

UE "Climat & Transitions"

Séquence 1 : Climat 1

Chloé Maréchal, LGL-TPE, Université Lyon 1

Université Lyon 1

Chloé Maréchal

LGL-TPE – Université Lyon1

Climat #1

Le climat, c'est quoi ?

- 1) Le climat, un écrin pour la vie
- 2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?
- 3) Les caractéristiques du climat global
- 4) L'effet de serre et l'équilibre climatique
- 5) Les causes de l'évolution du climat
- 6) L'évolution passée du climat



Capsule 1

Le climat, un écriin pour la vie

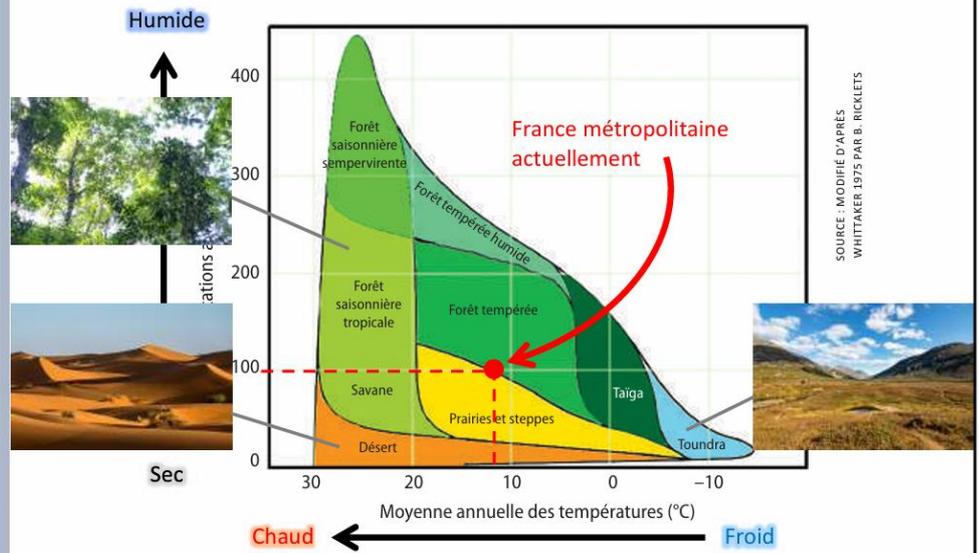
1) Le climat, un écriin pour le vivant

Objectif :

Comprendre le rôle primordial tenu par le climat dans la répartition du vivant sur Terre.



Relation végétation – température/précipitations

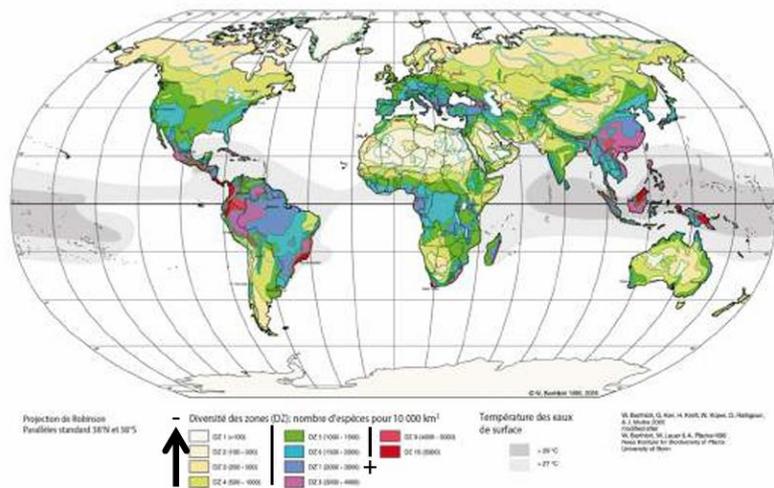


Types de végétation (biomes) en fonction des températures et des précipitations annuelles.

A chaque milieu écologique homogène et étendu (biome) correspond une gamme de températures et de précipitations annuelles singulière = niche climatique

2

Relation biodiversité – zones climatiques



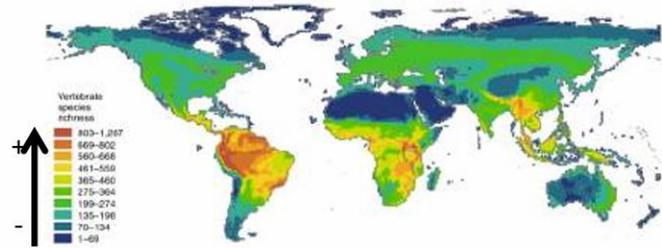
Répartition de la biodiversité végétale (nombre d'espèces présentes par unité de surface, ici 10 000 m²) pour les plantes vasculaires terrestres.

La zone équatoriale est la plus riche, en particulier en montagne.

La biodiversité continentale diminue fortement de l'Equateur aux Pôles.

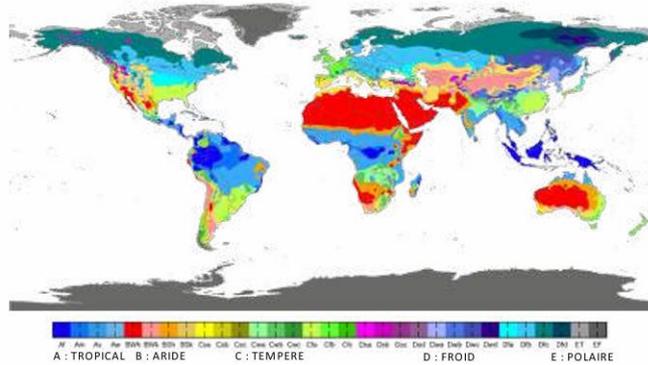
La répartition actuelle de la biodiversité est aussi en grande partie héritée de l'évolution du climat passé sur des millions d'années.

4



SOURCE : ANTONELLI ET AL. 2018

Répartition de la **biodiversité animale** (nombre d'espèces présentes par unité de surface, ici des cellules de 1°) pour les **tétrapodes (amphibiens, oiseaux et mammifères) terrestres**.

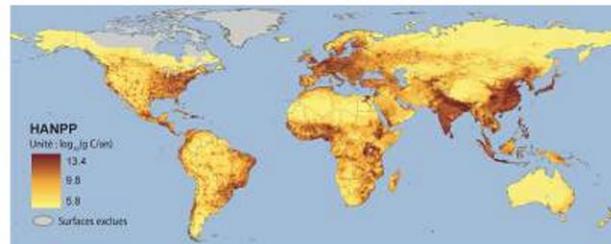


SOURCE : D'APRES CHEN & CHEN 2018

Les **climats terrestres** selon la classification de Köppen-Geiger – période 1901-2010.

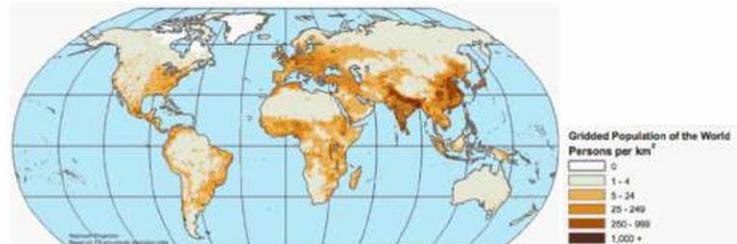
La répartition de la biodiversité continentale est très proche de celle des zones climatiques. **5**

Relation Homme – zones climatiques



SOURCE : NASA /r/ MEUJERES ET MARECHAL 2020

Répartition de la **quantité annuelle de végétation utilisée par la population humaine** (HANPP, Human Appropriation of net Primary Production) en gramme de carbone par unité de surface et par an.



SOURCE : CIESIN, COLUMBIA UNIV 2005

Densité de la population mondiale en 2000.

La répartition de la densité de ressource alimentaire agricole est, sans surprise, très proche de celle de la population mondiale : les hommes s'installent là où la nourriture est disponible.

Cela démontre la dépendance de l'Homme au climat.

6

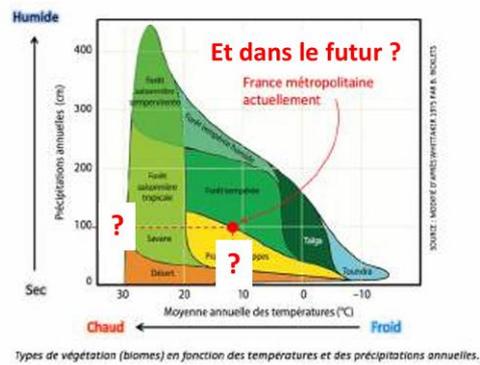
1) Le climat, un écrin pour le vivant

En conclusion ...

La répartition de la **végétation**, des animaux, de leur **biodiversité**, ainsi que celle de la **production agricole** et des **populations humaines**, sont **fortement liées** à la **répartition des différents climats terrestres**.

Comment, en cas d'évolution climatique rapide dans un avenir proche, ces répartitions évolueront-elles ?

Dans le cadre d'un réchauffement, les zones de répartition se déplaceront-elles vers les Pôles, ou vers l'Equateur ? Certaines zones seront-elles en extension, ou en contraction ?



→ L'un des enjeux de l'étude du climat est de comprendre l'impact de son évolution sur le vivant (dont l'Homme fait partie)

1) Le climat, un écriin pour le vivant

Résumé :

La vie sur Terre est conditionnée par le climat : à **chaque climat** local correspond un **écosystème local différent**

Les **changements climatiques** se **répercutent** automatiquement sur les **écosystèmes** et sur la **biodiversité**

La connaissance du climat permet de comprendre l'impact de son évolution sur le vivant (dont l'Homme fait partie)

1) Le climat, un écriin pour le vivant

Références bibliographiques

ANTONELLI, A., KISSLING, W., D., FLANTUA, S., G., BERMUDEZ, M., A., MULCH, A. N. MUELLNER-RIEHL, A., N., KREFT, H., LINDER, H., P., BADGLEY, C., FIELDSA, J., FRITZ, S., A., RAHBEK, F., H., HOOGHIEMSTRA, H. & HOORN, C. (2018) Geological and climatic influences on mountain biodiversity, *Nature Geoscience* 11, 718-725.

BARTHLOTT, W., LAUER, W. & PLACKE, A. (1996) Global distribution of species diversity in vascular plants : towards a world map of phytodiversity, *Erkunde* 50, 317-328.

CHEN, D. & CHEN, H., W. (2013) Using the Köppen classification to quantify climate variation and change : An example for 1901–2010, *Environmental Development* 6, 69-79.

FRANCOU, B. & MÉLIÈRES, M-A. (2021) Coup de chaud sur les montagnes. Paulsen éditions/Guérin, Chamonix. 237 pp.

MAYOUX, P. (2004) Fleurs des Pyrénées. Editions Rando. 64 pp.

MELIERES, M-A. & MARECHAL, C. (2020) Climats : passé, présent, futur. Belin Editeur / Humensis, Paris. 426 pp.



WHITTAKER, R. (1975) Communities and Ecosystems. Mac-Millan Publishing Company, Inc., New York.

Climat #1

Le climat, c'est quoi ?

- 1) Le climat, un écrin pour la vie**
- 2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?**
- 3) Les caractéristiques du climat global**
- 4) L'effet de serre et l'équilibre climatique**
- 5) Les causes de l'évolution du climat**
- 6) L'évolution passée du climat**

Capsule 2

Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?

2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?

Objectifs :

Identifier les trois grandeurs physiques qui caractérisent le climat sur une région donnée ou sur le globe.

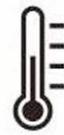
Savoir expliquer en quoi le climat est différent de la météo.

Comprendre que le climat est en relation avec les cinq grands compartiments de surface de la Terre.

2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?

Les grandeurs physiques

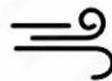
La *température*



Les *précipitations*
(pluie et neige)



Le *déplacement des masses d'air*
(vent)



Ces grandeurs sont également étudiées en météorologie ...

Quelle est la différence entre climat et météo ?

2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?

Ex. Station de Grande Chartreuse (Isère, France)



SOURCE : ERIC GABA/STING

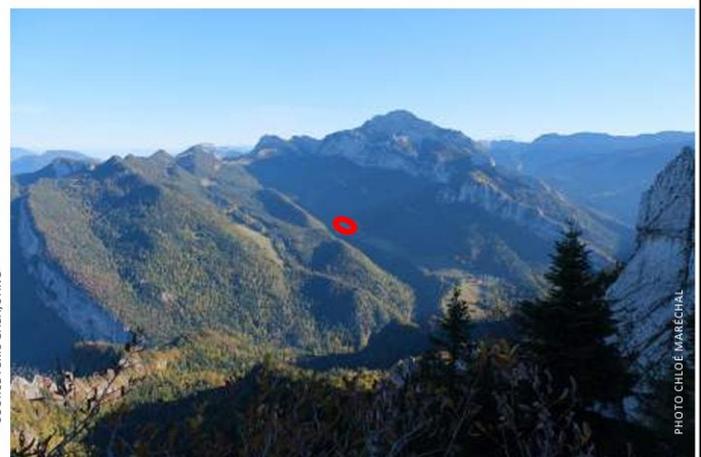


PHOTO CHLOE MARECHAL

La station de Grande Chartreuse (point rouge) est localisée dans le massif de la Chartreuse, dans les Pré-Alpes (France), à une altitude de 945 mètres.

2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?

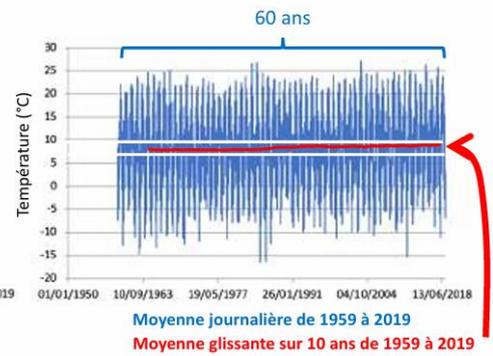
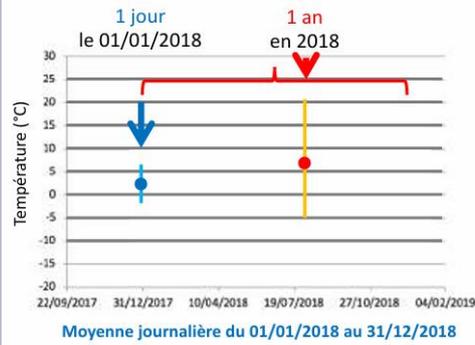
Ex. Station de Grande Chartreuse (Isère, France)

Sur 1 jour (24h), le 01/01/2018 :

Température mesurée minimale : -2°C (à 04h), maximale : $+6^{\circ}\text{C}$ (à 15h)
→ Température moyenne journalière : $\approx +2^{\circ}\text{C}$ (bleu)

Sur 1 an, du 01/01 au 31/12/2018 :

Température journalière minimale : -10°C (le 27/02), maximale : $+24^{\circ}\text{C}$ (le 05/08)
→ Température moyenne annuelle : $\approx +7^{\circ}\text{C}$ (rouge)

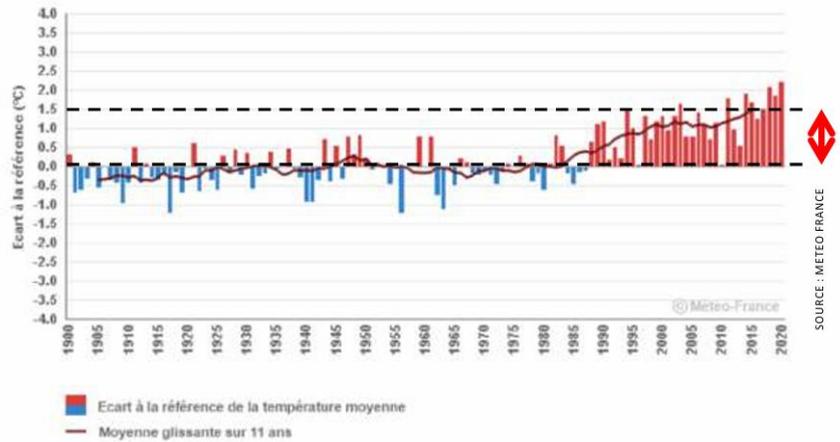


→ Réchauffement de $\approx 1,5^{\circ}\text{C}$ de ≈ 1980 à 2015



2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?

En accord avec le réchauffement moyen observé en France métropolitaine :



Evolution de l'écart des températures moyennes annuelles en France métropolitaine depuis 1900, par rapport à la période 1961-1990 (moyenne glissante sur 11 ans). Le réchauffement observé est particulièrement marqué depuis les années 1980.

→ Réchauffement de $\approx 1,5^{\circ}\text{C}$ de ≈ 1980 à 2015

« ... Et en 2100, quel sera le réchauffement en France ? » = climatologie

La climatologie étudie les températures, les précipitations, les vents, sur une durée longue (supérieure à 30 ans), à la différence de la météorologie qui les étudie sur une durée courte (heures, jours ...)

5

2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?

Climatologie :

- ⇒ Simulation du climat pour les prochaines décennies (les prochains siècles).
- ⇒ Reconstitutions du climat sur les siècles, les millénaires, les millions d'années ... passés.

→ difficilement perceptible par nos sens

→ concept (donc savoir abstrait) – qui passe par des représentations



Météorologie :

- ⇒ Prédiction du temps pour les prochaines heures, les prochains jours.

→ facilement perceptible par nos sens

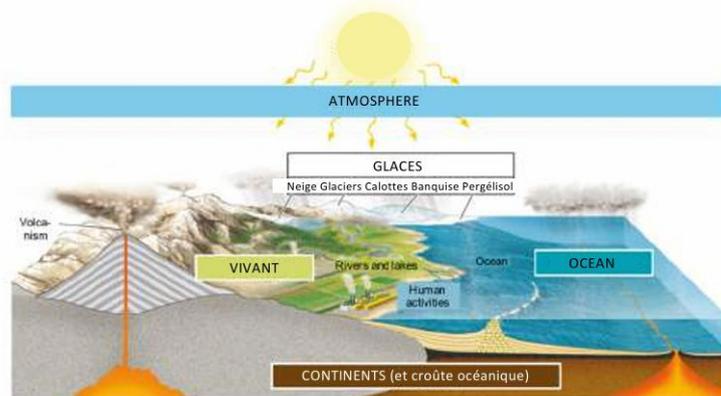


6

2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?

Le climat et les grands compartiments terrestres

La climatologie, qui s'intéresse à des temporalités longues, est en relation permanente avec les compartiments de la surface terrestre : **l'atmosphère, l'océan, le vivant, les glaces, les continents.**



SOURCE : MODIFIÉ D'APRÈS RAZIK 2014, GROTZINGER ET AL. 2008

Les cinq compartiments en surface de la Terre en perpétuelle interaction : l'atmosphère, l'océan, le vivant (biosphère continentale et océanique), les glaces, les continents/la croûte océanique.

L'ensemble de ces compartiments constitue une fine pellicule à la surface de la Terre, sans cesse en évolution.

2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?

Résumé :

Les grandeurs mesurées en climatologie sont les **températures**, les **précipitations**, les mouvements de l'air (**vents**)

La **climatologie** s'intéresse à l'évolution de ces grandeurs sur des **durées longues** (minimum 30 ans) alors que la **météorologie** le fait sur un **temps court** (heures, jours)

Les **cinq grands compartiments de surface terrestre** (l'atmosphère, l'océan, la biosphère, les continents, les glaces), qui sont en **permanente interaction**, influent sur le climat, et **inversement**.

La **planète** est un **système global, dynamique**, qui détermine le climat.

2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?

Références bibliographiques

GROTZINGER, J., JORDAN, T.H., PRESS, F., & SIEVER, R. (2008) Allgemeine Geologie. Spektrum Akademischer Verlag, 736 p.

RAZIK, S. (2014) How magnetics and granulometry of continental margin sediments reflect terrestrial and marine environments of South America and West Africa. Universität Bremen, EuroProx. 131 pp.

Climat #1

Le climat, c'est quoi ?

- 1) Le climat, un écrin pour la vie
- 2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?
- 3) Les caractéristiques du climat global
- 4) L'effet de serre et l'équilibre climatique
- 5) Les causes de l'évolution du climat
- 6) L'évolution passée du climat

Capsule 3

Les caractéristiques du climat global

3) Les caractéristiques du climat global

Objectifs :

Connaître les valeurs des grandeurs physiques associées au climat global de la Terre

Retenir quel flux d'énergie est nécessaire pour maintenir le climat

Réaliser, à partir du bilan énergétique, que le flux solaire reçu se trouve amplifié à la surface de la Terre

3) Les caractéristiques du climat global

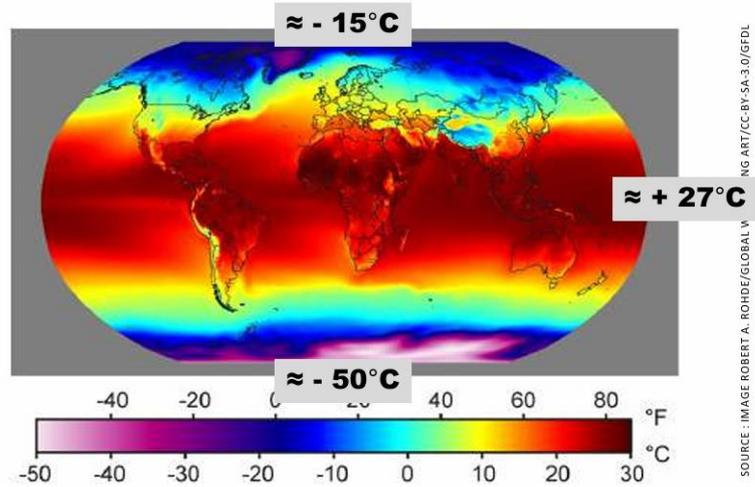
Le climat global sur Terre

On appelle « climat global » le **climat moyenné sur toute la surface de la planète** (océans et continents).

La moyenne s'exprime pour chaque grandeur physique du climat :
température, précipitations, montées des masses d'air

3) Les caractéristiques du climat global

Température



SOURCE : IMAGE ROBERT A. ROHDE/GLOBAL W... NG ART/CC-BY-SA-3.0/GFDL

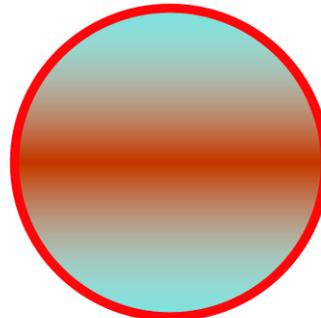
Répartition de la **température moyenne annuelle** à la surface de la Terre pour la période 1961-1990.

La température moyenne diminue de l'Equateur aux pôles, l'Equateur recevant sur l'année plus d'énergie solaire que les pôles à cause de la sphéricité de la Terre.

3

3) Les caractéristiques du climat global

≈ - 15°C Région polaire nord



≈ + 27°C Equateur

≈ - 50°C Région polaire sud

Schéma des **températures moyennes annuelles** à la surface de la planète.

**Température moyenne globale :
≈ 15°C**

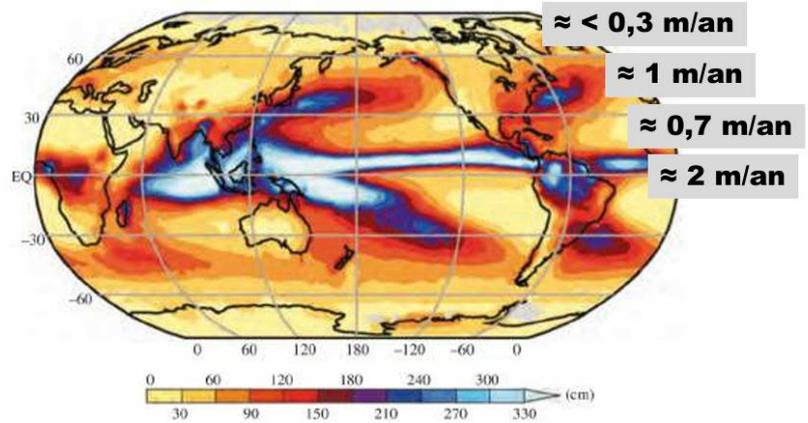
SOURCE : MÉLIÈRES ET MARÉCHAL 2020

Comment la température moyenne globale va-t-elle évoluer avec le changement climatique ?

4

3) Les caractéristiques du climat global

Précipitations (pluie et neige)



SOURCE : IPCC 2007

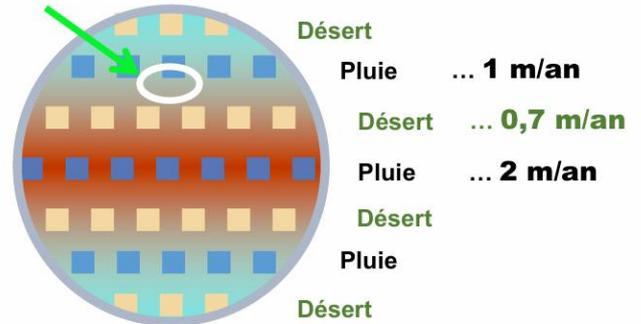
Répartition des **précipitations moyennes annuelles** à la surface de la Terre pour la période 1980-1999. Les précipitations sont exprimées en hauteur d'eau (cm).

La répartition des précipitations moyennes s'organise en une alternance de ceintures bien arrosées (au nombre de 3) et de ceintures faiblement arrosées (au nombre de 4). La circulation atmosphérique en est le maître d'œuvre.

5

3) Les caractéristiques du climat global

Europe occidentale



SOURCE : MÉLIÈRES ET MARÉCHAL 2020

Schéma de l'alternance des **ceintures de pluie et des régions arides** à la surface de la planète.

La quantité d'eau qui tombe chaque année sur la surface de la planète est équivalente à une lame d'eau d'1 mètre de hauteur

Précipitations moyennes globales : $\approx 1 \text{ m/an}$

Où se situent l'Europe et la zone méditerranéenne ?

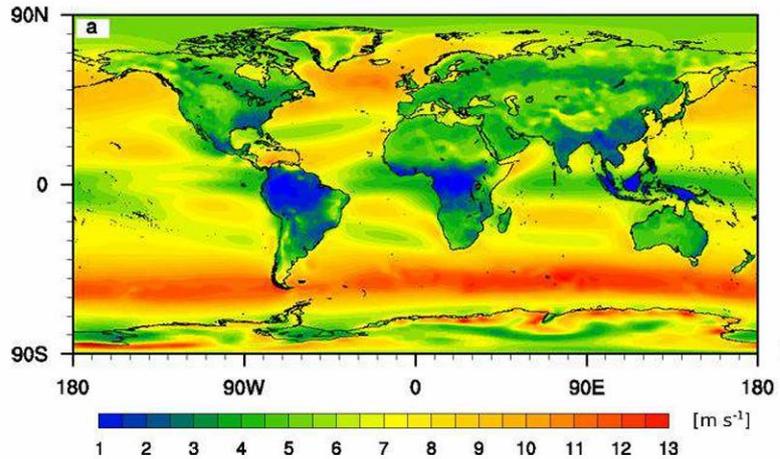
Comment vont évoluer ces ceintures avec le changement climatique ?

- s'amplifier / s'atténuer ?
- se déplacer vers les pôles / vers l'Equateur ?

6

3) Les caractéristiques du climat global

Déplacement des masses d'air (vents)



SOURCE : POSSNER AND CALDEIRA 2017

Répartition de la **vitesse des vents moyens annuels** à 10 mètres au-dessus de la surface terrestre pour la période préindustrielle. Les vitesses sont exprimées en m/s.

Les vents montre également une diversité de distribution en fonction des latitudes. Cette diversité dépend de la circulation atmosphérique à grande échelle.

7

3) Les caractéristiques du climat global

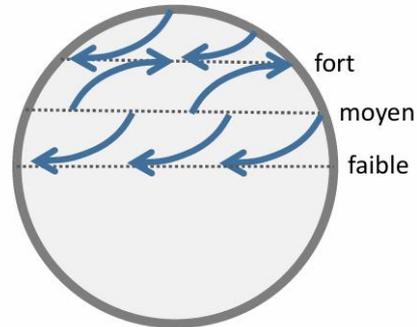


Schéma de la **direction** moyenne annuelle des **vents** à la surface de la planète pour l'**hémisphère nord**.

Les vents de surface participent à la convection atmosphérique qui est initiée par la **montée des masses d'air chaud** dans l'air **depuis la surface**, c'est-à-dire par les **vents ascendants**.

Vents moyens ascendants

8

3) Les caractéristiques du climat global

En résumé

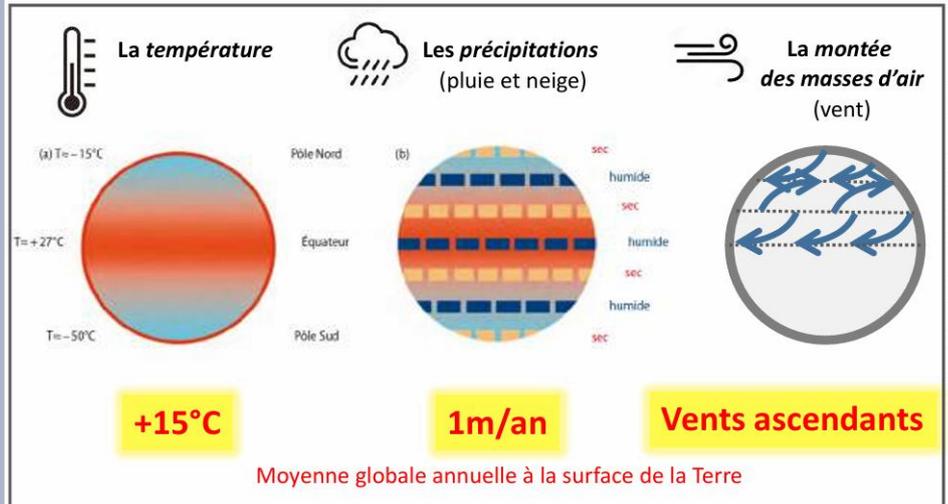


Schéma des répartitions des **température**, des **précipitations**, et des **vents** à la surface de la planète, et leur **valeur moyenne annuelle à la surface terrestre** (continents et océans). Données : GIEC (2007)

3) Les caractéristiques du climat global

Le climat, une « machine » qui demande de l'énergie

Quelle énergie est nécessaire pour maintenir le climat ?

3) Les caractéristiques du climat global

Le climat global sur Terre nécessite de maintenir environ 500 W/m^2 , sur la surface terrestre

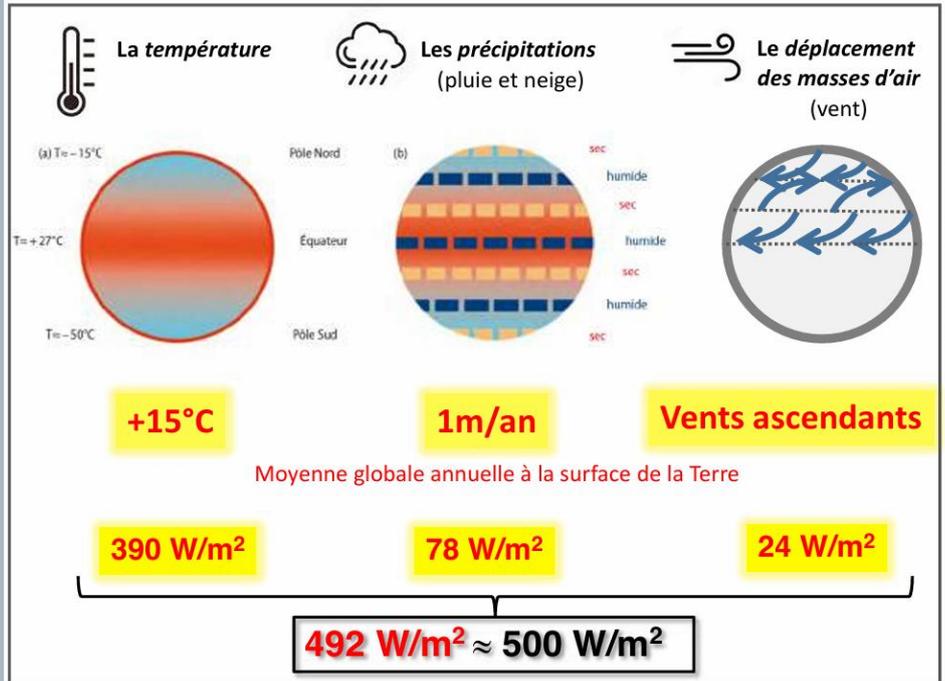


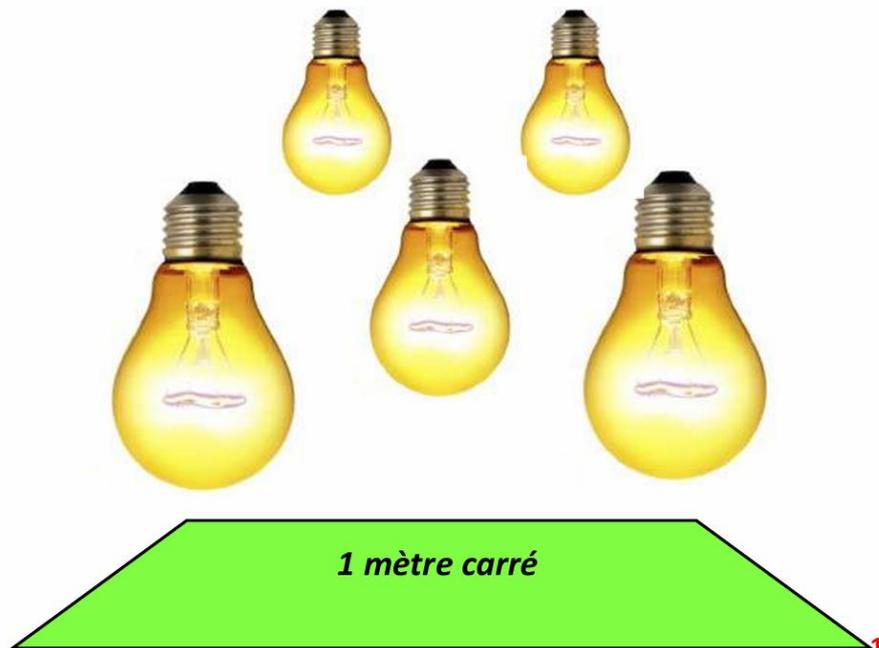
Schéma des répartitions des température, des précipitations, et des vents à la surface de la planète, leur valeur moyenne annuelle à la surface terrestre, et leur coût énergétique. Données : GIEC (2007)

SOURCE : MODIFIÉ D'APRÈS MÉLIÈRES ET MARÉCHAL 2020

3) Les caractéristiques du climat global

Qu'est-ce que ça représente 500 W par mètre carré ?

... 5 ampoules de 100 W au-dessus d'une surface d'1 m²



3) Les caractéristiques du climat global

Et s'il fallait fournir nous-mêmes ce flux d'énergie avec nos muscles ?

Pour produire 500 W par mètre carré,

- sur 1 jour, la surface (1 m²) doit produire 12 kWh
soit le travail musculaire de 55 randonneurs de 80 kg qui grimpent un dénivelé de 1000 m
- sur l'année, c'est l'équivalent du travail musculaire de 20 100 randonneurs qui grimpent chaque jour, par groupe de 55, un dénivelé de 1000 m

... Et sur l'année pour toute la surface terrestre ?

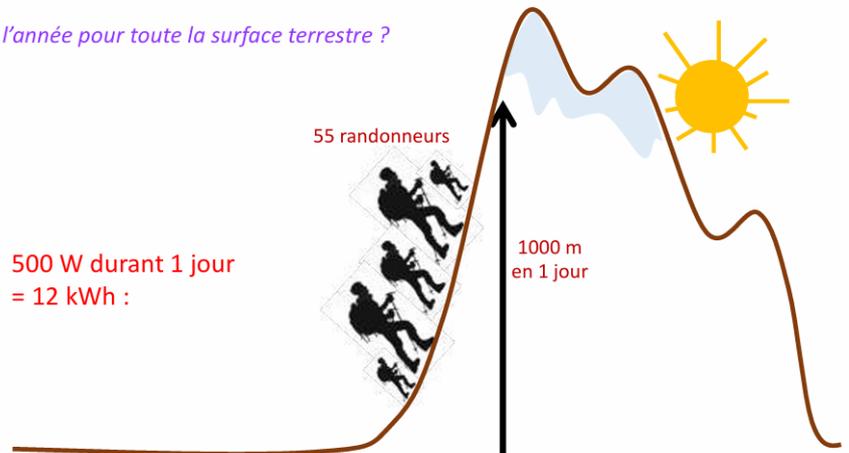
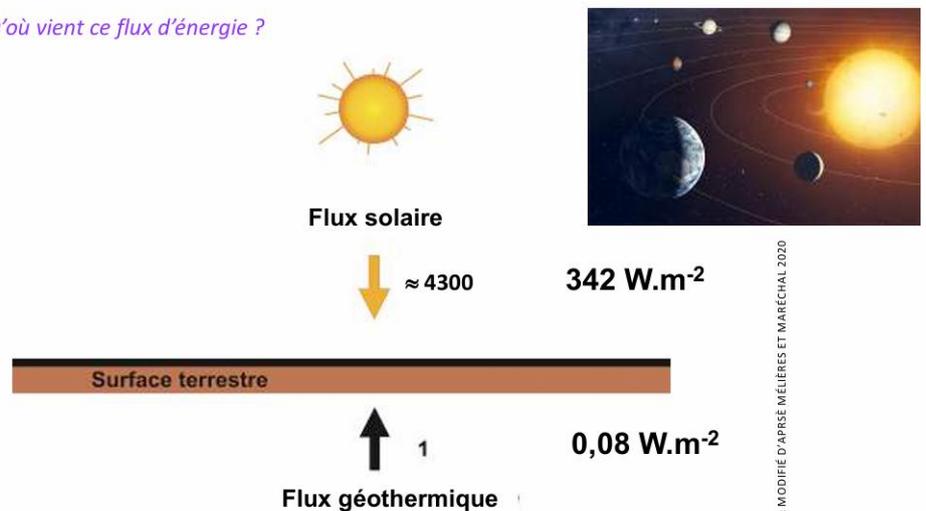


Schéma d'un exemple d'effort musculaire que des humains devraient fournir pour produire 4380 kWh durant 1 an (soit l'équivalent de 500 watts durant 1 an)

4

3) Les caractéristiques du climat global

D'où vient ce flux d'énergie ?



Rapport des **flux d'énergie solaire et géothermique** arrivant en surface terrestre.

L'énergie nécessaire pour maintenir le climat est fournie par le **Soleil**.

Le climat actuel nécessite une flux d'énergie de $\approx 500 \text{ W/m}^2$

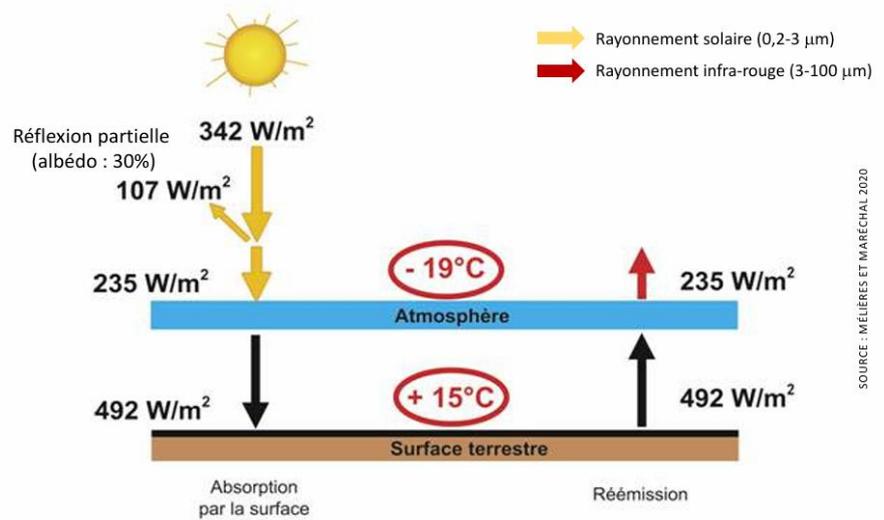
Le Soleil est la seule source d'alimentation.

Or le flux solaire reçu, moyenné sur la planète, est de $\approx 340 \text{ W/m}^2$...

Comment est-il alors possible de disposer de $\approx 500 \text{ W/m}^2$ à la surface ?

3) Les caractéristiques du climat global

Le bilan énergétique sur Terre



SOURCE : MÉLIÈRES ET MARÉCHAL 2020

Schéma de l'équilibre énergétique à la surface de la Terre. Par simplification, la réflexion du rayonnement solaire a été tracée au-dessus de l'atmosphère (en réalité elle a lieu à différentes altitudes dans l'atmosphère ainsi qu'au niveau de la surface terrestre). Données : GIEC (2007)

L'atmosphère naturelle, par sa présence, réchauffe fortement la surface de la Terre.

16

3) Les caractéristiques du climat global

Résumé :

La **température décroît** de l'Équateur aux Pôles.
 Les zones de **pluies** et de **sécheresse alternent** suivant les latitudes.

Le « **climat global** » est caractérisé par :

- une **température moyenne annuelle de 15°C**
- une quantité d'eau qui tombe **par an sur la surface de la planète** équivalente à **une lame d'eau d'1 mètre de hauteur**
- des **vents moyens ascendants**

Le flux d'énergie nécessaire pour maintenir le climat est de \approx **500 Watt par mètre carré**, multiplié par la surface de la Terre

Le Soleil est le **pourvoyeur d'énergie** sur notre planète.

Le flux solaire reçu sur Terre est de \approx **340 Watt/m^2**

L'atmosphère naturelle réchauffe la surface de la Terre.

17

3) Les caractéristiques du climat global

Références bibliographiques

IPCC (2007) Climate change 2007 : The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

MELIERES, M-A. & MARECHAL, C. (2020) Climats : passé, présent, futur. Belin Editeur / Humensis, Paris. 426 pp.



POSSNER, A., & CALDEIRA, K. (2017) Geophysical potential for wind energy over the open oceans, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, N°52, E1335

Climat #1

Le climat, c'est quoi ?

- 1) Le climat, un écrin pour la vie**
- 2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?**
- 3) Les caractéristiques du climat global**
- 4) L'effet de serre et l'équilibre climatique**
- 5) Les causes de l'évolution du climat**
- 6) L'évolution passée du climat**

Capsule 4

L'effet de serre et l'équilibre climatique

4) L'effet de serre et l'équilibre climatique

Objectifs :

Comprendre le mécanisme de l' « effet de serre »

Connaitre les principaux gaz à effet de serre naturels

Pouvoir décrire d'où viennent les flux d'énergie qui réchauffent la surface terrestre

Savoir que l'équilibre climatique provient d'un équilibre entre deux flux d'énergie à la surface de la Terre, et qu'il implique un climat stable

4) L'effet de serre et l'équilibre climatique

Qu'est-ce que l'effet de serre ?

Un « gaz à effet de serre » (« GES ») est un gaz qui **absorbe une partie du rayonnement infra-rouge émis par la surface de la Terre** et qui **réémet totalement ce rayonnement** d'une part **vers l'espace**, d'autre part **vers la surface terrestre**.

Ceci fait qu'une partie du rayonnement infra-rouge émis par la surface de la Terre, absorbé par l'atmosphère, est réémis vers la surface de la Terre, qui l'absorbe en retour.

C'est l' « effet de serre » qui **réchauffe la surface de la Terre**.

Quels sont les principaux gaz à effet de serre naturels ?

4) L'effet de serre et l'équilibre climatique

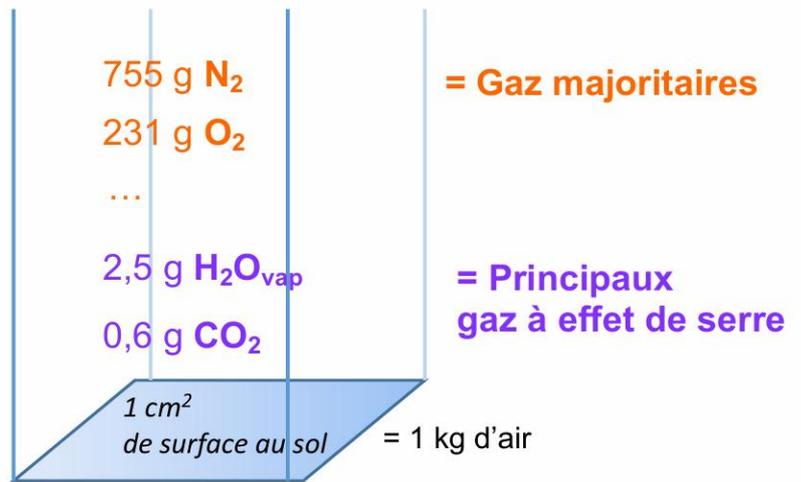
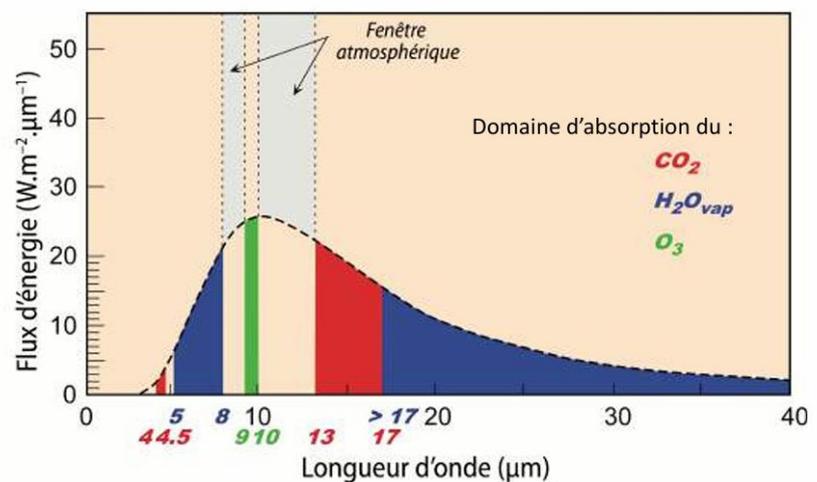


Schéma d'une colonne d'air reposant sur 1 cm² de surface terrestre avec les gaz majoritaires, azote et dioxygène (en orange), et les principaux gaz à effet de serre naturels, vapeur d'eau et gaz carbonique (en violet), et leur poids respectifs (en g). L'ensemble de tous les gaz dans cette colonne d'air pèse 1 kg.

Les principaux GES naturels sont la vapeur d'eau, H₂O_{vap}, et le gaz carbonique, CO₂

Leur quantité représente quelques millièmes de la masse de l'atmosphère :
≈ 3 g sur 1000 g d'air

4) L'effet de serre et l'équilibre climatique



SOURCE : MÉLIÈRES ET MARECHAL 2020

Rayonnement émis par la surface terrestre (surface sous les tirets) et qui est absorbé par l'atmosphère (bandes de couleur) dans un graphe présentant le flux d'énergie émis par la surface terrestre (W/m²/μm) en fonction de la longueur d'onde du rayonnement (en micron, μm).

L'ensemble des gaz à effet de serre absorbent presque entièrement le rayonnement émis par la surface terrestre, qui est dans le domaine de l'infrarouge, entre 3 et 100 microns (μm)

La vapeur d'eau est le premier gaz à effet de serre naturel (absorption majoritaire) le gaz carbonique, le second.

4) L'effet de serre et l'équilibre climatique

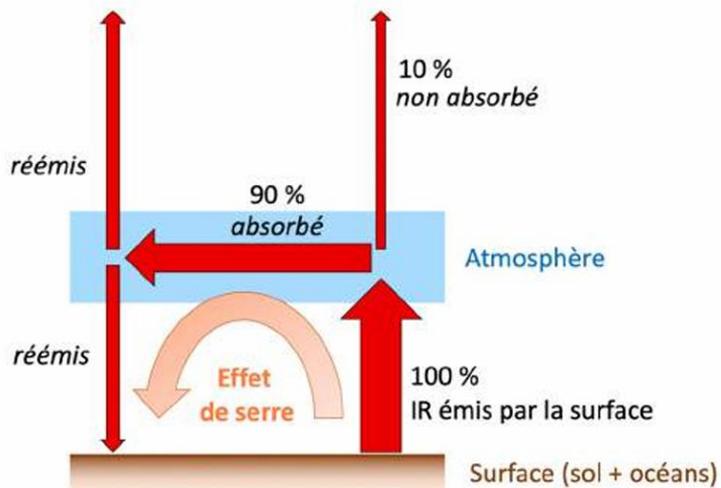


Schéma du mécanisme de l'effet de serre. Données : IPCC (2007)

Le rayonnement émis par la surface, presque entièrement absorbé par l'atmosphère, est réémis totalement d'une part vers l'espace, d'autre part vers la surface terrestre où il est intégralement absorbé, participant ainsi au **réchauffement de la surface**.

Plus la concentration d'un GES dans l'atmosphère augmente, plus l'ES est fort, et **plus la surface se réchauffe**.

5

4) L'effet de serre et l'équilibre climatique

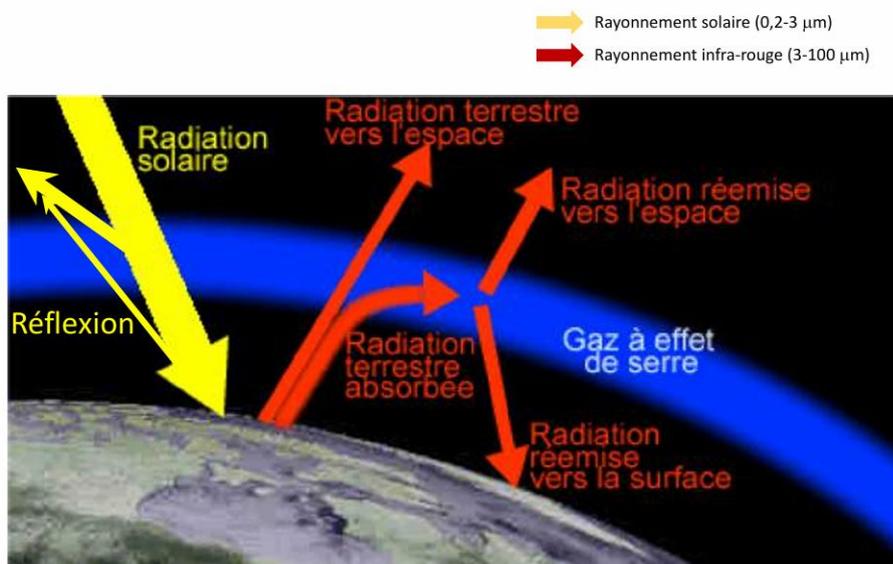
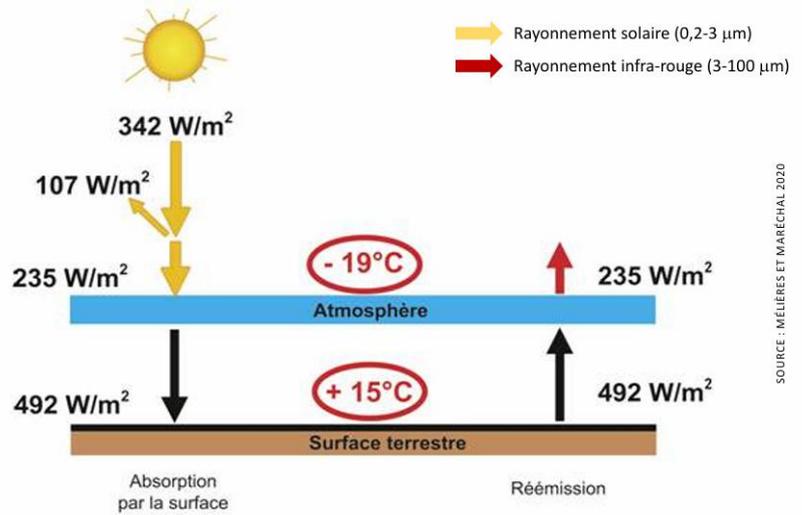


Schéma du rôle de l'effet de serre dans le bilan énergétique en surface terrestre, en limitant la représentation des flux d'énergie au rayonnement solaire et au rayonnement infra-rouge.

6

3) Les caractéristiques du climat global



SOURCE : MELIÈRES ET MARÉCHAL 2020

Schéma de l'équilibre énergétique à la surface de la Terre. Données : IPCC (2007)

Température de la planète, au sommet de l'atmosphère : $\approx -19^\circ\text{C}$

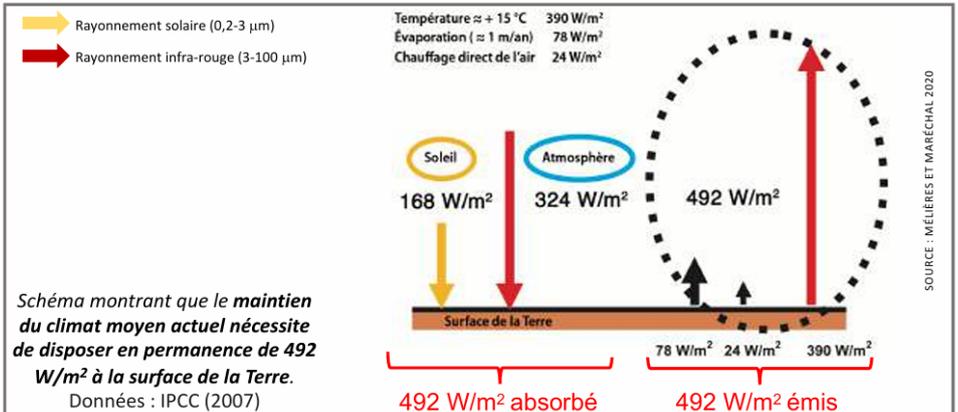
Température à la de surface de la Terre : $\approx +15^\circ\text{C}$

Au premier ordre, on peut considérer que **l'effet de serre naturel réchauffe la surface de notre planète d'une trentaine de degrés** : $\approx 2/3$ par l' $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$ $\approx 1/3$ par le CO_2

4) L'effet de serre et l'équilibre climatique

L'équilibre climatique

Le maintien du **climat moyen** nécessite de **disposer en permanence d'environ 500 W/m^2 à la surface de la Terre.**



SOURCE : MELIÈRES ET MARÉCHAL 2020

Schéma montrant que le **maintien du climat moyen actuel nécessite de disposer en permanence de 492 W/m^2 à la surface de la Terre.** Données : IPCC (2007)

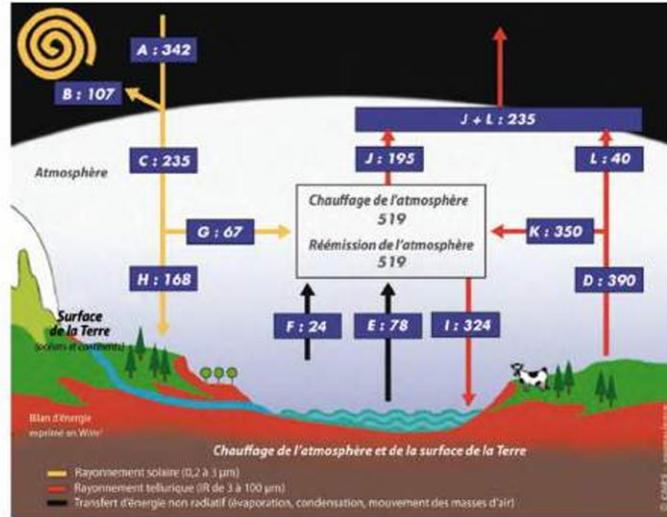
Deux sources alimentent ce flux : **le flux solaire**, 168 W/m^2 ,
et le flux rayonné par l'atmosphère, 324 W/m^2 , dans l'infrarouge.

Cette dernière valeur, proche du double du flux solaire, illustre **l'importance de l'effet de serre.**

L'égalité entre les **flux d'énergie absorbé et émis par la surface** définit **l'équilibre climatique** : le **climat est stable.**

Lorsque cet **équilibre est rompu**, le climat évolue.

4) L'effet de serre et l'équilibre climatique



SOURCE : MÉLIÈRES ET MARÉCHAL 2020

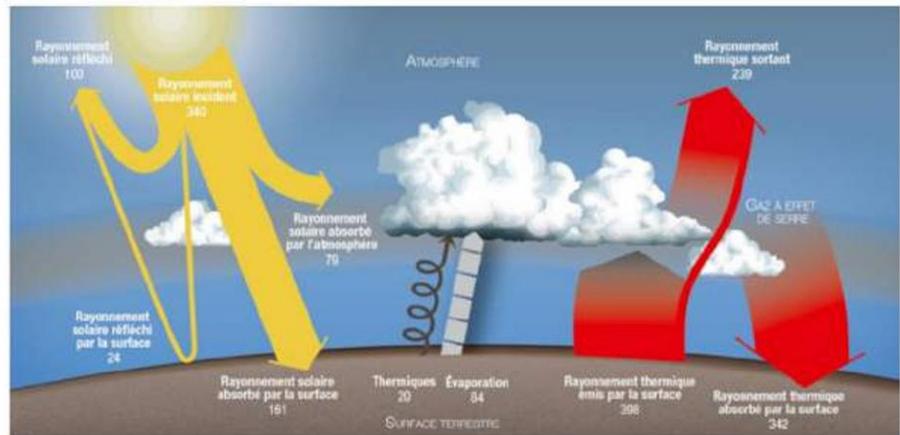
Bilan énergétique naturel sur Terre, à l'équilibre (valeurs en W/m^2). Données : IPCC (2007)

Voici une illustration complète de l'équilibre climatique.

Les rôles de l'évaporation (flèche noire de $78 W/m^2$), de la convection (flèche noire de $24 W/m^2$), et de l'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère (flèche jaune de $67 W/m^2$), sont ici également représentés.

4) L'effet de serre et l'équilibre climatique

- Rayonnement solaire (0,2-3 μm)
- Flux d'énergie lié à l'évaporation
- Rayonnement infra-rouge (3-100 μm)
- Flux d'énergie lié au chauffage des masses d'air par la surface



SOURCE : FRANCOU ET MÉLIÈRES 2021, ADAPTÉ DU GIEC 2014

Bilan énergétique naturel sur Terre, à l'équilibre (valeurs en W/m^2). Données : IPCC (2014)

4) L'effet de serre et l'équilibre climatique

Résumé :

L'effet de serre naturel résulte essentiellement de la présence de vapeur d'eau (H_2O_{vap}) et du gaz carbonique (CO_2) dans l'atmosphère.

L'effet de serre est dû à l'absorption par ces gaz du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre, suivi de sa réémission vers la surface terrestre.

Le climat sur Terre est déterminé par le flux d'énergie qui alimente la surface des continents et des océans.

- Lorsque ce flux d'énergie est égal au flux d'énergie perdu par la surface, le climat est stable : c'est l'équilibre climatique.
- Lorsque cet équilibre est rompu, le climat évolue.

4) L'effet de serre et l'équilibre climatique

Références bibliographiques

FRANCOU, B. & MÉLIÈRES, M-A. (2021) Coup de chaud sur les montagnes. Paulsen éditions/Guérin, Chamonix. 237 pp.

IPCC (2007) Climate change 2007 : The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC (2014) Climate change 2014 : The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

MELIERES, M-A. & MARECHAL, C. (2020) Climats : passé, présent, futur. Belin Editeur / Humensis, Paris. 426 pp.



Climat #1

Le climat, c'est quoi ?

- 1) Le climat, un écrin pour la vie
- 2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?
- 3) Les caractéristiques du climat global
- 4) L'effet de serre et l'équilibre climatique
- 5) Les causes de l'évolution du climat
- 6) L'évolution passée du climat

Capsule 5

Les causes de l'évolution du climat

5) Les causes de l'évolution du climat

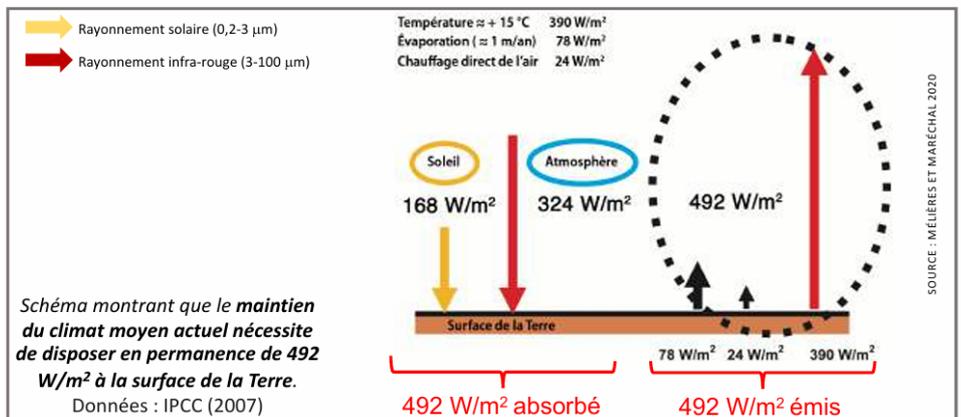
Objectifs :

Savoir classer de façon schématique l'ensemble des causes des changements climatiques

Etre capable d'estimer l'impact de ces causes sur la température globale à travers certains exemples

5) Les causes de l'évolution du climat

La rupture de l'équilibre climatique



Equilibre climatique : flux d'énergie absorbé = flux d'énergie émis par la surface
 Le climat est stable.

La **modification du flux d'énergie absorbé** par la surface terrestre entraîne un **changement de flux d'énergie disponible pour maintenir le climat** (soit plus de flux d'énergie, soit moins), et donc un **changement climatique**.

Cette modification découle de ce qu'on appelle un « **forçage radiatif** » lorsque l'origine de la perturbation est extérieure au système climatique.

5) Les causes de l'évolution du climat

Le changement climatique peut être **amplifié** ou **atténué** par les « **rétroactions** » du climat (« **positives** » ou « **négatives** », respectivement).

Ces « **rétroactions positives** » sont principalement liées à des variations d'**albédo** ou de teneur en gaz à **effet de serre** dans l'atmosphère.

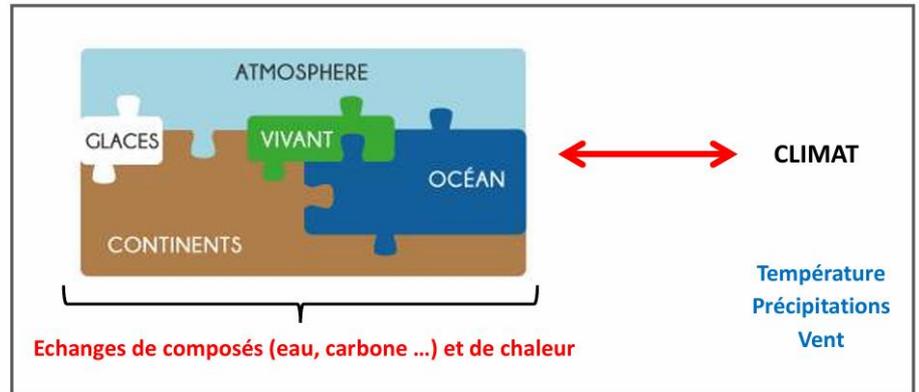


Schéma des liens entre le climat et les compartiments superficiels de la Terre.

5) Les causes de l'évolution du climat

Différentes origines, différents impacts

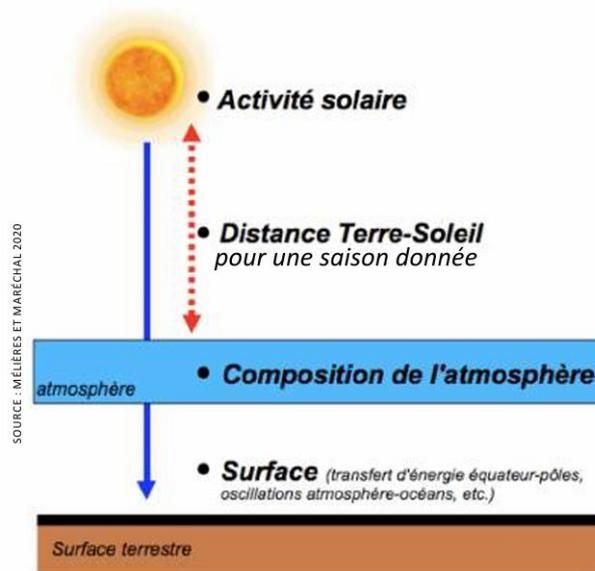
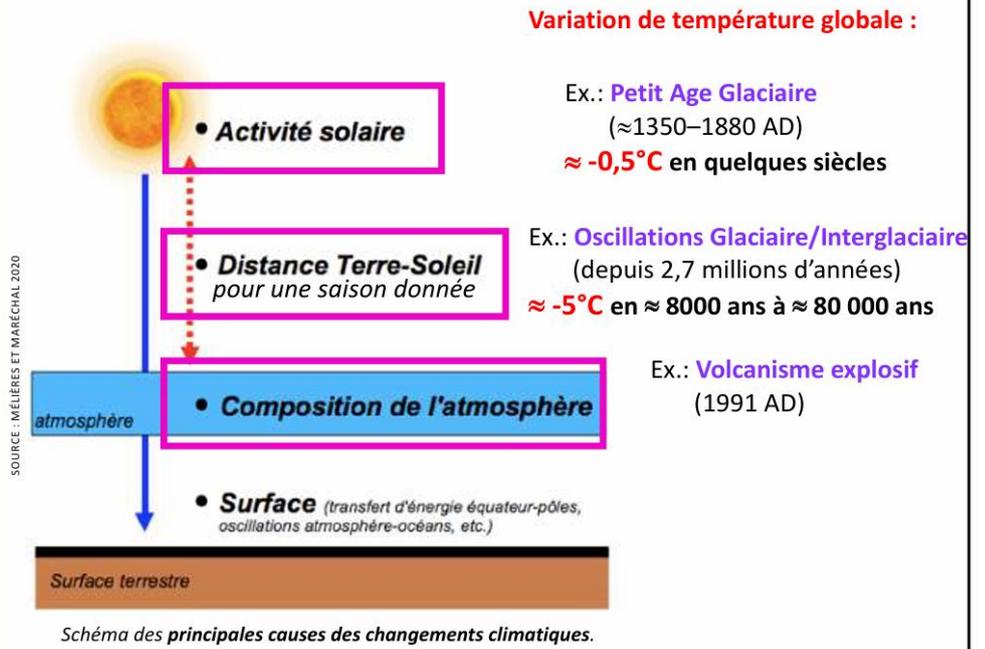
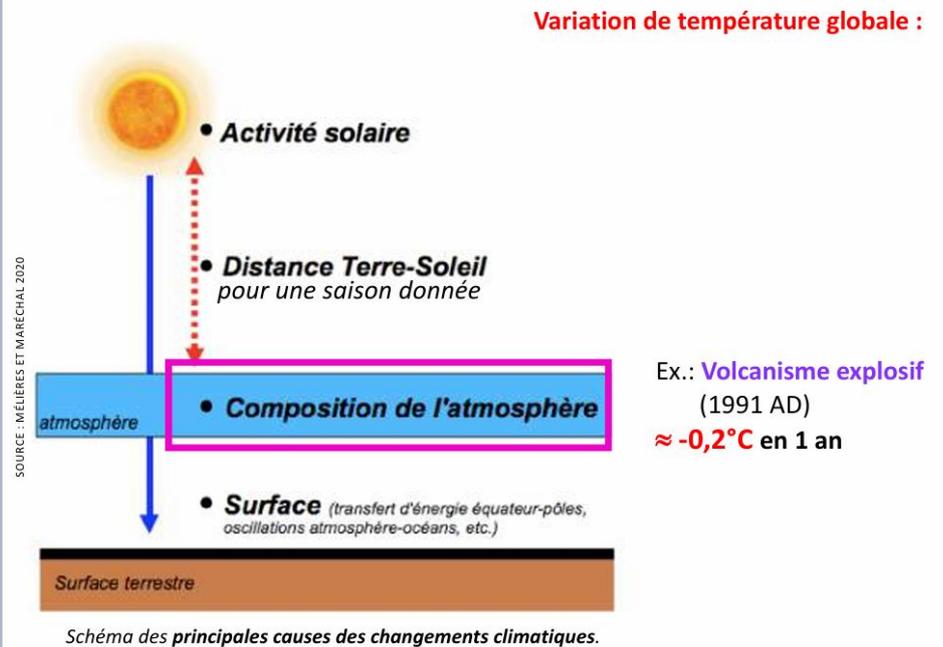


Schéma des principales causes des changements climatiques.

5) Les causes de l'évolution du climat



5) Les causes de l'évolution du climat



5) Les causes de l'évolution du climat

Variation de température globale :

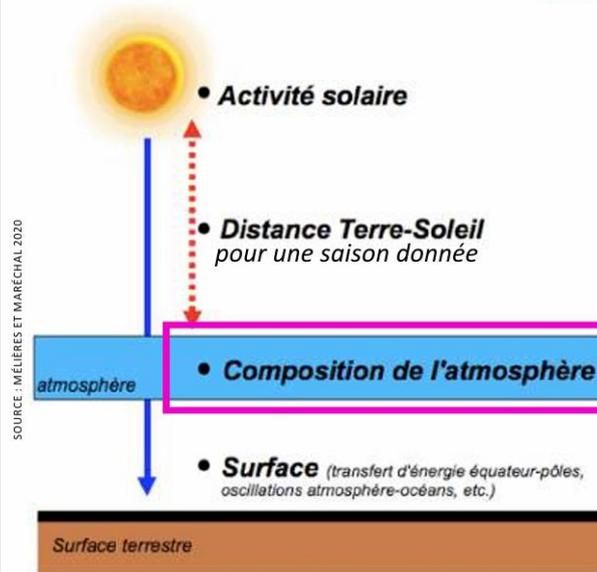


Schéma des principales causes des changements climatiques.

Ex.: **Effet de serre**
(activités humaines)
(1850–2020 AD)
≈ 1°C en 2 siècles

5) Les causes de l'évolution du climat

Variation de température globale :

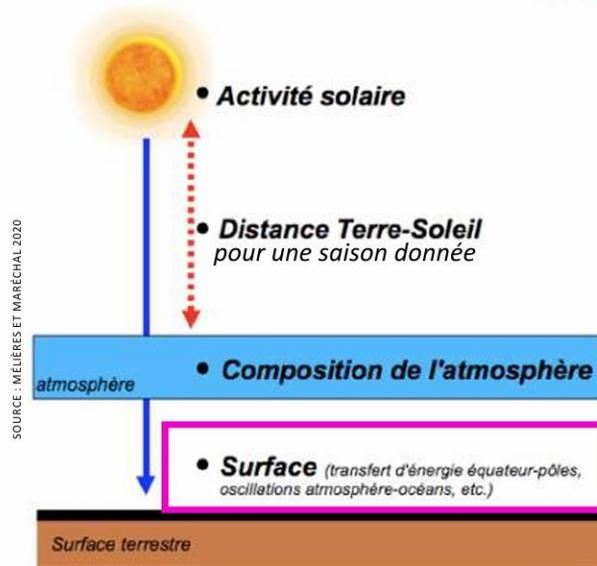
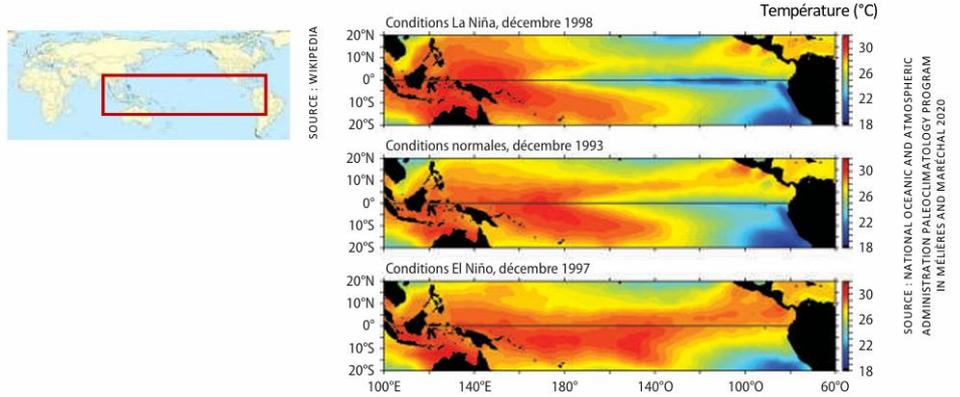


Schéma des principales causes des changements climatiques.

Ex.: **El Niño**
(2015–2016 AD)

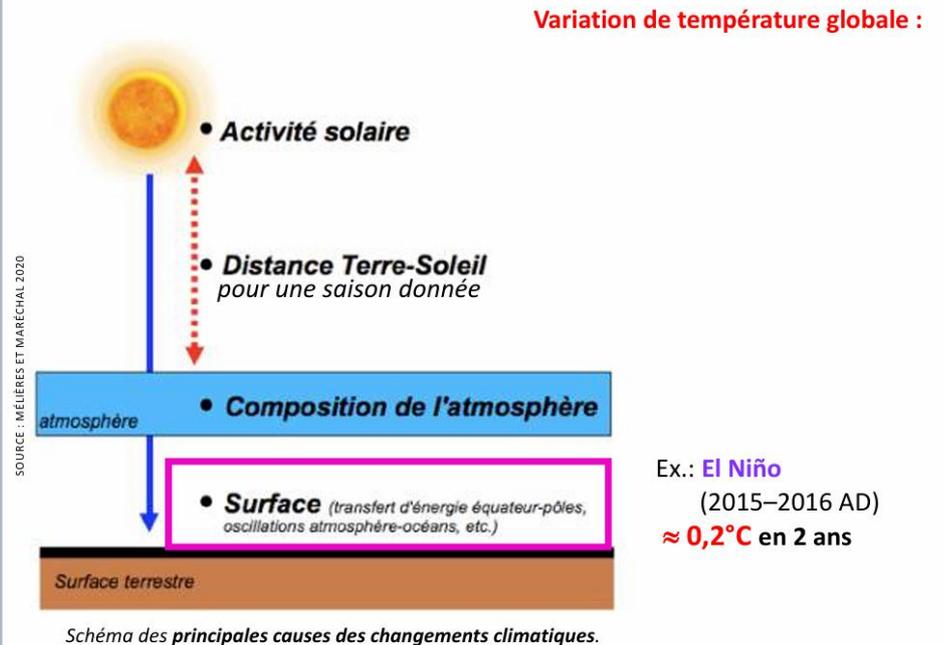
5) Les causes de l'évolution du climat



Température (°C) des eaux du surface du Pacifique entre la situation normale de 1993 (centre), l'épisode du El Niño en Décembre 1997 (bas), et celui de La Niña en Décembre 1998 (haut).

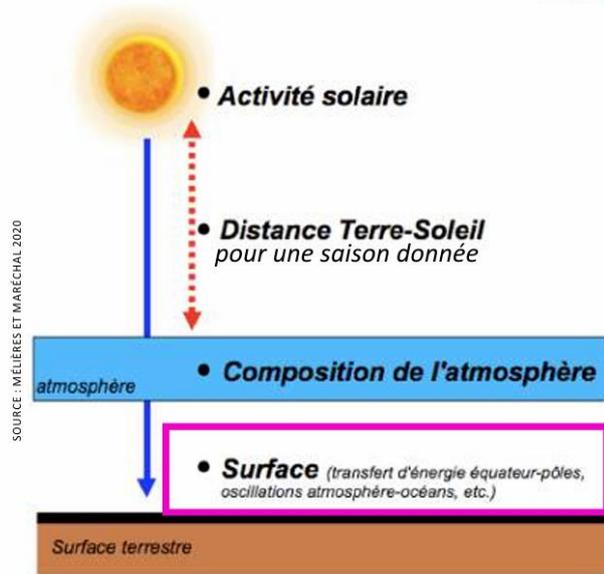
Lors d'un épisode El Niño, l'océan Pacifique tropical se réchauffe, ce qui se répercute sur la température globale terrestre.

5) Les causes de l'évolution du climat



5) Les causes de l'évolution du climat

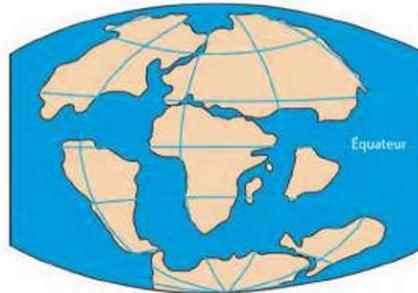
Variation de température globale :



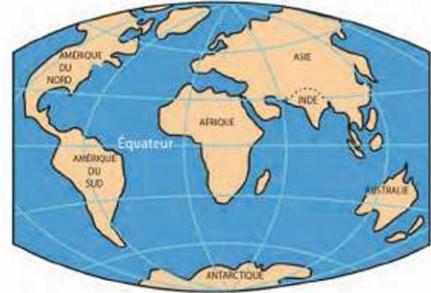
Ex.: Collision Inde/Asie
Isolement de l'Antarctique
(des 10^{aines} de millions d'années)

Schéma des principales causes des changements climatiques.

65 millions d'années



Actuel



SOURCE : DEPARTMENT OF THE INTERIOR / USGS IN MELLÈRES ET MARÉCHAL 2020

Evolution de la position des continents entre 65 millions d'années et l'époque actuelle.

La tectonique des plaques, qui entraîne la **dérive des continents**, a fortement **modifié les transferts de chaleur entre l'Équateur et les régions polaires** (suite à la surrection de l'Himalaya et l'isolement de l'Antarctique, essentiellement).

Ces modifications ont **perturbé le bilan énergétique de la Terre** et **changé le climat de la planète sur le long terme**.

5) Les causes de l'évolution du climat

Variation de température globale :

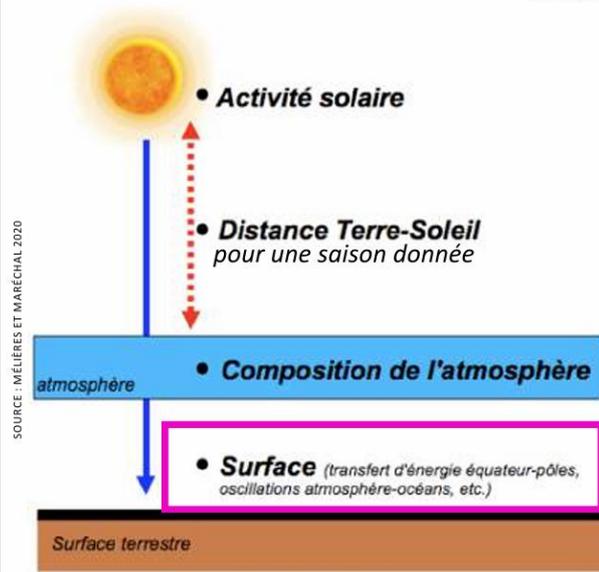


Schéma des principales causes des changements climatiques.

Ex.: Collision Inde/Asie
Isolement de l'Antarctique
(des 10^{aines} de millions d'années)
≈ -10^{aine} °C en plusieurs
dizaines de millions
d'années

5) Les causes de l'évolution du climat

Synthèse

Variation de température globale (°C)				
Sur les dizaines de millions d'années	Sur plusieurs milliers d'années aux dizaines de milliers d'années	Sur quelques milliers d'années	Sur les siècles	Sur les dizaines d'années, les années
Dérive continentale : ≈ -10 ^{aine} °C	Oscillations glaciaire / interglac. : ≈ 5°C	Interglaciaire actuel : ≈ 1°C	Petit Age Glaciaire : ≈ -0,5°C	Volcanisme explosif : ≈ -0,2°C
			Activités humaines (1850-2020) : ≈ 1°C	El Niño : ≈ 0,2°C
				Cycles solaires de 11 ans : < 0,1°C

Tableau synthétique des variations de la température globale (ordre de grandeur) pour différentes périodes de temps, relatives à différentes causes (naturelles et anthropique).

2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?

Résumé :

La **modification de l'équilibre énergétique** entraîne une **évolution du climat**.

Cette modification découle d'un « **forçage radiatif** », et son effet peut être **amplifié ou atténué** par les **rétroactions du climat**.

Diverses causes entraînent des changements climatiques qui diffèrent par leur intensité et par leur rapidité.

Le changement climatiques lié :

- au **volcanisme explosif**, produit des variations de température globale de $\approx -0,2^{\circ}\text{C}$ sur 2 ans,
- aux fluctuations atmosphère-océan (**El Nino**), de $\approx 0,2^{\circ}\text{C}$ sur 2 ans,
- à l'**activité solaire**, de $\approx -0,5^{\circ}\text{C}$ sur quelques siècles,
- à l'**activité humaine**, de $\approx 1^{\circ}\text{C}$ sur 2 siècles (**jusqu'à présent ...**),
- à la **distance Terre-Soleil** pour une saison donnée, de $\approx 5^{\circ}\text{C}$ en 8000 à 80 000 ans,
- à la **dérive continentale**, d'une $\approx 10^{\text{aine}}^{\circ}\text{C}$ sur plusieurs dizaines de millions d'années.

16

3) Les caractéristiques du climat global

Référence bibliographique

MELIERES, M-A. & MARECHAL, C. (2020) Climats : passé, présent, futur. Belin Editeur / Humensis, Paris. 426 pp.



17

Climat #1

Le climat, c'est quoi ?

- 1) Le climat, un écrin pour la vie
- 2) Quand on parle du climat, on s'intéresse à quoi ?
- 3) Les caractéristiques du climat global
- 4) L'effet de serre et l'équilibre climatique
- 5) Les causes de l'évolution du climat
- 6) L'évolution passée du climat

Capsule 6

L'évolution passée du climat

6) L'évolution passée du climat

Objectifs :

Avoir des connaissances sur les climats passés pour estimer l'importance de l'évolution climatique actuelle et future

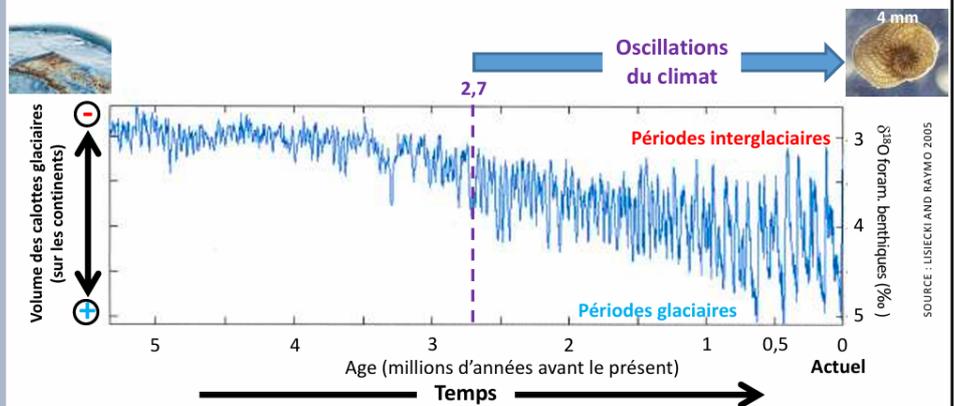
Brosser le tableau des grands climats passés sur trois périodes différentes

Mémoriser l'évolution des températures globales (amplitude) et les intervalles de temps associés à ces évolutions (rapidité)

Connaître la/les causes de ces grands changements climatiques passés

6) L'évolution passée du climat

Les cycles glaciaire/interglaciaire des derniers millions d'années



Evolution du $\delta^{18}O$ dans les carbonates des « coquilles » de zooplancton (foraminifères benthiques) sur les 5 derniers millions d'années. Cette courbe provient de 57 sites océaniques répartis dans les différents océans du globe.

Une alternance de périodes glaciaire/interglaciaire s'est établie il y a 2,7 Ma, au cœur d'une ère glaciaire qui a débuté il y a ≈ 34 millions d'années (avec l'englacement de l'Antarctique).

Une **cinquantaine d'oscillations** se sont succédées.

Nous sommes **depuis $\approx 12\ 000$ ans** dans une **période interglaciaire**.

La **dernière période glaciaire** a culminé il y a $\approx 20\ 000$ ans.

6) L'évolution passée du climat

Mais à quoi ressemblent les périodes glaciaires ?

Il y a $\approx 20\,000$ ans
Période glaciaire (maximum)



Actuel, et depuis $\approx 12\,000$ ans
Période interglaciaire



SOURCE : JOUSSAUME 1993

Extension des calottes glaciaires et de la banquise au Dernier Maximum Glaciaire (à gauche) et actuellement (à droite).

Deux immenses calottes de glace recouvrent les continents de l'hémisphère nord (Amérique du nord et Eurasie) en période glaciaire, et disparaissent en période interglaciaire.

Dans l'hémisphère sud, la calotte glaciaire antarctique grossit légèrement en période glaciaire.

6) L'évolution passée du climat

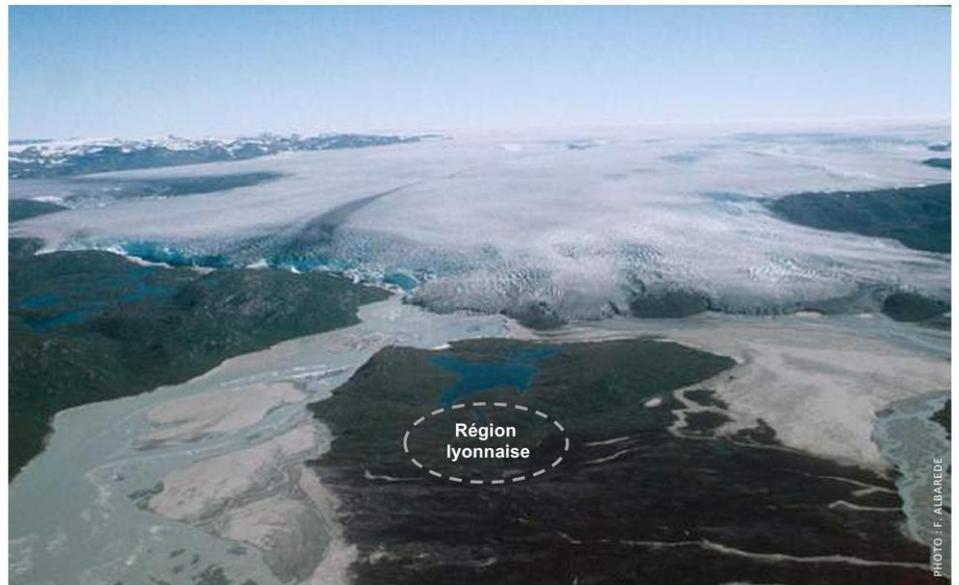
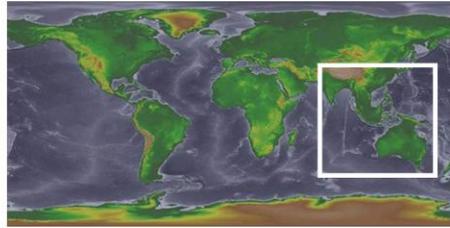


PHOTO : F. ALBAREDE

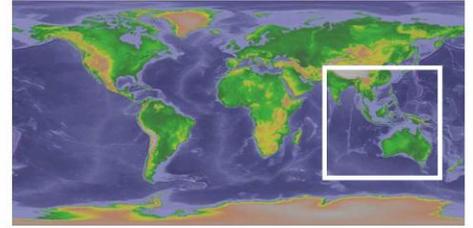
Ce à quoi pouvait ressembler la région de Lyon au cours de la période glaciaire d'il y a $\approx 130\,000$ ans (un peu plus froide que la dernière période glaciaire il y a $\approx 20\,000$ ans), d'après une vue aérienne du bord occidental de la calotte glaciaire du Groenland.

Le niveau marin baisse de ≈ 130 m.

Il y a $\approx 20\,000$ ans
 Période glaciaire (maximum)

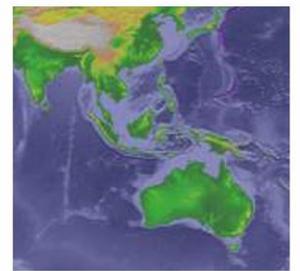
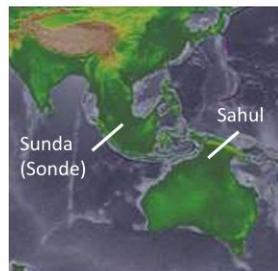


Actuel, depuis $\approx 12\,000$ ans
 Période interglaciaire



Représentation des surfaces continentales sur Terre (sans les calottes glaciaires) au Dernier Maximum Glaciaire et à l'actuel.

Le tracé des côtes n'est pas le même pour beaucoup de régions.



Agrandissement de la figure précédente sur la zone de l'Asie du sud-est et de l'Australie.

5

Le peuplement végétal et animal aux moyennes latitudes est totalement différent.

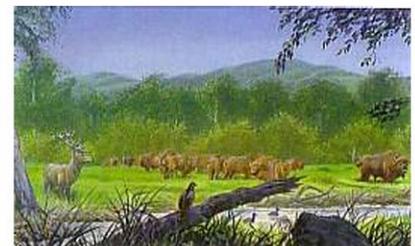
Il y a $\approx 20\,000$ ans
 Période glaciaire (maximum)



Actuel, depuis $\approx 12\,000$ ans
 Période interglaciaire



Répartition des différents biomes (types de végétation) en Europe au Dernier Maximum Glaciaire et à l'actuel.

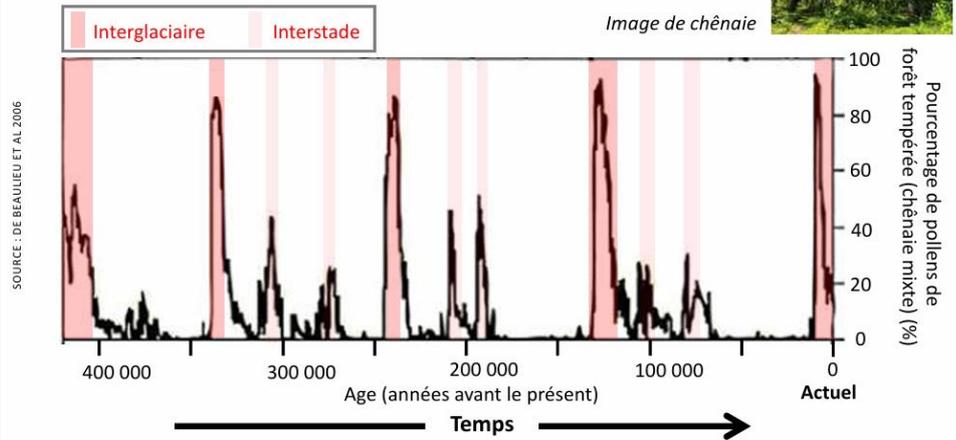


Vues d'artiste des paysages en Europe au Dernier Maximum Glaciaire (à gauche) et à l'actuel (à droite).

6

6) L'évolution passée du climat

La flore et la faune se sont adaptées à ces aller-retours du climat ...
(par exemple par migration)
ou bien les populations ont disparues



Courbe des pourcentages polliniques d'espèces d'arbre de la chênaie mixte (chêne, noisetier, charme ...) dans le Velay (Massif Central, France).

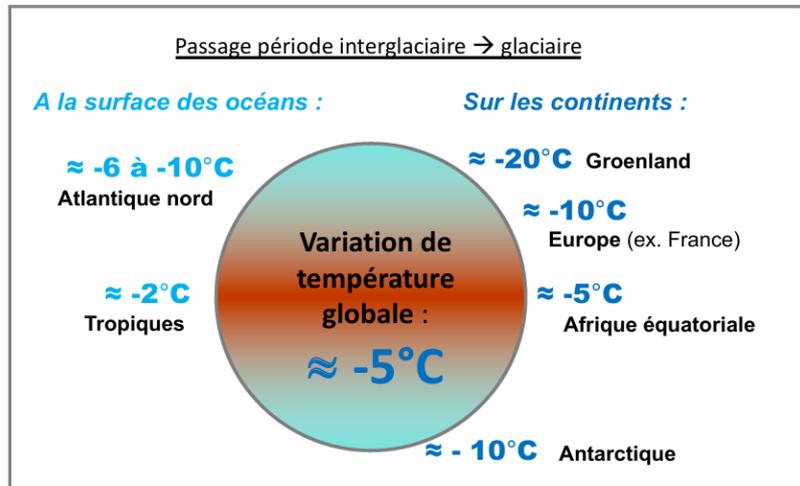
Qu'en est-il si ce « méta-équilibre » est rompu, par exemple par la mise en place brutale d'un climat très chaud à partir d'une période interglaciaire (réchauffement climatique anthropique) ?



7

6) L'évolution passée du climat

Sur les dernières centaines de milliers d'années, la **température globale** sur Terre varie de $\approx -5^\circ\text{C}$ entre une période interglaciaire et une période glaciaire.



Variations de température moyenne (1) globale et (2) en fonction des latitudes, sur les continents (à droite) et à la surface des océans (à gauche) lors du passage d'une période interglaciaire à une période glaciaire.

Le refroidissement :

- s'amplifie plus on se rapproche des pôles
- est plus marqué sur les continents que sur les océans

En période glaciaire, la température globale est de $\approx 10^\circ\text{C}$, en période interglaciaire, de $\approx 15^\circ\text{C}$.

8

6) L'évolution passée du climat

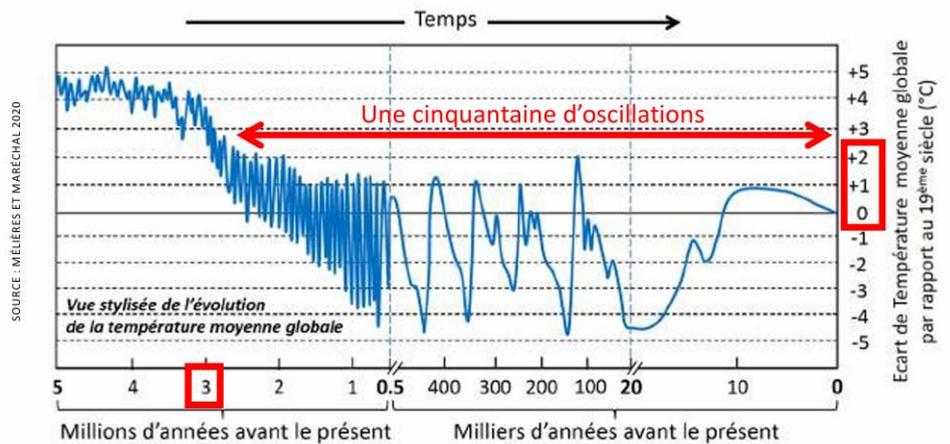


Schéma simplifié de l'évolution de l'anomalie de température globale depuis 5 millions d'années jusqu'à l'époque préindustrielle. Attention l'échelle de temps n'est pas linéaire entre les époques de 5 millions d'années à 500 000 ans (à gauche), de 500 000 ans à 20 000 ans (au milieu), et de 20 000 ans à l'actuel (à droite). L'incertitude est de ± 1 °C de 5 millions à 10 000 ans, et de $\pm 0,5$ °C de 10 000 ans à l'actuel.

Y a-t-il eu des interglaciaires plus chauds que l'interglaciaire actuel ?

... pas plus de $\approx +2$ °C par rapport à l'interglaciaire actuel, depuis plus de 2 millions d'années.

6) L'évolution passée du climat

Quelle est l'origine des oscillations glaciaires / interglaciaires ?

Depuis ≈ 50 millions d'années, la Terre se refroidit progressivement ...

Dans ce contexte, depuis ≈ 3 millions d'années, les continents de l'hémisphère nord s'englacent, et ce de façon périodique.

La périodicité des oscillations glaciaire/interglaciaire correspond à celles des **paramètres astronomiques de la Terre** qui contrôlent la **position de notre planète en été par rapport au Soleil**.

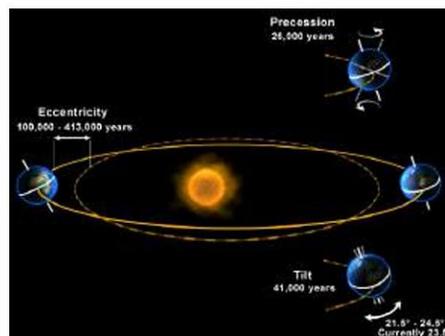


Schéma des paramètres astronomiques de la Terre (précession, inclinaison, excentricité).

L'effet de **ces paramètres** fait basculer la Terre en période glaciaire ou en période interglaciaire.

Combien de temps notre interglaciaire va-t-il durer ?

En modélisant les paramètres astronomiques, on sait que la **prochaine période glaciaire** aura lieu **dans ... 50 000 ans environ**.

En résumé ...

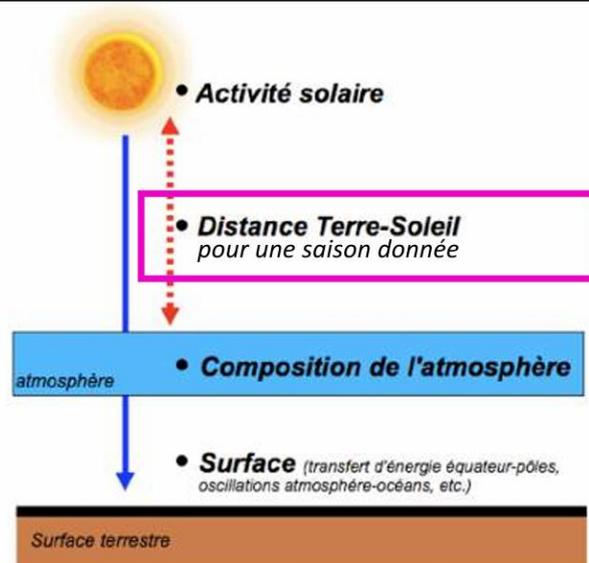


Schéma des principales causes des changements climatiques.

Le moteur du changement climatique des **oscillations glaciaire/interglaciaire** est :
la **distance Terre-Soleil**
dont l'effet est amplifié par les **rétroactions positives** du climat (albédo, gaz à effet de serre)

$\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$ en ≈ 8000 ans à $\approx 80\,000$ ans

11

La période interglaciaire actuelle depuis 12 000 ans, « l'Holocène »

Nous sommes depuis $\approx 12\,000$ ans en période interglaciaire.

Le **climat chaud et humide** de la première moitié de cette période a laissé place, il y a ≈ 5000 ans, à un **climat plus frais et plus sec sur Terre**

Lors de cette première période, le Sahara s'est verdi : c'est l'épisode du « Sahara vert ».

Il y a $\approx 10\,000$ à ≈ 5000 ans



Depuis ≈ 5000 ans

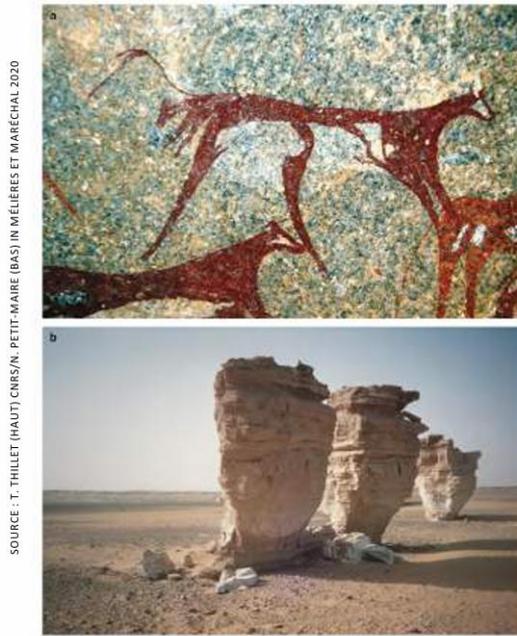


Reconstitution de la phase « Humide de l'Holocène » en Afrique du nord, ou « Sahara vert » (à gauche) et vue satellite du Sahara actuellement, et depuis plusieurs milliers d'années (à droite).

12

6) L'évolution passée du climat

Des vestiges de l'époque du « Sahara vert » ...



SOURCE : T. THILLET (HAUT) / CNRS/IN. PETIT-MAIRE (BAS) IN MÉLIÈRES ET MARECHAL 2020

Peintures rupestres dans le Djebel Aweinat (sud-est de la Libye), une région actuellement désertique, indiquant une occupation pastorale néolithique lors de la phase humide de l'Holocène.

Sédiments érodés au nord du Mali, dans une région actuellement désertique, indiquant l'existence de dépôts lacustres lors de la phase humide de la première moitié de l'Holocène.

6) L'évolution passée du climat

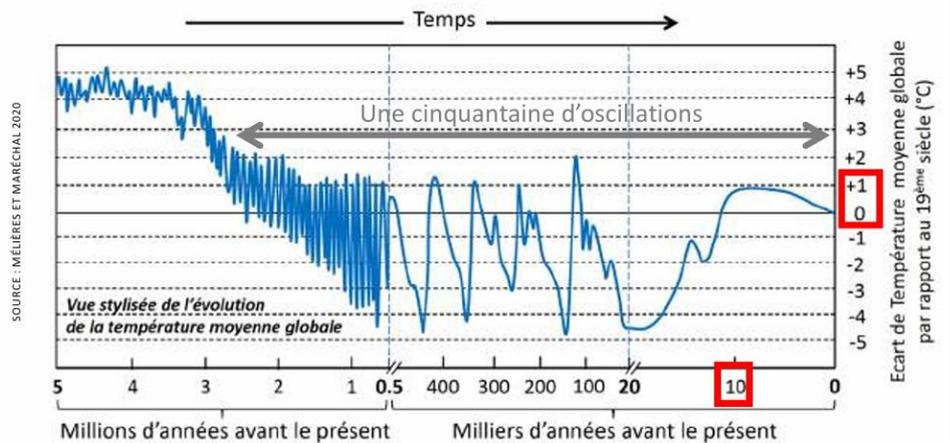


Schéma simplifié de l'évolution de l'anomalie de température globale depuis 5 millions d'années jusqu'à l'époque préindustrielle. Attention l'échelle de temps n'est pas linéaire entre les époques de 5 millions d'années à 500 000 ans (à gauche), de 500 000 ans à 20 000 ans (au milieu), et de 20 000 ans à l'actuel (à droite). L'incertitude est de $\pm 1^\circ\text{C}$ de 5 millions à 10 000 ans, et de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ de 10 000 ans à l'actuel.

Au cours de l'interglaciaire actuel, le climat global s'est lentement refroidit de presque $\approx 1^\circ\text{C}$.

Quelle est en la cause ?

Cela a été imposé par les paramètres astronomiques de la Terre (= le « balancier climatique »).

En résumé ...

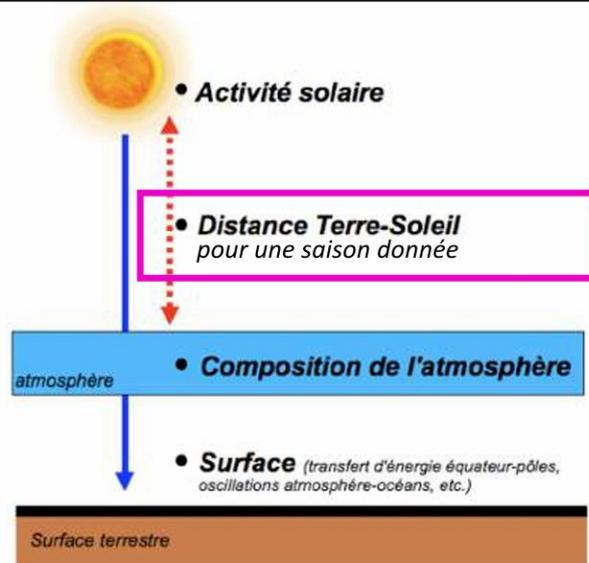


Schéma des principales causes des changements climatiques.

Le moteur du changement climatique depuis 12 000 ans (au cours de la période interglaciaire actuelle) est :
la distance Terre-Soleil

$\Delta T \approx 1^\circ\text{C}$ en quelques milliers d'années

15

Les « coups de chaud et de froid » des derniers milliers d'années

Des époques un peu plus froides (« néoglaciations ») ou un peu plus chaudes (« optimums ») ont ponctué les derniers millénaires, marquées par des avancées ou des reculs des glaciers.



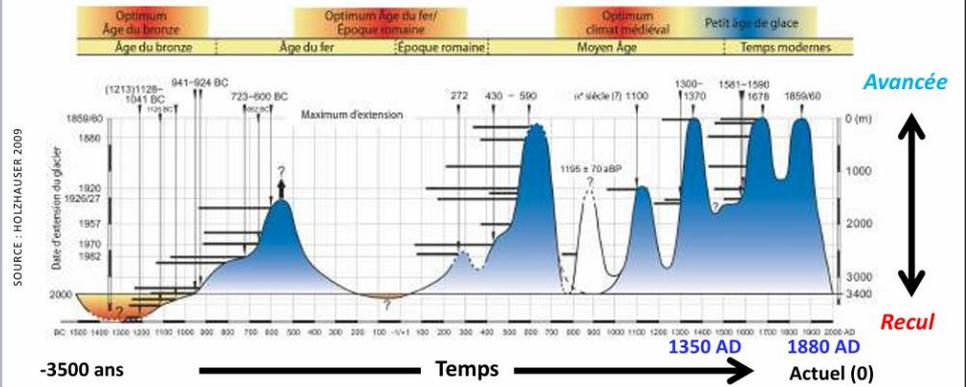
SOURCE : FRANCOU ET VINCENT 2007



PHOTO : F. MARTENS, ARCHIVES H.J. ZUMBHÜL

Massif de l'Oberland bernois, dans les Alpes suisses, avec le glacier d'Aletsch, au centre, qui se distingue par sa longue taille (24 km) (à gauche). Le glacier d'Aletsch en 1858 (à droite).

16



Reconstitution de la longueur du glacier d'Aletsch (Suisse) et donc de ses avancées et reculs, depuis 3500 ans.

Epoques un peu plus chaudes : optimum romain il y a \approx 2000 ans
 optimum du Moyen-Age il y a \approx 1000 ans
 ...

Epoques un peu plus froides : « Petit Age Glaciaire » sur les derniers siècles, \approx 1350-1880 AD (le plus fort « coup de froid »)
 ...



Pieter Brueghel (dit l'ancien), 1565
 « Paysage d'hiver avec patineurs »

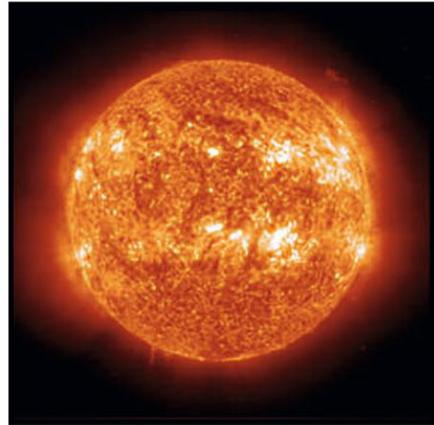
La Tamise gelée à Londres en 1677



Entre l'optimum médiéval et le « Petit Age Glaciaire », le climat global s'est refroidi de \approx 0,5°C en moyenne.

6) L'évolution passée du climat

Quelle est en la cause ?



SOURCE : NASA

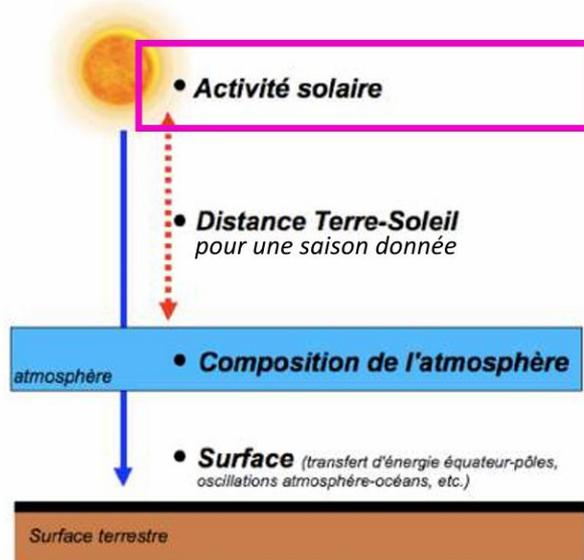
Taches solaires 29/04/2000, en émission UV.

Principalement, les **fluctuations de l'activité solaire**

= moins l'activité est forte, moins de rayonnement solaire est reçu sur Terre, et plus il fait froid

6) L'évolution passée du climat

En résumé ...



SOURCE : MÈLIÈRES ET MARECHAL 2020

Schéma des **principales causes des changements climatiques**.

Le moteur principal des fluctuations climatiques des derniers millénaires (« optimums » et « néoglaciations ») est :
l'**activité du Soleil**

$\Delta T \approx 0,5^\circ\text{C}$ en quelques siècles

3) Les caractéristiques du climat global

Résumé :

La Terre connaît des **cycles glaciaire/interglaciaire** depuis ≈ 3 millions d'années, avec des variations de température globale de $\approx 5^\circ\text{C}$ en ≈ 8000 ans (au plus court).

Ces variations ont eu lieu entre un **climat comparable au nôtre** ($\approx 15^\circ\text{C}$) et un **climat glaciaire** ($\approx 10^\circ\text{C}$).

En climat **glaciaire**, d'**immenses calottes** recouvrent les continents de l'hémisphère nord et le **niveau marin est ≈ 130 m plus bas**.

Les **écosystèmes terrestres** se sont adaptés à ces alternances dont les **transitions** prennent **plusieurs milliers d'années** (de ≈ 8000 à $\approx 80\,000$ ans).

Au cours de la période interglaciaire actuelle, **depuis 12 000 ans, la température globale a diminué de presque 1°C** .

Entre l'optimum médiéval (≈ 1000 AD) et le Petit Age Glaciaire (1350-1880 AD), la température globale a chuté de $\approx 0,5^\circ\text{C}$.

21

3) Les caractéristiques du climat global

Références bibliographiques

DE BEAULIEU, J.-L., ANDRIEU-PONEL, V., CHEDDADI, R., GUIER, F., RAVAZZI, C., REILLE, M. & ROSSI, S. (2006) Apport des longues séquences lacustres à la connaissance des variations des climats et des paysages pléistocènes, *C. R. Palevol* 5, 65–72

FRANCOU, B. & VINCENT, C. (2007) Les glaciers à l'épreuve du climat. IRD Editions et Belin, Paris. 274 pp.

HOLZHAUSER, H., MAGNY, M. & ZUMBÜHL, H. (2009) Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years, *The Holocene*, 15, 6, 789-801.

JOUSSAUME, S. (1993) Climat d'hier à demain. CNRS Editeur, Paris. 144 pp.

LISIECKI, L. & RAYMO, M. (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records, *Paleoceanography*, 20.

MELIERES, M-A. & MARECHAL, C. (2020) Climats : passé, présent, futur. Belin Editeur / Humensis, Paris. 426 pp.

VAUCHER J.

<http://www.iro.umontreal.ca/~vaucher/History/Evolution/Climate/Green.html>

