

Thème I : Science, Climat et Société.

Thème 1 : Science, climat et société

L'atmosphère primitive de la Terre était différente de celle d'aujourd'hui. Sa transformation au cours des milliards d'années est liée aux processus géologiques et biologiques. Depuis la révolution industrielle, l'activité humaine modifie de manière significative la composition atmosphérique. Ces modifications affectent l'équilibre dynamique des enveloppes fluides de la Terre. Les conséquences de l'activité humaine sur la composition atmosphérique, celles qui sont déjà observées et celles qui sont prévisibles, sont multiples et importantes, tant pour l'humanité que pour les écosystèmes. Les choix raisonnés des individus et des sociétés dans ce domaine s'appuient sur les apports des sciences et des technologies.

Histoire, enjeux et débats - Les enjeux du réchauffement climatique global. - Les acteurs des analyses climatiques : recherche et programmes mondiaux (Organisation Météorologique Mondiale, modèles climatiques) ; coordination (Nations-Unies) ; évaluation (Groupe Intergouvernemental pour l'Étude du Climat). - Un enjeu mondial : l'océan. - Les ressources et les utilisations de l'énergie dans le monde. - Le trou dans la couche d'ozone : de sa découverte à des prises de décisions mondiales.

Chapitre 2 : La complexité du système climatique.

Le système climatique et son évolution dans le temps résultent de plusieurs facteurs naturels et d'interactions entre océans, atmosphère, biosphère, lithosphère et cryosphère. Il est nécessaire de prendre en compte ces interactions à différentes échelles spatiales et temporelles (de l'année au million d'années voire davantage). Le système climatique présente une variabilité spontanée et réagit aux perturbations de son bilan d'énergie par des mécanismes appelés rétroactions. Les facteurs anthropiques ont des conséquences irréversibles à court terme.

Savoirs : *Un climat est défini* par un ensemble de moyennes de grandeurs atmosphériques observées dans une région donnée pendant une période donnée. Ces grandeurs sont principalement la température, la pression, le degré d'hygrométrie, la pluviométrie, la nébulosité, la vitesse et la direction des vents. La climatologie étudie les variations du climat local ou global à moyen ou long terme (années, siècles, millénaires...). La météorologie étudie les phénomènes atmosphériques qu'elle prévoit à court terme (jours, semaines). La température moyenne de la Terre, calculée à partir de mesures *in situ* et depuis l'espace par des satellites, est l'un des indicateurs du climat global. Il en existe d'autres : volume des océans, étendue des glaces et des glaciers... Le climat de la Terre présente une variabilité naturelle sur différentes échelles de temps. Toutefois, depuis plusieurs centaines de milliers d'années, jamais la concentration du CO₂ atmosphérique n'a augmenté aussi rapidement qu'actuellement.

Depuis un siècle et demi, on mesure un réchauffement climatique global (environ +1°C). Celui-ci est la réponse du système climatique à l'augmentation du forçage radiatif (différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise) due aux émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère : CO₂, CH₄, N₂O et vapeur d'eau principalement. Lorsque la concentration des GES augmente, l'atmosphère absorbe davantage le rayonnement thermique infrarouge émis par la surface de la Terre. En retour, il en résulte une augmentation de la puissance radiative reçue par le sol de la part de l'atmosphère. Cette puissance additionnelle entraîne une perturbation de l'équilibre radiatif qui existait à l'ère préindustrielle. L'énergie supplémentaire associée est essentiellement stockée par les océans, mais également par l'air et les sols, ce qui se traduit par une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre et la montée du niveau des océans.

L'évolution de la température terrestre moyenne résulte de plusieurs effets amplificateurs (rétroaction positive), dont : - l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère ; - la décroissance de la surface couverte par les glaces et diminution de l'albédo terrestre ; - le dégel partiel du permafrost provoquant une libération de GES dans l'atmosphère. L'océan a un rôle amortisseur en absorbant à sa surface une fraction importante de l'apport additionnel d'énergie. Cela conduit à une élévation du niveau de la mer causée par la dilatation thermique de l'eau. À celle-ci s'ajoute la fusion des glaces continentales. Cette accumulation d'énergie dans les océans rend le changement climatique irréversible à des échelles de temps de plusieurs siècles. À court terme, un accroissement de la végétalisation constitue un puits de CO₂ et a donc un effet de rétroaction négative (stabilisatrice).

Savoirs faire :

Distinguer sur un document des données relevant du climat d'une part, de la météorologie d'autre part. Identifier des tendances d'évolution de la température sur plusieurs échelles de temps à partir de graphiques. Identifier des traces géologiques de variations climatiques passées (pollens, glaciers).

Déterminer la capacité d'un gaz à influencer l'effet de serre atmosphérique à partir de son spectre d'absorption des ondes électromagnétiques. Interpréter des documents donnant la variation d'un indicateur climatique en fonction du temps (date de vendanges, niveau de la mer, extension d'un glacier, ...). Analyser la variation au cours du temps de certaines grandeurs telles que l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂, la variation de température moyenne, des indicateurs de l'activité économique mondiale.

Identifier les relations de causalité (actions et rétroactions) qui sous-tendent la dynamique d'un système. Réaliser et interpréter une expérience simple, mettant en évidence la différence d'impact entre la fusion des glaces continentales et des glaces de mer. Estimer la variation du volume de l'océan associée à une variation de température donnée, en supposant cette variation limitée à une couche superficielle d'épaisseur donnée.

Prérequis et limites Les notions d'équilibre radiatif de la Terre et d'effet de serre atmosphérique, étudiées en classe de première, sont mobilisées. L'étude des paramètres orbitaux de la Terre et de leur influence sur le climat n'est pas au programme.

Séance 1 :

A) Météorologie et climatologie.

A- 1- Déterminer les critères et les rôles de ces disciplines

Introduction :

Depuis l'acquisition de son **atmosphère**, la **surface** de la planète **Terre** est soumise à de nombreux **phénomènes atmosphériques** (vents, pluies, chutes de neige, formation de nuages, tempêtes, tornades, cyclones...), plus ou moins intenses.

Ces mêmes phénomènes atmosphériques sont **étudiés** par deux **disciplines scientifiques** souvent confondues : la **météorologie** et la **climatologie**.

Elles étudient les **mêmes grandeurs physiques moyennes** qui concernent la **basse atmosphère**, c'est-à-dire la **troposphère** (limitée au 12 premiers kilomètres d'altitude et représentant 80% de la masse totale de l'atmosphère) :

- la **température** (mesurée en surface en°C) ;
- la **pression** (pression exercée par l'atmosphère à la surface terrestre, mesurée en Atm ou en Pa) ;
- l'**hygrométrie** (proportion de vapeur d'eau en suspension, mesurée % d'humidité) ;
- la **pluviométrie** (quantité de précipitations, mesurée en mm ou en L/m²) ;
- la **nébulosité** (densité de la couverture nuageuse, mesurée en octas) ;
- la **vitesse** et la **direction** des **vents** (mesurées en km/h et en degré de latitude (N/S) et de longitude (E/O)).

Ces deux disciplines recouvrent cependant chacune des **réalités différentes** car elles intègrent leurs **propres critères** pour utiliser ces grandeurs physiques.

PB : Comment différencier les deux disciplines climatologie et météorologie?

Bilan séance 1 :

La **météorologie** et la **climatologie** reposent sur l'étude des mêmes facteurs mais se distinguent par des **critères opposés de temps d'espace** :

- la **météorologie** analyse ces grandeurs moyennes sur de **courtes périodes**, allant d'une **journée** à une **semaine**, ceci au niveau d'une **zone géographique réduite** et **précise**, allant d'une **ville**, à une **région**, jusqu'à un **pays** : il s'agit donc d'une analyse dont les **critères** sont le **court terme** et la **localité**, c'est-à-dire une **échelle réduite**.

L'analyse météorologique recoupe des mesures effectuées par des **stations météorologiques locales**, avec des **images satellitales** : elle permet de réaliser des **bulletins prévisionnels** de la veille pour le lendemain.

- A l'opposé, la **climatologie** analyse ces grandeurs moyennes sur de **longues périodes**, allant d'une **année**, au **siècle**, jusqu'au **millénaire**, ceci au niveau de **zones géographiques étendues**, allant d'un **continent**, à un **ensemble de continents**, jusqu'à la **Terre entière** : il s'agit donc d'une analyse dont les **critères** sont le **long terme** et la **globalité**, c'est-à-dire une **grande échelle**.

L'analyse climatique recoupe des **mesures météorologiques relevées** par **satellite** en **différents points du globe**, par un **réseau mondial** de **stations**, avec d'autres **indicateurs climatiques**, qui sont par exemple la **température moyenne globale**, la **composition chimique** de l'**atmosphère**, le **volume** ou le **niveau** des **océans**, la **surface** ou l' des **banquises** et des **glaciers**...

Les **climatologues** tiennent également compte des **épisodes récurrents** de **forte canicule** ou de **grand froid**, ainsi que des **périodes** de **sécheresse** ou d'**inondation**...

Tous ces indicateurs permettent de de connaître le climat mondial actuel et d'en faire des projections sur 10, 100 ou 1000 ans.

Séance 2 :

A) Météorologie et climatologie.(suite)

A- 2- Évaluer les climats passés de façon indirecte

Introduction

Déterminer un climat nécessite la prise en compte de **nombreux paramètres** mesurés grâce à des **instruments** précis(et de plus en plus...). Évaluer l'évolution des climats grâce à ces outils est donc limitée à l'apparition de ceux ci !

Actuellement les **indicateurs climatiques** permettent de constater un **réchauffement climatique global exceptionnellement rapide** amorcé depuis **10² années** : augmentation de +1°C, dépassé en 2014, par rapport au début de l'ère industrielle (1850).

Au cours de son **histoire**, la **Terre** a déjà connu des **variations climatiques** (réchauffements ou refroidissements) **naturelles** (sans intervention anthropique) sur **différentes échelles de temps**.

La **science** qui étudie des variations climatiques naturelles passées est la **paléoclimatologie**.

Elle utilise certains **indices** pour **reconstituer** les **conditions climatiques** qui régnaient sur **Terre**, il y a **plusieurs milliers d'années** jusqu'à **quelques millions d'années**.

Il faut donc utiliser des manières indirectes pour retracer l'histoire climatique plus ancienne...

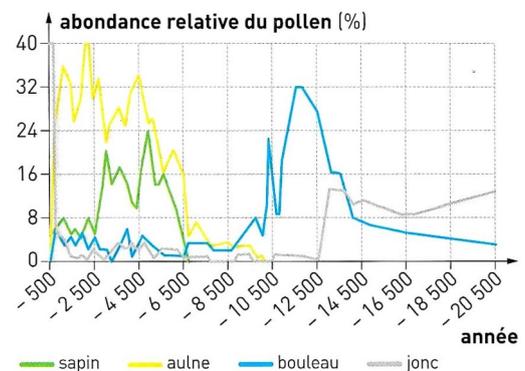
PB : Comment retracer les climats terrestres et quantifier leurs évolutions ?

Bilan séance 2 :

Pour connaître la **variabilité naturelle du climat** sur une **échelle de plusieurs milliers d'années**, on a recours à l'**étude de quantitative et qualitative des grains de pollen fossiles**, ou **paléo-palynologie**.

Ces grains de pollen sont libérés par les **végétaux à fleurs** au moment de la **belle saison** et ils sont **spécifiques** (taille, forme, aspect, structure...), c'est dire propres à chaque **espèce**.

Ils s'**accumulent** au cours du temps dans les **sédiments lacustres et marécageux**, où ils sont enfouis et **conservés**. Leur **abondance relative** dans les **roches sédimentaires** (en %) en fonction du **temps** (âge de la roche en milliers d'années) permet d'élaborer des **diagrammes polliniques**. En faisant **correspondre** à cette **abondance relative** à l'**espèce** correspondante et aux **préférences physico-chimiques** de cette espèce, on peut **reconstituer** une **succession de périodes paléoclimatiques**.



Diagrammes polliniques du site d'Amsoldingen (Suisse), obtenu avec le logiciel Paléobiome 2.

Pour connaître la **variabilité naturelle du climat** sur une **échelle du million d'années**, on a recours à l'**étude de quantitative et qualitative des isotopes de l'élément oxygène de la molécule d'eau**, ainsi que des gaz contenus dans les **bulles d'air** (d'atmosphère) **fossiles**, contenus dans les **calottes glaciaires anciennes** (glaciers et banquises) :

- Le **rapport** entre la **quantité** des **isotopes ¹⁸O** (isotope radioactif minoritaire) et **¹⁶O** (isotope froid majoritaire) retrouvé dans les **échantillons d'H₂O gelée**, permet d'**obtenir la température** (ou **paléo-température**) **atmosphérique** qui régnait au moment de leur dépôt par précipitation (pluie ou chute de neige).
- La **concentration** en **CO₂** contenu dans les **bulles d'air** retrouvées dans les **échantillons de glace**, permet d'obtenir la **proportion** de ce **gaz** qui existait alors dans l'**atmosphère** (ou **paléo-atmosphère**), au moment de son emprisonnement dans la glace.

Cette étude révèle que sur les **800 milles dernières années**, le **climat global** a subi une **alternance cyclique** (tous les 10 000 ans) de **périodes glacières** (baisse de la paléo-température corrélée avec celle de la concentration de CO₂ dans la paléo-atmosphère) et de **périodes inter-glacières** (augmentation de la paléo-température corrélée avec celle de la concentration de CO₂ dans la paléo-atmosphère).

Cependant, **jamais le climat global n'a subi un réchauffement aussi rapide que depuis le début du siècle dernier** (1920) : en 2014 l'augmentation de température supérieur à +1°C correspond, pour la première fois, à une concentration atmosphérique en CO₂ qui dépasse le seuil de 400 ppm.

Séance 3 :

B) Évaluer le bilan radiatif terrestre et les effets de sa modification.

Introduction :

La **température moyenne** à la **surface** de la **Terre** (base de la **troposphère**) est de **15°C** ; cette valeur est compatible avec la **présence d'eau liquide** dans l'**hydrosphère** et donc au **maintien** de la **biosphère**.

Cette température favorable est le résultat d'un phénomène de **réchauffement naturel** de **32°C** (T° moyenne = -18°C sans ce réchauffement) de la **basse atmosphère** par un **effet de serre** : certains gaz atmosphériques (Gaz à Effet de Serre ou **GES**) **absorbent** les **rayons** thermiques **IR**.

Cet effet de serre naturel participe au **bilan radiatif** (ou **énergétique** ou **thermique**) **terrestre** : il s'agit de la **différence** entre la **quantité d'énergie reçue** par la Terre, grâce au rayonnement solaire et **celle réémise** vers l'espace.

Depuis **1880** (début de l'ère industrielle), jusqu'à 2014, on a constaté un **réchauffement climatique** de **+1°C**, ce qui traduit un **déséquilibre** de ce **bilan radiatif** et donc un **bouleversement** de l'**effet de serre naturel**, par l'**activité anthropique**.

PB : Comment situer l'action de l'effet de serre dans le bilan radiatif terrestre ?

Comment l'activité anthropique agit-elle sur cet effet de serre pour déséquilibrer le bilan radiatif terrestre et réchauffer le climat ?

Bilan séance 3 :

La **Terre** reçoit une **puissance** (ou énergie) **solaire** moyenne de **340W/m²**, sous forme de **rayons solaires** visibles.

La **surface terrestre** (glaciers, banquises) et le **sommet** de la **troposphère** (nuages) **réfléchissent 30%** de cette puissance vers l'espace : c'est le mécanisme d'**albédo** ($A = \text{puissance solaire incidente} / \text{puissance solaire réfléchie}$).

70% de la puissance solaire restante et **absorbée** par l'**atmosphère** et par la **surface terrestre**, qui provoque leur **réchauffement**.

L'**énergie thermique** (calorifique) accumulée et ensuite **évacuée** sous forme de **rayons infrarouges (IR)**, de la surface terrestre vers l'atmosphère et inversement, puis de l'atmosphère vers l'espace.

Finalement, par le **transfert d'énergie thermique**, la **surface terrestre réabsorbe** une **énergie thermique** (rayons IR) **équivalente** à la **puissance solaire incidente** (rayons solaires visibles), soit **340 W/m²**.

Une **partie** de ces **rayons IR** est **absorbée** par certains **gaz** de l'**atmosphère** (vapeur d'eau **H₂O**, dioxyde de carbone **CO₂**, méthane **CH₄**, protoxyde d'azote **NO₂**, concentrés dans la troposphère), appelés **gaz à effet de serre (GES)**, car cette absorption **participe** naturellement à l'**élévation** de la **température atmosphérique**. Ils ont un **pouvoir** de **réchauffement global (PRG)**, qui dépend de leur **capacité** à **absorber** les **rayons IR** (ex : 85% à 15µm pour le CO₂), ainsi de leur **temps** de **résidence** dans l'atmosphère (ex : 100 ans pour le CO₂)

Le **bilan radiatif terrestre** correspond donc à la **différence** entre la **puissance solaire incidente** (égale à énergie thermique absorbée par la Terre) et la somme de **celle** qu'elle **réfléchit** (rayons visibles) et **réémet** (rayons IR) vers l'espace :

$$\text{BR} = \text{puissance solaire reçue} - (\text{puissance solaire réfléchie} + \text{énergie thermique réémise})$$

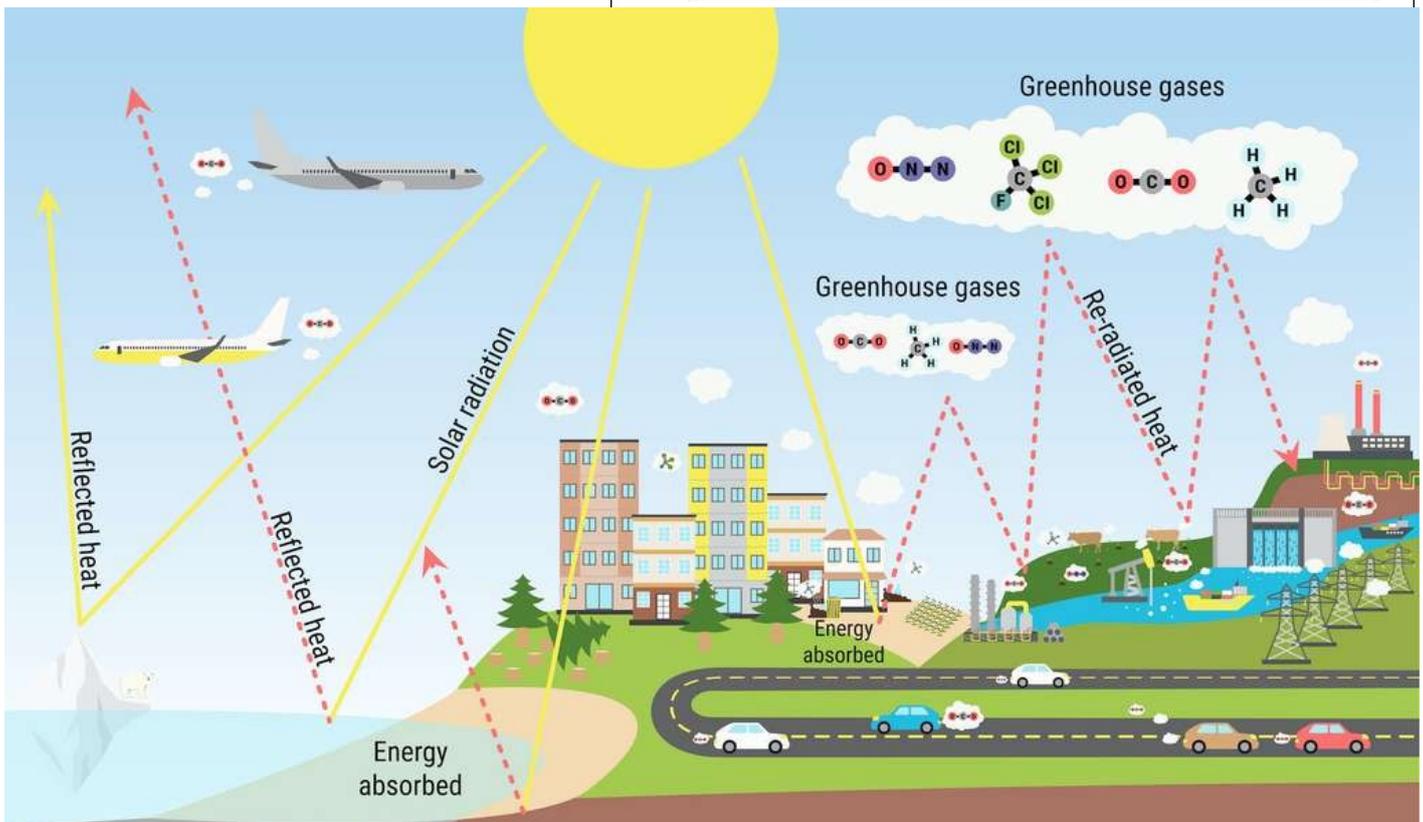
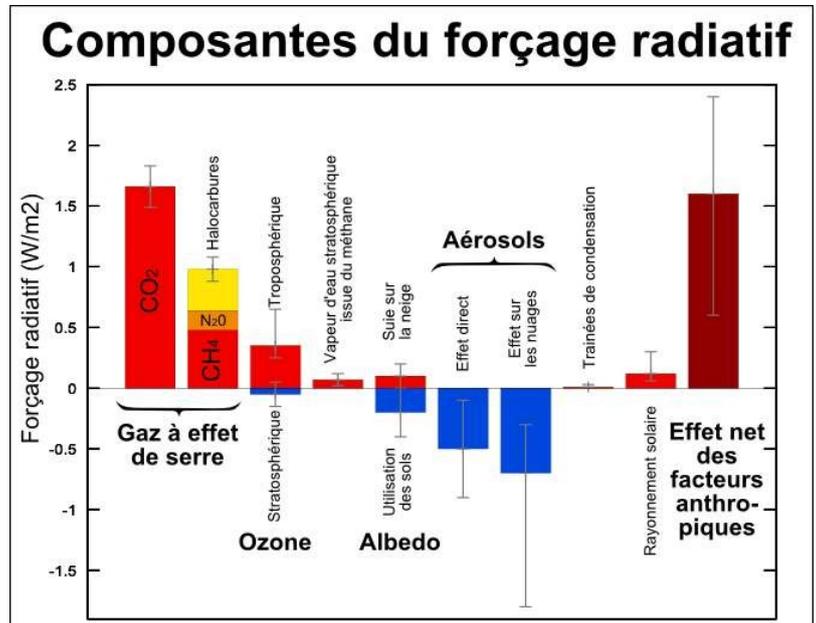
Avant l'ère industrielle, ce **bilan** était relativement et **naturellement équilibré**, c'est-à-dire approximativement de **valeur nulle**.

A partir de **1800**, l'**humanité s'industrialise** à grande vitesse et connaît par conséquent une **croissance** rapide de son **activité économique** (augmentation du PMB).

La **source d'énergie** de cette industrialisation a été la **combustion des énergies fossiles** (charbon, pétrole et gaz naturel - 86% des émissions anthropiques de CO₂) qui **libère** massivement du **CO₂** dans l'atmosphère (augmentation de 300 à 406 ppm entre 1800 et 2018).

Cet **excès de CO₂**(notamment) a **engendré** une **amplification globale** de l'**effet de serre**, qui a eu comme conséquence d'**augmenter** la **part d'énergie thermique absorbée** par l'atmosphère, **aux détriments**, de celle **réémise** : le **bilan radiatif** s'est alors **déséquilibré** et est **devenu positif**.

Cette variation positive du bilan radiatif est appelée **forçage radiatif positif** ; il est à l'origine de l'**augmentation** de **+1,2°C** de la **température globale moyenne** entre **1800** et **2020** et donc d'un **réchauffement climatique artificiel**.



Les facteurs naturels se trouvent essentiellement du côté de la quantité d'énergie reçue par le système Terre/atmosphère. Ainsi, les variations du cycle solaire ou encore celles de l'orbite de notre Terre et de son axe de rotation modifient la quantité de rayonnements reçus. Les éruptions volcaniques, en revanche, influent sur la quantité de rayonnements renvoyés. En augmentant la quantité d'aérosols en suspension dans l'atmosphère.

+ GES : Cette capacité d'absorption est directement liée aux propriétés spectroscopiques des molécules et donc à leur structure (leur capacité à « vibrer »). Les molécules diatomiques comme le diazote N_2 et le dioxygène O_2 n'ont pas cette capacité de vibration et donc n'absorbent pas(peu) le rayonnement dans le domaine des longueurs d'onde infrarouge. Elles ne jouent donc pas(peu) de rôle dans l'effet de serre.

Les molécules triatomiques et polyatomiques, qu'elles aient une structure linéaire (comme le gaz carbonique CO_2 et l'hémioxyde d'azote N_2O), tétraédrique (comme le méthane CH_4) ou sans symétrie d'ordre supérieur (comme la vapeur d'eau H_2O , l'ozone O_3 ou les CFC) possèdent des bandes d'absorption dans le domaine infrarouge et peuvent donc jouer un rôle dans l'effet de serre.

La capacité des constituants atmosphériques à piéger le rayonnement infrarouge est donc liée à leurs propriétés de structure moléculaire. Leur rôle relatif dans l'effet de serre est alors fonction de leur concentration dans l'atmosphère et du degré de saturation des transitions, lié précisément à cette concentration relative.

Ainsi, l'effet de serre naturel est principalement dû à H_2O et CO_2 . Compte tenu des concentrations actuelles de ces gaz dans l'atmosphère, aux longueurs d'onde considérées, l'absorption du rayonnement est totale. Une augmentation de concentration de ces gaz ne conduit pas alors à une augmentation proportionnelle de l'absorption (la relation n'est pas linéaire). Ceci explique que le doublement du gaz carbonique de 350 ppmv (parties par million en volume) à 700 ppmv ne conduise qu'à un apport d'énergie supplémentaire de 4 W/m^2 alors que l'effet actuel (qui correspond à un passage de 0 ppmv à 350 ppmv) est d'environ 50 W/m^2 .

Ceci explique aussi que des constituants moins abondants comme le méthane (1,8 ppmv), l'ozone (0,04 ppmv) ou les CFC (0,003 ppmv) puissent *in fine* jouer un rôle relatif important dans l'effet de serre additionnel dans la mesure où leurs bandes d'absorption sont situées à des longueurs d'onde différentes de celles de H_2O et CO_2 .

Ainsi, à masse égale relâchée aujourd'hui dans l'atmosphère, le méthane a un pouvoir de piégeage du rayonnement 56 fois supérieur à celui du CO_2 , l'ozone 1 200 fois et les CFC entre 4 000 et 8 000 fois.

Séance 4 :

C) Des pistes pour « forcer » le destin... Comprendre les facteurs accélérateurs et modérateurs.

Introduction :

Les **climatologues** du **GIEC** (Groupe, d'experts Intergouvernemental, sur l'Évolution du Climat) prévoient en **2100** une **augmentation** de **+1,5°C** de la **température moyenne globale** par rapport à 1800, cela même en cas de réduction massive des émissions anthropiques de GES. Ah non, ça c'était en 2015... A présent, nous devrions atteindre les 1,5°C en plus entre 2025 et 2040....

Cela signifie qu'il existe d'autres **facteurs** qui contribuent à **amplifier** le **forçage radiatif positif** du **système climatique** provoqué par l'**Homme** et **aggraver** le **réchauffement climatique actuel**.

A l'opposé, certains **facteurs** doivent pouvoir permettre de **modérer** ce dérèglement.

Ces facteurs impliquent des **flux** (échanges) de deux **molécules** essentielles, l'**H₂O** et le **CO₂**, entre les différentes **enveloppes terrestres** pouvant servir de **réservoir** et donc, de **puits** ou de **source**, pour ces molécules.

Le **système climatique** est donc composé de toutes ces **enveloppes** :

- L'**atmosphère** (contenant de l'**H₂O** et du **CO₂**) ;
- La **biosphère** (dont les **êtres vivants** absorbent ou libèrent de l'**H₂O** et/ou du **CO₂**) ;
- La **lithosphère** (dont la surface des **continents** stocke de l'**H₂O** liquide ou gelée) ;
- L'**hydrosphère** (dont les **océans** stockent de l'**H₂O** liquide et les **banquises** de l'**H₂O** gelée) ;
- La **cryosphère** (qui regroupe les stocks d'**H₂O** gelée continentaux et océaniques).

A sein de ce système, les **enveloppes interagissent** de manière complexe pour **contrôler** le **forçage radiatif positif** et donc le **réchauffement climatique actuel**.

PB : *Comment ces facteurs amplificateurs et modérateurs interagissent-ils au sein du système climatique pour contrôler le forçage radiatif positif actuel, d'origine anthropique ?*

Bilan de la séance 4 :

Le **réchauffement climatique global actuel**, qui trouve son origine dans un **forçage positif** du **bilan radiatif terrestre**, étant causé par un **excès de GES d'origine anthropique** dans l'atmosphère, **agit directement** au niveau de **trois enveloppes** du **système climatique** :

- Au niveau de l'**hydrosphère**, il provoque un **réchauffement** des **masses d'eau** en **surface**, associé à sa **dilatation thermique** et à son **évaporation** ; cette dilatation thermique explique en partie le **monté** du **niveau des océans**.
- Au niveau de la **cryosphère**, il provoque la **fonte** de la **banquise** océanique, des **glaciers** et des **pergélisols** continentaux.
- Au niveau de la **biosphère**, il provoque l'**augmentation** de la **couverture végétale** en raison d'une **optimisation** de l'**activité photosynthétique**, qui **améliore** l'**absorption** le **CO₂** atmosphérique.

Cette action directe déclenche d'**autres interactions** entre ces **mêmes enveloppes** qui, de manière **indirecte**, vont **rétroagir** sur le **réchauffement climatique** lui-même.

Cette **rétroaction** peut correspondre, soit à l'action de **facteurs amplificateurs** (**rétroaction positive**), soit **modérateurs** (**rétroaction négative**) :

- Au niveau de l'**hydrosphère**, le **réchauffement** des **masses d'eau océaniques**, leur **dilatation thermique** et donc la **monté** du **niveau des océans**, **absorbent**, à **court terme**, (plusieurs dizaines d'années) **95%** de l'**énergie thermique** en excès de l'**atmosphère** ; ces **facteurs** exercent une **rétroaction négative** sur le **réchauffement climatique**. Cependant, à **long terme** (plusieurs siècles), l'**accumulation d'énergie thermique** dans les **océans** rend le **réchauffement climatique irréversible** car le transfert d'énergie s'inverse ; la **rétroaction** devient alors **positive**.

- Au niveau de la **cryosphère**, la **fonte** des **banquises** et des **glaciers** engendre une **diminution** de l'**albédo**, ce qui **augmente** la **puissance solaire absorbée** par la **Terre** ; parallèlement la **fonte** des **pergélisols libère** dans l'atmosphère deux **GES**, le **CH₄** et le **CO₂**, ce qui **amplifie** l'**effet de serre**. Ces deux **facteurs** exercent une **rétroaction positive** sur le **réchauffement climatique**.
- Au niveau de la **biosphère**, l'**absorption du CO₂** **réduit** sa **concentration atmosphérique**, ce qui **diminue** l'**effet de serre** ; ce **facteur** exerce une **rétroaction négative** sur le **réchauffement climatique**.
- Au niveau de l'**atmosphère**, l'**excès de vapeur d'H₂O**, due à l'**évaporation** de l'**H₂O liquide océanique**, engendre une **amplification** de l'**effet de serre** d'une part, et une **augmentation** de la **couverture nuageuse** qui **améliore** l'**albédo** d'autre part. Ces deux **facteurs** exercent respectivement une **rétroaction positive** et **négative** sur le **réchauffement climatique**.