

Thème 1: Enjeux planétaires contemporains: Atmosphère, hydrosphère, climats: du passé à l'avenir.

La détermination du climat global de la terre dépend étroitement de la dynamique des enveloppes fluides de la terre (atmosphère, hydrosphère) mais aussi de la biosphère, de la géosphère, et des influences astronomiques.

Les changements climatiques et atmosphériques actuels ont des conséquences graves sur les plans humain, écologique, et économique. Les prévisions climatiques futures basées sur différents modèles opposent des résultats parfois contradictoires alimentant ainsi la polémique actuelle. La prévision des climats futurs nécessite l'identification des principaux paramètres responsables des variations climatiques. Cette identification des facteurs responsables des fluctuations climatiques est à rechercher dans l'analyse des climats passés ou paléoclimats.

Comment les interactions entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la géosphère, influencent elles le climat global de la terre ?

Partie 1: Évolutions récentes du climat et de l'atmosphère

1: Les variations climatiques au cours des 800 000 dernières années

1: Études des archives glaciaires

-> Activité 1: Indices des variations climatiques "récentes": le delta isotopique des glaces polaires

Au niveau des calottes polaires, le delta isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ ou δD) de la glace est fonction de la température de l'air qui régnait au dessus de la calotte lors des précipitations neigeuses à l'origine de la glace. Plus le delta isotopique de la glace est élevé plus la température de l'air était élevée lors de la précipitation neigeuse.

Les carottes de glaces, issues des forages réalisés en Antarctique (pôle Sud) et au Groenland (pôle Nord), donnent accès à des échantillons de glaces anciennes que l'on peut dater (plus la profondeur de la carotte est élevée, plus la glace est âgée) et sur lesquelles on peut mesurer le delta isotopique; il est donc possible de déterminer la température qui régnait au moment des précipitations neigeuses à l'origine des échantillons de glace étudiés.

La calotte glaciaire au niveau de l'Antarctique provient du tassement de plus de 400.000 ans de chute de neige. L'analyse du $\delta^{18}\text{O}$ (ou du δD) des carottes glaciaires met ainsi en évidence une alternance de périodes froides (δ faible) et de périodes chaudes (δ élevé) avec un écart de température d'une dizaine de degrés Celsius. Ces périodes sont approximativement synchrones et de mêmes amplitudes en Antarctique et au Groenland. Il s'agit donc de changements globaux d'un ou plusieurs paramètres du climat. Ces périodes "froides" (périodes glaciaires) ont une périodicité de 100 000 ans et sont entrecoupées de périodes chaudes (périodes inter-glaciaires) d'environ 10 000 ans.

2: Autres témoins des variations climatiques récentes: Les archives fossiles: foraminifères benthiques et palynologie

-> Activité 2: Indices des variations climatiques "récentes": le delta isotopique des foraminifères

Les forages des fonds océaniques donnent accès à des sédiments océaniques contenant des restes de tests calcaires de foraminifères que l'on peut dater (plus les sédiments sont profonds plus ils sont anciens) et sur lesquels on peut mesurer le $\delta^{18}\text{O}$ des tests calcaires.

Le $\delta^{18}\text{O}$ des tests calcaires (CaCO_3) des foraminifères benthiques est fonction du $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer dans laquelle vivaient les foraminifères: plus le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer est élevé, plus le $\delta^{18}\text{O}$ des tests calcaires des foraminifères benthiques est élevé.

Le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer dépend des volumes relatifs des océans et des calottes glaciaires:

- en période plus froide qu'actuellement l'eau qui s'évapore des océans s'accumule aux pôles sous forme de glace appauvrie en ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$ de la glace polaire = -40 à -50 pour mille); l'eau qui reste dans les océans est donc enrichie en ^{18}O ; le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer est alors supérieur à l'actuel c'est à dire supérieur à 0.
- en période plus chaude qu'actuellement, la glace des calottes polaires fond et le volume des océans augmente. L'eau provenant des calottes polaires qui retourne aux océans est appauvrie en ^{18}O ; le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer est alors inférieur à l'actuel c'est à dire inférieur à 0

Une augmentation du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques indique donc une augmentation du volume des calottes polaires c'est à dire une période froide. Une diminution du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques indique donc une diminution du volume des calottes polaires, c'est à dire une période chaude.

Les carottes de sédiments marins ont permis d'estimer le volume des glaces et donc indirectement les variations climatiques depuis 1 million d'années. Ce volume a varié de 25 millions de km^3 dans les périodes interglaciaires à 65 millions de km^3 pendant les périodes glaciaires. On observe ainsi une alternance de périodes glaciaires (d'environ 100 000 ans) entrecoupées de périodes inter-glaciaires (d'environ 10 000 ans); ce qui est concordant avec les données issues du $\delta^{18}\text{O}$ des glaces polaires.

Malgré les variations du volume des calottes polaires, les pôles étaient toujours plus ou moins recouverts d'une calotte de glace au cours des 700000 dernières années; les périodes glaciaires et interglaciaires observées s'inscrivent, à une échelle de temps plus grande, dans une ère glaciaire caractérisée par la présence permanente d'une calotte de glace aux pôles.

-> Livre pages 82-83: Indices des variations climatiques "récentes": les pollens

En dehors des calottes polaires et des sédiments marins, les analyses sont réalisées sur des carottages effectués au fonds des lacs et dans les tourbières, en utilisant le principe d'actualisme. Ces analyses portent sur les pollens (palynologie) ou des gisements de fossiles (micro-fossiles ou macro-fossiles) permettant de reconstituer les flores ou faunes passées caractéristiques des climats passés.

Un spectre pollinique permet de réaliser un « instantané » sur le climat régional à l'époque de la sédimentation. Différents spectres polliniques superposés forment un diagramme pollinique qui permet de reconstituer les fluctuations climatiques au cours du temps. Des analyses de fossiles complètent ces travaux.

La concordance des résultats obtenus par différentes analyses permet de retrouver une succession de périodes glaciaires et interglaciaires. La superposition des résultats sur les variations climatiques régionales et planétaires permet de mettre en évidence une succession cyclique de périodes glaciaires et interglaciaires.

Quatre périodicités remarquables se chevauchent: un cycle de 100.000 ans rythme les maxima glaciaires; entre deux maxima des cycles de refroidissement-réchauffement sont observés sur des périodes de 41.000, 23.000 et 19.000 ans.

II: Origines des variations climatiques récentes

1: Évolution récente de l'atmosphère et propriétés des gaz atmosphériques

Lors de sa précipitation, la neige emprisonne et fossilise des gaz atmosphériques contemporains de la chute de neige et de son tassement. Une analyse des gaz contenus dans ces micro-bulles fossiles permet de déterminer la composition atmosphérique de l'époque, notamment la composition en CO_2 , H_2O , CH_4 ...

Certains de ces gaz, tels que ceux cités ci dessus, ont la propriété de transmettre les longueurs d'ondes dans le domaine du visible, tout en absorbant les longueurs d'ondes dans le domaine de l'infrarouge. Cette absorption provoquant leur échauffement, l'équilibre thermique de ces molécules gazeuses s'établit par une ré-émission dans le domaine de l'infra rouge. Ces gaz sont qualifiés de gaz à effet de serre (GES).

On observe une corrélation positive entre les variations de la teneur atmosphérique de ces GES et les variations climatiques au cours du quaternaire.

2: L'effet de serre

La majeure partie de l'énergie rayonnée par le Soleil se situe dans des longueurs d'ondes auxquelles l'atmosphère est transparente (c'est-à-dire entre 0,2 et 0,5 micromètres).

Au contraire, une planète rayonne principalement dans les longueurs d'onde de l'infrarouge, entre 4 et 12 micromètres. Ces longueurs d'onde sont fortement absorbées par les gaz à effet de serre de l'atmosphère.

Lorsqu'une molécule de gaz absorbe un photon infrarouge, elle le ré-émet rapidement. Cette ré-émission se fait dans une direction aléatoire. Ainsi, environ la moitié du rayonnement infrarouge émis par la surface de la planète repart dans l'espace (la part ré-émise par l'atmosphère vers le haut), tandis que l'autre moitié retourne à la surface (la part ré-émise par l'atmosphère vers le bas).

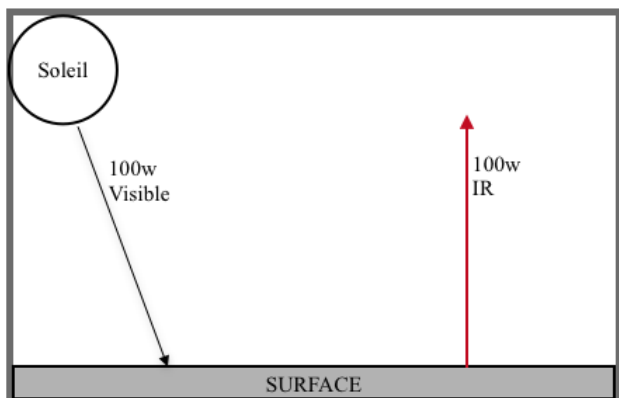


Schéma de la situation d'équilibre thermique sans CO_2

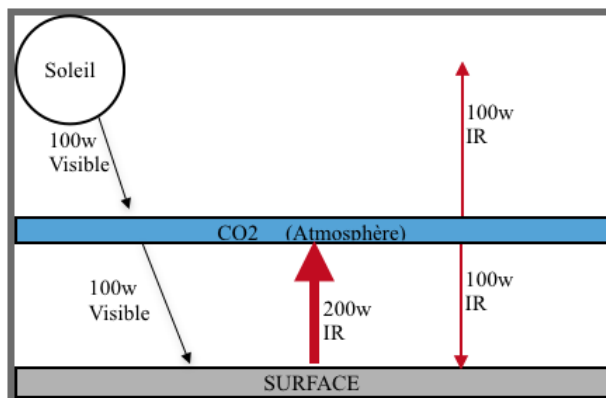


Schéma de la situation d'équilibre thermique avec CO_2

Dans ce modèle, en présence de CO_2 , la surface absorbe et ré émet deux fois plus d'énergie qu'en l'absence de CO_2 ce qui provoque un décalage de l'équilibre thermique: la température d'équilibre est plus élevée en présence de CO_2 qu'en l'absence de CO_2 .

3: Des mécanismes amplificateurs des variations climatiques: le CO_2 et l'albédo

Lors d'une période de réchauffement climatique, la baisse de solubilité du CO_2 dans l'eau, entraîne une augmentation de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère (dégazage) et donc une accentuation de l'élévation de température moyenne de l'atmosphère par effet de serre. Le réchauffement climatique est amplifié. Lors d'une période de refroidissement, l'augmentation de la solubilité du CO_2 dans l'eau, entraîne une diminution de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère (dissolution) et donc une diminution de l'effet de serre. Le refroidissement climatique est amplifié.

L'albédo (rapport entre l'énergie reçue et l'énergie renvoyée; 30% actuellement sur Terre), est un second facteur amplificateur. Plus une surface réfléchit d'énergie et moins elle en absorbe et moins elle s'échauffe. Les radiomètres montrent que les calottes glaciaires sont les zones qui possèdent le plus fort albédo, ce sont donc ces zones qui renvoient beaucoup d'énergie contribuant ainsi au refroidissement de la planète.

Lors d'une période de réchauffement, les calottes glaciaires fondent, leur surface diminue ce qui induit une diminution de l'albédo. La terre se réchauffe accentuant ainsi la fonte des calottes glaciaires. Le réchauffement climatique est amplifié.

Lors d'une période de refroidissement, la surface des calottes glaciaires augmente ce qui induit l'augmentation de l'albédo. La Terre se refroidit induisant ainsi l'expansion des calottes glaciaires. Le refroidissement climatique est amplifié.

Le CO_2 et l'albédo amplifient les variations climatiques selon des mécanismes de rétroactions positives:

Le CO_2 : un mécanisme amplificateur des variations climatiques	L'albédo: un mécanisme amplificateur des variations climatiques
Réchauffement -----> Dégazage CO_2 -----> Hausse $[\text{CO}_2]$ atm Hausse effet de serre	Réchauffement -----> Fonte calottes glaciaires -----> Baisse albédo
Refroidissement -----> Dissolution CO_2 -----> Baisse $[\text{CO}_2]$ atm Baisse effet de serre	Refroidissement ----> Expansion calottes glaciaires ----> Hausse albédo

4: Influence des paramètres astronomiques

L'étude des variations climatiques des 700 000 dernières années met en évidence une alternance de périodes glaciaires et inter-glaciaires. On dénombre 7 périodes glaciaires au cours des 700 000 dernières années; on observe ainsi une périodicité de 100 000 ans entre 2 maxima glaciaires. Au sein de ces périodes de 100 000 ans, on distingue des variations climatiques de moindre amplitude sur des périodes de 41.000, 23.000 et 19.000 ans.

La teneur en CO₂ atmosphérique et l'albédo amplifient les variations climatiques selon un mécanisme de rétroaction positive; ce qui devrait s'opposer à l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires observée au cours des 700 000 dernières années; il doit donc exister un mécanisme initiateur des variations climatiques. Ce mécanisme initiateur fut mis en évidence au début du XX^e siècle, par un mathématicien Serbe: Milutin Milankovitch qui fonda la théorie astronomique des climats.

Deux arguments principaux permettent de valider la théorie astronomique des climats:

(1) Les variations de l'insolation calculées en tenant compte de l'excentricité, de l'obliquité et de la précession des équinoxes au cours des 700 000 dernières années sont corrélées à celles du δ¹⁸O des carbonates: plus l'insolation est élevée, plus le δ¹⁸O est faible. Or plus le δ¹⁸O dans les carbonates est faible, plus la t° globale de la Terre était élevée.

Les variations de l'insolation calculées à partir des paramètres orbitaux sont en cause dans les variations climatiques de la Terre au cours des 700 000 dernières années.

(2) L'excentricité de la Terre varie selon des cycles de 100 000 ans, l'obliquité varie selon des cycles de 41 000 ans et la précession varie selon des cycles de 23 000 et 19 000 ans. Or les variations climatiques de la Terre ont une périodicité de 100 000, 41 000 et 23 000 et 19 000 ans.

Les variations de l'excentricité de la Terre sont responsables des variations climatiques de périodicité 100 000 ans (cycles climatiques), les variations de l'obliquité de la Terre sont responsables des variations climatiques de périodicité 41 000 ans et la précession des équinoxes est responsable des variations climatiques de périodicités 23 000 et 19 000 ans

La corrélation entre les variations des paramètres orbitaux et les variations climatiques ainsi que la similitude des périodicités plaident en faveur de la théorie astronomique des climats. Cependant, l'impact sur l'insolation reste très modeste: les variations sont de l'ordre de 0,1% ce qui entraîne une variation de la température moyenne du globe de quelques dixièmes de degrés, or l'amplitude des variations thermiques mesurées entre les périodes glaciaires et interglaciaires est de l'ordre de 5°C à 10°C. Les variations des paramètres orbitaux agissent comme un mécanisme initiateur des variations climatiques qui sont ensuite amplifiées par la teneur en CO₂ et l'albédo.

Partie 2: Atmosphère et climat aux grandes échelles de temps

1: Reconstitution des paléo-climats du Carbonifère et du Crétacé

1: Les marqueurs de changements climatiques aux grandes échelles de temps

Les archives disponibles pour la reconstitution des paléoclimats sont essentiellement, et d'après le principe d'actualisme, les roches sédimentaires et leur gisement fossilifère dont la formation est liée au climat :

- les latérites et la bauxite sont présentes dans des milieux continentaux sous un climat marqué par l'alternance d'une saison sèche et d'une saison très humide, c'est-à-dire un climat tropical
- les coraux fossiles témoignent également d'un climat tropical, mais cette fois en milieu marin
- le pétrole, le charbon et la houille sont le résultat d'un enfouissement de grandes quantités de matière organique produite par une forêt exubérante sous un climat équatorial
- les traces de stries et de polissage de roches, la présence de moraines qui donneront après consolidation des tillites, les vallées en U sont les témoins d'un ancien glacier

2: Les mécanismes qui contrôlent les variations climatiques à l'échelle des temps géologiques

Le climat dépend surtout de la teneur en CO₂ atmosphérique.

Les mécanismes qui consomment du CO₂ favorisent un refroidissement du climat par baisse de l'effet de serre :

- la photosynthèse réalisée par les producteurs primaires consomme du CO₂ mais la respiration réalisée par ces mêmes producteurs primaires et les autres maillons des chaînes trophiques compensent cette consommation. Par contre, l'enfouissement de la matière organique et la formation de tourbe, houille, charbon et pétrole, piège du CO₂ atmosphérique dans la lithosphère, et contribue ainsi à une diminution de l'effet de serre.
- la dissolution des carbonates transfère du CO₂ atmosphérique vers l'hydrosphère: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$ Cette réaction de dissolution peut être compensée par la précipitation des carbonates.
- l'altération des silicates des roches magmatiques ou métamorphiques constitutives des chaînes de montagne, consomme également du CO₂ lors du démantèlement des reliefs par érosion. Il y a transfert de CO₂ atmosphérique vers l'hydrosphère : $\text{CaSiO}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{CO}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$

Les mécanismes qui libèrent du CO₂ favorisent un réchauffement du climat par augmentation de l'effet de serre:

- le volcanisme libère dans l'atmosphère de grande quantité de CO₂. Le volcanisme, intra-plaque avec les points chauds, sous-marin au niveau des dorsales ou continental dans les chaînes de subduction sont donc une source importante de transfert de CO₂ mantellique vers l'atmosphère.
- la formation ou précipitation des carbonates transfère du CO₂ hydrosphérique vers l'atmosphère: $\text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$, cette réaction de précipitation peut être compensée par la dissolution des carbonates.
- l'altération de la croûte océanique libère du CO₂ : $\text{CaSiO}_3 + \text{Mg}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{MgSiO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

II: Évolution de l'atmosphère et développement de la vie

1: La formation de l'atmosphère primitive

La composition des gaz des chondrites (météorites ayant la même composition globale que la Terre) et celle des gaz volcaniques permet de conclure que l'atmosphère primitive s'est formée précocement entre -4,55 et -4,3 Ga (Hadéen) par :

- dégazage du manteau, lors de la différenciation de la terre en enveloppes concentriques (croûte, manteau, noyau),
- des apports météoritiques, en partie responsables du stock d'eau.

L'atmosphère primitive était essentiellement constituée de H_2O , de CO_2 et de N_2 , elle ne contenait pas d' O_2 : l'atmosphère primitive était réductrice. Le refroidissement de la planète (Archéen) a provoqué, vers -4Ga, la condensation de l'eau atmosphérique et ainsi la création de l'hydrosphère (océans).

2: L'origine du d'oxygène

L' O_2 est d'origine biologique. Sa production est la conséquence de l'apparition de cyanobactéries réalisant la photosynthèse aérobie. L'existence de cyanobactéries photosynthétiques peut être datée vers -3,8 Ga.

Vers -2,2 Ga, l'atmosphère contient de l' O_2 libre et devient oxydante. Le fer est oxydé en surface au contact de l'atmosphère : apparition des premiers sols oxydés rouges.

L'accumulation de l' O_2 dans l'atmosphère ne peut pas s'expliquer par la photosynthèse seule : pour que l' O_2 s'accumule, il ne faut pas que les molécules organiques photosynthétisées soient totalement réoxydées par la respiration. La fossilisation de la matière organique dans les roches carbonées, en retranchant une part de la biomasse produite, est la cause principale de l'augmentation de l' O_2 atmosphérique.

3: L'évolution du taux de CO_2 atmosphérique

Le CO_2 , très soluble dans l'eau, a été rapidement piégé sous forme de carbonates (>98% à 4 Ga), ce qui a entraîné sa quasi disparition de l'atmosphère. On peut considérer qu'il existe 4 grands réservoirs de carbone entre lesquels s'effectuent des échanges permanents :

- Réservoir atmosphérique : CO_2 gaz
- Réservoir hydrosphérique : CO_2 dissous, HCO_3^- et CO_3^{2-}
- Réservoir biologique : biomasse et matière organique fossile
- Réservoir géologique : roches carbonées (organiques) et carbonatées (minérales)

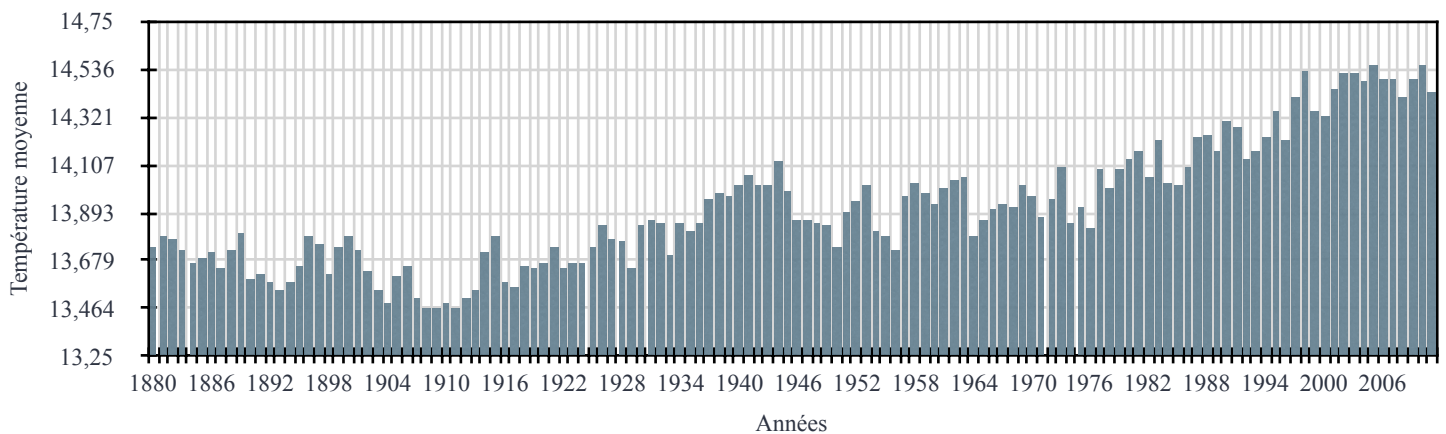
L'évolution de l'atmosphère est donc la produit des interactions complexes entre atmosphère, hydrosphère, géosphère et biosphère. Elle est en partie liée à l'apparition et l'évolution de la vie sur Terre.

Partie 3: Activités humaines - Évolutions atmosphériques et climatiques présentes et futures

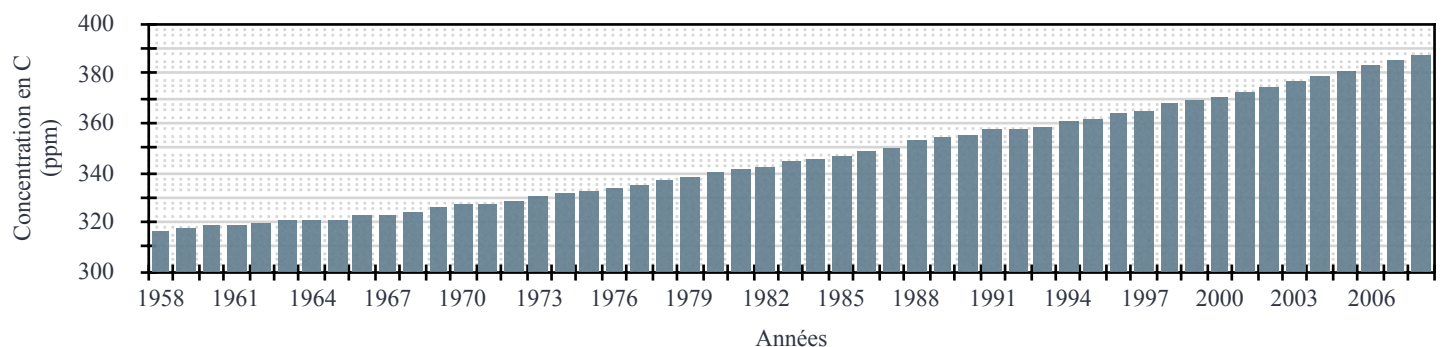
I: Évolutions récentes du climat et de l'atmosphère

Les mesures réalisées sur terre ou par satellite mettent en évidence une augmentation récente de la température et de la teneur en CO_2 :

Températures moyennes annuelles globales de 1880 à 2011



Évolution de la concentration atmosphérique en CO_2 de 1958 à 2008



On observe sur la période de temps considérée, une augmentation de la température globale de $0,7^{\circ}C$. Et une augmentation de la teneur atmosphérique en CO_2 qui est passée de 280 ppm (ère pré industrielle) à 387 ppm (en 2008) (400 ppm en 2013). L'évolution climatique récente est liée à l'évolution de la composition atmosphérique récente et en particulier à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre.

II: Projections climatiques futures

En se basant sur des hypothèses démographiques, économiques, et technologiques futures, on peut établir des scénarios d'émission de GES. Les connaissances relatives au fonctionnement du système climatique terrestre (bilan radiatif, forçage radiatif, sensibilité climatique) permettent aux climatologues d'établir des projections climatiques. Ces projections climatiques mises en relation avec des modèles d'impacts permettent d'établir des scénarios d'incidence (Doc 6 p 107) qui devraient permettre aux dirigeants politiques et économiques de prendre les bonnes décisions afin de préserver la planète. Les projections ainsi réalisées prévoient un réchauffement au cours du XXI^e siècle compris entre + 2,5° C et + 6° C.

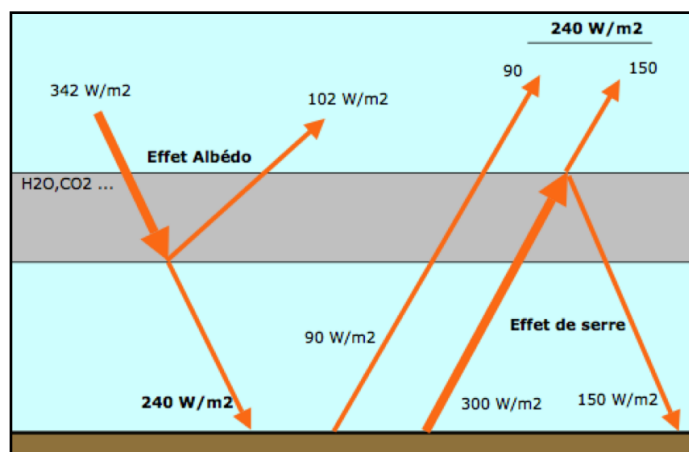
1: Un scénario d'émission de GES est un scénario basé sur des hypothèses (progrès technologiques, socio-économiques, démographiques)

Exemples de scénarios possibles:

1. On stoppe le développement économique / énergétique / démographique, et on émet autant de C qu'en 2012 jusqu'en 2113
2. La population augmente, les besoins énergétiques aussi, on émet de plus en plus de C
3. La population décroît, et / ou on se passe peu à peu des énergies fossiles et on arrête la déforestation

2: La projection climatique est la projection de la réponse du système climatique aux scénarios d'émissions ou de concentration de gaz à effet de serre et d'aérosols, ou de scénarios de forçage radiatif, souvent fondée sur des simulations par des modèles climatiques. *Annexe B - Glossaire du Troisième Rapport d'Évaluation du GIEC [archive]*

2.1: Le bilan radiatif (δR) est la différence entre le flux incident absorbé et le flux ré-émis. À l'équilibre thermique: $\delta R = 0$



En présence d'un effet de serre naturel (époque pré-industrielle) [CO₂] = 280 ppm):

- La surface absorbe 390 W/m² (240+150) et ré émet 390 W/m² (300+90); la surface est à l'équilibre thermique.
- L'atmosphère absorbe 342 W/m² et ré émet 240 W/m² et réfléchit 102 W/m²; l'atmosphère est à l'équilibre thermique.

2.2: Relation entre bilan radiatif et température d'équilibre: La loi de Stefan Boltzman:

D'après Stefan Boltzman : Énergie émise = cste x T⁴ , donc T° (K) = (Énergie / cste)^{1/4}. (Avec constante = 5,674.10⁻⁸, et T°C = T°K - 273,15)

	Énergie Absorbée	Température d'équilibre
En l'absence d'effet de serre	R = 240 W/m ²	T équilibre = 255°K soit -18°C
En présence d'un effet de serre naturel Époque pré-industrielle: [CO ₂] = 280 ppm	R = 390 W/m ²	T équilibre = 287,93°K soit 14,78°C
En présence d'un effet de serre 2012 [CO ₂] = 395,64 ppm	R = 391,85 W/m ²	T équilibre = 288,26°K soit 15,13°C

2.3: Forçage radiatif (δF) : C'est une perturbation (positive ou négative) du bilan radiatif : $\delta F = 5,35 \times \ln ([\text{Carbone}] / [\text{Carbone référence} = 280])$ en W/m²

La Terre reçoit de l'énergie thermique via les rayons du soleil. Certains facteurs, tels que les gaz à effet de serre, ont tendance à absorber les infrarouges. Ainsi, plus ils sont présents dans l'atmosphère, plus on assiste à un réchauffement du climat. Le forçage radiatif des gaz à effet de serre est donc positif. En revanche, les aérosols ont tendance à renvoyer les rayons solaires vers leur émetteur, ce qui provoque un refroidissement de la Terre. Dans ce cas, le forçage radiatif est négatif. Si le bilan des forçages radiatifs est positif, la Terre a tendance à se réchauffer. C'est ce qu'il se passe en ce moment. Dans le cas contraire, elle refroidit. **Les concentrations en carbone s'expriment en ppm : [C] ppm = Q (C) Gt x 280 / 595**

2.4: Sensibilité climatique (λ): C'est la variation de la température de surface moyenne qui serait observée pour 1 W/m² de variation du bilan énergétique de la Terre (δF). D'après la dérivée de Stefan Boltzman: $\lambda = T / (4 \times E)$

- λ calculé avec effet de serre naturel (époque pré-industrielle): $\lambda = 287,93/(390 \times 4) = 0,1846$
- λ calculé sans effet de serre naturel: $\lambda = 255/(240 \times 4) = 0,3$
- λ utilisé dans les projections du GIEC: $\lambda = 0,5$

Les activités humaines qui détruisent les forêts consommatrices de CO₂, et ré injectent dans l'atmosphère le carbone piégé dans les roches carbonées fossiles (charbon, pétrole) sont actuellement à l'origine d'une modification de l'atmosphère et du climat. Le CO₂ rejeté par les activités humaines est à l'origine d'un forçage radiatif (déséquilibre du bilan radiatif qui se réajuste alors à un autre niveau; il en résulte une nouvelle température d'équilibre). Dans le cas du CO₂ et des gaz à effet de serre, le forçage radiatif est positif (la surface reçoit et ré émet davantage de W/m²), ce qui entraîne une augmentation de la température d'équilibre.

Application: Réaliser une projection climatique - Correction

Années	[CO ₂] ppm observées 31/12	Quantités atmosphériques observées (Gt de carbone) <i>Valeur au 31/12</i>	Quantités atmosphériques calculées (Gt de carbone) <i>Valeur au 31/12</i>	Émissions liées aux énergies fossiles (Gt de carbone/an)	Émissions liées à l'utilisation des terres (Gt de carbone/an)	Absorption = [1 - (Q conservée / Q rejetée)] x 100
2014	398,85	847,56				
2015	401,85	853,93	858,36	9,6	1,2	40,97 %

Données initiales	
Émissions de C anthropiques (Gt/an)	10,8
Absorption (%)	40,97
Quantité de C initiale (Gt)	853,93
[CO ₂] ppm initiale	401,85
Durée du scénario d'émission et de la projection climatique	
Début de la simulation	2015
Fin de la simulation	2115
Durée de la simulation (années)	100
Scénario d'émission	
Quantité de C finale (Gt)	1491,45
[CO ₂] ppm finale	701,86
Projection climatique	
Forçage radiatif (w/m²): $\delta F = 5,35 \ln ([C] / [C \text{ référence}])$	4,92
Références pré-industrielles	
[CO ₂] ppm	280
Bilan radiatif (w/m²)	390
Température (K) d'après Boltzman	287,93
Température (°C) d'après Boltzman	14,78
Bilan radiatif de la projection	
Bilan radiatif (w/m²)	394,92
Température d'équilibre de la projection Selon Boltzman $T^{\circ} (K) = (\text{Énergie} / \text{cste})^{1/4}$. Soit $\lambda = 287,93/(390 \times 4) = 0,1846$	
Température équilibre (K) d'après Boltzman	288,84
Température équilibre (°C) d'après Boltzman	15,69
Température d'équilibre de la projection (selon sensibilité climatique λ)	
Sensibilité climatique λ (K / w/m²)	0,5
Température additionnelle (K) d'après sensibilité climatique	2,46
Température équilibre (K) d'après sensibilité climatique	290,39
Température équilibre (°C) d'après sensibilité climatique	17,24

Les scénario d'émissions de GES reposent sur des hypothèses (économique, démographique, technologique..) invérifiables. Ces scénario, et les projections qui en découlent n'ont donc de valeur scientifique qu'au regard de ces hypothèses. De plus, les liens scientifiques entre concentration en GES et modification du bilan radiatif d'une part (forçage radiatif), et entre bilan radiatif et température d'équilibre d'autre part (sensibilité climatique) sont complexes et très contestés par la communauté scientifique. Ainsi, selon la sensibilité climatique choisie (Boltzman ou GIEC) la température d'équilibre envisagée par notre projection varie de 15,69°C à 17,24°C en 2115. Malgré ces incertitudes, les projections climatiques restent cependant essentielles pour appréhender l'évolution des climats futurs.