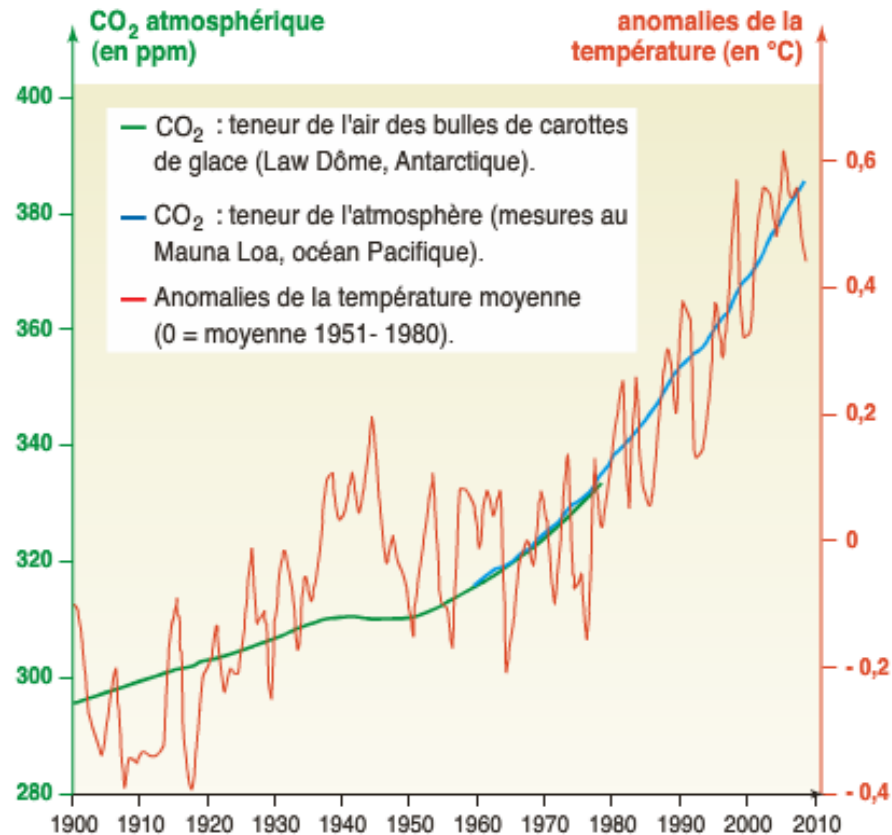
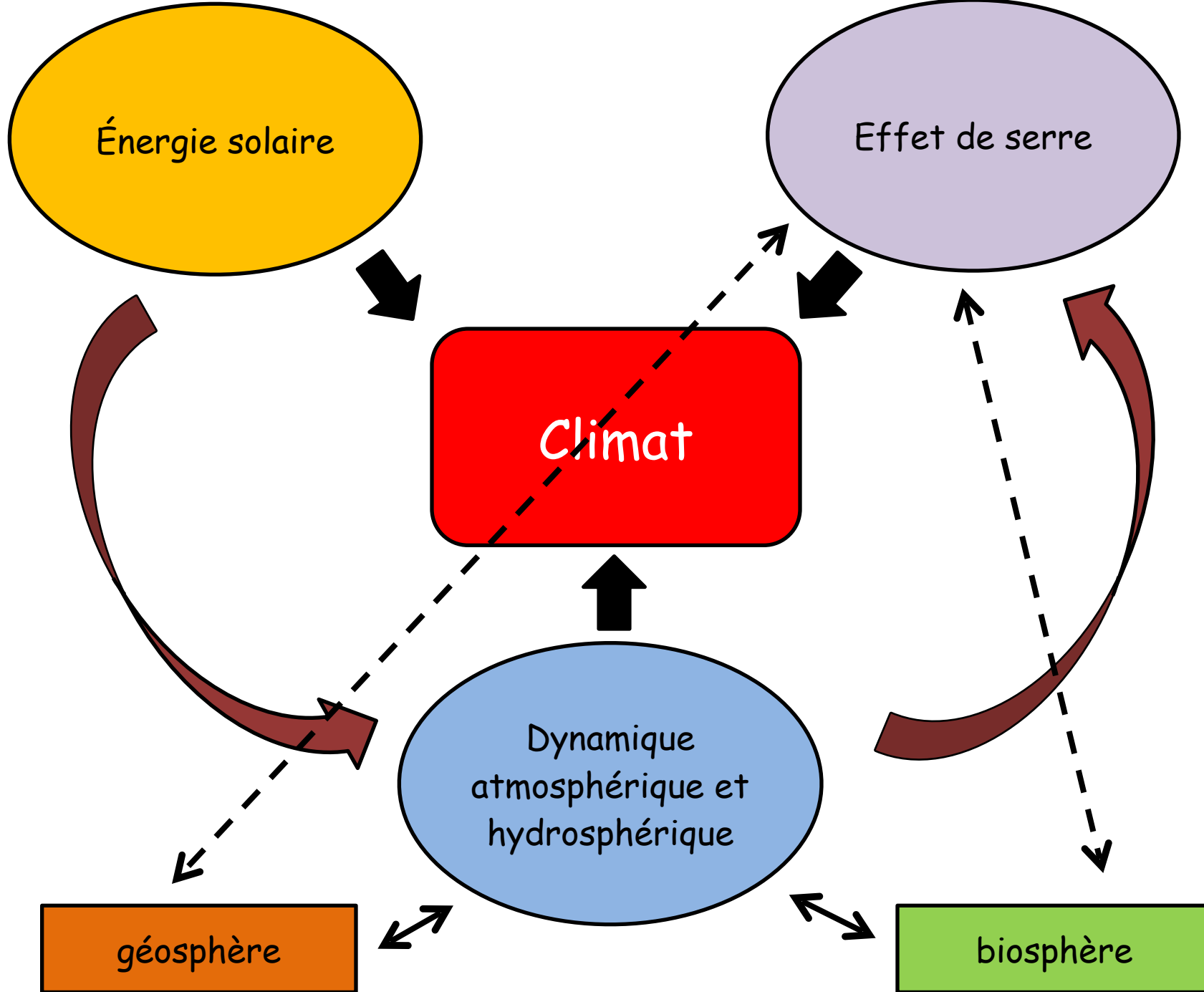


Thème 2 : Enjeux planétaires contemporains

TD4 : De l'évolution récente du climat au climat de demain





Problème :

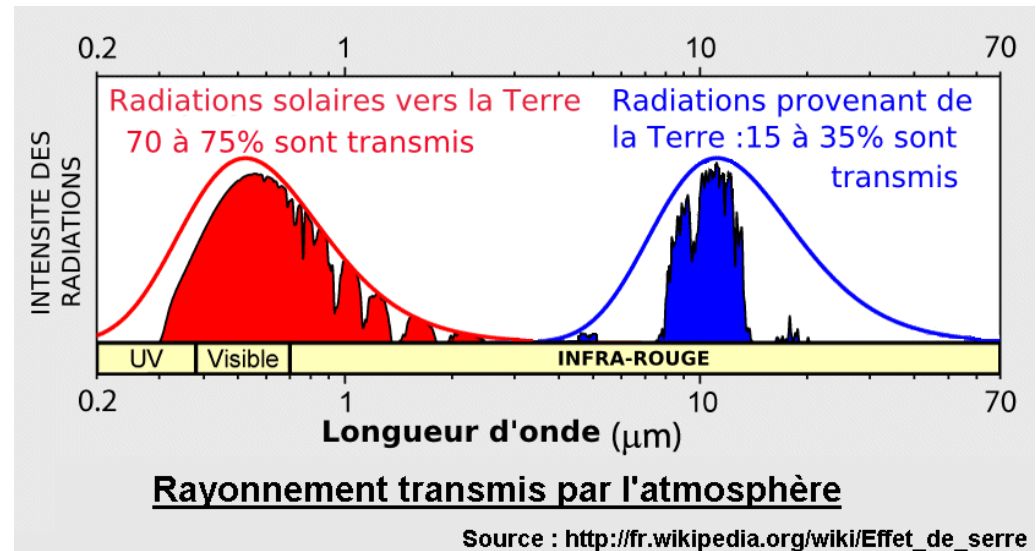
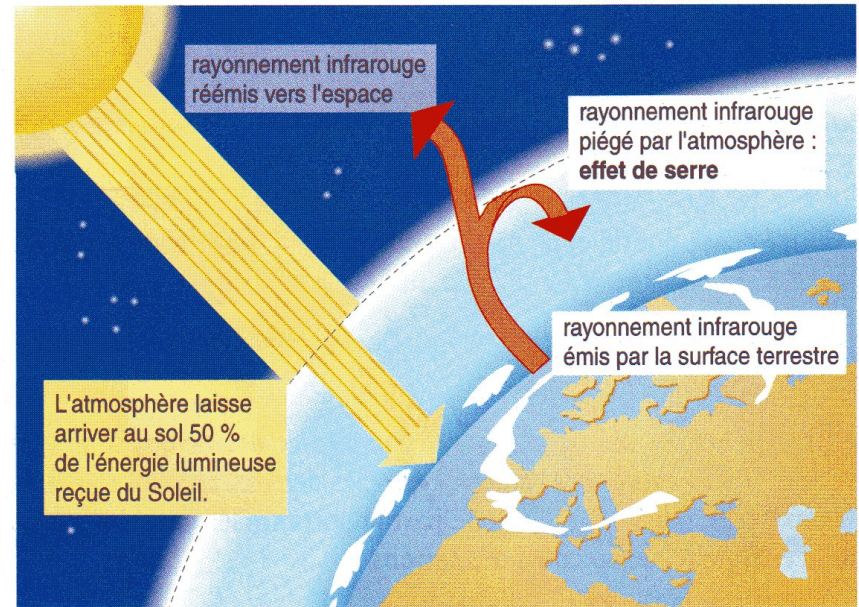
Quels facteurs, naturels et anthropiques, interviennent dans l'évolution climatique ?

Peut-on modéliser le climat d'aujourd'hui et de demain ?

Activité 1. Les gaz à effet de serre et le climat

Doc 1. Rappel. Qu'est-ce que l'effet de serre ? (seconde)

Définition et principe général : L'effet de serre est un processus naturel dû à l'atmosphère, qui contribue à **augmenter la température de surface** par rapport à une planète ayant les mêmes caractéristiques (même constante solaire et même albédo...) mais sans atmosphère. L'atmosphère laisse passer, de jour, des rayonnements solaires (70 à 75 % de ce qui arrive au sommet de l'atmosphère). Le sol réfléchit une partie de ces rayonnements (= albédo) et absorbe l'autre partie, ce qui le réchauffe. Le sol cède ensuite cette chaleur en réémettant, de jour comme de nuit, vers le haut, un rayonnement infrarouge (rayonnement thermique du sol). **La majorité des radiations issues du sol (65 à 85 %) est cette fois absorbée par certains gaz atmosphériques, dits gaz à effet de serre (GES).** Cette action réchauffe l'atmosphère qui émet son propre rayonnement thermique dont la plus grande partie retourne vers le sol qui



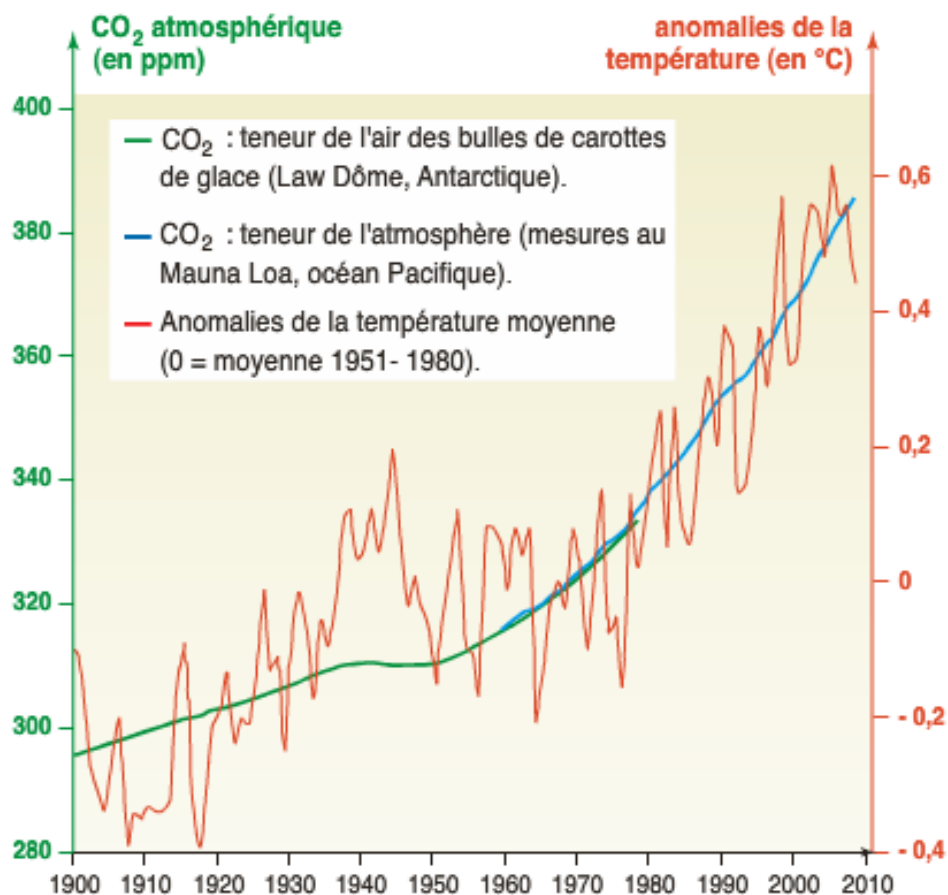
Doc 2. température et CO₂ atmosphérique (doc 1 p 120 Bordas)

Même si les **gaz à effet de serre** sont en faible proportion dans l'atmosphère terrestre, leur impact sur le climat est important. Les activités humaines parviennent à modifier sensiblement ces concentrations, en particulier celles du CO₂, par l'utilisation des combustibles fossiles.

Classement	Année	Anomalie de température*
1	2010	+ 0,62 °C
2	2005	+ 0,62 °C
3	1998	+ 0,60 °C
4	2003	+ 0,58 °C
5	2002	+ 0,58 °C
6	2009	+ 0,56 °C
7	2006	+ 0,56 °C
8	2007	+ 0,55 °C
9	2004	+ 0,54 °C
10	2011	+ 0,52 °C

* Écart entre les mesures effectuées pour l'ensemble des terres (température de l'air) et des océans (température de l'eau) et la moyenne du XX^e siècle, soit 13,9 °C. En France, 2011 a été l'année la plus chaude depuis plus d'un siècle.

Classement des 10 années les plus chaudes depuis 1850

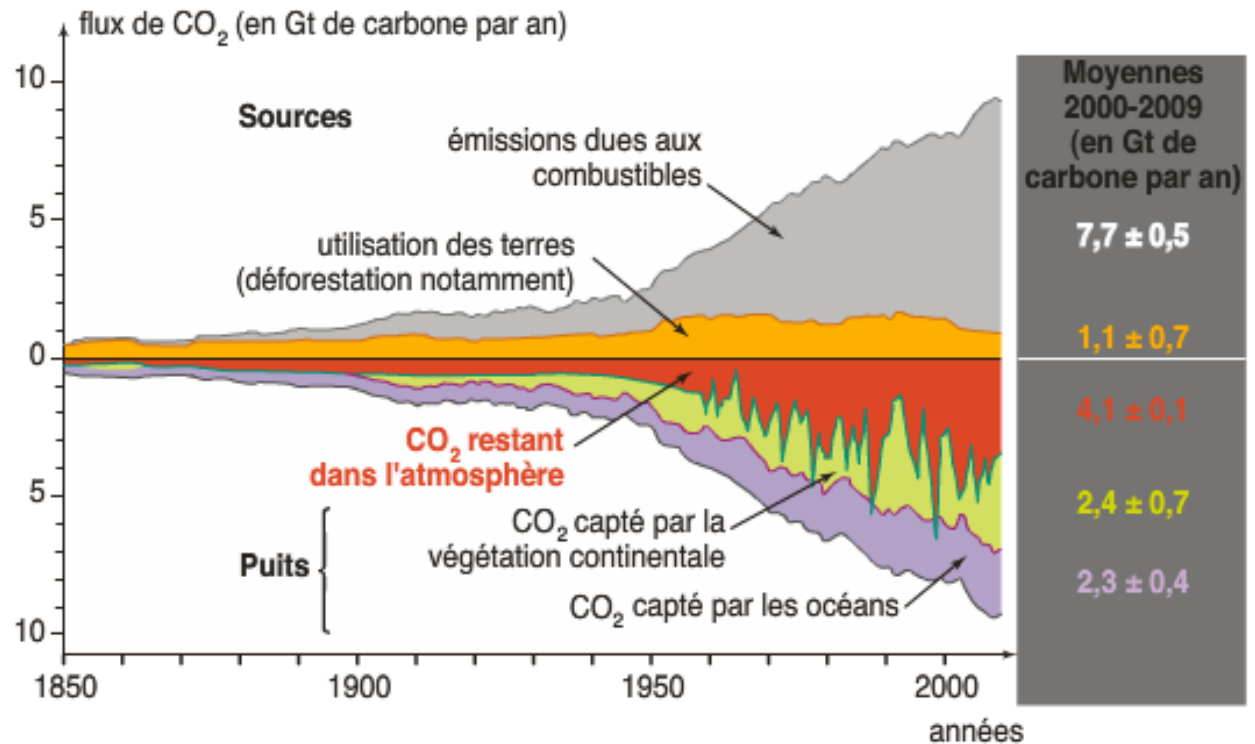


Évolution de la teneur de l'atmosphère en CO₂ et de la température moyenne à la surface du globe depuis le début du XX^e siècle

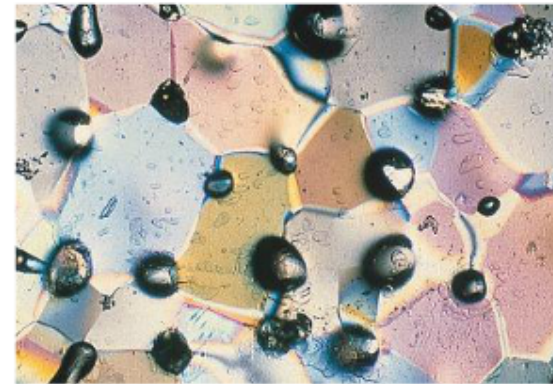
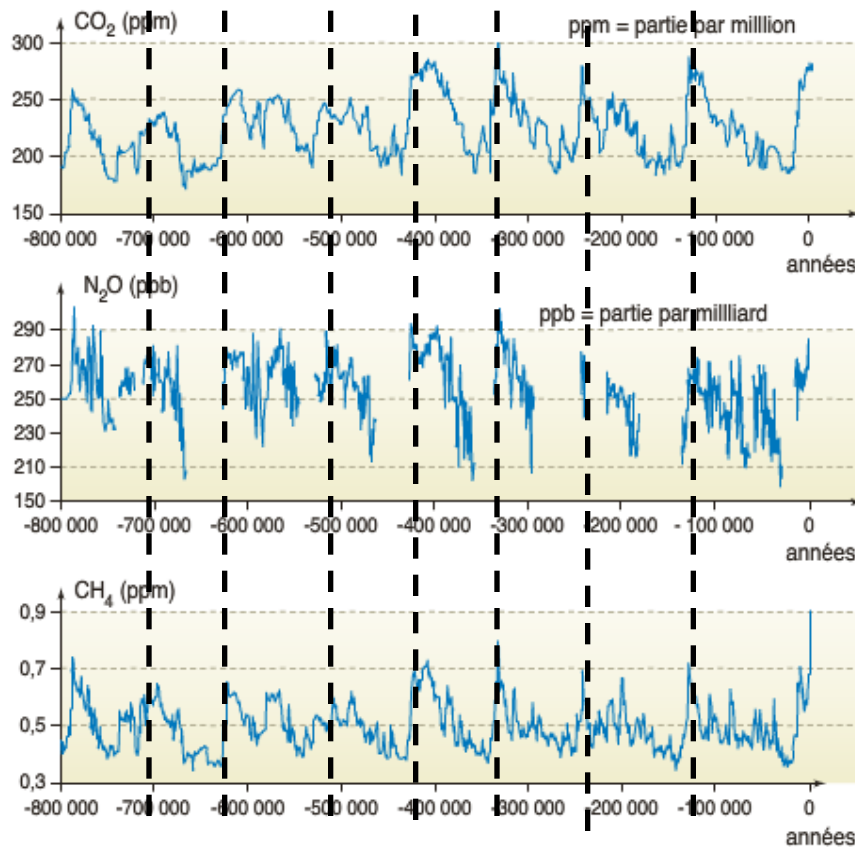
Doc 3. « sources » et « puits » de carbone depuis 1850 (doc 2 p 120 Bordas)

Le graphique ci-contre illustre un bilan des principaux flux de CO₂ liés aux activités de l'Homme. Il concerne donc :

- les « sources », c'est-à-dire les activités humaines qui contribuent à enrichir l'atmosphère en CO₂ ;
- les « puits », c'est-à-dire les réservoirs qui absorbent le carbone de l'air contribuant ainsi à faire baisser la quantité de CO₂ atmosphérique.



Doc 4. Cyclicité des variat° des GES : CO₂, N₂O et CH₄ (voir TD2)



Bulles d'air emprisonnées dans les cristaux de glace (observation au microscope polarisant)

Les bulles d'air piégées dans la glace lors de la transformation de la neige en glace contiennent de l'air de l'époque où s'est formée cette glace. Plus la glace est ancienne, plus ces bulles sont elles-mêmes anciennes. Leur analyse permet de connaître l'évolution de la concentration des gaz atmosphériques.

Le *graphe* représente cette évolution pour trois gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO₂), le protoxyde d'azote (N₂O) et le méthane (CH₄) au cours des 800 000 dernières années.

Doc. 2 Les résultats de l'analyse des carottes de glace prélevées en Antarctique.

Fluctuat° remarquables des GES : « pics » de GES env tous les **100 000 ans** = mise en ev de variat° cycliques d'une périodicité d'environ 100 000 ans.

Question : Discutez de l'influence des activités humaines sur le climat.

L'évolution de la concentration en CO_2 atmosphérique dépend de l'équilibre entre les sources (combustion fossiles + déforestation + respiration des EV) et les puits de CO_2 (piégeage par océans + photosynthèse).

Activités humaines = émissions de CO_2
- Combustibles fossiles + déforestation -

↓ +
↑ CO_2 atm

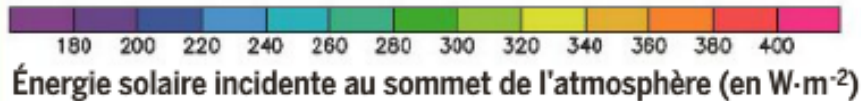
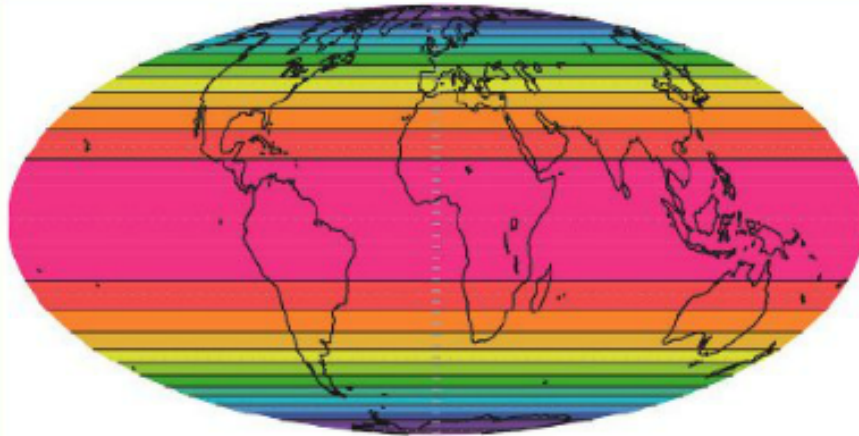
↓ +
↑ effet de serre

= effet de serre additionnel

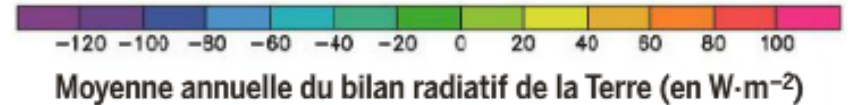
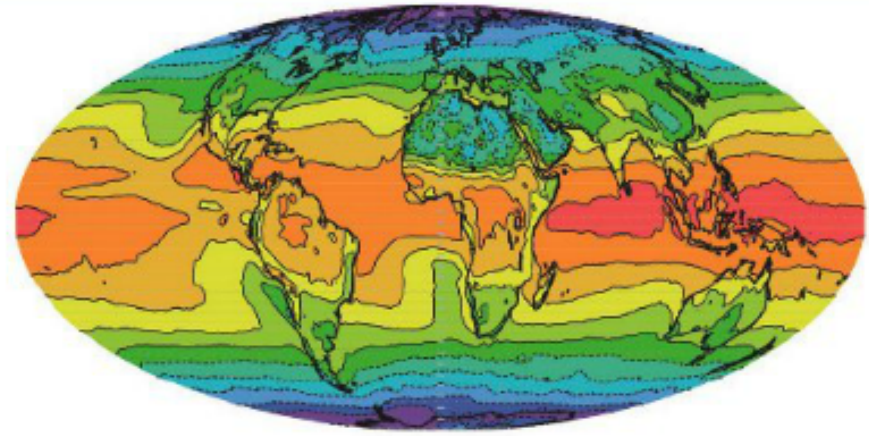
↓ +
↑ T° atm de manière « anormale »
= réchauffement climatique

Activité 2 - Le climat : une intervention de nombreux facteurs

Doc 1. énergie solaire incidente et bilan radiatif de la Terre (doc 1 p 122 Bordas)



Des mesures satellitales ont permis d'établir le *planisphère ci-dessus*. Si l'énergie solaire incidente moyenne représente $342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, elle est plus élevée dans la région équatoriale (de 400 à $430 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) que dans les régions polaires ($< 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).



Il est possible de calculer le **bilan radiatif** de la Terre, c'est-à-dire la différence entre l'énergie solaire absorbée et la chaleur rayonnée dans l'espace. Certains facteurs peuvent limiter la fuite de chaleur vers l'espace et tendent donc à réchauffer la Terre ; pour d'autres, c'est le contraire.

Doc 2. L'albédo, un acteur important du climat (doc 2 p 122 Bordas)

- **La notion d'albédo**

L'énergie du rayonnement solaire parvenant sur la planète n'est pas totalement absorbée. Une partie de ce rayonnement incident est réfléchi vers l'espace.

On définit l'**albédo** comme le rapport entre l'énergie réfléchi et l'énergie reçue (incidente). On peut le définir au niveau d'une surface (*voir expérimentation ci-après*). On peut aussi le définir au niveau d'une région du globe (*voir document 3*).

- **Une mesure expérimentale de l'albédo**



Les mesures peuvent être réalisées à l'aide d'un luxmètre ou, comme ici, avec un radiomètre.

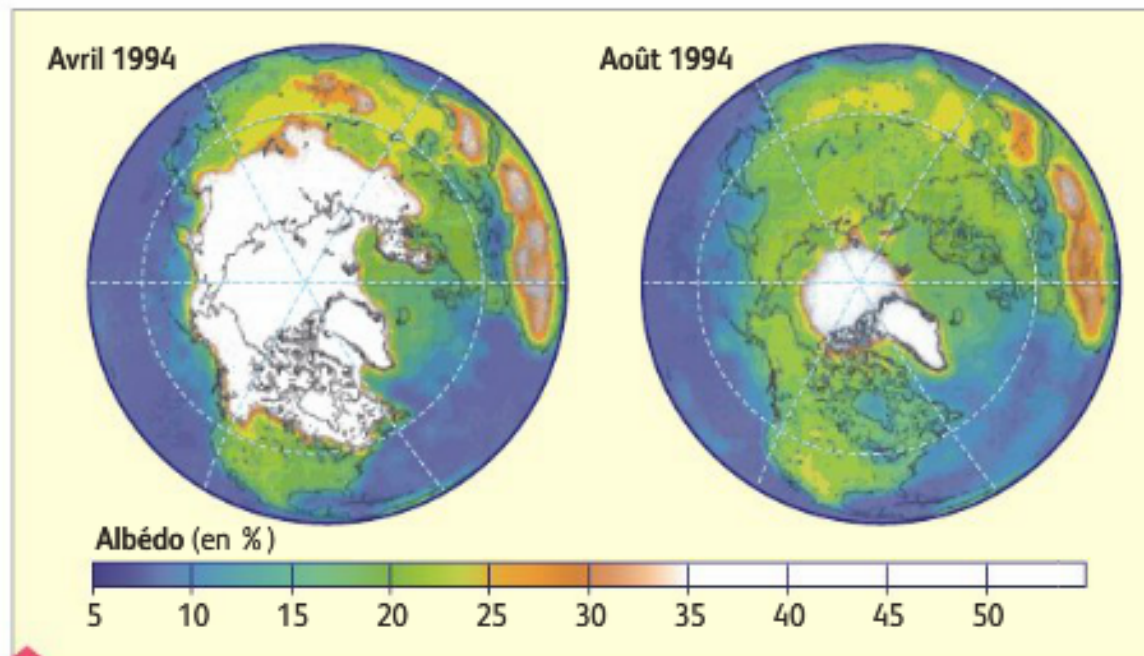
Matériau utilisé	Albédo (en %)
Feuille blanche mate	90
Feuille noire mate	10
Sable de Fontainebleau	65
Herbe	25

- **L'albédo est un facteur clé du climat**

La température moyenne à la surface de la Terre est de 15 °C

Si la Terre était recouverte...	...sa température de surface serait :
...d'un océan	32 °C
...de forêts	24 °C
...de déserts	13 °C
...de glace	- 52 °C

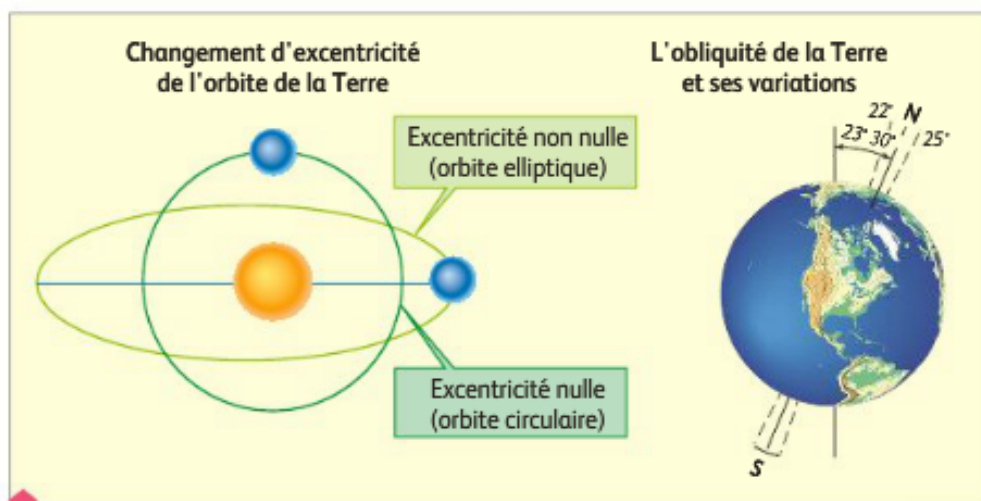
- ▶ La surface de la **banquise** et de la calotte glaciaire qui recouvrent l'hémisphère nord varie au cours des saisons. Elle est maximale en fin d'hiver et minimale en fin d'été.
- ▶ L'albédo d'un objet est le rapport entre l'énergie qu'il réfléchit et l'énergie qu'il reçoit du Soleil. Plus une surface est réfléchissante, moins elle s'échauffe. Alors que l'albédo moyen de la Terre (hors zone glacée) est de 0,2, l'albédo moyen des glaces est de 0,85.



▶ **Albédo de l'hémisphère nord de la Terre mesuré par satellite au cours de 2 mois de l'année.**

Doc 3. énergie solaire incidente et paramètres orbitaux

► La quantité d'énergie solaire reçue par la Terre à un endroit donné de sa surface dépend notamment de trois paramètres évoluant périodiquement : l'**excentricité** de son orbite autour du Soleil, l'**obliquité** de l'axe de rotation de la planète par rapport au plan de l'orbite et la direction vers laquelle pointe cet axe à un moment de l'année alors qu'il évolue suivant un mouvement de **précession**.



► **Variations de l'excentricité de l'orbite terrestre et de l'obliquité de la planète.**

L'obliquité de la Terre varie entre 22° et 25°; elle est actuellement de 23°30'.

Excentricité : valeur exprimant l'aplatissement d'une ellipse.

L'excentricité de l'orbite terrestre varie de 0 à 6 % suivant des périodicités de 400 000 ans et 100 000 ans.

Obliquité : angle qui caractérise l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'orbite ; elle oscille entre 22° et 25° suivant une périodicité de 41 000 ans.

Précession : mouvement très lent de rotation de l'axe d'un corps, lui-même en rotation. La précession de l'axe de rotation de la Terre évolue suivant des périodicités de 23 000 ans et 19 000 ans.

Maximum glaciaire : époque durant laquelle l'extension des calottes glaciaires est maximale.

Banquise : eau de mer gelée sur 2 à 3 m d'épaisseur.

Doc 4. température et solubilité du CO_2

► Dans les océans, la température moyenne des eaux superficielles (profondeur inférieure à 1 000 m) dépend du climat alors que plus profondément elle reste constante et voisine de 1 à 2°C. La température des eaux océaniques superficielles est actuellement de 15°C alors qu'au cours du der-

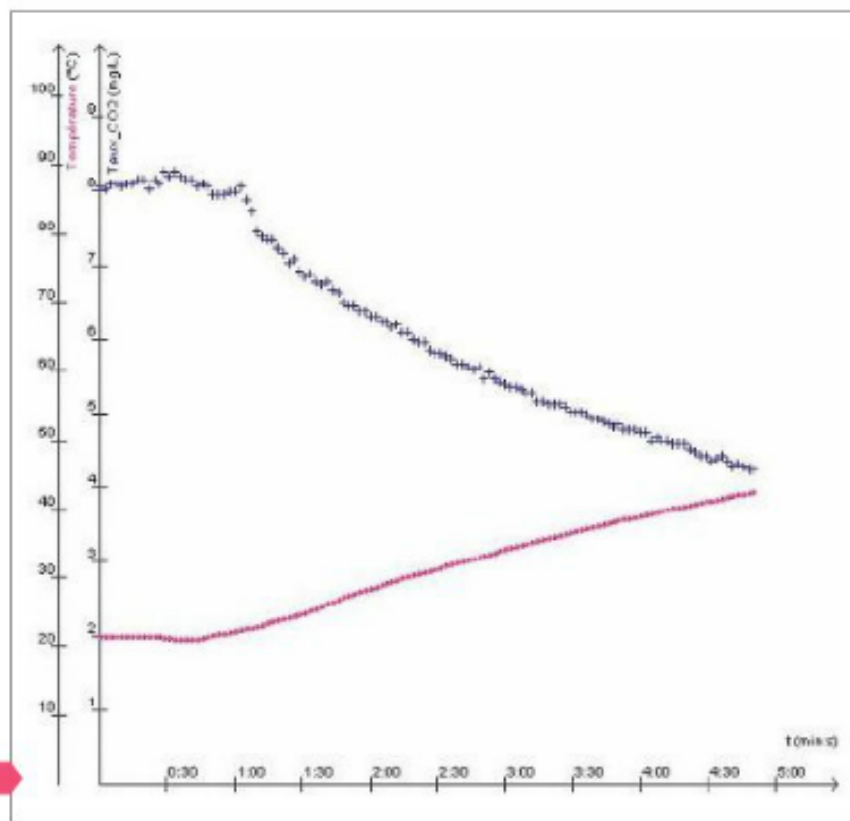
nier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, elle devait être de 10°C.

► On s'intéresse ici à l'influence de la température sur la solubilité du CO_2 dans l'eau.

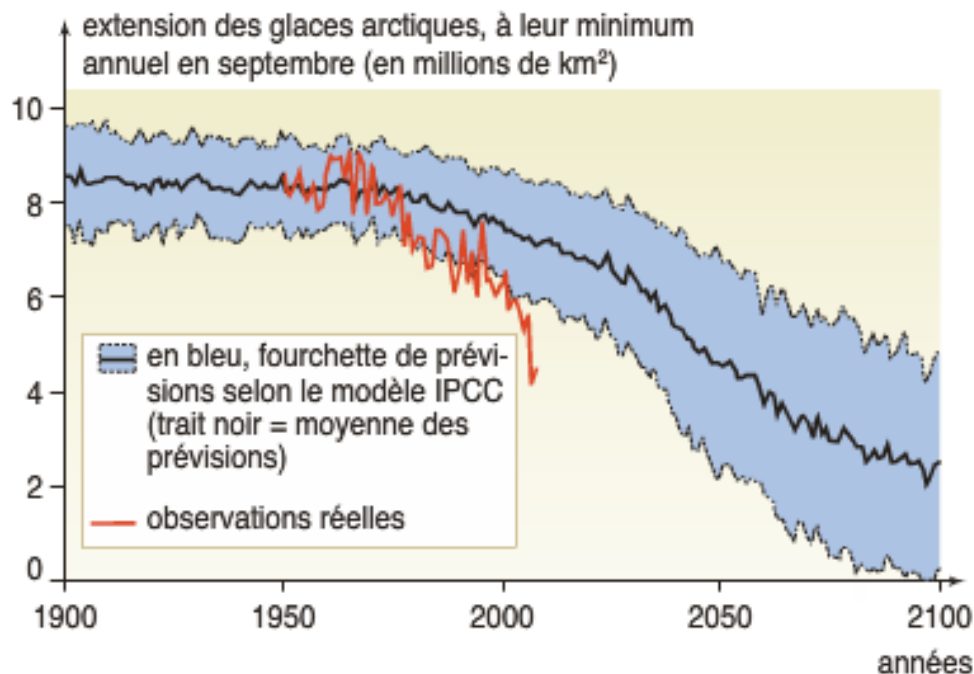
RÉALISER

1. Remplir à moitié un récipient avec de l'eau salée (35 g.L⁻¹) bouillie, le fermer hermétiquement et laisser l'eau refroidir.
2. Plonger une sonde à CO_2 et un thermomètre dans l'eau par les orifices prévus dans le couvercle. Placer le récipient sur une plaque chauffante.
3. Enrichir l'eau en CO_2 en y expirant plusieurs fois par le biais d'un tube plongeant dans l'eau.
5. Lancer l'enregistrement des données et allumer la plaque chauffante au bout de 45 s.

Influence de la température sur la solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau.



Doc 5. La notion de rétroaction positive : un emballement du système (doc 5 p 123 Bordas)



Au cours des dernières décennies, la banquise arctique (mesurée en septembre), a diminué en moyenne de 1,5 million de km² par décennie (ce qui représente presque trois fois la surface de la France métropolitaine). Or, la banquise a un albédo très supérieur à l'océan et absorbe donc beaucoup moins l'énergie solaire que l'eau libre. Plus la banquise se réduit, plus l'océan Arctique se réchauffe rapidement, ce qui accélère la fonte du reste de la banquise. Ce mécanisme « d'auto-emballement » est qualifié de **rétroaction positive**. Les spécialistes estiment qu'un point de non-retour sera probablement atteint dans la décennie à venir.

Q1 - Expliquez pourquoi répartition solaire incidente et bilan radiatif ne se superposent pas exactement.

Q2 - Comment expliquer les cyclicités de 100 000 ans, 40 000 ans et 20 000 ans du climat observées au Quaternaire ?

Q3 - A l'aide d'un schéma bilan fonctionnel, expliquez le devenir probable de la banquise arctique.

Q1 - Expliquez pourquoi répartition solaire incidente et bilan radiatif ne se superposent pas exactement.

A cause de l'albédo = énergie réfléchie/énergie incidente.

Il varie en fonction de la nature de la surface terrestre : un albédo élevé (glace) réduit le bilan radiatif de la zone concernée (car - d'énergie absorbée), donc réduction de la température.

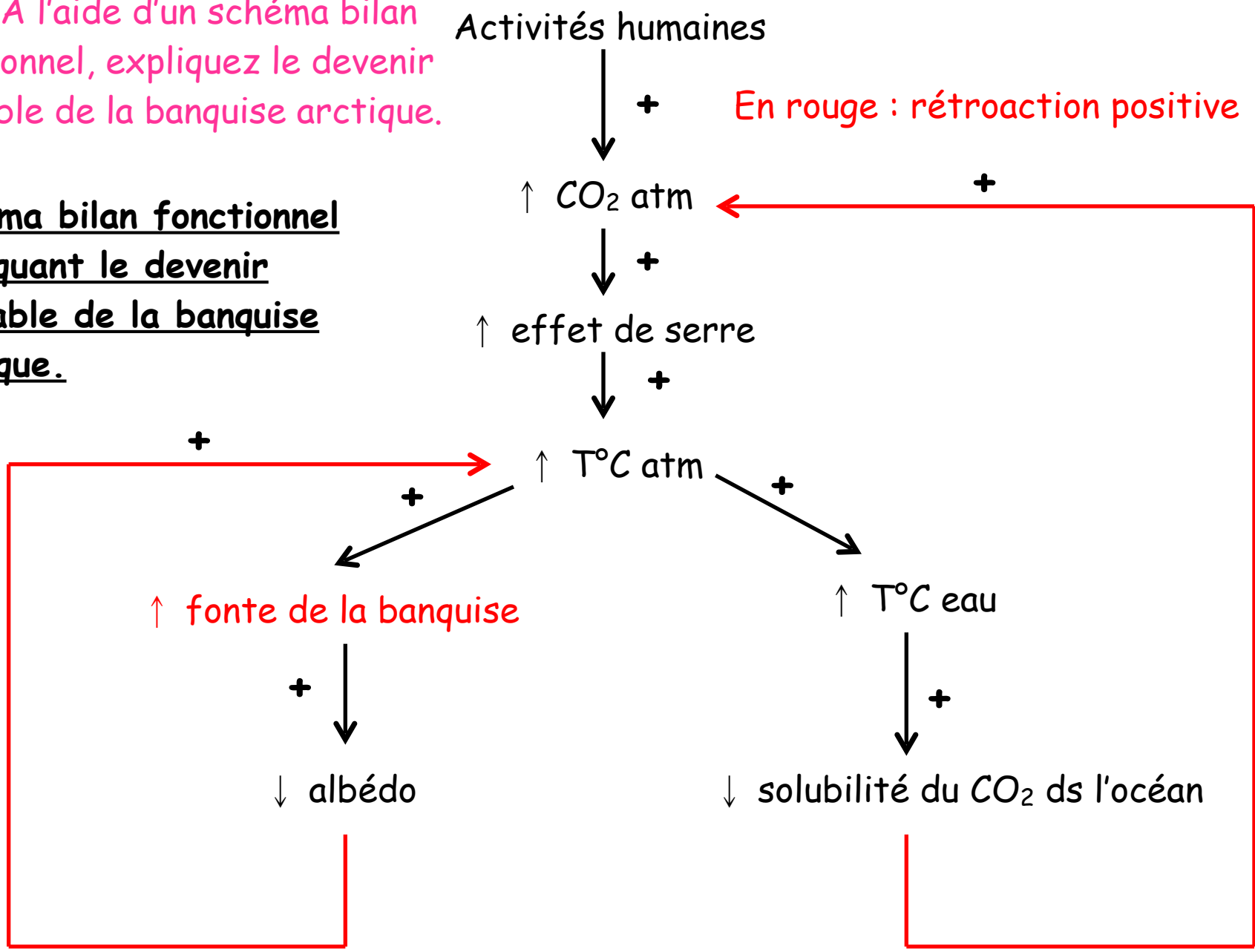
Q2 - Comment expliquer les cyclicités de 100 000 ans, 40 000 ans et 20 000 ans du climat observées au Quaternaire ?

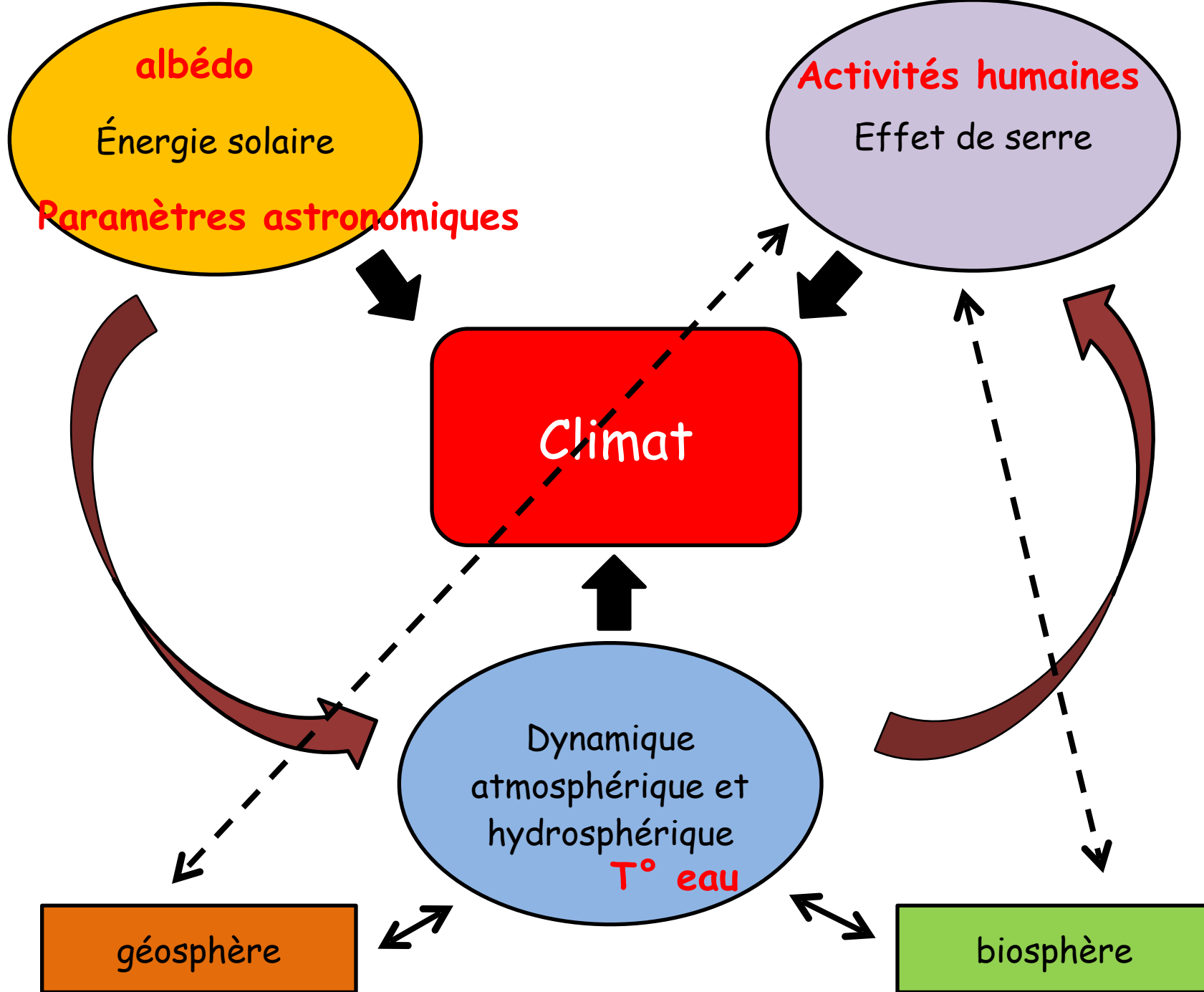
Différentes périodes cycliques

- 100 000 ans => Excentricité de l'orbite terrestre.
- 40 000 ans => Obliquité de l'axe de rotation de la Terre (varie entre 23° et 30°)
- 20 000 ans => Précession (oscillation de l'axe de la Terre - comme une toupie)

Q3 - A l'aide d'un schéma bilan fonctionnel, expliquez le devenir probable de la banquise arctique.

Schéma bilan fonctionnel expliquant le devenir probable de la banquise arctique.





Le climat résulte d'une multitude d'interactions...

Activité 3 - Le climat de demain : une modélisation délicate

Activité 3 p 124-125 du Bordas

Doc. 1 et 2 Montrez pourquoi une politique de réduction des gaz à effet de serre ne peut avoir un effet immédiat.

Doc. 3 Identifiez les contraintes et les enjeux de l'établissement de modèles climatiques.

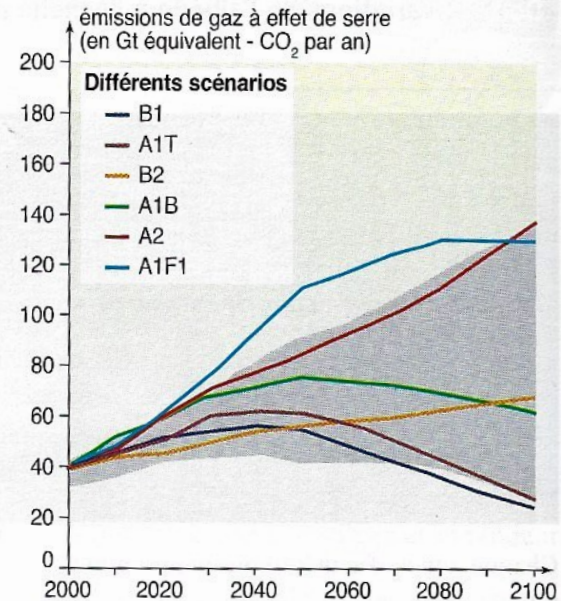
Doc. 4 Exploitez les simulations pour décrire l'évolution de la température et du niveau des mers selon les scénarios envisagés et montrez en quoi la connaissance des rétroactions exercées par la végétation et les océans est essentielle.

On appelle « scénario socio-économique » un ensemble d'hypothèses cohérentes concernant l'évolution démographique, économique ou sociologique de la planète. Différents scénarios envisagés par le GIEC (Groupe d'experts Intergouverne-

mental sur l'Evolution du Climat) permettent d'estimer les émissions futures de gaz à effet de serre, dans le monde, selon le type de développement envisagé et leur influence sur le climat.

Scénarios du GIEC	T ₂₁₀₀ *
Scénario B1 : le moins polluant, il décrit un monde où la population culmine au milieu du siècle et décline ensuite, où l'accent est mis sur des solutions mondiales orientées vers une économie de services et d'information.	+ 1,8 °C
Scénario A1T : la croissance est très rapide, mais l'économie s'appuie sur des sources d'énergie non fossiles et intègre rapidement des nouvelles technologies plus efficaces.	+ 2,4 °C
Scénario B2 : il décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales, pour assurer une durabilité économique, sociale et environnementale.	+ 2,4 °C
Scénario A1B : la croissance économique très rapide s'appuie sur des sources d'énergie équilibrées entre énergies fossiles et autres (nucléaire, renouvelables). De nouvelles technologies plus efficaces sont introduites rapidement. C'est le scénario qui « colle » le plus aux prévisions actuelles.	+ 2,8 °C
Scénario A2 : il décrit un monde très hétérogène où le développement économique est faible avec de lents progrès technologiques.	+ 3,4 °C
Scénario A1F1 : le plus polluant, il décrit un monde à croissance très rapide qui recourt fortement aux énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole).	+ 4 °C

* T₂₁₀₀ : augmentation prévisible de la température à l'horizon 2100.



Émissions mondiales de gaz à effet de serre selon les différents scénarios envisagés par le GIEC. La zone grise représente la dernière « fourchette » envisagée en 2007.

Doc. 1 Différents scénarios pour l'évolution des émissions de gaz à effet de serre.

Activité 3 - Le climat de demain : une modélisation délicate

Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre doivent être couplés d'une part à la durée de séjour approximative de ces gaz dans l'atmosphère (*tableau ci-dessous*), d'autre part à leur pouvoir de réchauffement. En effet, sur une période de 100 ans, un kilogramme de méthane a un impact sur l'effet de serre 25 fois supérieur à un kilogramme de CO₂.

Gaz à effet de serre	Durée de séjour dans l'atmosphère
CO ₂	100 ans
Méthane	12 ans
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	120 ans
CFC et HCFC	12 à 130 ans
tétrafluorométhane	50 000 ans
hexafluorure de soufre	3 200 ans

Doc. 2 Durée de séjour dans l'atmosphère des gaz à effet de serre et « pouvoir réchauffant ».

Doc. 1 et 2 Montrez pourquoi une politique de réduction des gaz à effet de serre ne peut avoir un effet immédiat.

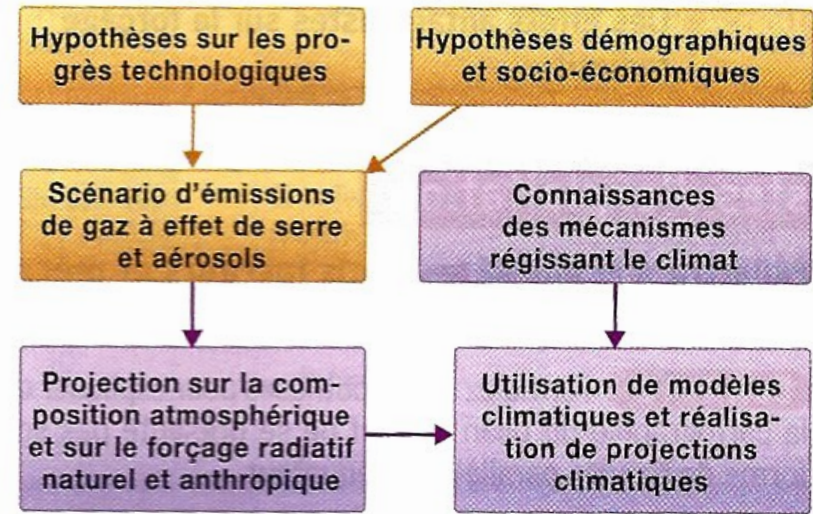
Quelle que soit l'évolution démographique, technologique ou socio-économique de la planète, il y aura une augmentation de la température moyenne en 2100 comprise entre + 1,8 °C et + 4 °C. Cette estimation peut sembler paradoxale quand on observe l'évolution prévue des émissions de gaz à effet de serre : en effet, dans tous les scénarios il y a croissance des émissions jusqu'en 2050, puis selon les scénarios B1, A1B et A1T, il y a décroissance alors que les scénarios B2, A2 continuent de voir les émissions augmenter jusqu'en 2100.

La solution est donnée dans le document 2 où l'on observe le temps de séjour des principaux gaz à effet de serre. Ceux-ci rejoignent et restent dans l'atmosphère au minimum 12 ans pour le CH₄ et de l'ordre de la centaine d'années pour le CO₂ et le N₂O. Couplées aux données sur leur pouvoir réchauffant, les mesures de durée de séjour dans l'atmosphère permettent de comprendre les estimations d'augmentation de température mais aussi et surtout qu'une politique de décroissance des émissions de GES ne peut être suivie immédiatement d'un effet sur la concentration atmosphérique : il existe un délai minimum d'environ 40 ans avant d'en observer les conséquences.

Doc. 3 Identifiez les contraintes et les enjeux de l'établissement de modèles climatiques.

L'enjeu majeur actuel est de pouvoir effectuer les projections climatiques les plus fiables possibles pour informer les différents citoyens et les gouvernements, leur permettant ainsi d'adopter une attitude et des mesures adaptées à la situation envisagée. Tout l'enjeu réside dans la fiabilité des modèles numériques climatiques construits.

La modélisation de l'évolution climatique par les experts du GIEC conduit à redouter la répétition d'événements climatiques extrêmes (tempêtes, inondations...).



Doc. 3 Des paramètres, pris en compte par les experts du GIEC, pour modéliser le climat.

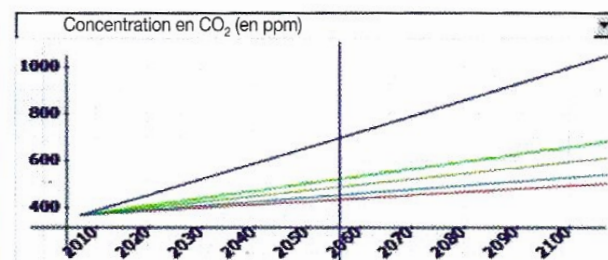
Pour cela, de nombreuses variables doivent être « rentrées » dans les modèles : les évolutions technologiques pouvant être mises en jeu pour réduire les émissions, l'évolution démographique et socio-économique mondiale, les connaissances sur les mécanismes régissant le climat (activité solaire, rétroactions exercées par la végétation, les océans, la fonte des glaces...). Ce sont autant de contraintes pour établir des modèles pertinents.

Le logiciel « Simclimat » permet de modéliser de façon simple le climat de demain. Différents paramètres peuvent être choisis selon la durée de la simulation (échelle de la décennie, du siècle ou du millénaire) : la valeur des sources de CO₂ (dont les émissions anthropiques de CO₂), en Gt/an, la valeur des

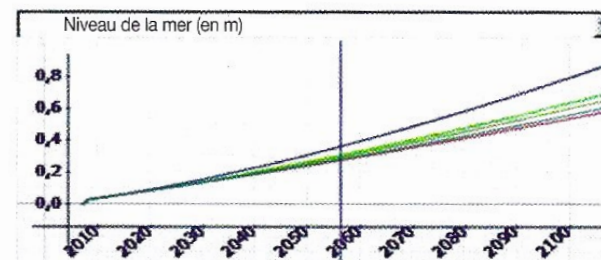
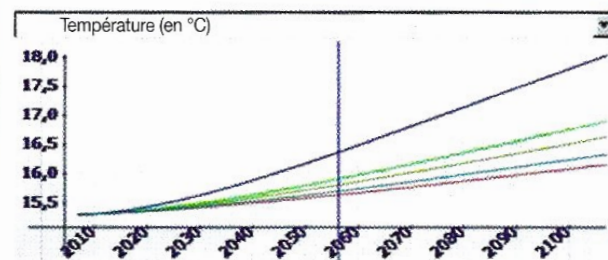
puits de CO₂ (dont le stockage biologique), en Mt/an, la possibilité de faire intervenir et de régler certaines rétroactions comme l'albédo, la solubilité du CO₂ océanique, les flux de CO₂ absorbés par la végétation et l'influence de la concentration d'eau dans l'atmosphère.



Les simulations ci-dessous ont été obtenues en choisissant une durée de 100 ans et en fixant comme invariables les paramètres modifiant l'énergie solaire incidente. Des courbes complémentaires peuvent être obtenues sur la variation de l'albédo et sur la position en latitude des calottes polaires.



Courbes	Conditions fixées
Rouge	• Scénario B1 : réduction des émissions anthropiques de CO ₂ de 8 à 6 Gt/an.
Verte	• Scénario B2 : augmentation des émissions anthropiques de CO ₂ de 8 à 14 Gt/an.
Bleu foncé	• Scénario A2 : augmentation des émissions anthropiques de CO ₂ de 8 à 30 Gt/an.
Marron clair	• Scénario B2 avec augmentation de 10 % des flux de CO ₂ épongés par la végétation.
Bleu clair	• Scénario B2 avec augmentation de 10 % des flux de CO ₂ épongés par la végétation et augmentation de 10 % des flux de CO ₂ épongés par l'océan.



Doc. 4 Exploitez les simulations pour décrire l'évolution de la température et du niveau des mers selon les scénarios envisagés et montrez en quoi la connaissance des rétroactions exercées par la végétation et les océans est essentielle.

Les courbes en rouge, vert et bleu marine montrent l'évolution linéaire au cours du siècle à venir des températures, du niveau de la mer et de la concentration en CO_2 pour les scénarios B1, B2 et A2 si l'on maintient les valeurs actuelles d'incidence solaire, de l'albédo, des rétroactions exercées par la végétation et les océans.

	Scénario B1 : réduction des émissions de 8 à 6 Gt/an	Scénario B2 : augmentation des émissions de 8 à 14 Gt/an	Scénario A2 : augmentation des émissions de 8 à 30 Gt/an
Température (en °C) en 2100	+ 1 °C	+ 1,7 °C	+ 2,7 °C
Niveau de la mer (en m) en 2100	+ 0,5	+ 0,6	+ 0,8

Doc. 4 Exploitez les simulations pour décrire l'évolution de la température et du niveau des mers selon les scénarios envisagés et montrez en quoi la connaissance des rétroactions exercées par la végétation et les océans est essentielle.

La connaissance des rétroactions exercées par la végétation et par les océans (puits de CO_2) est essentielle car, si l'on reprend le scénario B2 en augmentant la seule productivité végétale de 10 % alors on réduit l'augmentation de + 1,7 °C à + 1,3 °C et la montée des eaux de 0,1 m. Si l'on ajoute une augmentation du flux de CO_2 vers l'océan de 10 % alors on obtient pratiquement les estimations correspondant au scénario B1 de réduction des émissions.

Bilan en gros :

- Proposition de différents scénarios par le GIEC
- Tous les modèles prévoient une augmentation de température de 2 à 4°C d'ici à 2100.

La modélisation du climat de demain est délicate car l'établissement des estimations dépend de nombreuses contraintes qu'il faut évaluer de façon la plus pertinente possible : incertitude sur la démographie, l'économie mondiale, les progrès technologiques et sur certains mécanismes régissant le climat. Les modèles climatiques globaux reposent donc sur des scénarios qui sont réévalués régulièrement en fonction de l'économie globale.

Bilan :

