

# La complexité du système climatique

Cours

## Sommaire

### I Le climat et ses variations au cours du temps

(A) La notion de climat

(B) Les indicateurs des variations du climat

1. Les indicateurs des variations climatiques du passé
2. Les indicateurs des variations actuelles du climat

### II L'effet de serre

(A) Les gaz à effet de serre

(B) Le forçage radiatif

(C) Les conséquences de l'effet de serre

### III Les mécanismes de régulation du climat

(A) Les mécanismes amplificateurs

(B) Les mécanismes stabilisateurs

## RÉSUMÉ

Le système climatique est un ensemble dynamique complexe. Ses composantes (atmosphère, océan, biosphère, cryosphère, surfaces continentales) sont en interactions permanentes. L'étude de différents indicateurs montre que le climat a déjà subi des variations au cours du temps et qu'il se réchauffe aujourd'hui de façon anormalement rapide. L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre est responsable d'un forçage radiatif positif. Il se traduit par une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre et une élévation du niveau des océans. Des mécanismes de régulation du climat modulent le réchauffement actuel soit en l'amplifiant, soit en le stabilisant.

## I Le climat et ses variations au cours du temps

La notion de climat désigne la moyenne de plusieurs paramètres atmosphériques (température, précipitations, ensoleillement, etc.) calculée sur une longue période en un lieu donné. L'étude de différents indicateurs de variation du climat montre une variabilité naturelle sur différentes échelles de temps. Cependant, elle montre aussi que le réchauffement climatique actuel diffère des épisodes passés par sa rapidité.

### (A) La notion de climat

**Le climat est défini par les moyennes des grandeurs atmosphériques relevées sur une zone généralement étendue et sur des longues durées (30 ans, par convention). Il ne faut pas le confondre avec la météorologie qui donne les valeurs ponctuelles des grandeurs atmosphériques sur une zone restreinte et sur une courte durée.**

Les zones étudiées pour définir un climat sont plus ou moins vastes : une région, un pays, un continent, une planète.

Les durées sur lesquelles un climat est défini varient également : année, siècle, millénaire.

On distingue ainsi la climatologie de la météorologie.

#### DÉFINITION

### Climatologie

**La climatologie** étudie les variations du climat local ou global à moyen ou long terme. C'est une science qui étudie les mesures passées pour définir un climat dans les années à venir.

#### DÉFINITION

### Météorologie

**La météorologie** étudie les phénomènes atmosphériques qu'elle prévoit à court terme. C'est une science qui étudie les mesures en temps réel pour prédire la météo dans les jours à venir.

|                                   | Météo  | Climat  |
|-----------------------------------|--|---|
| Grandeurs atmosphériques étudiées | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Température</li> <li>• Pression</li> <li>• Degré d'hygrométrie</li> <li>• Précipitations</li> <li>• Nébulosité</li> <li>• Vitesse et direction des vents</li> </ul> |   |
| Période étudiée                   | Jours, semaines  | Années, siècles, millénaires  |
| Zone étudiée                      | Ville, département   | Région, pays, continent, planète  |
| Exemple                           |    |  |

© Wikimedia Commons

## B Les indicateurs des variations du climat

Les indicateurs des variations du climat permettent de définir l'évolution du climat à l'échelle de la planète. Certains indicateurs permettent de reconstituer les variations climatiques du passé, d'autres permettent d'identifier ses variations actuelles.

### 1. Les indicateurs des variations climatiques du passé

Les indicateurs des variations climatiques du passé sont les roches, les pollens, les glaces ou encore les sédiments. Ils montrent une variabilité naturelle du climat sur différentes échelles de temps.

Des indices géologiques témoignent du climat du passé. Les roches se forment dans des conditions climatiques différentes. En datant les roches, on reconstitue le climat existant à l'époque de leur formation.

Le charbon témoigne d'un climat chaud et humide à l'époque de sa formation.

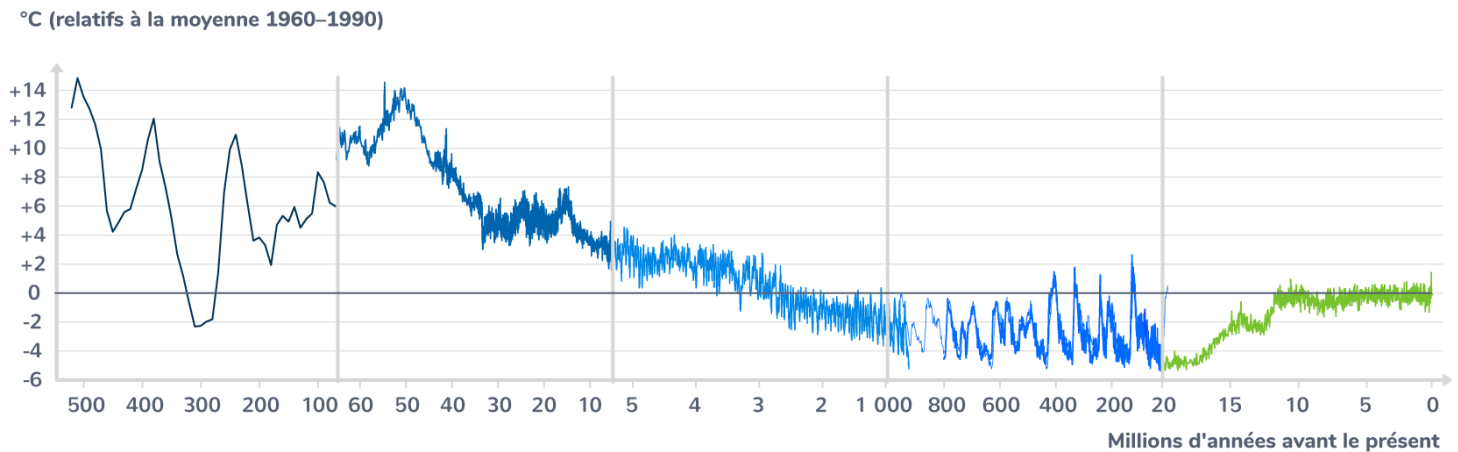
Les reliefs façonnés en fonction des conditions climatiques sont aussi de précieux indices.

#### EXEMPLE

Une vallée dont la forme indique qu'elle a été creusée par un glacier témoigne d'un climat froid.

Ces indices géologiques permettent de reconstituer les climats à l'échelle de millions d'années.

Paléotempératures des 540 derniers millions d'années



Des alternances de réchauffements et glaciations ont déjà eu lieu plusieurs fois dans l'histoire de la Terre.

Les pollens fossiles trouvés dans les glaces sont caractéristiques du climat global de la planète. En datant les glaces, on date aussi le climat passé.

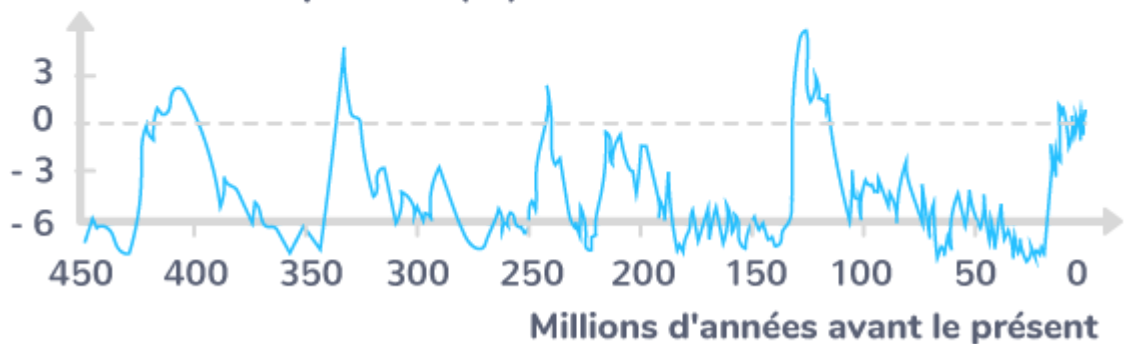
#### EXEMPLE

Si l'on observe une domination des pollens de conifères dans un échantillon de glace, on peut en déduire que le climat était froid à l'époque de sa formation.

Le  $\delta^{18}\text{O}$  est un véritable thermomètre paléo-magnétique. La composition des glaces de l'Antarctique est étudiée. L'oxygène est présent sous forme de deux isotopes ( $^{18}\text{O}$  et  $^{16}\text{O}$ ). Les scientifiques calculent un rapport nommé  $\delta^{18}\text{O}$  qui renseigne sur la richesse en  $^{18}\text{O}$  dans la glace. Plus le  $\delta^{18}\text{O}$  est grand, plus la température était élevée. Les températures peuvent ainsi être reconstituées. Elles sont comparées à la température actuelle régnant en Antarctique pour reconstituer les variations de température au cours du temps.

## Variations de température durant les 450 000 dernières années

Variations de température (°C)



© Wikimedia Commons

L'analyse de la composition des glaces indique les variations de température ( $\Delta t$ ) par rapport à la température actuelle en Antarctique.

### EXEMPLE

Il y a 125 000 ans, la température moyenne était supérieure de 6 °C par rapport à la température actuelle. C'était le pic d'une période chaude, interglaciaire.

Inversement, il y a 250 000 ans, la température était inférieure de 6 °C par rapport à la température actuelle en Antarctique, c'était la fin d'une période glaciaire.



### REMARQUE

Le  $\delta^{18}\text{O}$  peut aussi être calculé dans les sédiments calcaires récents accumulés au fond des océans. Dans ce cas, plus le  $\delta^{18}\text{O}$  des sédiments est élevé, plus il faisait froid.

## 2. Les indicateurs des variations actuelles du climat

**Les principaux indicateurs des variations actuelles du climat sont la température moyenne globale, l'étendue des glaces et le volume des océans. Ils montrent un réchauffement climatique très rapide de l'ensemble de la planète.**

La température moyenne globale de la Terre est calculée à partir des mesures réalisées sur Terre (on parle de mesures *in situ*) ou dans l'espace par des satellites.

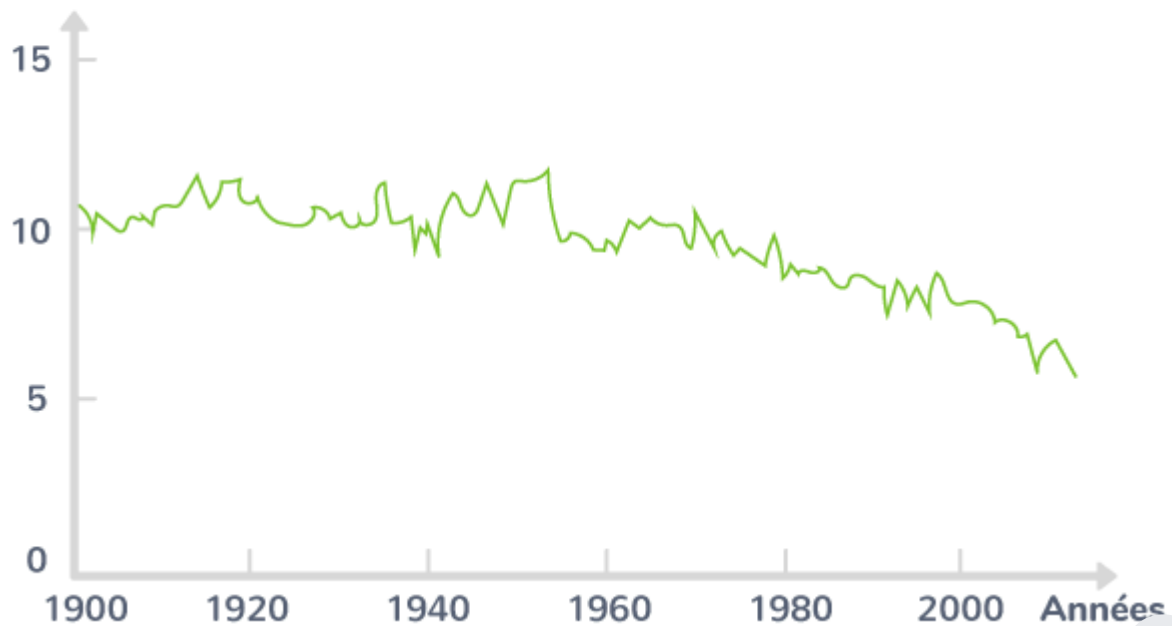
### EXEMPLE

Sur la période du dernier siècle (1901-2012), on observe une augmentation globale de la température sur Terre de 0,6 °C en moyenne.

L'étude de l'étendue des surfaces recouvertes de glace (banquises, glaciers) est un bon indicateur de l'évolution du climat global, à l'échelle de la planète. La fonte des glaces indique un réchauffement global de la température de la planète.

## Étendue des glaces des mers en Arctique pendant la saison d'été

Étendue des glaces de mer  
(millions de km<sup>2</sup>)



Le niveau moyen des mers augmente régulièrement depuis 100 ans. Il témoigne d'une augmentation de la température globale de la Terre. C'est un indicateur très surveillé. Les conséquences directes sont catastrophiques avec la disparition de certains territoires et la problématique déjà bien réelle des réfugiés climatiques.

D'autres indicateurs, liés à l'activité économique, sont observés, comme les dates des vendanges. Leur précocité témoigne du réchauffement climatique. En 50 ans, elles ont été avancées d'un mois.

## II L'effet de serre

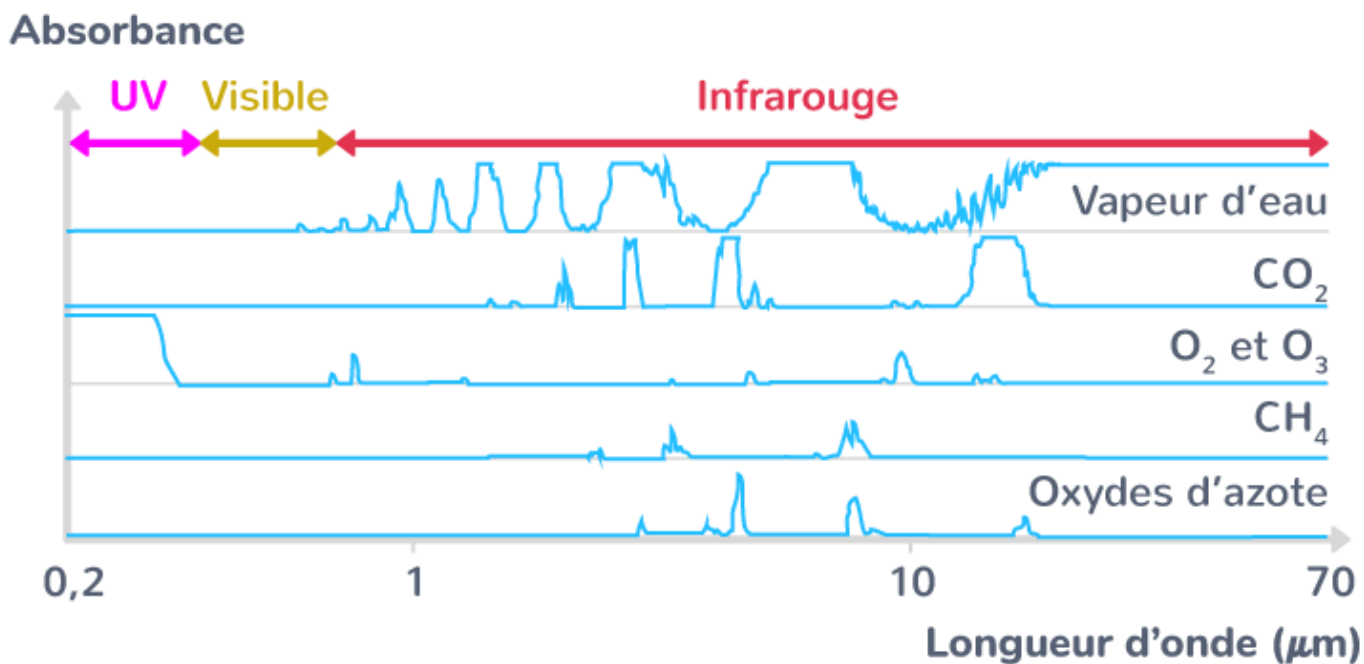
L'étude des spectres d'absorption des gaz à effet de serre permet d'expliquer comment ils contribuent à un forçage radiatif positif. Les conséquences de l'effet de serre sont une augmentation de la température moyenne et une montée du niveau des océans.

### A Les gaz à effet de serre

L'observation des spectres d'absorption montre que certains gaz ont la capacité d'absorber le rayonnement infrarouge. Lorsque ces gaz sont présents dans l'atmosphère terrestre, celle-ci absorbe davantage le rayonnement thermique infrarouge : ce sont les gaz à effet de serre.

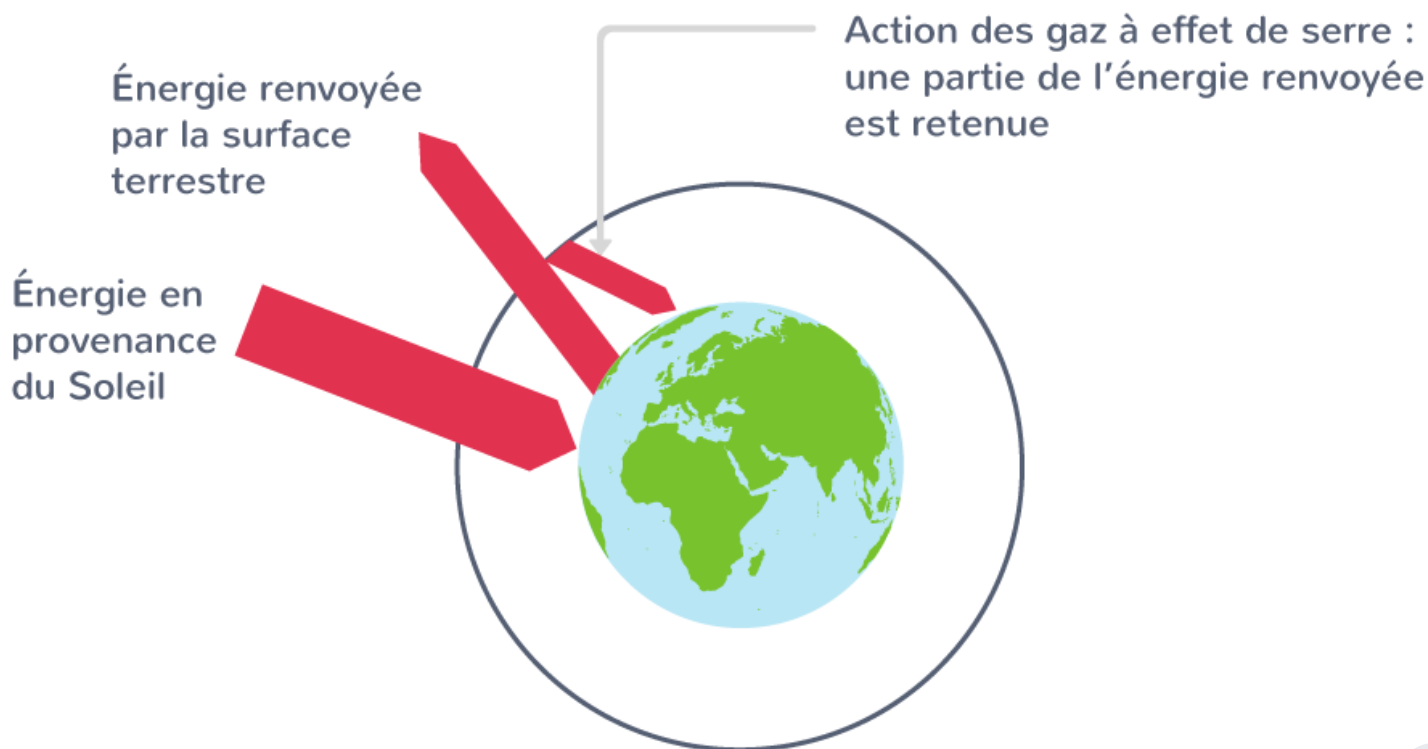
La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et, dans une moindre mesure l'ozone, le méthane et les oxydes d'azote absorbent en partie le rayonnement infrarouge.

## Spectre d'absorption de certains gaz



Du fait de la présence de ces gaz dans l'atmosphère terrestre, une partie de l'énergie que renvoie la surface terrestre ne quitte pas l'atmosphère et est retenue : c'est l'effet de serre.

## L'effet de serre



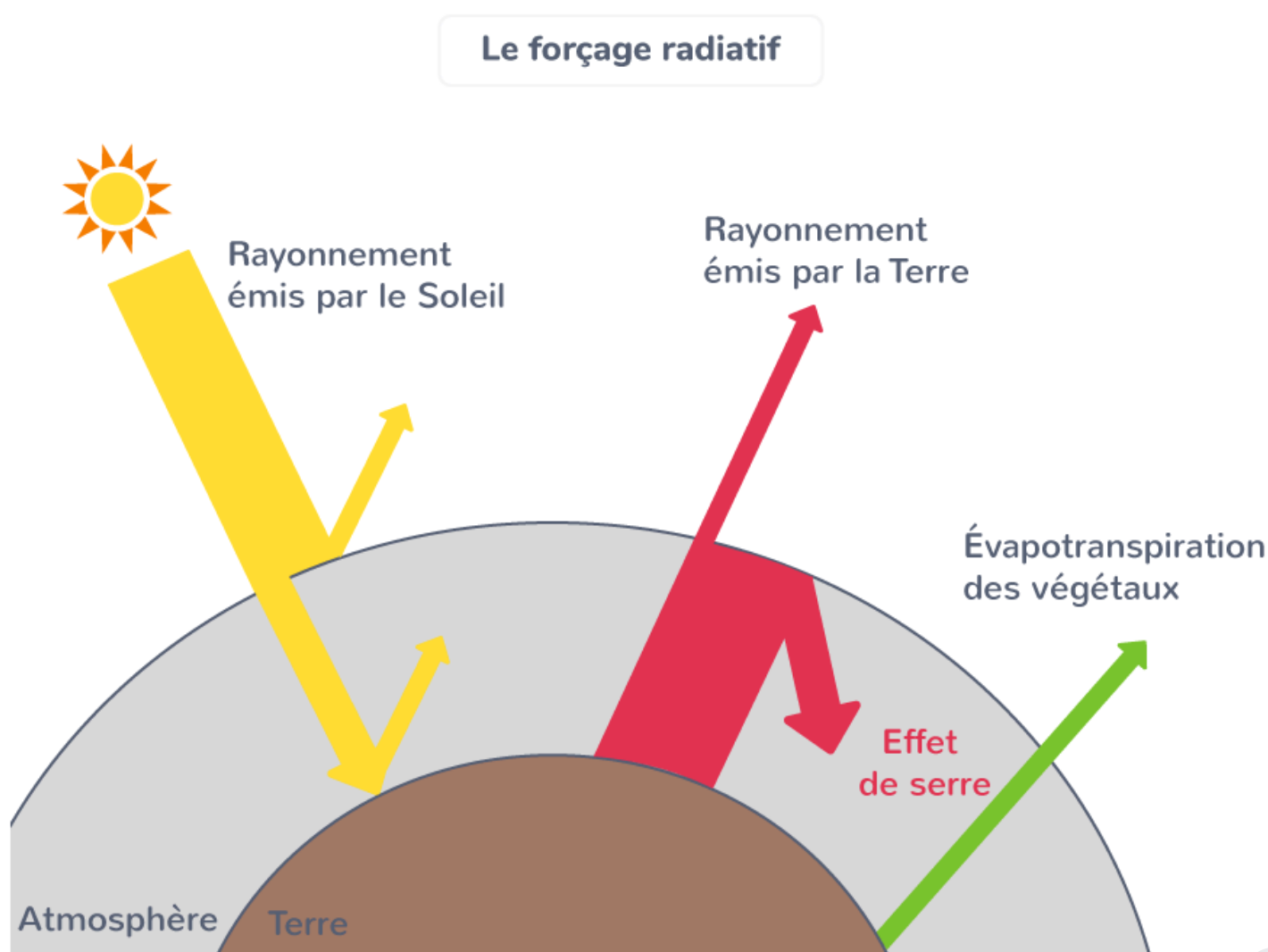
Le forçage radiatif correspond à la différence entre la puissance surfacique radiative reçue et celle émise par un système climatique donné.

#### DÉFINITION

### Forçage radiatif

Le **forçage radiatif** est égal à la différence entre la puissance surfacique radiative reçue et celle émise par un système climatique donné. Il s'exprime en watts par mètre carré ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

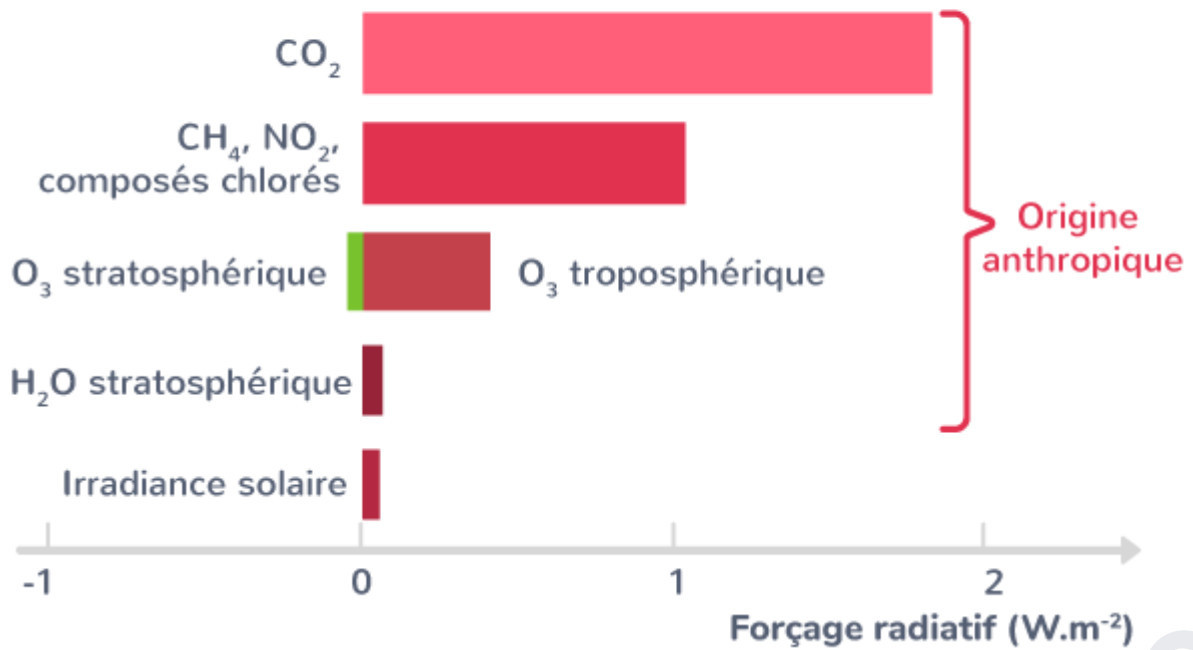
Actuellement, le forçage radiatif de la Terre serait d'environ  $2,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Ce forçage radiatif positif signifie que la Terre reçoit davantage de puissance que ce qu'elle émet et donc que sa température tend globalement à augmenter.



Il existe des phénomènes naturels pouvant être la cause d'un forçage radiatif positif (éruptions volcaniques, augmentation de l'irradiation solaire, etc.). Cependant, l'augmentation mesurée depuis le début de l'ère industrielle est de nature anthropique, c'est-à-dire due aux activités humaines, et les gaz à effet de serre en sont les principaux responsables.



## Les différentes contributions au forçage radiatif positif

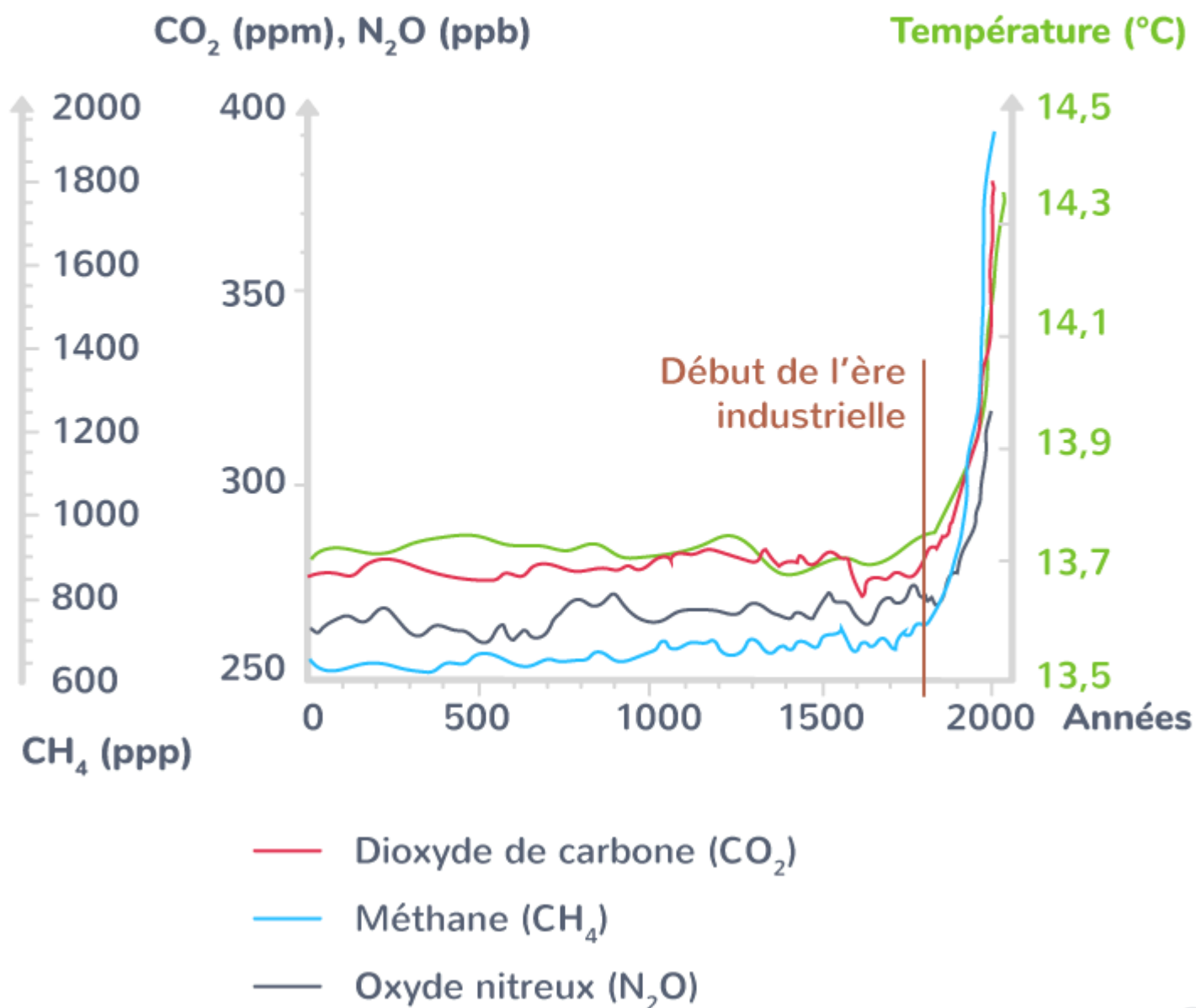


### C Les conséquences de l'effet de serre

Depuis le début de l'ère industrielle, l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre contribue au forçage radiatif positif et entraîne une perturbation de l'équilibre radiatif. Le système Terre stocke alors davantage d'énergie, 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 de la planète suit celle de l'émission de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère.

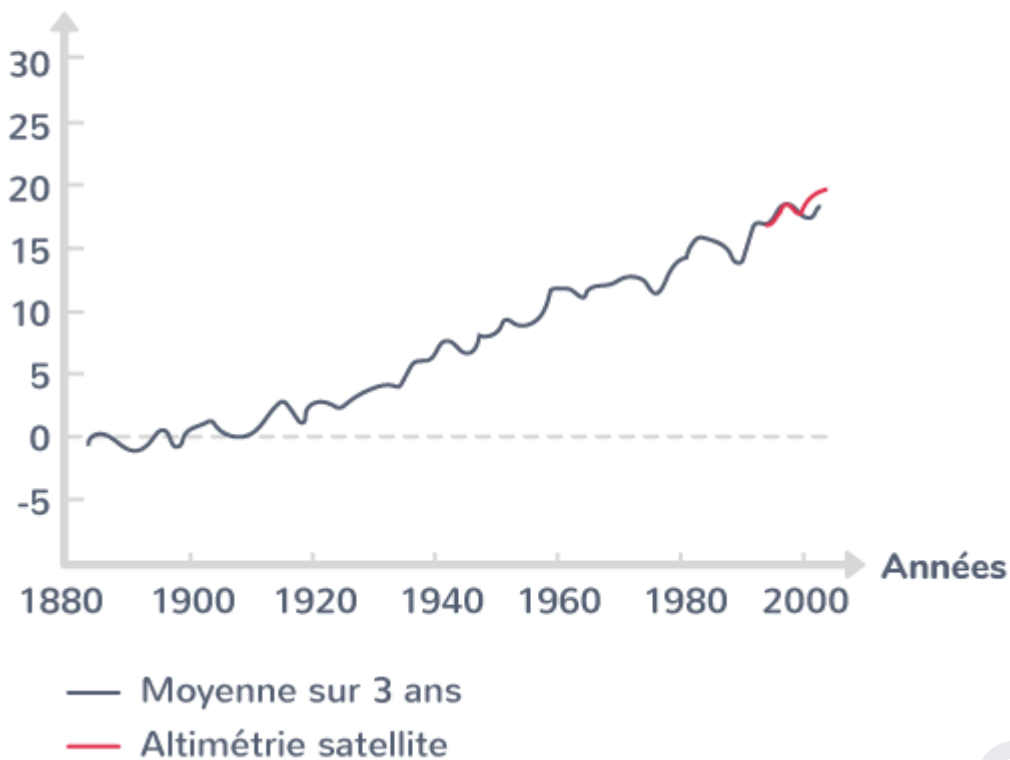
## Évolutions parallèles des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et de la température de la Terre



Les mesures du niveau de la mer dans des environnements géologiquement stables montrent une élévation d'environ 2 mm par an. Cette montée du niveau des eaux s'explique par la fonte des glaciers continentaux et par le phénomène de dilatation thermique (le volume des océans augmente avec la température).

## Élévation du niveau de la mer au XX<sup>e</sup> siècle

Variation du niveau de la mer (cm)



© Wikimedia Commons



PIÈGE

On pourrait croire que la fonte de la banquise provoque directement une montée des eaux mais ce n'est pas le cas, car lorsque cette glace océanique fond, l'eau de fonte occupe exactement le volume d'eau de mer que la glace occupait, sans modifier le niveau marin. Néanmoins, cette fonte n'est pas sans effet sur le climat car, avec sa couleur claire, la banquise a un fort pouvoir de réflexion des rayons solaires, et donc un rôle dans les variations de l'albédo de la surface de la Terre.

### III Les mécanismes de régulation du climat

Plusieurs mécanismes de régulation du climat sont identifiés. Les composantes du système climatique réagissent au réchauffement actuel par des mécanismes amplificateurs qui accroissent le phénomène et des mécanismes stabilisateurs qui tendent à l'atténuer.

#### A Les mécanismes amplificateurs

Les mécanismes amplificateurs sont engendrés par la diminution de l'albédo liée à la fonte des glaces, le dégel du permafrost (pergélisol) et la vapeur d'eau de l'atmosphère.

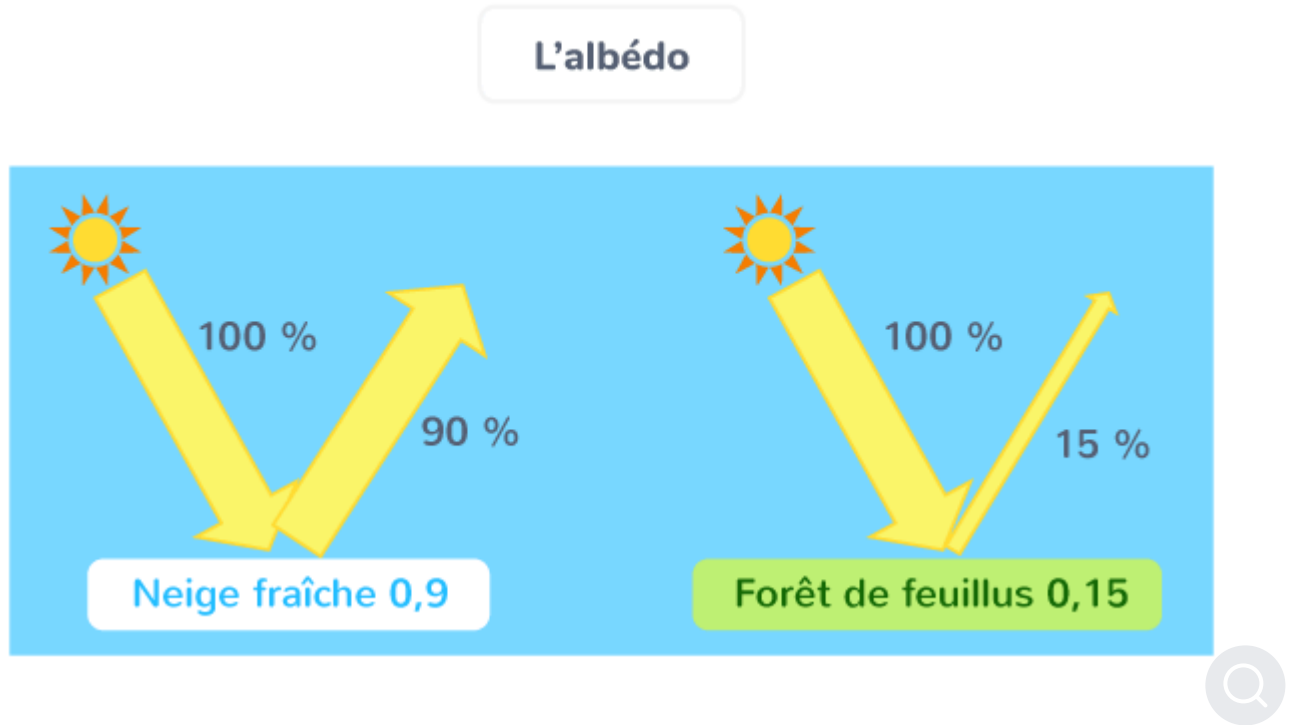
Le réchauffement climatique entraîne une diminution de l'albédo.

#### DÉFINITION

Albédo

**L'albédo** est le rapport entre l'énergie solaire réfléchi et l'énergie solaire incidente (reçue). Une surface ayant un albédo de 0,8 réfléchit 80 % de l'énergie solaire qu'elle reçoit. Plus la surface est blanche, plus l'énergie solaire est réfléchi. Plus l'albédo est fort, moins la surface au sol est chauffée.

La neige et les glaces ont un albédo fort ( $< 0,75$ ). Les surfaces sombres (océans, forêts, etc.) ont un albédo très faible ( $< 0,15$ ).



L'augmentation de la température globale de la Terre fait fondre neige et glace des calottes glaciaires. L'albédo diminue. L'énergie solaire est alors beaucoup moins réfléchi par la surface au sol. L'énergie absorbée réchauffe le sol. Ainsi, la diminution de l'albédo amplifie le réchauffement climatique.

Le dégel du permafrost est un autre phénomène amplificateur du réchauffement climatique.

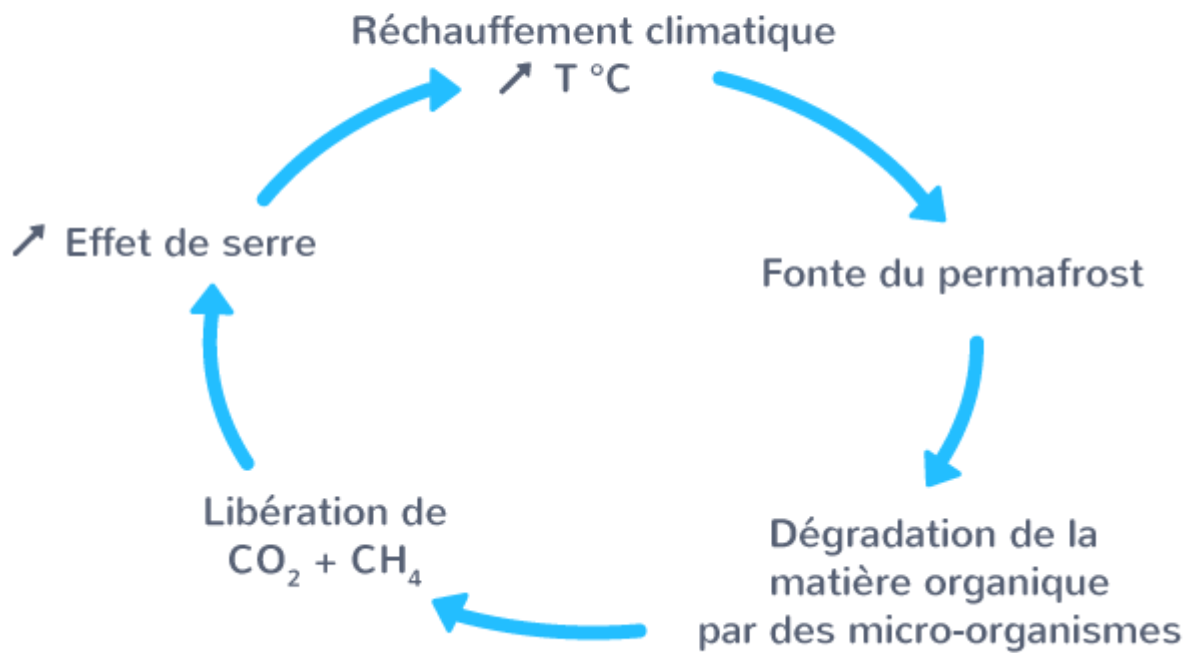
#### DÉFINITION

#### Permafrost

**Le permafrost** (en anglais) ou pergélisol (en français) désigne l'ensemble des sols qui restent gelés en permanence.

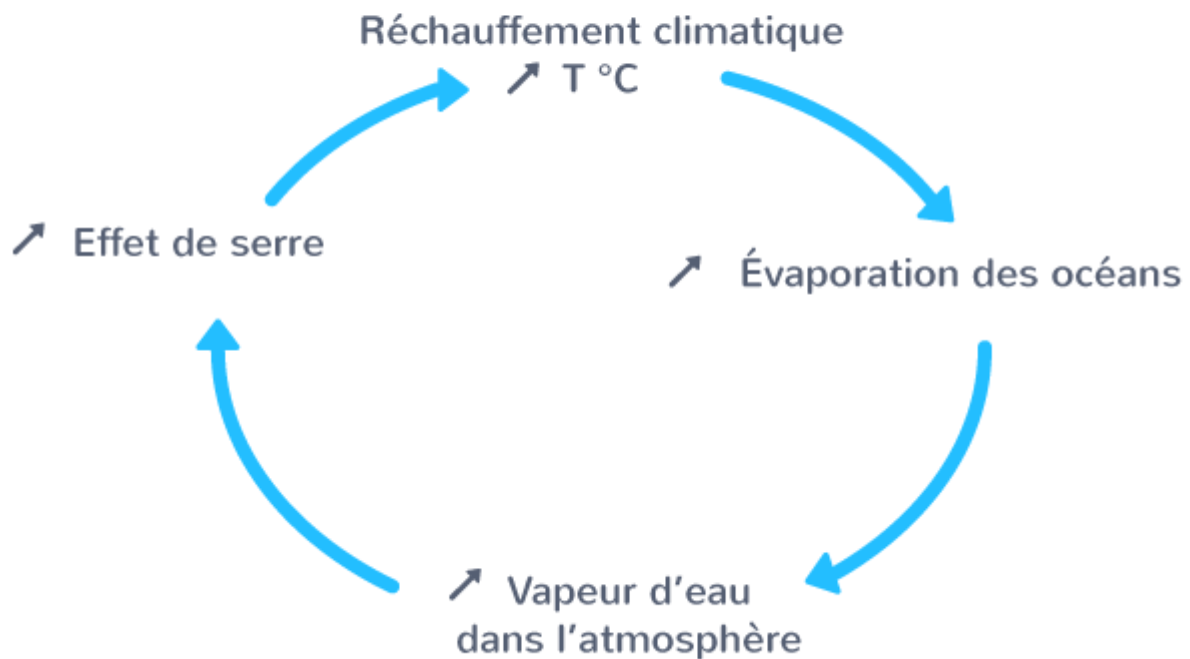
Le réchauffement climatique entraîne la fonte du permafrost. Ce dégel est accompagné d'émissions importantes de GES ( $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ ). En effet, la matière organique conservée dans ce sol (débris de végétaux, cadavres d'animaux) devient accessible aux micro-organismes. La dégradation de cette matière organique libère du  $\text{CO}_2$  et du  $\text{CH}_4$ , puissants GES dans l'atmosphère. L'émission de ces GES augmente l'effet de serre qui, à son tour, accroît le réchauffement climatique. C'est ce que l'on appelle une boucle d'amplification ou de rétroaction positive.

## Boucle d'amplification du réchauffement climatique par la fonte du permafrost



L'augmentation de la température globale de la Terre favorise aussi l'évaporation d'eau, notamment au niveau des océans. La quantité de vapeur d'eau augmente ainsi dans l'atmosphère. La vapeur d'eau est le principal GES, par conséquent l'effet de serre s'accroît et la température aussi. Le réchauffement climatique est amplifié, c'est une nouvelle boucle de rétroaction positive.

## Boucle d'amplification du réchauffement climatique par vapeur d'eau



### **B** Les mécanismes stabilisateurs

Les océans et la végétation sont des puits de  $\text{CO}_2$ . Ils assurent ainsi les mécanismes stabilisateurs du réchauffement climatique.

Les mécanismes stabilisateurs atténuent le réchauffement climatique qui s'emballerait encore plus vite s'il n'y avait que des mécanismes amplificateurs.

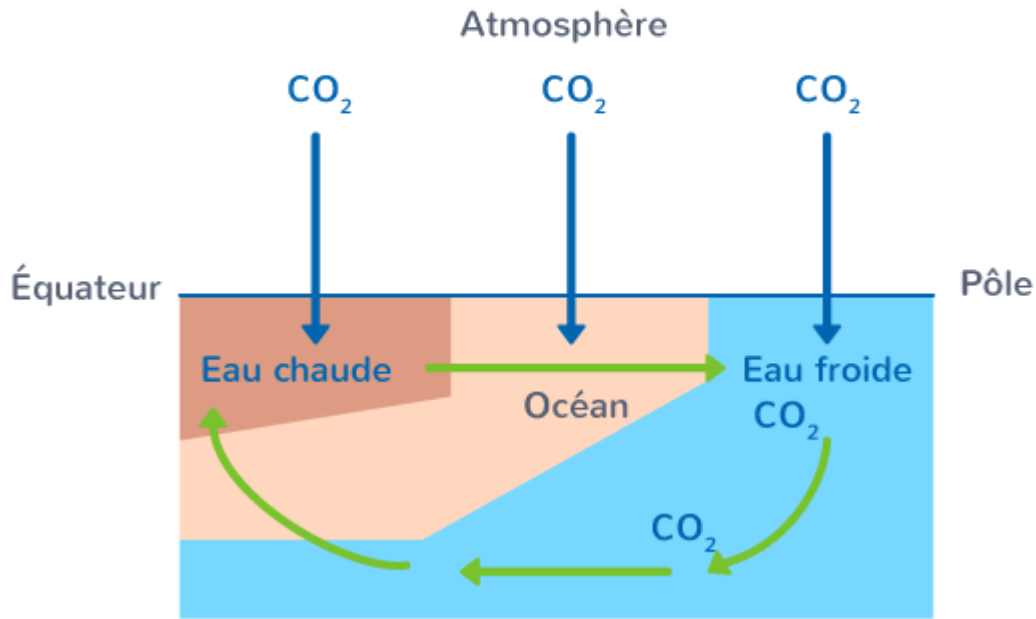
L'océan joue un rôle d'amortisseur indispensable. Deux mécanismes permettent à l'océan d'absorber 30 % des rejets de GES émis par l'homme.

Le premier mécanisme est physique : les océans et l'atmosphère réalisent des échanges gazeux par diffusion au niveau de la surface de contact entre l'air et l'eau. L'augmentation de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère

accroît la quantité de  $\text{CO}_2$  dissous dans l'eau. Cette dissolution est d'autant plus importante que les eaux sont froides. De plus, la circulation océanique entre en jeu. Les eaux froides sont plus denses que les eaux chaudes. Au niveau des pôles, elles plongent donc en profondeur, entraînant avec elles le  $\text{CO}_2$  dissous. Le

renouvellement des eaux en surface permet d'absorber à nouveau du  $\text{CO}_2$ .

## Mécanisme physique d'absorption du CO<sub>2</sub> par les océans



Le deuxième mécanisme est biologique. Le phytoplancton est constitué d'une grande quantité d'organismes végétaux microscopiques qui réalisent la photosynthèse. Le CO<sub>2</sub> dissous est ainsi absorbé par les êtres vivants photosynthétiques pour produire de la matière organique.

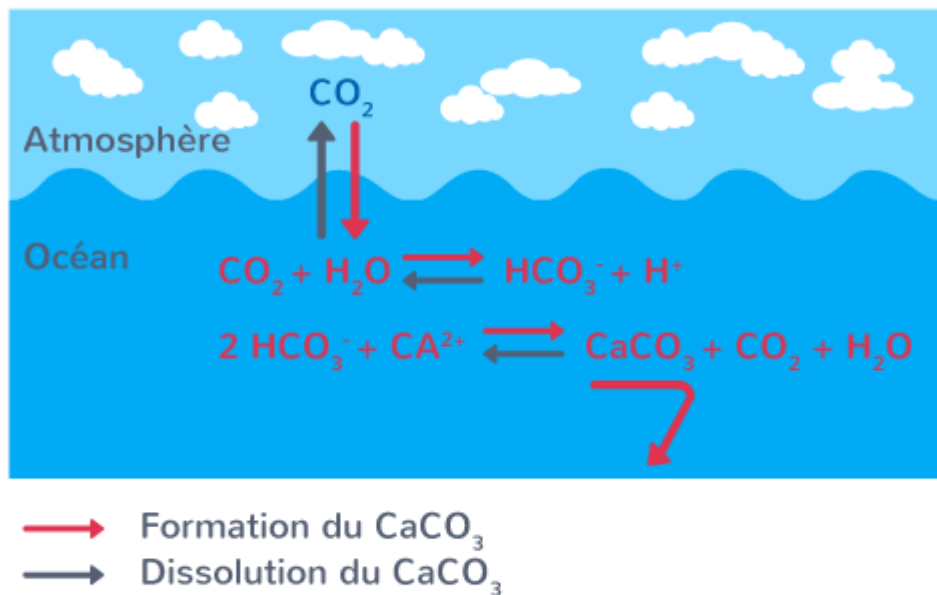
Équation de la photosynthèse :  $6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$

Ces organismes sont le premier maillon des chaînes alimentaires. Les consommateurs de phytoplancton stockent à leur tour le carbone issu du CO<sub>2</sub> dans leur matière organique, mais aussi dans leur coquille ou squelette. À leur mort, ils se déposent au fond des océans. Les sédiments ainsi accumulés constituent un puits de CO<sub>2</sub>.

Par ailleurs, les coraux et du plancton utilisent le CO<sub>2</sub> dissous pour produire du carbonate de calcium, principal puits de CO<sub>2</sub> des océans.

Lors de sa dissolution dans l'eau, le CO<sub>2</sub> s'associe à l'eau pour former des ions bicarbonates HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et hydrogène (H<sup>+</sup>). Les ions bicarbonates s'associent au calcium dissous dans l'eau pour former du carbonate de calcium.

## Formation du carbonate de calcium dans les océans



Le  $\text{CO}_2$  libéré lors de la formation du carbonate de calcium est utilisé par la photosynthèse. Ainsi, les océans constituent un puits de  $\text{CO}_2$  et atténuent l'augmentation de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. Cependant, ce n'est pas suffisant pour compenser l'ensemble des émissions de GES.



### REMARQUE

L'accumulation de  $\text{CO}_2$  dans les océans a toutefois un effet négatif. Cela entraîne l'acidification des océans et modifie la biodiversité, entraînant la mort de certains organismes comme les coraux à la base des chaînes alimentaires. C'est donc l'ensemble du réseau trophique qui est en danger.

Outre le phytoplancton, la végétation terrestre joue également le rôle de puits de  $\text{CO}_2$ .

Face à l'augmentation de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, les végétaux s'adaptent. Une étude australienne révèle que l'activité photosynthétique des végétaux est d'autant plus importante que la quantité de  $\text{CO}_2$  atmosphérique est grande. Ainsi, la surface des feuilles augmente, leur permettant de capter encore plus de  $\text{CO}_2$ . Par conséquent, la végétation assimile le surplus de  $\text{CO}_2$  émis. C'est un mécanisme de rétroaction négative.

Le revers de cette bonne nouvelle est que l'évapotranspiration est plus importante, le besoin en eau de ces plantes est donc majoré. Cela accroît le problème de la disponibilité en eau douce.

Les végétaux et les océans tentent ainsi d'atténuer les émissions de  $\text{CO}_2$  liées aux activités humaines, mais cela ne suffit pas à les compenser. C'est pourquoi on observe une augmentation rapide de la



concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère.

