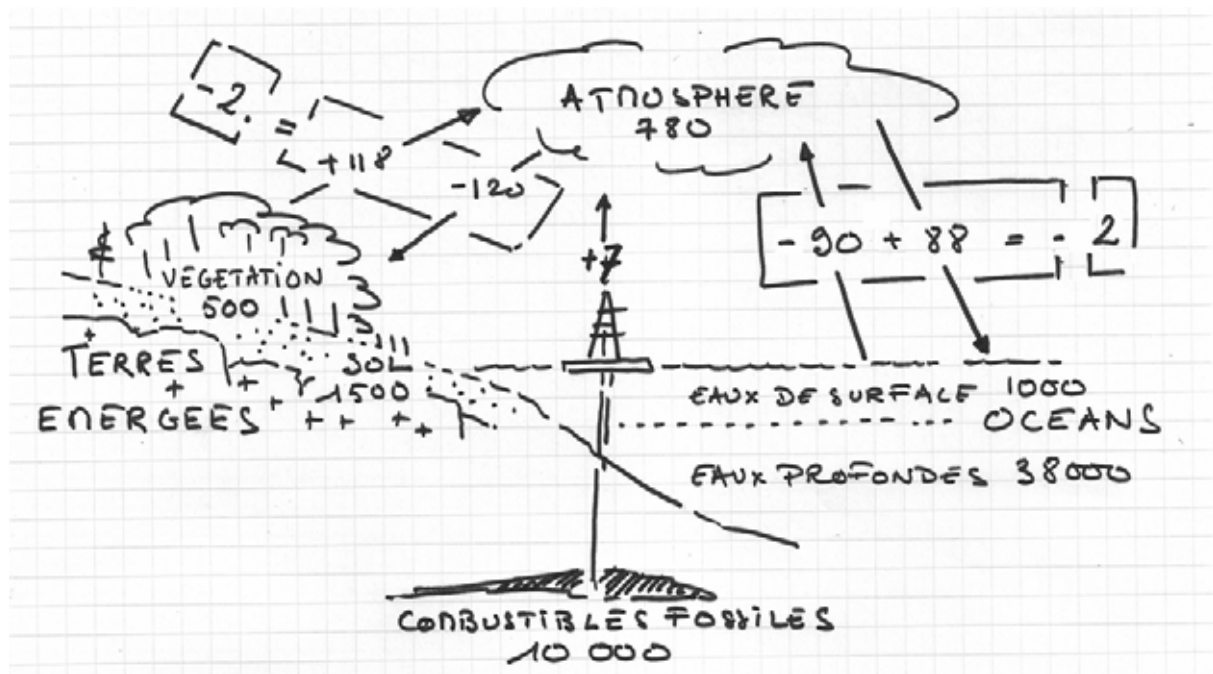


Figure 4 : Taille des réservoirs de carbone et flux entre ces réservoirs exprimés en Gt et en Gt/an. Les flux sont positifs si dirigés vers l'atmosphère.

*La réalisation du schéma bilan de la figure 4 a globalement été réussie. Un nombre de points important était alloué à l'identification des émissions industrielles en tant que flux entre les réservoirs « combustibles fossiles » et « atmosphère ». La plupart des schémas en faisait volontairement ou non un flux entre « terres émergées et « atmosphère ».*

Il semble donc que le réchauffement récent indiqué par de nombreux marqueurs climatiques soit imputable au moins en partie à la libération par l'Homme de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces gaz à effet de serre en absorbant l'énergie rayonnée par le soleil

<sup>6</sup> Cela représente une augmentation de la taille du réservoir de  $0,3$  %/an, on retrouve la pente de la courbe du document 10 sur les 50 dernières années :  $(360-300)/300$  ppm /50 ans =  $0,4$  %/an

et la Terre génèrent un forçage radiatif voisin de  $2 \text{ W.m}^{-2}$ . Les teneurs augmentent dans l'atmosphère car la quantité de  $\text{CO}_2$  absorbée par les autres réservoirs est plus faible que le flux des émissions anthropiques. Ce n'est pas tant l'amplitude du phénomène, mais sa vitesse qui est « anormale ». Pour quantifier et vérifier ce rapport entre émissions anthropiques de gaz à effet de serre et changement des constantes climatiques, la modélisation des échanges et des mécanismes physiques à l'œuvre est un passage nécessaire.

### **3. Les modèles et scénarios envisagés pour le futur.**

Un modèle se base sur un certain nombre d'hypothèses et de données d'entrées et propose en sortie des données synthétiques qui permettent d'infirmes ou non les hypothèses qui le fondent. Les experts du GIEC ont mis au point des modèles de fonctionnement du climat, qu'ils testent sur les données passées et actuelles et projettent ensuite dans les temps futurs pour différents scénarios.

#### **3.1. Les scénarios d'évolution des émissions anthropiques de gaz à effet de serre.**

Le **document 9A** montre trois paramètres d'entrée des modèles climatiques, que sont les évolutions des teneurs atmosphériques dans les trois principaux gaz à effet de serre émis par les activités humaines. *Les émissions sont à lire en Gt, ou Tg par an (la confusion n'a pas été sanctionnée).*

Les 6 scénarios<sup>7</sup> proposés peuvent être séparés en trois familles en se basant sur les valeurs des émissions auxquelles ils aboutissent pour 2100. Les scénarios A1F1 et A2 sont des scénarios extrêmes avec des émissions en CO<sub>2</sub> multipliées par 4 d'ici 2100 pour arriver à environ 28 GtC/an. Dans ces deux scénarios, les émissions de méthane et de N<sub>2</sub>O sont doublées et augmentées de 50 % respectivement. Les scénarios A1T et B1 constituent une seconde famille (scénarios « minimalistes ») avec les augmentations les plus faibles, voire même des diminutions des émissions anthropiques. Dans ces scénarios, les émissions de CO<sub>2</sub> seront légèrement inférieures à l'actuelle en 2100 après un maximum atteint autour de 2040. Les mêmes tendances sont observables pour les deux autres gaz, à ceci près que les émissions de N<sub>2</sub>O dans le scénario A1T diminuent dès aujourd'hui. Les deux derniers scénarios, A1B et B2, forment une famille de scénarios intermédiaires avec une augmentation modérée des émissions de CO<sub>2</sub> multipliées par 2 d'ici 2100. Elles diffèrent du point de vue du méthane : le scénario B2 est proche de la première famille alors que le scénario A1B se rapproche de la seconde. Les deux dernières familles sont proches du point de vue des émissions de N<sub>2</sub>O.

Les concentrations en gaz à effet de serre ne sont sans doute pas les seuls paramètres d'entrées de ces modèles. Les évolutions de la biosphère (taille des forêts équatoriales, par exemple) contrôlée en partie par l'Homme sont aussi à prendre en compte.

*Le traitement des documents 9 et 3 fut sans doute le plus difficile pour les candidats. Il était important de clairement identifier le document 9A comme les entrées des modèles, et les documents 9B et 3 comme des sorties des modèles. Il s'agissait ensuite de faire preuve de*

---

<sup>7</sup> Juste pour montrer que ça va chercher loin des ST... Extrait du rapport du GIEC :

**Les scénarios d'émissions du Rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES)**

A1. Le canevas et la famille de scénarios A1 décrivent un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Les principaux thèmes sous-jacents sont la convergence entre régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant. La famille de scénarios A1 se scinde en trois groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. Les trois groupes A1 se distinguent par leur accent technologique: forte intensité de combustibles fossiles (A1FI), sources d'énergie autres que fossiles (A1T) et équilibre entre les sources (A1B) ("équilibre" signifiant que l'on ne s'appuie pas excessivement sur une source d'énergie particulière, en supposant que des taux d'amélioration similaires s'appliquent à toutes les technologies de l'approvisionnement énergétique et des utilisations finales).

A2. Le canevas et la famille de scénarios A2 décrivent un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.

B1. Le canevas et la famille de scénarios B1 décrivent un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.

B2. Le canevas et la famille de scénarios B2 décrivent un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2, il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les canevas et les familles de scénarios B1 et A1. Les scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

Un scénario d'illustration a été choisi pour chacun des six groupes de scénarios A1B, A1FI, A1T, A2, B1 et B2. Tous sont également fiables. Les scénarios SRES n'incluent pas d'initiatives climatiques supplémentaires, ce qui signifie que l'on n'inclut aucun scénario qui suppose expressément l'application de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ou des objectifs du Protocole de Kyoto pour les émissions.



*méthode dans le commentaire des différents types de scénarios. Une stratégie finalement payante consistait à choisir 2 ou 3 scénarios représentatifs parmi les 6 proposés, l'identification de familles et de tendances communes était néanmoins mieux considérée.*

### **3.2. La modélisation des paramètres globaux.**

#### **3.2.1. L'évolution de la température d'ici 2100.**

Le **document 9B** présente deux sorties des modèles climatiques globaux, la température globale et le niveau moyen des mers, ainsi que la dispersion des différents résultats. L'enveloppe de la dispersion pour les températures prédit un réchauffement global minimal de + 1,6 °C et un réchauffement maximal de 6,2 °C ! A l'intérieur de cette dispersion les différents scénarios présentés en **document 9A** donnent tous des courbes croissantes mais avec des valeurs différentes en 2100. La première famille donne des valeurs de réchauffement de 4 et 4,8 °C, la seconde 2,3 et 2,9 °C, et la famille intermédiaire 3 et 3,2 °C.

Ces différents modèles permettent de comparer le poids des différents gaz à effet de serre dans la machine climatique telle qu'elle est modélisable à l'heure actuelle. Les scénarios de la première famille avec les émissions les plus fortes donnent évidemment les réchauffements les plus forts. Le scénario A1B1 avec les émissions les plus faibles (sauf pour le N<sub>2</sub>O) donne les valeurs les plus faibles. Le rôle du N<sub>2</sub>O semble mineur (l'échelle « forçage radiatif » pour ce gaz était en effet la plus faible sur le **document 10**). La comparaison des deux scénarios de la famille intermédiaire A1B et B2 permet de discuter de l'importance relative de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>. A1B montre la plus forte augmentation de température, alors qu'il se base sur une faible augmentation des émissions de méthane suivie même d'une diminution. Il présente en revanche une quantité cumulée de CO<sub>2</sub> émis (surface sous la courbe) plus grande que le scénario B2. Cela montre le rôle prépondérant du CO<sub>2</sub> dans l'effet de serre. Ce poids plus grand peut s'expliquer par une capacité de forçage radiatif élevée, et une forte accumulation dans l'atmosphère, comme expliqué en §2.3. Le méthane a un rôle secondaire, à cause de son faible temps de résidence dans l'atmosphère, entre autres.

#### **3.2.2. L'évolution future du niveau marin moyen.**

Pour le niveau moyen des mers, l'ensemble des modèles donne des valeurs de + 20 à 70 cm. Parmi ceux détaillés, le scénario A1F1 donne la plus grande hausse (50 cm) et la plus faible est donnée par le scénario B1 (31 cm), les autres scénarios aboutissent à des valeurs semblables entre 35 et 43 cm. La comparaison détaillée des courbes aboutit aux mêmes conclusions que l'examen des courbes de températures. Ceci s'explique en partie par le contrôle du niveau marin par la température globale. En effet, plusieurs phénomènes peuvent engendrer une hausse du niveau marin : la dilatation thermique (directement due à l'élévation thermique globale) et la diminution des réserves des glaces d'inlandsis et des glaciers de montagne (dus aux températures et aux précipitations locales). Pour donner la mesure de ces phénomènes, la diminution de 1 % des inlandsis représente un volume de glace de  $3,8 \cdot 10^5 \text{ km}^3$ , le volume d'eau correspondant est de  $3,41 \cdot 10^5 \text{ km}^3$  (on multiplie par la densité de la glace). La surface totale des océans représente 70 % de la surface terrestre, soit  $3,57 \cdot 10^8 \text{ km}^2$ . L'élévation du niveau marin est le volume d'eau divisé par la surface des océans soit environ 1 m. Les variations du niveau marin obtenues dans les modèles sont donc relativement faibles par rapport au 100 m que provoquerait la fonte de tous les inlandsis.

Les modèles globaux donnent donc des valeurs moyennées sur l'ensemble de la planète, si la notion de niveau marin global peut avoir une signification, les températures, elles, montrent une grande variation régionale. Il est nécessaire de modéliser les changements climatiques régionaux pour préciser les impacts locaux du changement global.

### 3.3. La modélisation de l'évolution future de la zonéographie climatique mondiale.

Les **documents 3A** et **3B** montrent des modélisations des courbes des changements de température et des précipitations entre la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et l'actuel pour l'Arctique au cours d'une année et des cartes de changements de température et de précipitations pour l'Afrique. Ces modélisations s'appuient sur le scénario A1B, appartenant à la famille intermédiaire du **document 9A**. Ces résultats peuvent être considérés comme « moyens » comme le prouve la position centrale de la courbe dans la dispersion des données concernant l'Arctique. Il est intéressant de noter que cette dispersion est beaucoup plus grande que celle sur les simulations globales ... les équilibres locaux étant la somme de phénomènes globaux et locaux plus difficiles à appréhender.

Le document **A** montre une augmentation moyenne des précipitations dans la région polaire de 20 %, avec un maximum de + 30 % en hiver. Les températures devraient elles aussi augmenter plus qu'à l'échelle globale avec une valeur moyenne de l'ordre de + 5 °C et une augmentation en hiver de + 8 °C ! Ces modifications sont cruciales pour l'inlandis groenlandais, dont l'équilibre est régi par les précipitations et la température.

Le document **B** montre des évolutions contrastées pour le continent africain. Le Maghreb et l'Afrique du Sud verront, dans ce scénario, leur température augmenter de + 2 à + 4 °C et leurs précipitations chuter de 5 à plus de 10 mm.an<sup>-1</sup>. Les précipitations sur l'Afrique de l'Ouest devraient augmenter, sans changement majeur de la température. Ces pronostics laissent envisager une augmentation de la taille des régions désertiques.

A l'échelle globale, les deux exemples du **document 3**, semblent montrer une accentuation des contrastes climatiques globaux avec un réchauffement plus fort au pôle, et une nouvelle répartition des masses d'eau atmosphériques : encore plus de pluie au pôle, encore moins dans les régions déjà pourtant sèches.

*Si le commentaire des simulations en carte du document 3B fut souvent correct, les commentaires des diagrammes du document 3A furent le plus souvent farfelus ... les candidats n'ayant pas lu qu'il s'agissait de changements de température et non de températures.*

### Conclusion.

Les différents documents extraits des rapports du GIEC permettent de faire le constat d'un changement rapide (sur le dernier siècle) des constantes climatiques, que sont par exemple la température moyenne (+ 0,8 °C sur les 140 dernières années), le niveau moyen des mers (3 mm.an<sup>-1</sup> entre 1993 et 2005) ou encore le recul des glaciers (de l'ordre de 800 m depuis 1870 pour les glaciers alpins). Ces variations sont de plus grande amplitude que la variabilité naturelle sur le dernier millénaire et avoisinent l'ordre de grandeur des variations sur de plus grandes échelles de temps ... mais à une vitesse beaucoup plus élevée !

Ces changements dans les constantes climatiques sont parallèles à l'augmentation des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre, libérés depuis le début de l'ère industrielle par les activités humaines. Pour le CO<sub>2</sub>, ces activités transfèrent 7 GtC.an<sup>-1</sup> des ressources fossiles vers le réservoir « atmosphère », alors que les pompes naturelles (océans et

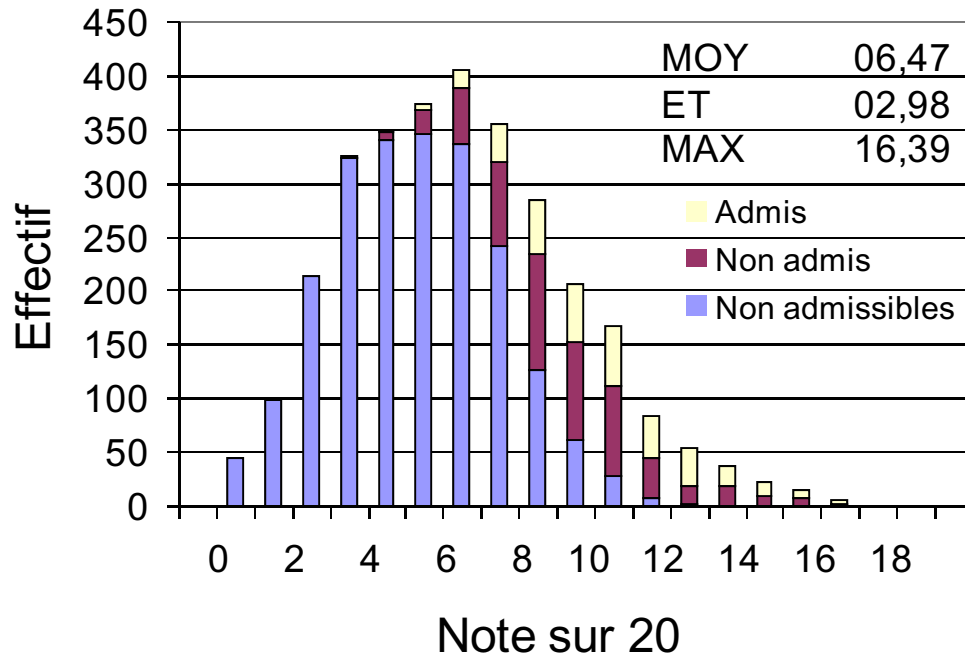
terres émergées, n'en soustraient que 4 GtC/an. L'accumulation des gaz à effet de serre génère une augmentation du forçage radiatif dû à l'effet de serre de l'ordre de  $2\text{W.m}^{-2}$ .

Tous ces mécanismes sont pris en compte dans les modèles climatiques, validés sur leur capacité à reproduire les évolutions passées des climats et qui s'appuient sur des scénarios prospectifs pour évaluer le changement climatique à venir. Tous admettent une élévation de température globale supérieure à 1,6 °C d'ici 2100, même pour les scénarios les plus « optimistes », ainsi que des variations locales beaucoup plus fortes des températures mais aussi des précipitations. Les zones actuellement arides ou semi-arides seront sans doute les plus touchées.

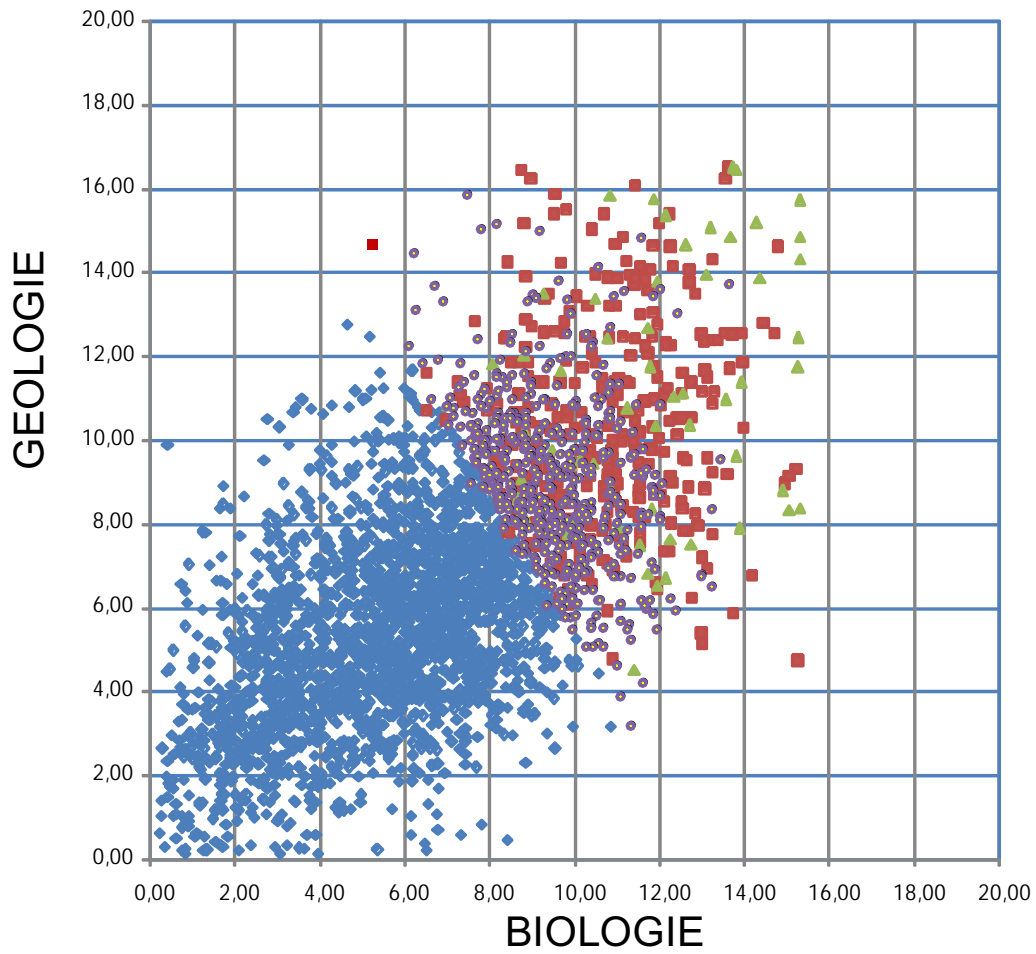
De telles études scientifiques montrent le rôle majeur des sciences de la Terre face aux enjeux sociétaux actuels et imminents.

*Comme les introductions, les conclusions sont souvent décevantes. Il s'agit de résumer les grands arguments tirés des documents analysés, et ce de façon quantitative. C'est ce qui différencie un exposé scientifique d'une discussion de salon. Une autre tendance malheureuse consiste à vouloir à tout prix faire un « schéma-bilan » qui se résume vite à des boîtes et des flèches de signification cabalistique ... tous les sujets ne s'y prêtent pas.*

## Répartition des notes de géologie



## Bilan de l'admissibilité



- ◆ Non admissibles
- Admissibles admis
- ▲ Admissibles absents
- Admissibles non admis