



Physique pour tous

2023-2024

Cours 4:

Physique du climat 1

*Modèles du climat et
réchauffement climatique*

Baptiste Coquinot



Objectif fondamental:

Comprendre comment fonctionne le climat et comment l'humanité le modifie.

Contexte de développement:

19ème: explication de l'effet de serre et découverte des âges glaciaires.

Première moitié du 20ème: modèle moderne du climat et découverte du réchauffement climatique.

1941: Hermann Foch pointe les effets anthropiques.

Seconde moitié du 20ème: simulations numériques du climat, consensus scientifique et alerte.

1988: création du GIEC (IPCC en anglais).

Plan du cours:

1. Météo vs. climat
2. Effet de l'astronomie sur le climat
3. Modèle du climat et effet de serre
4. Les gaz à effet de serre
5. Le réchauffement climatique
6. Détail des émissions carbone



Première partie:

Météo vs. climat

Météo et climat

Météorologie

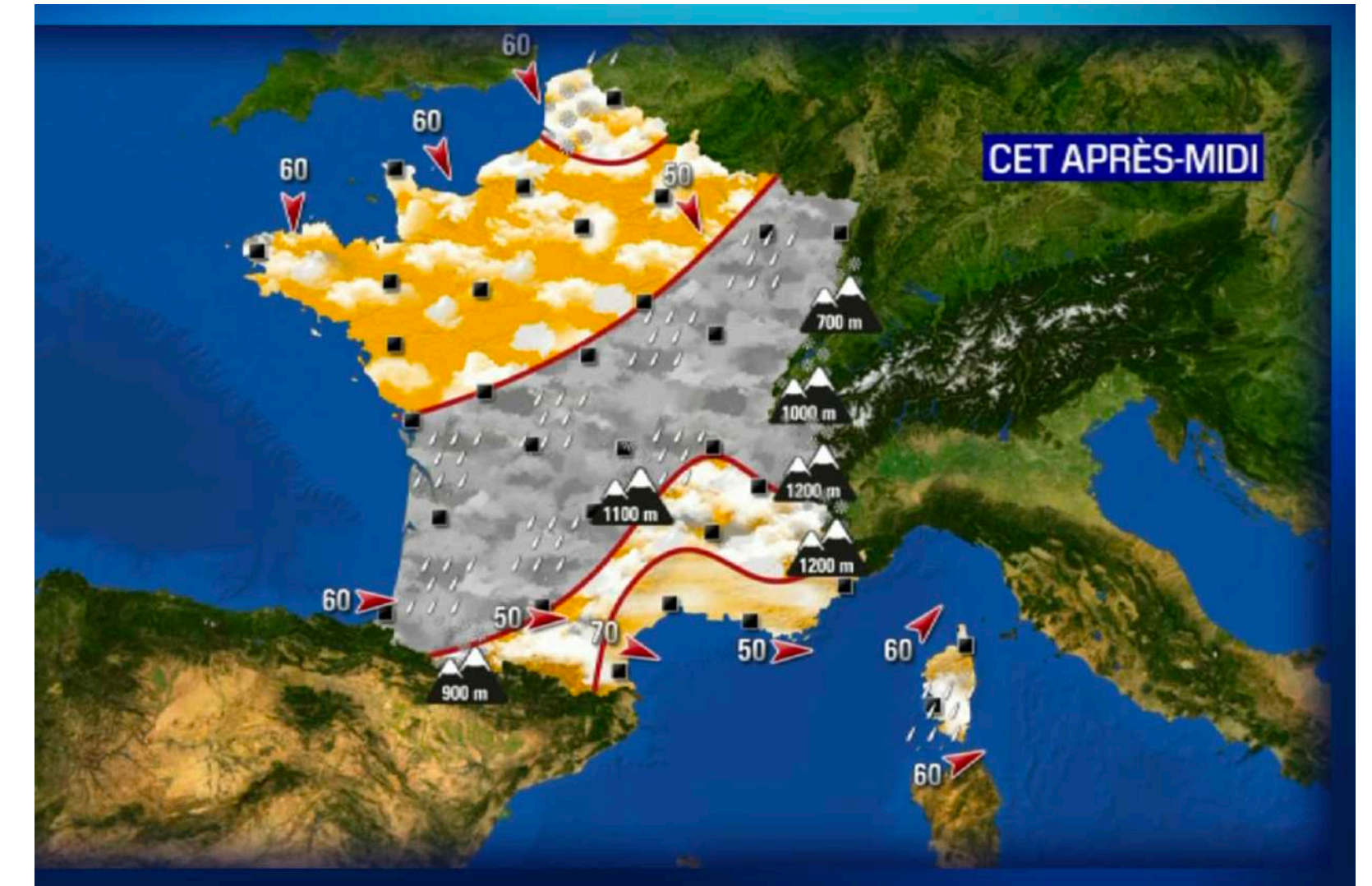
Définition: Evolution de la température sur une courte durée. La durée typique est la journée.

Physique: C'est de la mécanique des fluides qui décrit la dynamique de l'atmosphère (vent, nuages, température) en interaction avec les sols et mers. L'effet principal est le cycle jour-nuit qui distribue la chaleur du Soleil de façon non-uniforme dans le temps et dans l'espace, en particulier le fait que les régions équatoriales soient plus chauffées que les régions polaires.

Climatologie:

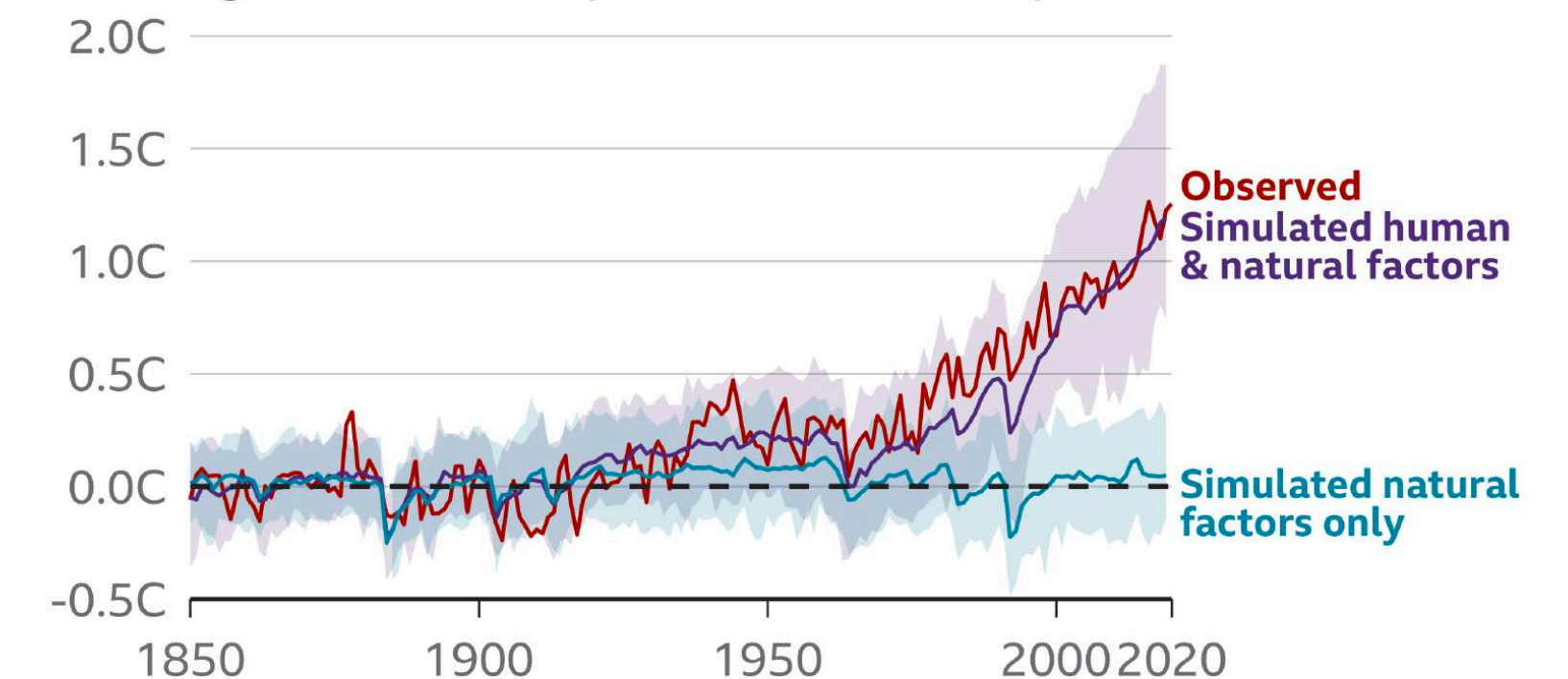
Définition: Evolution de la température moyenne sur une longue durée. La durée typique est l'année (un cycle complet c'est 30 ans).

Physique: C'est de la thermodynamique, qui se base sur les échanges moyens de chaleur entre le Soleil, les sols, les mers et l'atmosphère. Le cycle jour-nuit et ses conséquences sont moyennées et les effets astronomiques (mouvement de la Terre) sont déterminants.



Human influence has warmed the climate

Change in average global temperature relative to 1850-1900, showing observed temperatures and computer simulations



Note: Shaded areas show possible range for simulated scenarios

Source: IPCC, 2021: Summary for Policymakers

La météo est chaotique...

Problématique: Pourquoi la météo sur plusieurs jours n'est pas fiables?

Systeme dynamique chaotique

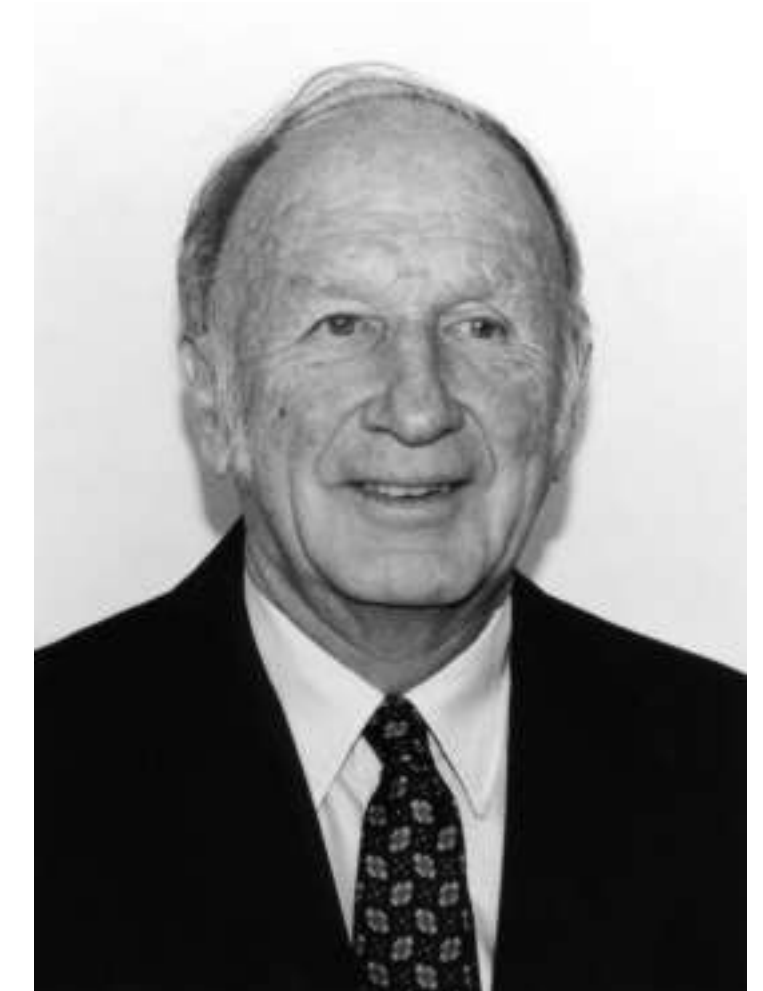
Définition: un système dynamique est dit chaotique s'il est déterministe mais que deux conditions initiales proches s'éloignent très rapidement (exponentiellement).

Conséquence: une faible incertitude sur la condition initiale mène à une grande incertitude sur la situation finale. Autrement dit c'est impossible à prédire de façon fiable en pratique...

Exemple: l'attracteur de Lorenz (vidéo)

Les équations de la mécanique des fluides sont complexes. On peut les simuler numériquement, mais la météo est en fait un système assez chaotique. En fait, l'attracteur de Lorenz est un modèle minimal de la météo. Plus précisément, la météo connaît beaucoup de variabilités, il y a donc de nombreux "attracteurs", ce qui la rend très compliquée à estimer.

C'est pourquoi on ne peut pas avoir de bonnes prévisions météo: on n'a qu'une mesure partielle de la situation initiale donc on a très vite une grande incertitude sur la météo. C'est ça l'"effet papillon": une petite fluctuation (comme le battement d'aile d'un papillon) finit par avoir de grosses conséquences sur la météo.



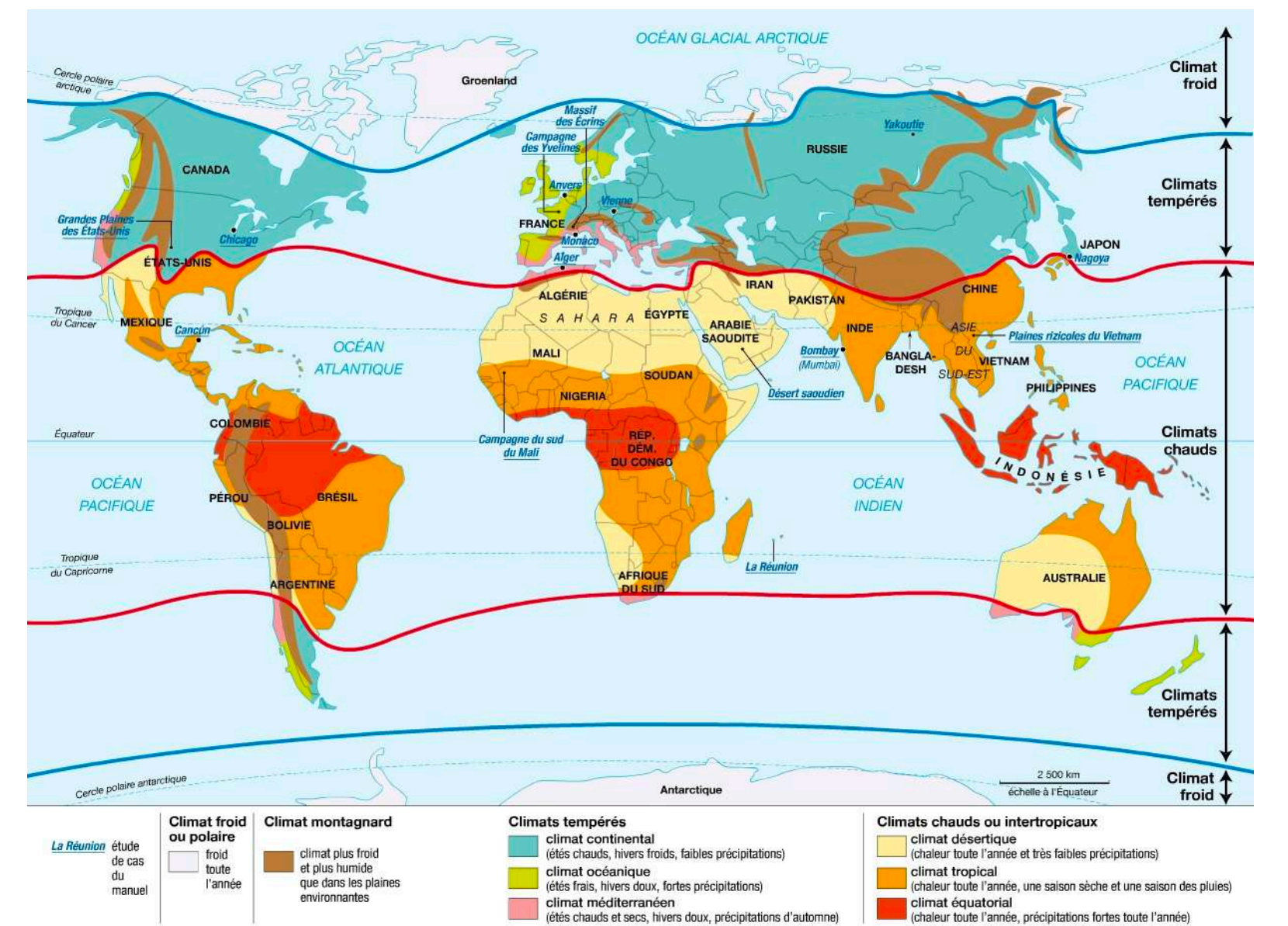
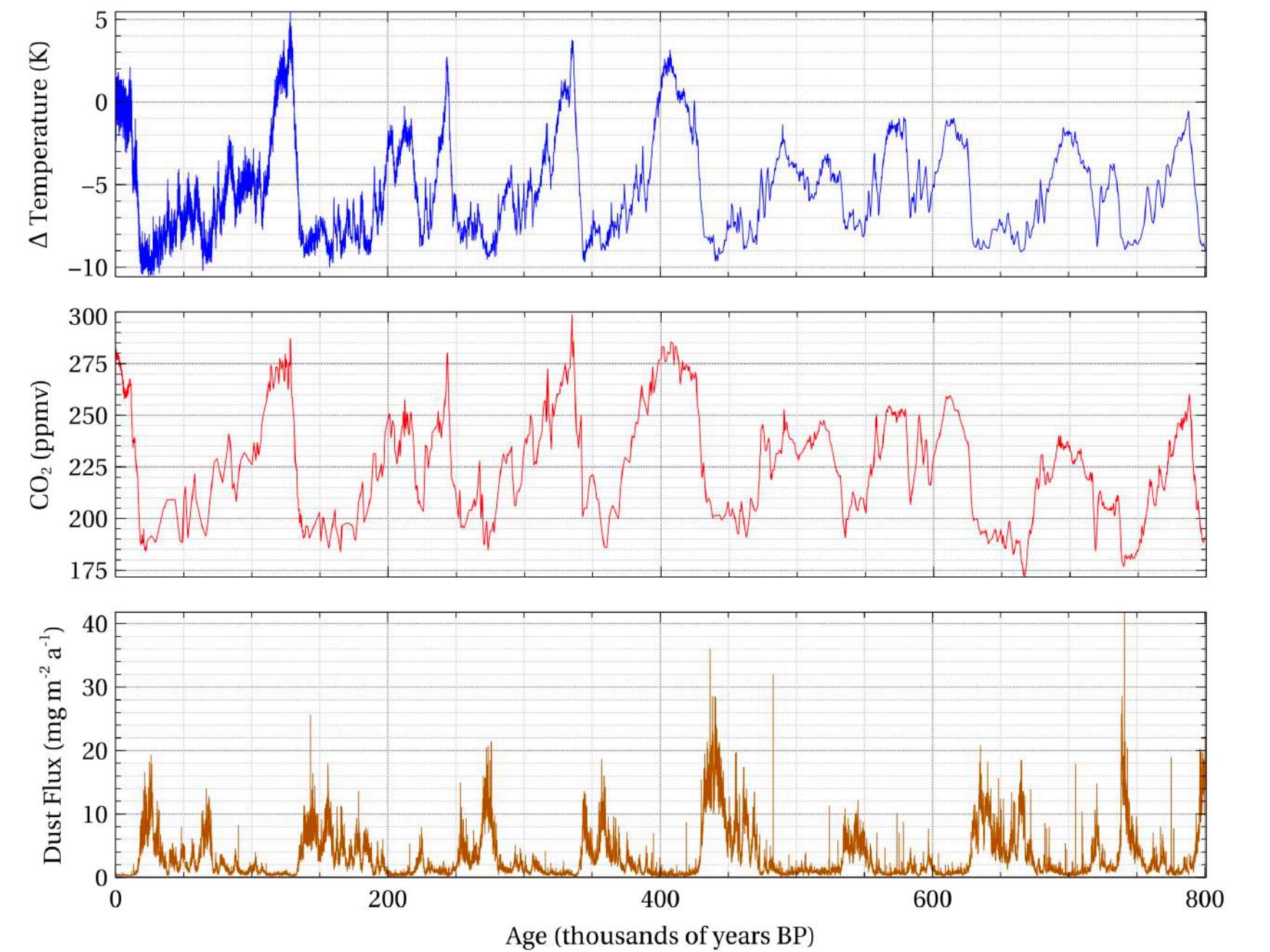
Edward Lorenz
1917-2008

... le climat non

Le climat n'est pas chaotique mais cyclique. Le climat de la Terre oscille selon des cycles de Milankovic (que l'on détaillera plus tard), alternant entre période glaciaire et période intermédiaire. C'est la paléoclimatologie.

Nous sommes dans une période intermédiaire, et la température moyenne est de 15°C. Le dernière âge glaciaire s'est terminé il y a 12 000 ans, la température y était entre 6 et 10°C plus faible. La température actuelle a été atteint il y a environ 10 000 ans, permettant la naissance de l'agriculture grâce à un climat plus favorable.

De même la distribution spatiale du climat est très stable. Cela permet de définir le climat d'une région et de "normales de saison", qui donne une moyenne pour la saison, malgré les fluctuations météorologiques.





Deuxième partie:

Effet de l'astronomie
sur le climat

Le cycle des saisons

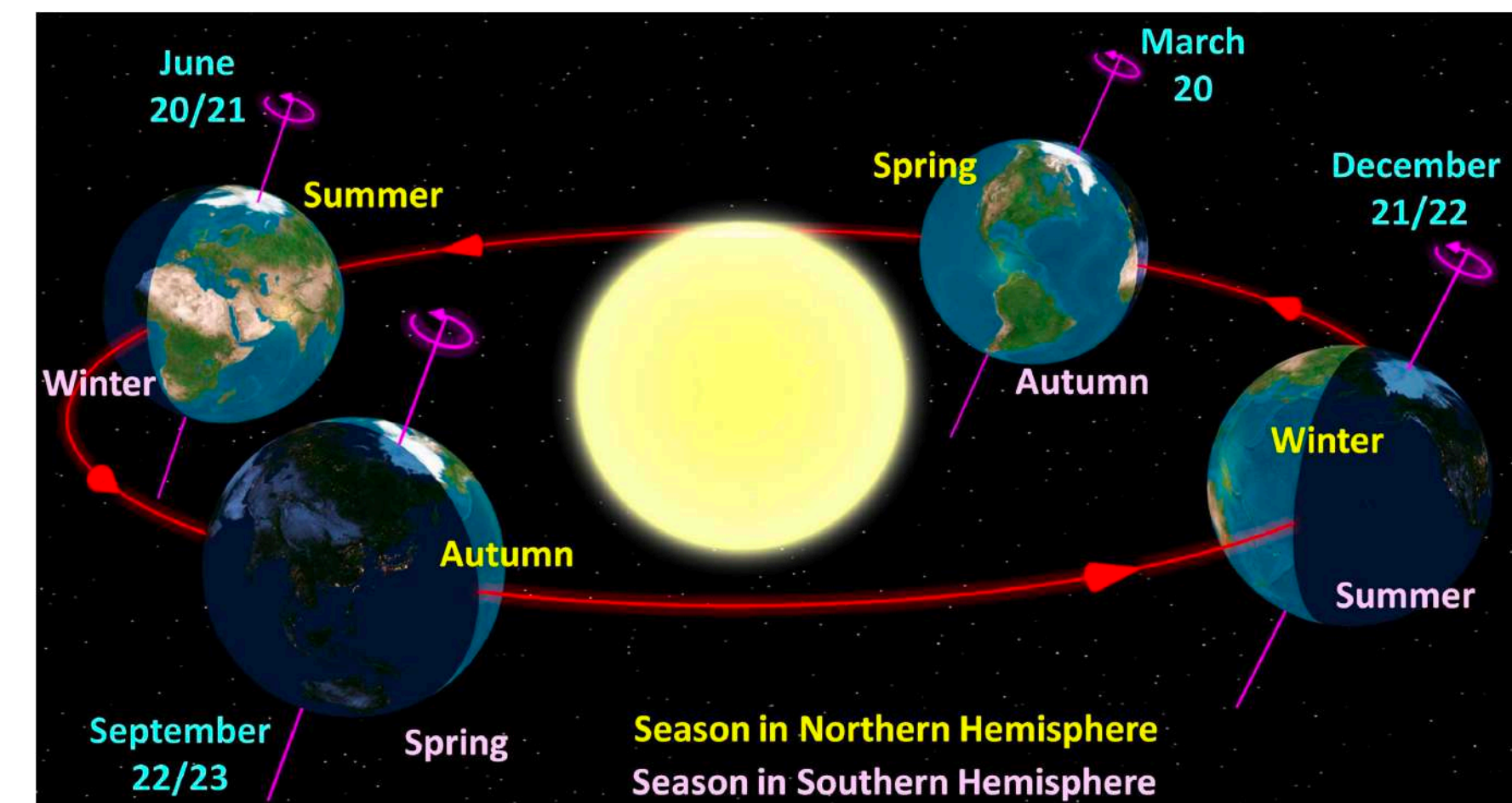
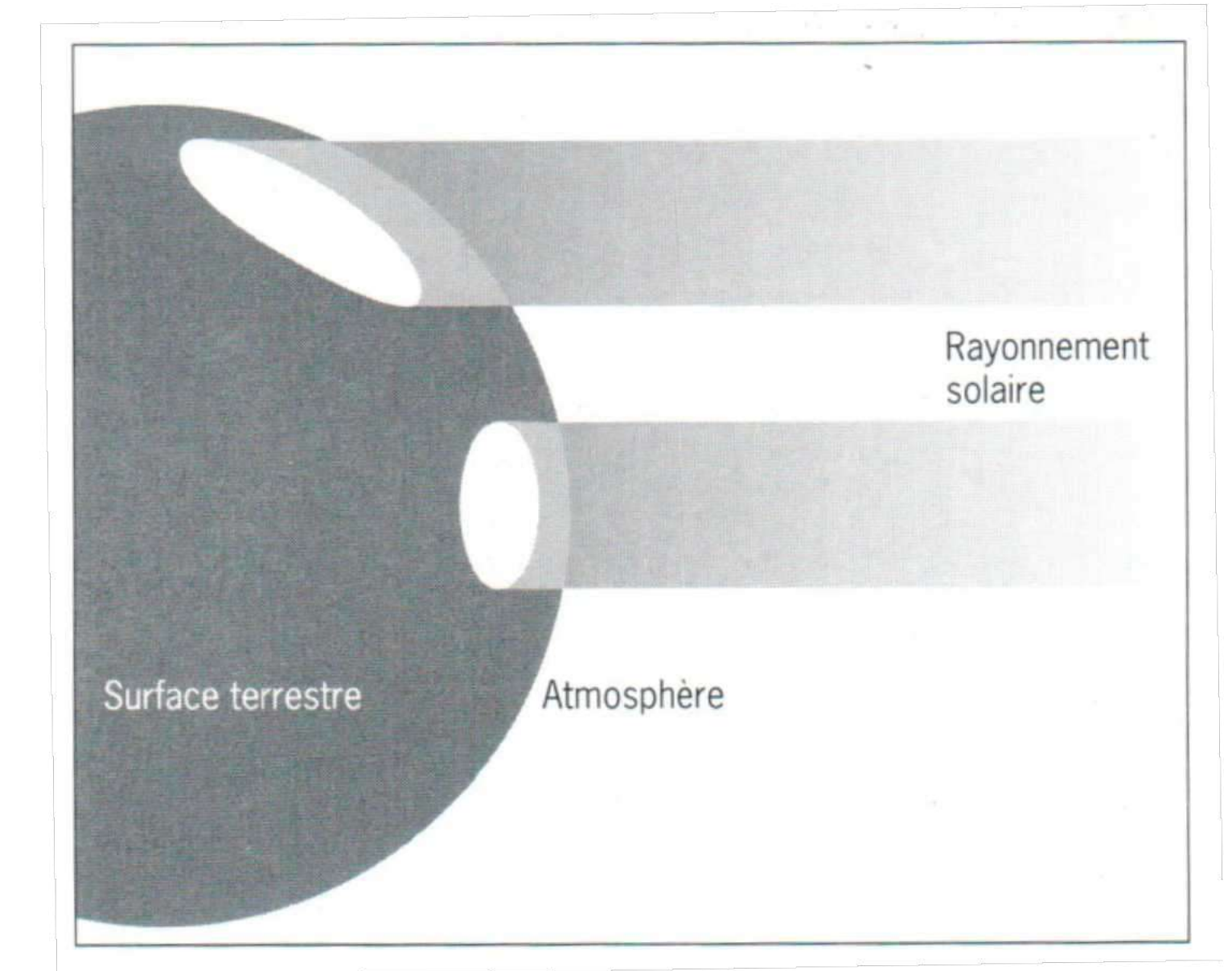
La Terre est chauffée par le rayonnement du Soleil. C'est l'effet central du climat. Le rayonnement solaire doit traverser l'atmosphère avant d'atteindre le sol. Sur le chemin, une partie significative de la chaleur est absorbée par l'atmosphère. Aussi, plus le rayon traverse d'atmosphère plus il est absorbé.

Pourquoi il fait chaud au sud et froid au nord? Ce rayonnement n'arrive pas de façon uniforme sur Terre. Plus une région est proche de l'équateur, plus elle est en face du Soleil, et donc plus elle récupère de rayonnement. De plus, c'est aussi là que les rayons doivent traverser le moins d'atmosphère. C'est pourquoi il fait plus chaud vers l'équateur qu'aux pôles.

L'obliquité et les saisons. De plus, la Terre est inclinée par rapport à son axe de rotation autour du Soleil: c'est l'obliquité. En conséquence, selon la période de l'année, un hémisphère (nord ou sud) se trouve plus en face du soleil: c'est l'été. À l'inverse, un hémisphère est moins exposé: c'est l'hiver. Cela évolue selon le cycle de la Terre autour du Soleil: c'est un cycle annuel. Cette variation d'exposition est la cause des saisons.

Solstices et équinoxes. Les solstices correspondent au moment de l'année où la Terre est le plus inclinée dans la direction du Soleil. C'est là où le jour est le plus long ou le plus court. Et c'est là que la variation de rayonnement est la plus forte. Les équinoxes correspondent au moment où l'inclinaison de la Terre n'est pas dans la direction du Soleil: jour et nuit ont la même durée et il n'y a pas de variation de rayonnement entre les hémisphères. Les saisons arrivent "après" les solstices et équinoxes parce qu'il y a une inertie de la température dans les mers et l'atmosphères.

Tropiques. À l'équinoxe, à midi, c'est l'équateur qui est en face du Soleil. Les tropiques (du Cancer au nord, du Capricorne au sud) correspondent aux latitudes qui sont en face du Soleil (à midi) aux solstices. Le reste de l'année, la latitude en face du Soleil varie entre les tropiques.



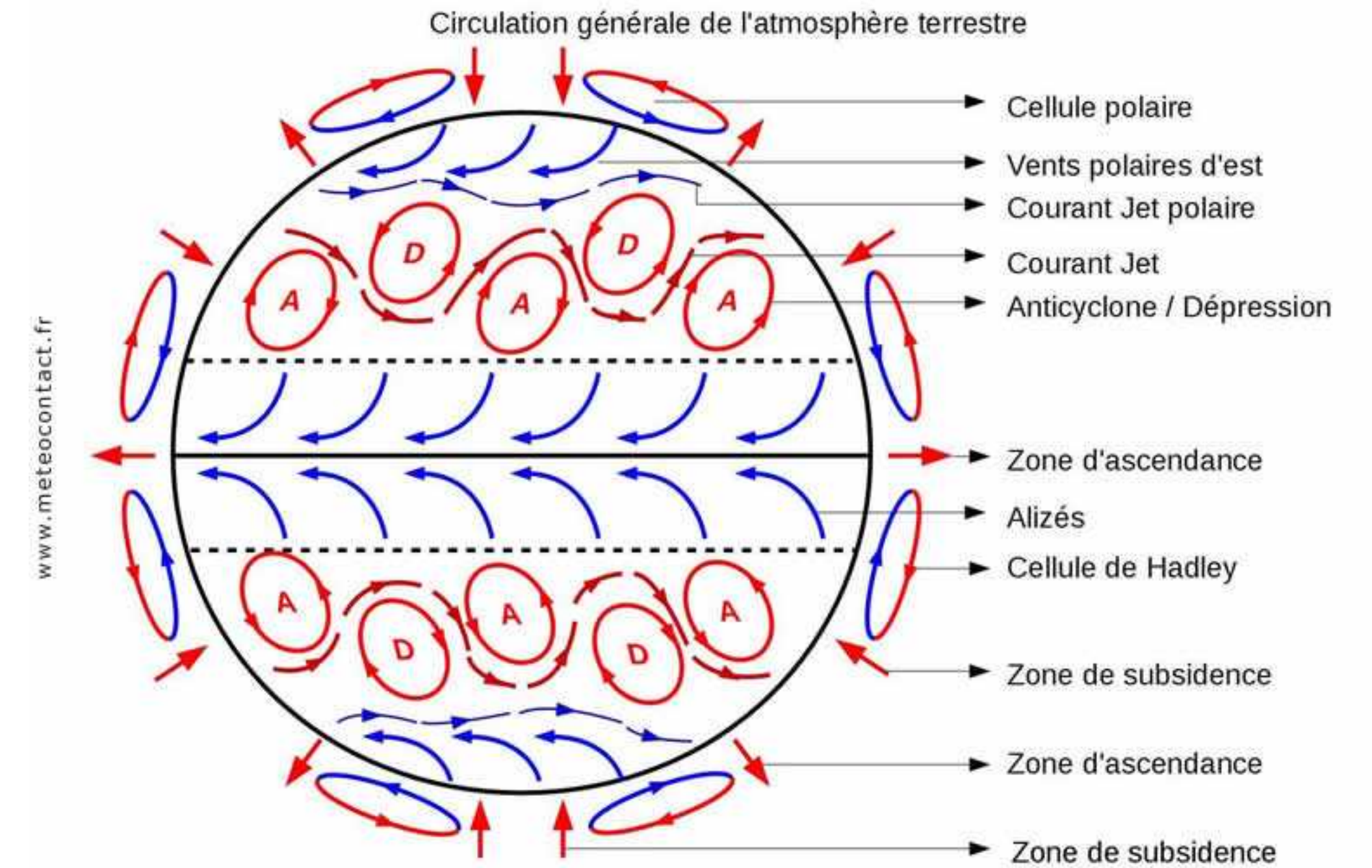
Equilibrer l'atmosphère

Les pôles reçoivent moins de rayonnement solaire que les tropiques, on a donc un déséquilibre de température. Cela va créer des cellules de convections pour essayer d'équilibrer la température: c'est l'origine de la **circulation atmosphérique** et la principale origine du vent.

C'est similaire à l'instabilité de Rayleigh-Bénard avec en plus:

- la force de Coriolis (rotation de la Terre) qui crée un sens de rotation privilégié
- la présence de terre émergés qui perturbent les courants.

La circulation atmosphérique est aussi à l'origine des courants marins de surface.

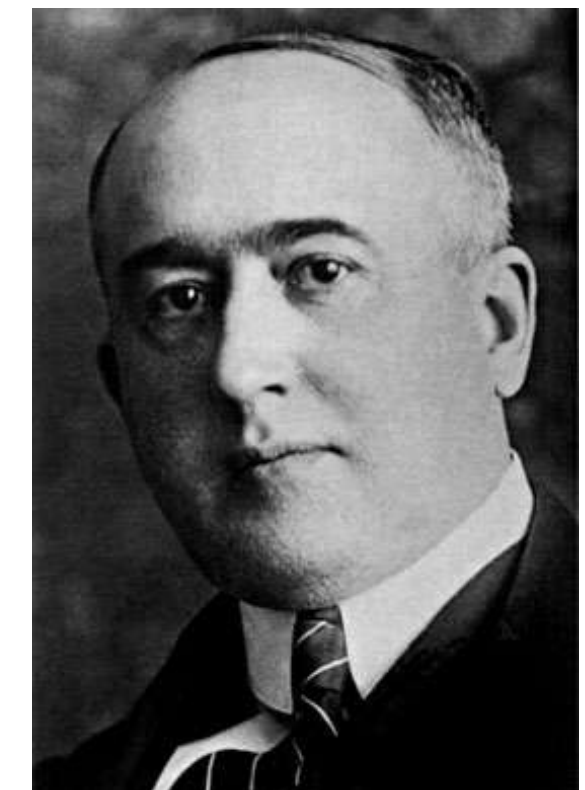
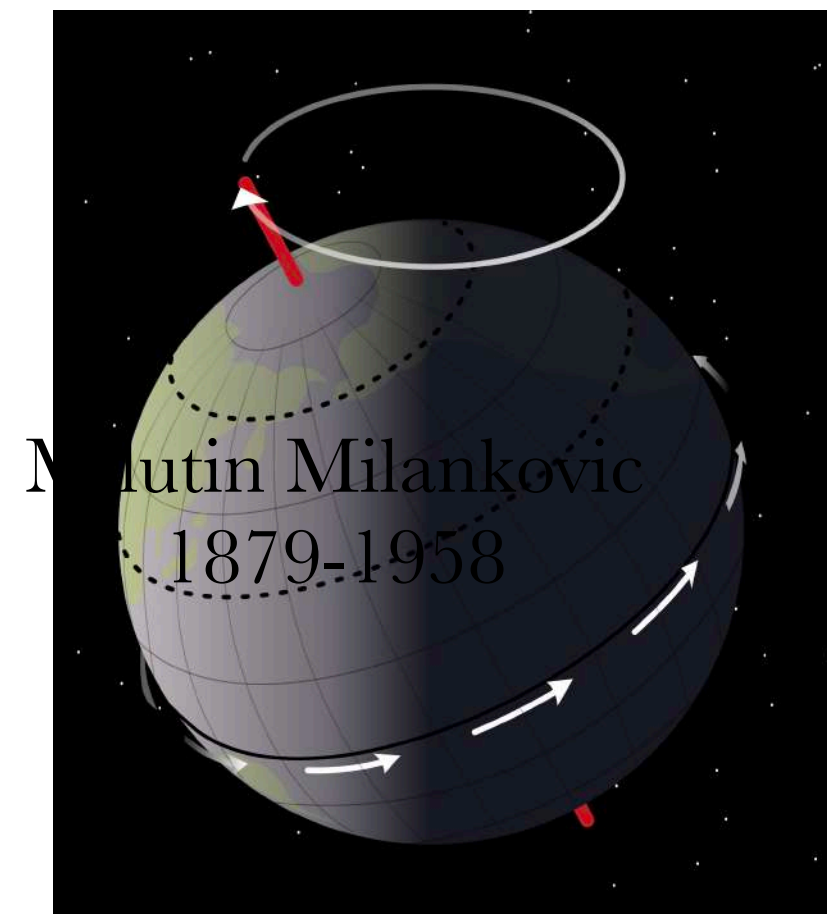
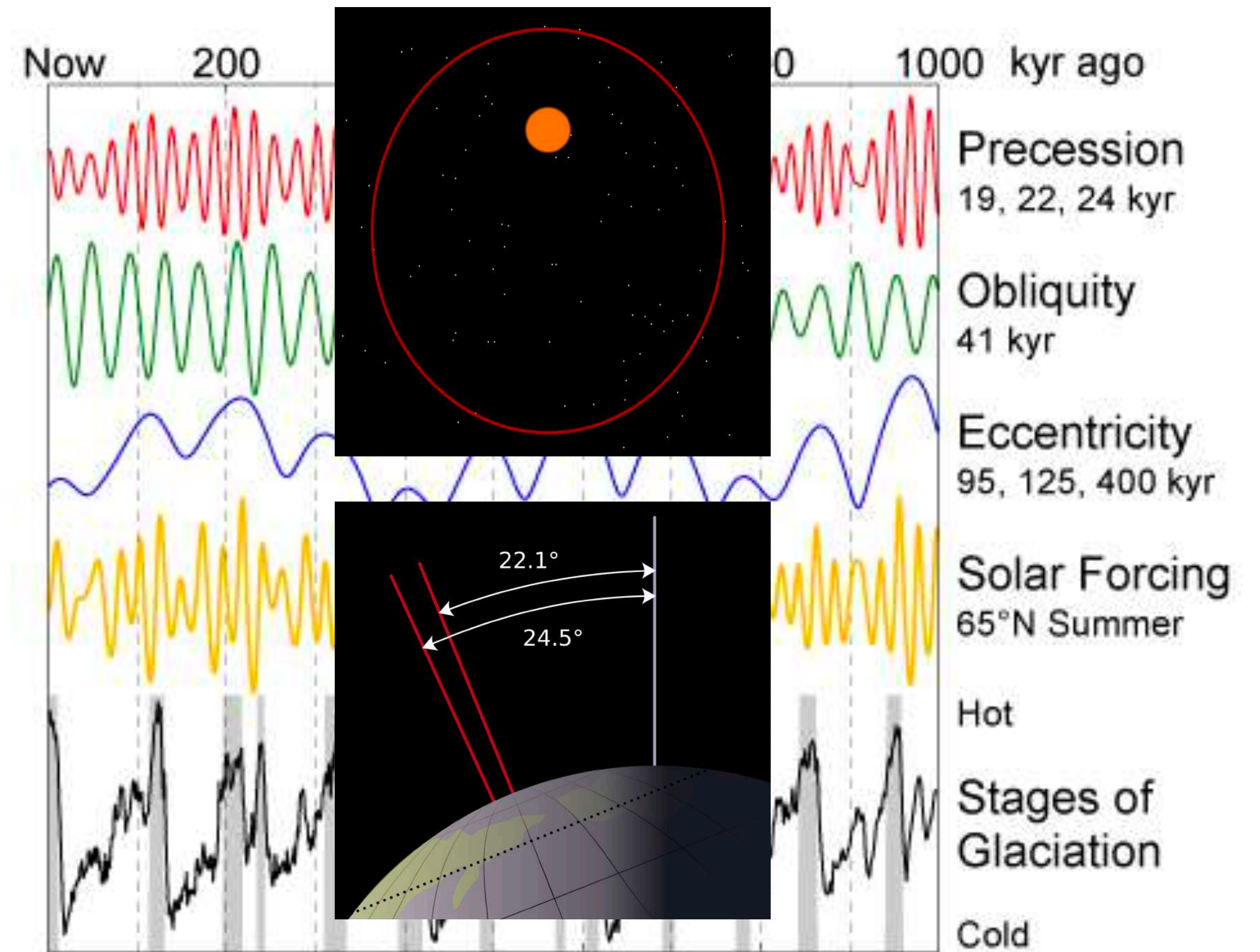


Cycles de Milankovic

Les cycles de Milankovic considèrent l'impact des variations de l'orbite terrestre sur le climat. Il y a trois principaux effets:

- **L'excentricité:** l'orbite de la Terre est une ellipse, la distance au Soleil varie donc au cours de l'année. Cela cause une variation du rayonnement solaire reçu. Cette variation annuelle peut être plus ou moins importante et varie selon plusieurs cycles.
- **L'obliquité:** la Terre est inclinée (cf. saisons) et l'angle de l'obliquité varie selon un cycle. Cela crée aussi des saisons plus ou moins marquées.
- **La précession:** de plus, la direction de cette l'inclinaison tourne sur elle-même. Si les solstices sont au plus près et au plus loin du Soleil, un hémisphère aura un été chaud et un hiver doux et l'autre un été frais et un hivers froid. Si à l'inverse les équinoxes sont au plus près et au plus loin du Soleil, les été et hiver seront intermédiaires dans les deux hémisphères.

Mettant les trois effets ensemble et utilisant un modèle du climat prenant en compte la variation de l'albédo, on a une bonne prédiction des cycles de glaciation et des cycles plus long.





Troisième partie:

Modèle du climat et
effet de serre

Rayonnement du corps noir

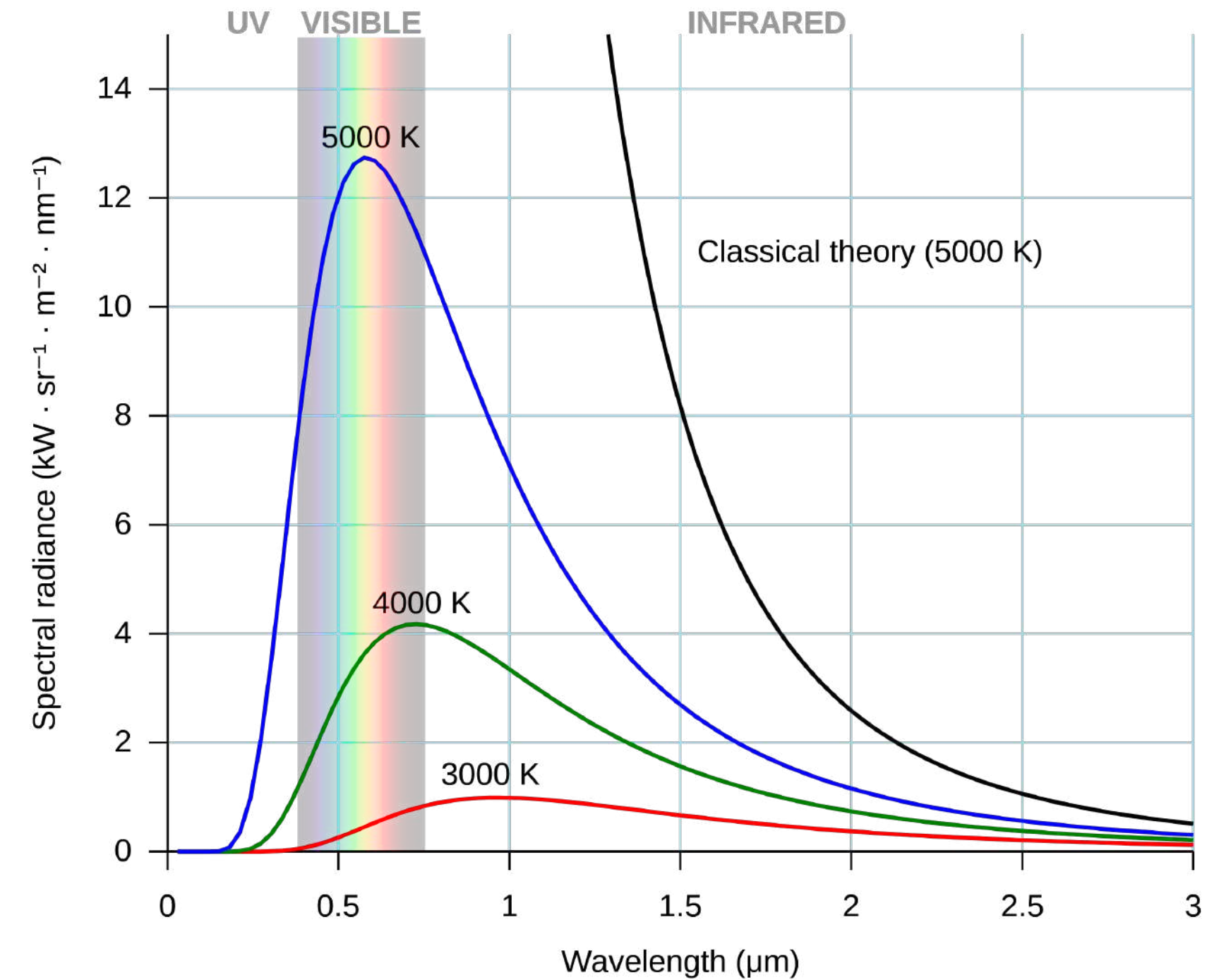
Les photons. La lumière est constituée de photons, les "particules de lumière". Chaque photon a une énergie qui dépend de sa couleur (= fréquence). Plus sa fréquence est grande (vers le bleu), plus il a d'énergie. Les photons atteignent aussi à l'équilibre thermique, si bien que l'on peut décrire leur comportement et en particulier le nombre de photons s'échappant d'un corps à l'équilibre thermique.

Rayonnement technique et loi de Planck. Toute matière qui a une température émet de la lumière: c'est le rayonnement thermique. Au pratique, la lumière émise est bien modélisée par le modèle du "corps noir" (où l'on suppose une absorption idéale par le milieu). La couleur (= fréquence) du rayonnement dépend de la température: elle suit la loi de Planck (courbes à droite). Plus c'est chaud, plus le pique est à faible longueur d'onde (= grande fréquence, vers le bleu). Par exemple, le corps humain (300 K) émet de la lumière dans l'infrarouge. Tandis que le Soleil (5800 K) émet principalement de la lumière visible. Ou plutôt, l'oeil a évolué vers ces couleurs car ce sont celles que fournit le Soleil.

Loi de Stephan-Boltzmann. On peut aussi calculer la puissance émise par rayonnement, c'est-à-dire la chaleur émise. Elle dépend de la température selon la loi de Stephan-Boltzmann:

$$P = \sigma ST^4$$

avec σ la constante de Stephan, S la surface du corps et T sa température. Un corps 2 fois plus chaud émet donc 16 fois plus de chaleur.



Max Planck
1858-1947



Josef Stephan
1835-1893

Premier modèle de climat

Essayons un premier modèle du climat. Les ingrédients:

- Le Soleil éclaire la Terre. Sachant sa température et sa distance on connaît le rayonnement solaire arrivant sur Terre: $P_{S \rightarrow T} \approx 10^{17}$ W.
- Une fraction de ce rayonnement est réfléchi dans l'espace, c'est l'albédo. Typiquement, la glace réfléchit le Soleil. Le reste est absorbé par la Terre.
- La Terre émet un rayonnement de corps noir à sa température T_{Terre} .

On a donc l'équilibre entre ce qui arrive et ce qui part:

$$(1 - a) \times P_{S \rightarrow T} = S_{Terre} \sigma T_{Terre}^4$$

où a est la proportion du rayonnement solaire réfléchi (albédo) et S_{Terre} est la surface de la Terre.

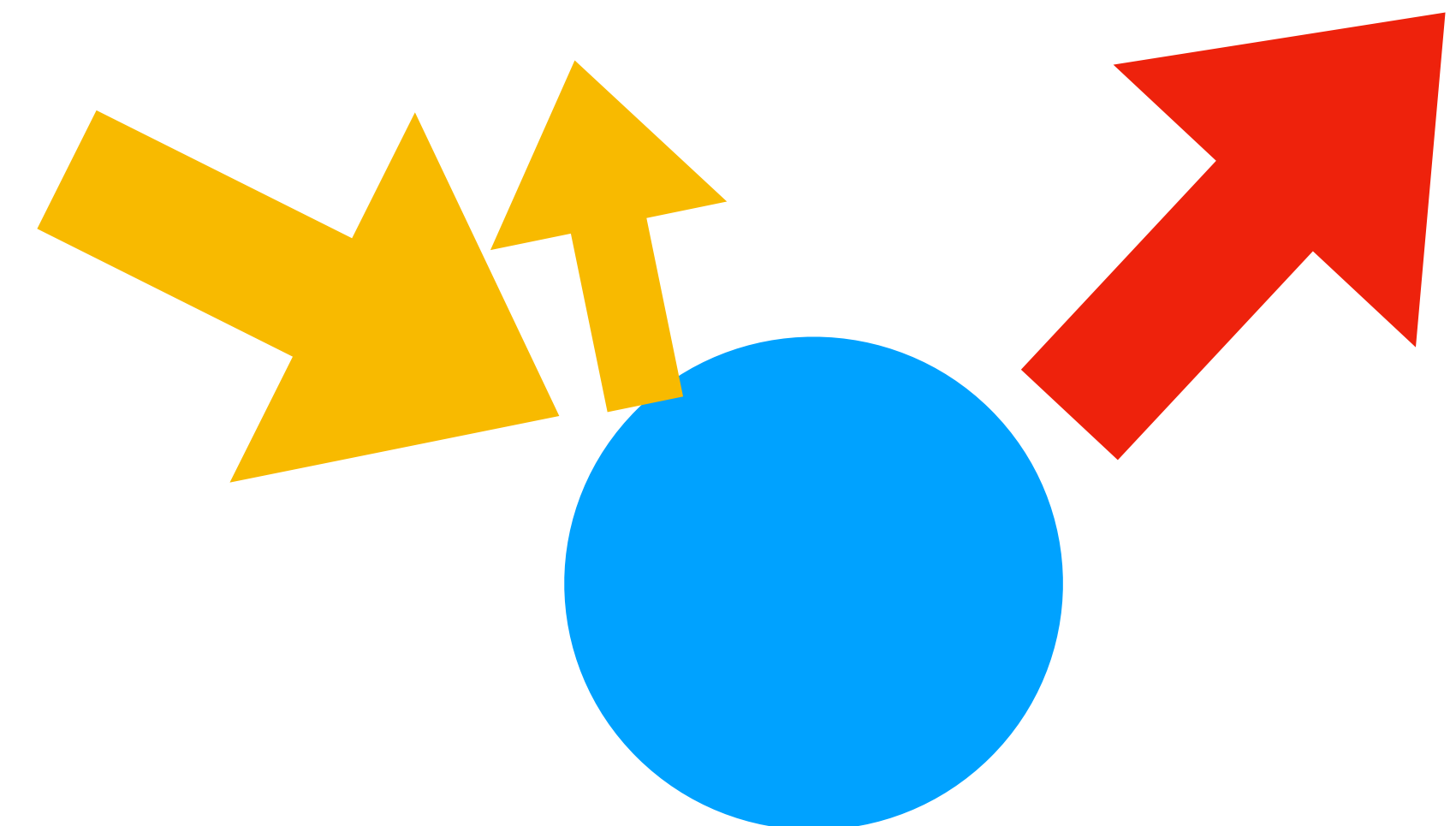
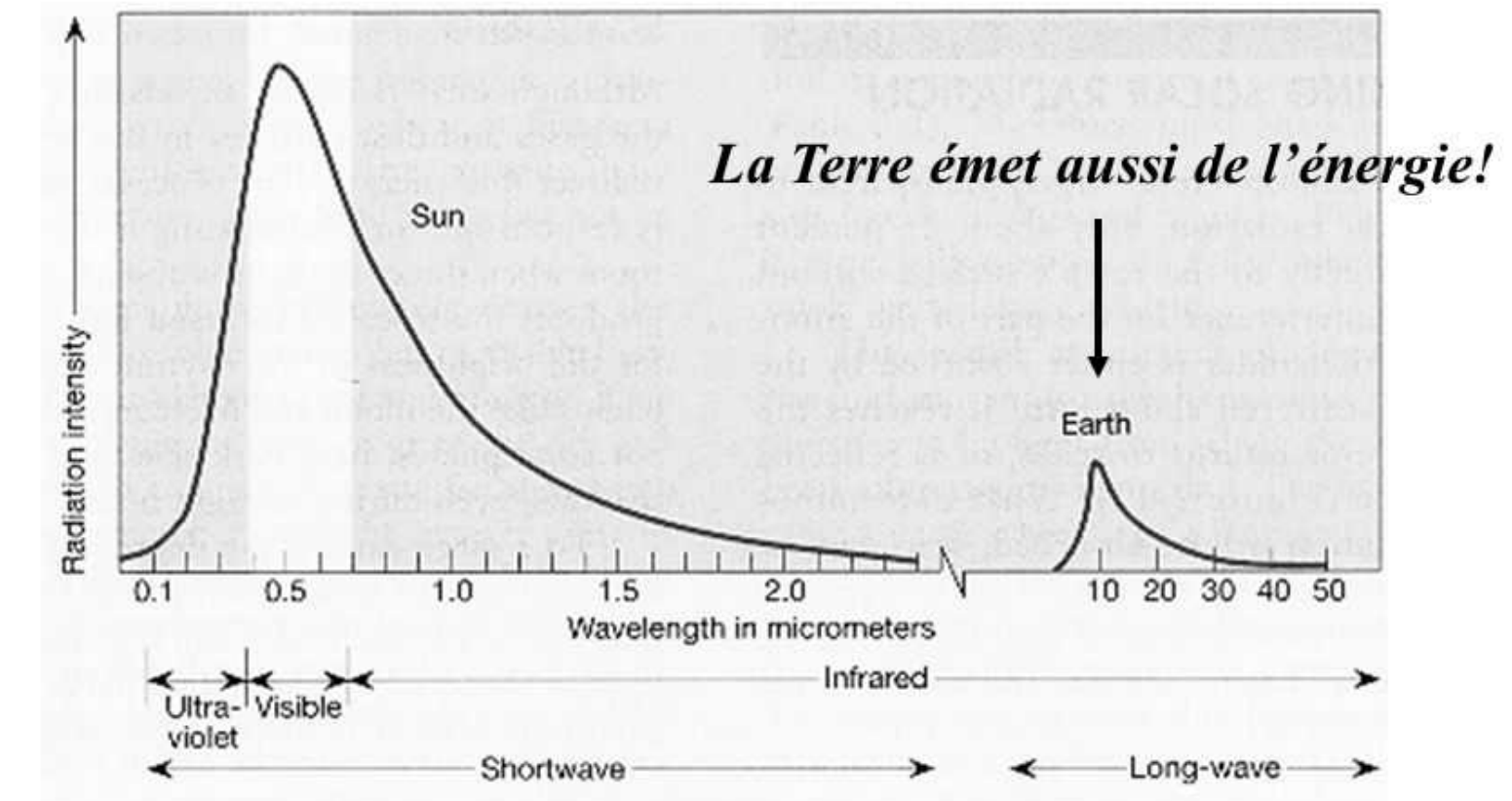
L'**albédo** dépend lui-même de la température moyenne de la Terre qui fait qu'il y a plus ou moins de glace sur la surface.

- Lorsque $T_{Terre} > 0^\circ\text{C}$, il y a peu de glace et l'albédo est faible: $a \approx 0.3$. Cela favorise une grande température de la Terre. On trouve ainsi une température d'équilibre haute.
- Lorsque $T_{Terre} < 0^\circ\text{C}$, il y a beaucoup de glace et l'albédo est grand: $a \approx 0.6$. Cela favorise une faible température de la Terre. On trouve ainsi une température d'équilibre basse.

Ces deux équilibres correspondent aux périodes glaciaire ou intermédiaire.

Néanmoins, ce modèle est naïf car il ne prend pas en compte l'effet de l'atmosphère, qui réchauffe significativement la Terre.

Spectre d'émission du Soleil et de la Terre

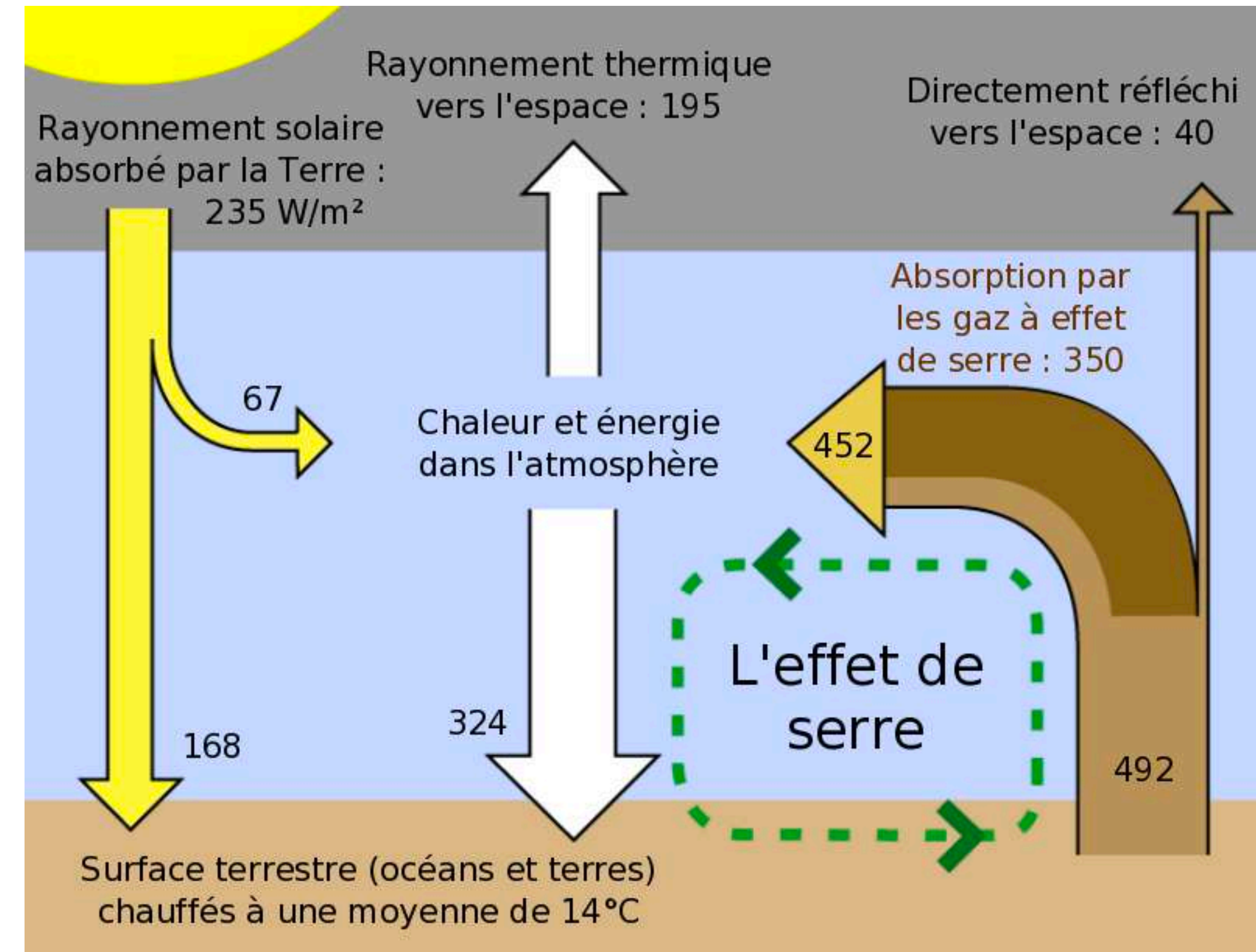


Modèle du climat avec l'effet de serre

Ajoutons l'atmosphère dans le modèle. Les nouveaux ingrédients:

- On distingue une température du sol et une température de l'atmosphère.
- L'atmosphère absorbe une partie du rayonnement du Soleil.
- L'atmosphère absorbe une partie du rayonnement de la Terre.
- L'atmosphère émet un rayonnement de corps noir.

L'atmosphère est plus froide que la Terre et sert de "manteau" à la Terre. L'effet de serre augmente donc la température de la Terre. Ce modèle, assez minimal, réussit à retrouver la température de la Terre: 15°C.





Quatrième partie:

Les gaz à effet de serre

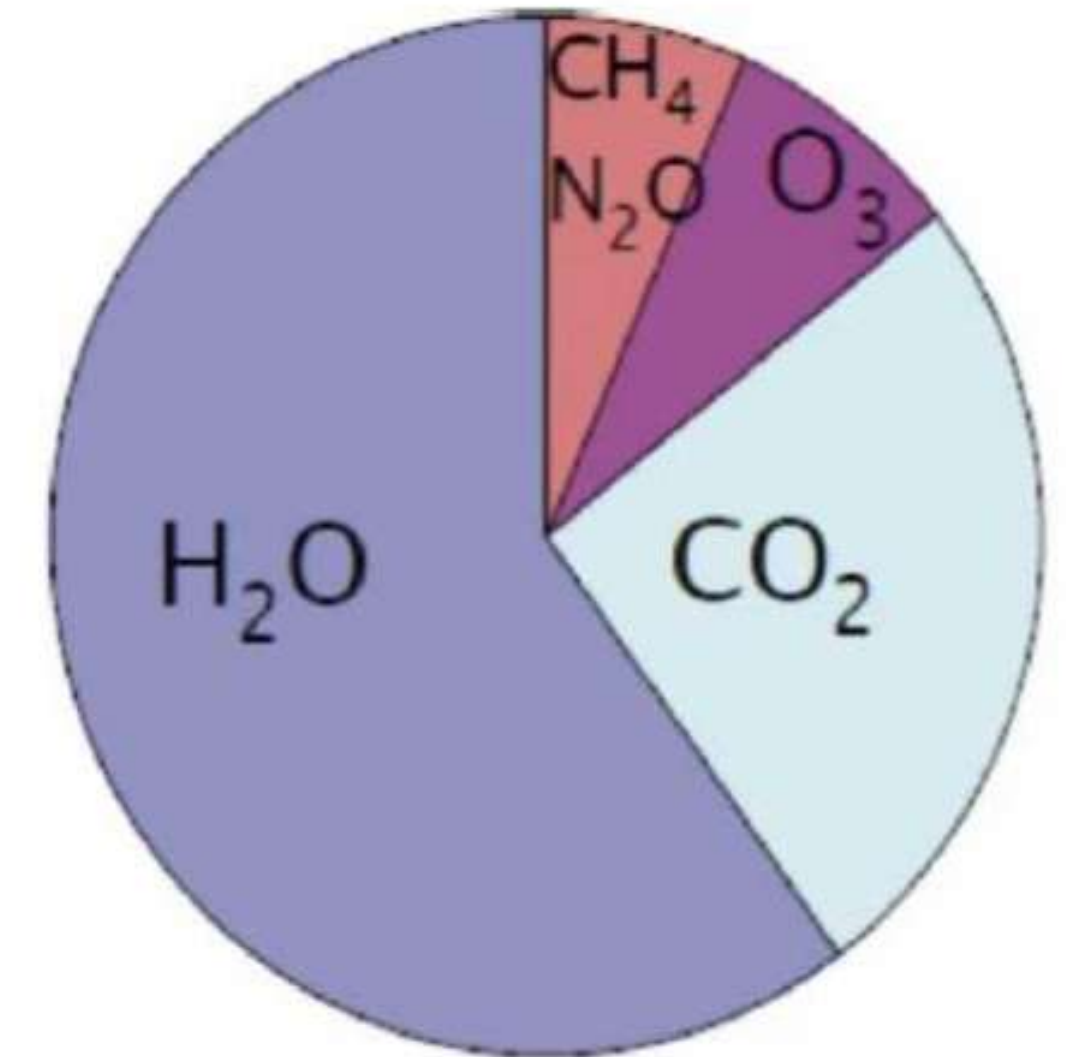
Les gaz à effet de serre

L'effet de serre est dû à différents gaz qui ont un impact plus ou moins fort.

- La vapeur d'eau: c'est le principal gaz à effet de serre, il est stable.
- Le gaz carbonique (CO₂): c'est le principal gaz à effet de serre émis par l'homme.
- Le méthane (CH₄): plus puissant que le CO₂ mais en plus faible quantité. C'est lui que l'on appelle gaz "naturel" ou gaz fossile.

Effet de serre ciel clair

	(W.m ⁻²)	(%)
Vapeur d'eau	75	60%
CO ₂	32	26%
Ozone	10	8%
N ₂ O+CH ₄	8	6%
total ciel clair	125	100%



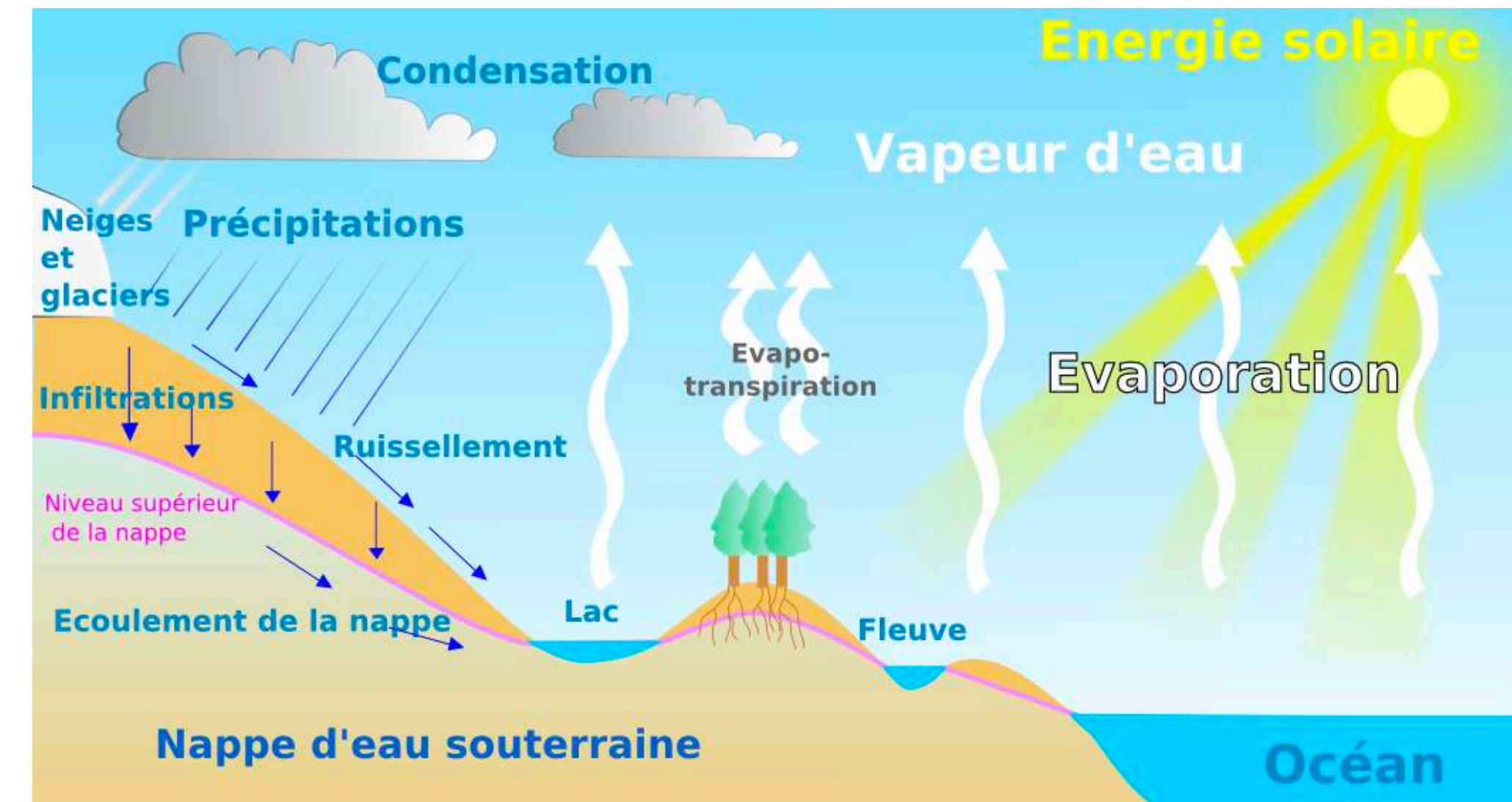
Le cycle de l'eau

L'eau suit un cycle:

- L'eau est évaporé grâce à l'énergie solaire.
- Lorsque la concentration de vapeur d'eau devient trop importante: il pleut.
- L'eau de pluie ruisselle jusque'à retourner dans les mers.

Le cycle dure typiquement 10 ans.

L'eau est le premier gaz à effet de serre, mais la concentration de vapeur d'eau est fixée pour une température donnée via un cycle assez court, donc elle n'est pas un problème.

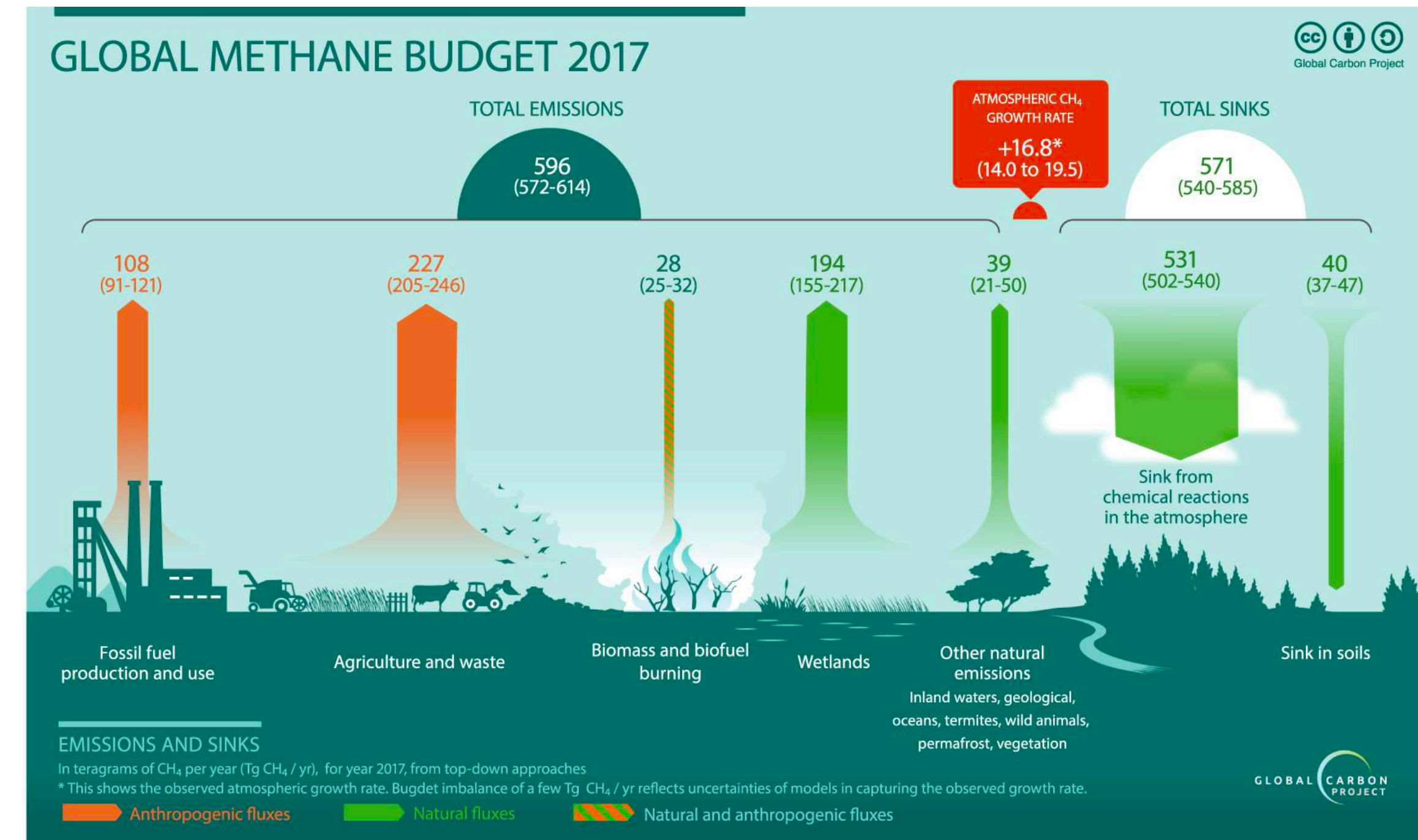


Le méthane

Le méthane est un gaz à effet de serre plus puissant que le CO₂. Mais il ne reste pas très longtemps dans l'atmosphère: au bout de quelques dizaines d'années il subit une réaction chimique et se transforme en CO₂. Il entre donc dans le cycle du carbone mais la durée passée sous forme de méthane constitue un surplus d'effet de serre.

On parlera dans la suite de CO₂-équivalent (ou CO₂eq) pour compter le méthane avec le CO₂ dans les bilans globaux.

Il émis principalement par l'élevage, puisque les animaux produisent du méthane lors de la digestion. Le méthane c'est aussi le gaz fossile (ou "naturel"). Les pertes de gaz fossile sont donc une autre source importante d'émission de méthane.



Le cycle du carbone

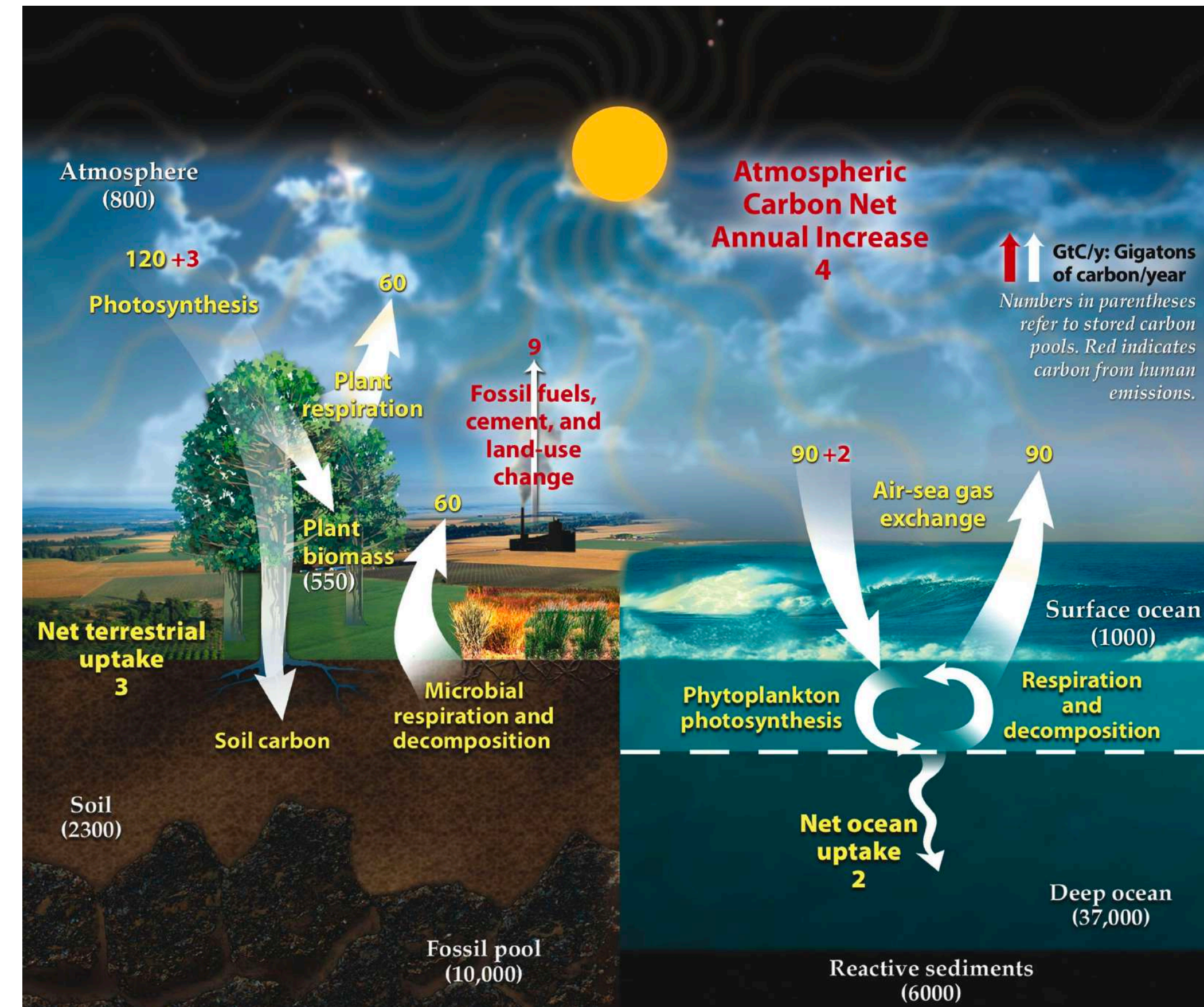
Le carbone suit un cycle, sur terre et dans les océans (en simplifié):

- Les plantes ou phytoplanctons absorbent du CO₂ et le transforment grâce à la photosynthèse.
- Ils émettent du O₂ et le carbone devient de la biomasse. Une partie du carbone est aussi stockée dans le sol ou tombe au fond de l'océan.
- Les plantes et phytoplanctons morts se décomposent retournant le CO₂ à l'atmosphère.

Le cycle dure typiquement 1 000 ans donc c'est long à l'échelle de l'humanité...

Le carbone stocké dans les sols et au fond des océans suit un second cycle du carbone, à l'échelle géologique (en millions d'années). C'est lui qui est à l'origine de la formation des hydrocarbures.

Les activités humaines émettent du CO₂ dans l'atmosphère, ce qui perturbe ce cycle. Celui-ci n'est donc plus à l'équilibre et aura besoin de milliers d'années pour y revenir si on arrêta soudainement les émissions de CO₂.





Cinquième partie:

Le réchauffement
climatique

Augmentation de la concentration de CO2

On observe une net augmentation de la quantité de CO2 dans l'atmosphère depuis le 19ème siècle.

Le CO2 émis produit principalement des gaz à effet de serre.

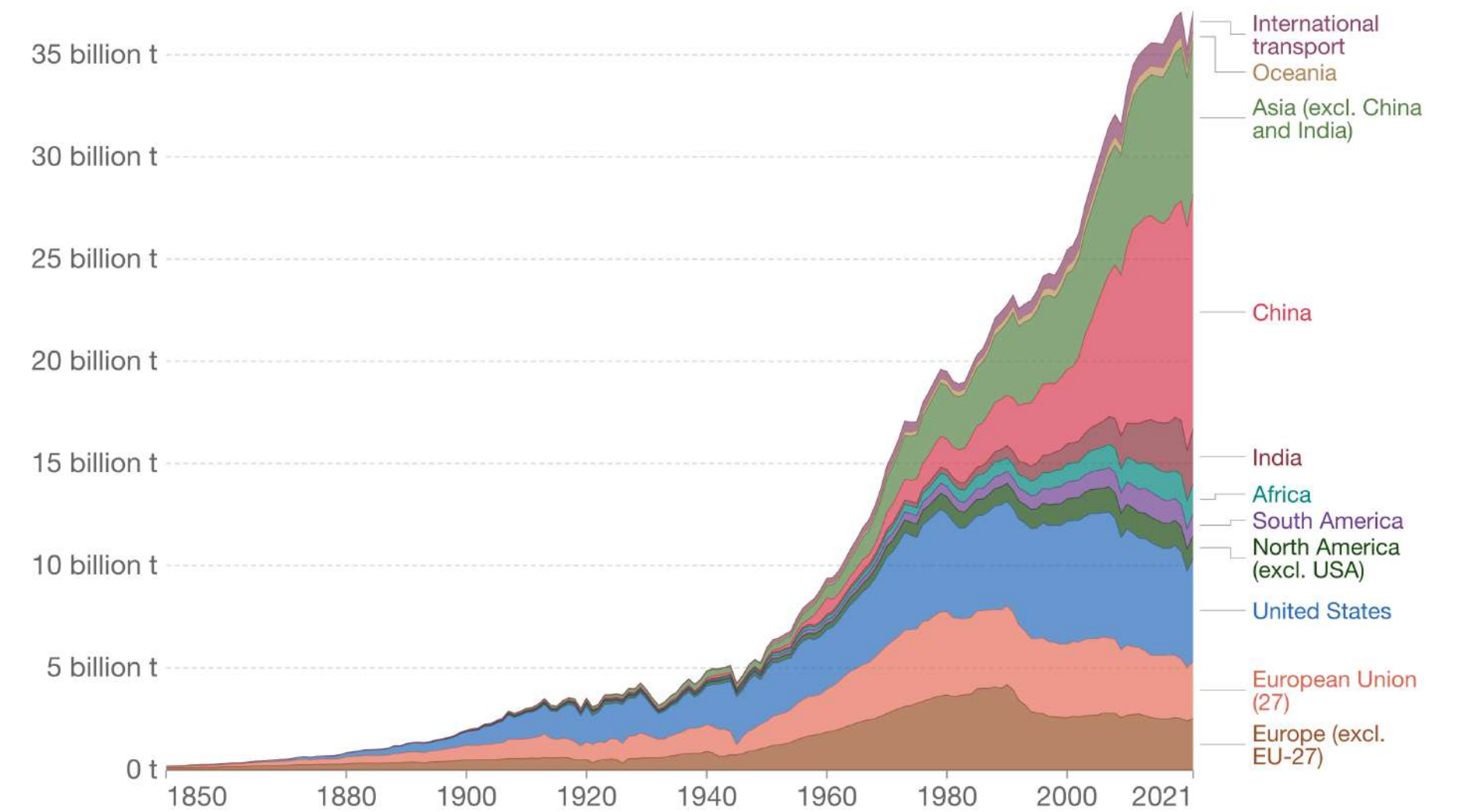
A cela s'ajoute l'utilisation des terres: la déforestation libère le CO2 stocké dans la terre.

Ici on ne décrit pas le méthane, mais son effet s'ajoute à celui du CO2.

Annual CO2 emissions by world region

This measures fossil fuel and industry emissions¹. Land use change is not included.

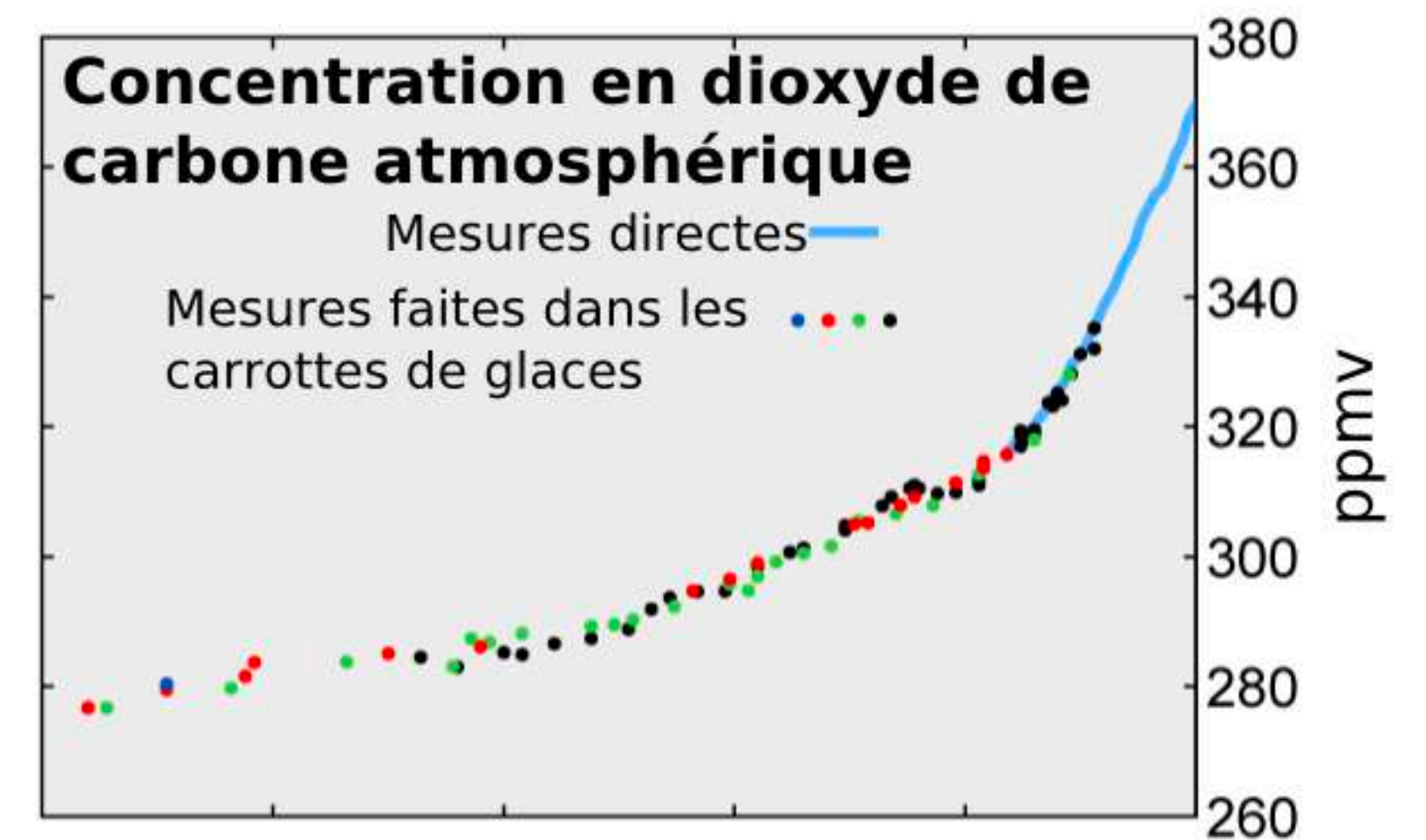
Our World
in Data



Source: Global Carbon Budget (2022)

OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions · CC BY

1. Fossil emissions: Fossil emissions measure the quantity of carbon dioxide (CO₂) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO₂ includes emissions from coal, oil, gas, flaring, cement, steel, and other industrial processes. Fossil emissions do not include land use change, deforestation, soils, or vegetation.



Réchauffement climatique

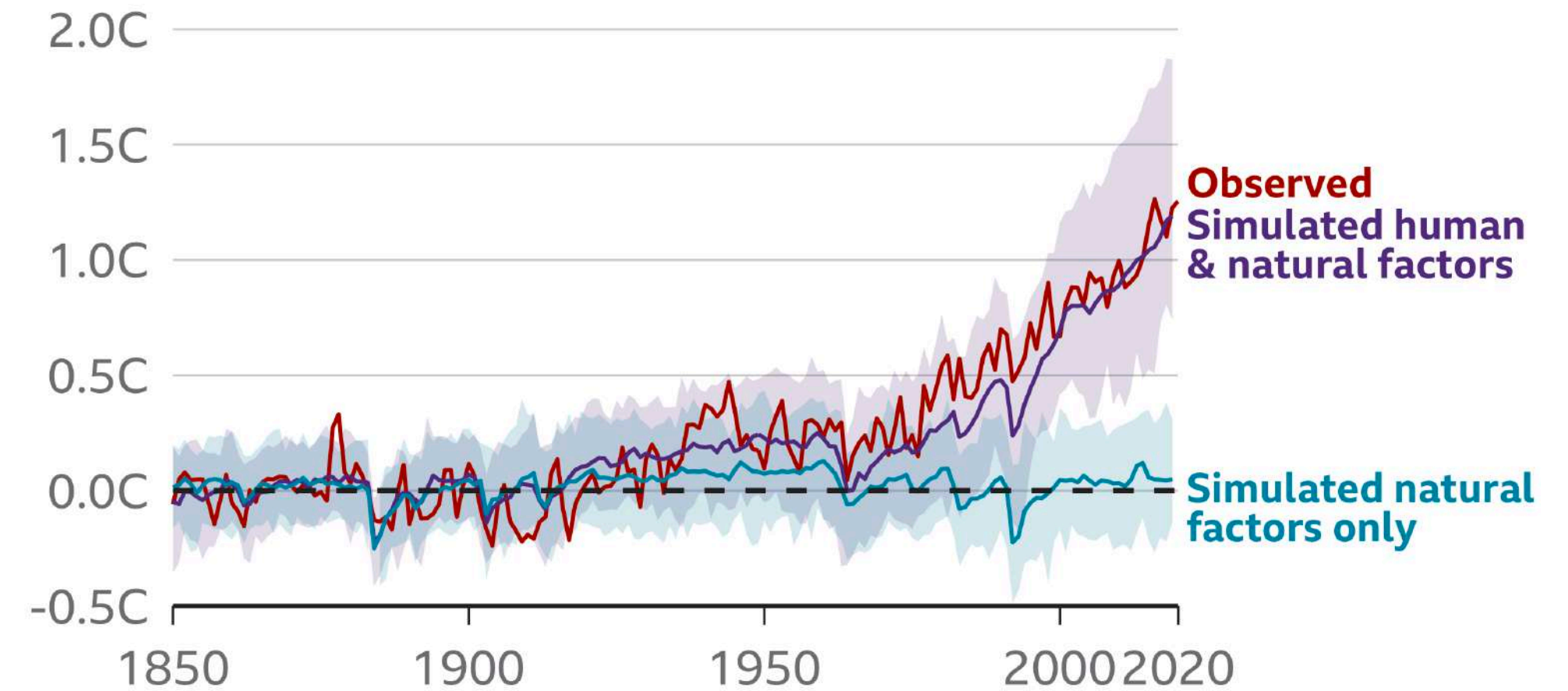
L'augmentation de la concentration de CO₂ augmente l'effet de serre et donc la température de la Terre. Modèles et observations sont d'accord: il y a un réchauffement climatique, et il est causé par les émissions de carbone des activités humaines.

Objectif de la COP21: garder le réchauffement climatique sous 2°C, si possible si 1,5°C.

C'est déjà trop tard pour 1,5°C avec la quantité de carbone déjà émise. On est pas du tout parti pour rester sous les 2°C non plus.

Human influence has warmed the climate

Change in average global temperature relative to 1850-1900, showing observed temperatures and computer simulations

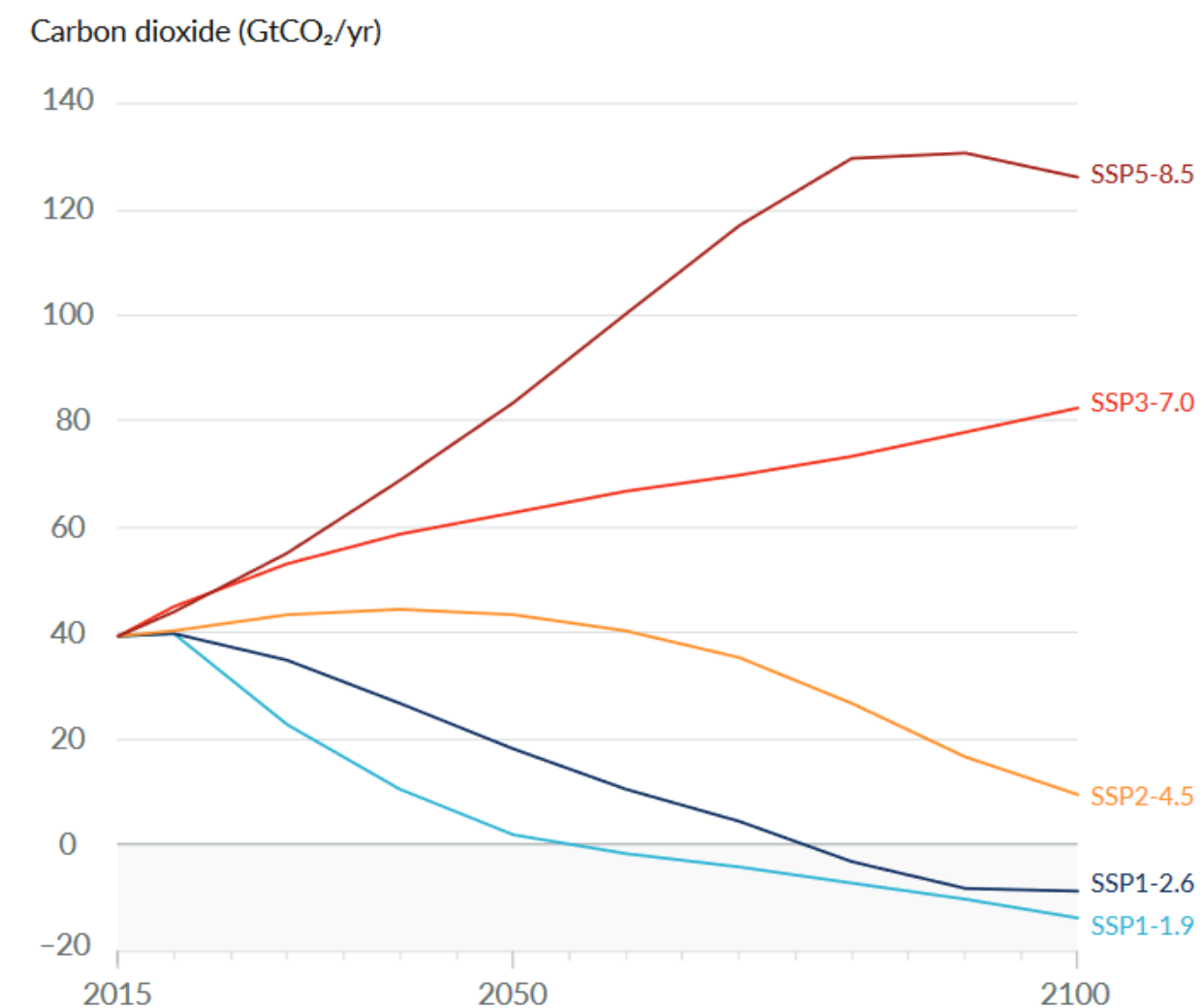


Note: Shaded areas show possible range for simulated scenarios

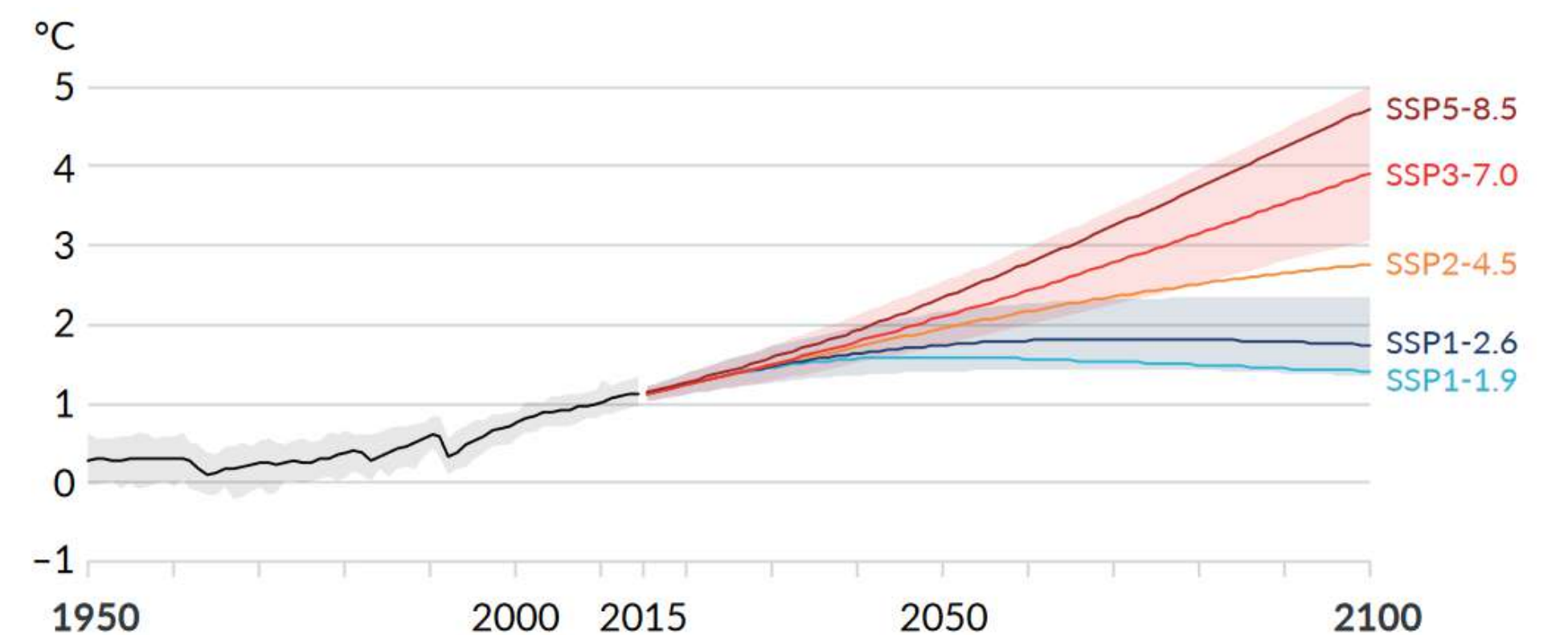
Source: IPCC, 2021: Summary for Policymakers

BBC

Plusieurs scénarios selon les émissions :



Différents niveaux de réchauffement :



Réchauffement climatique: conséquences

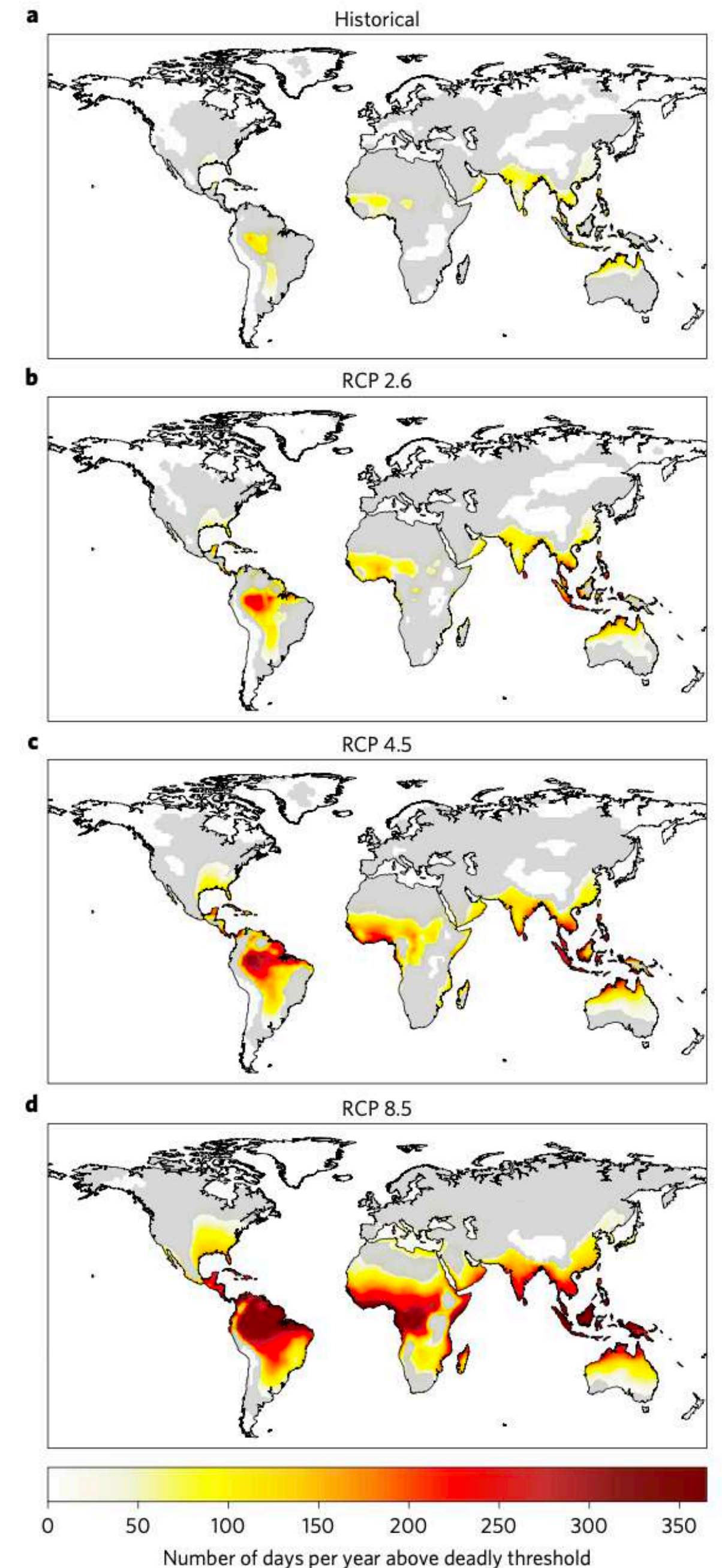
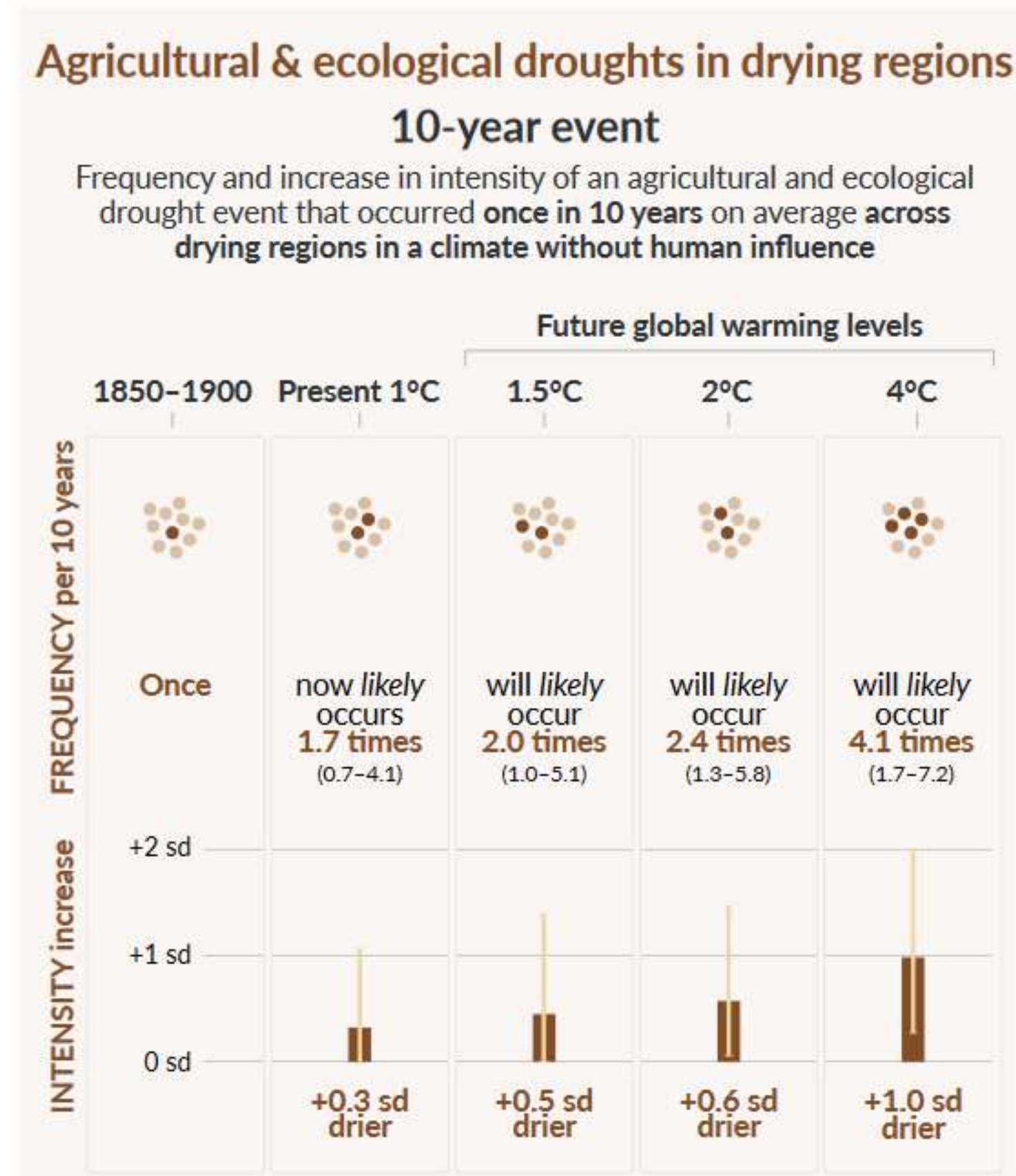
Le réchauffement climatique a de nombreux impacts: sécheresse, canicules, météo extrême, chute de la biodiversité, ...

L'OMS estime 250 000 morts/an à partir de 2030 à cause du réchauffement climatique.

Des études récentes prédisent que des millions de personnes vivront en 2100 dans des régions invivables plus l'homme (cf. à droite).

Déjà maintenant, de nombreux effets de réchauffement climatique sont observables, notamment des épisodes extrêmes de météo (canicules, orages, sécheresses, ...) en Europe. Du fait de la variabilité de la météo on pourrait jamais attribuer avec certitude un épisode météorologique à une cause précise.

Les études d'attribution se font sur le principe suivant : on simule 1000 fois le climat avec le réchauffement climatique, on voit qu'il y a 99 canicules extrêmes à Paris comme celle observée, on le simule 1000 fois sans réchauffement climatique, on voit qu'il y a 1 canicule extrême, donc on peut attribuer la canicule extrême observée à 99 % au réchauffement climatique (chiffres au hasard)



La Révolution Industrielle

Les émissions de CO₂ proviennent essentiellement de la combustion d'hydrocarbure:

- Le charbon
- Le pétrole
- Le gaz fossile (méthane)

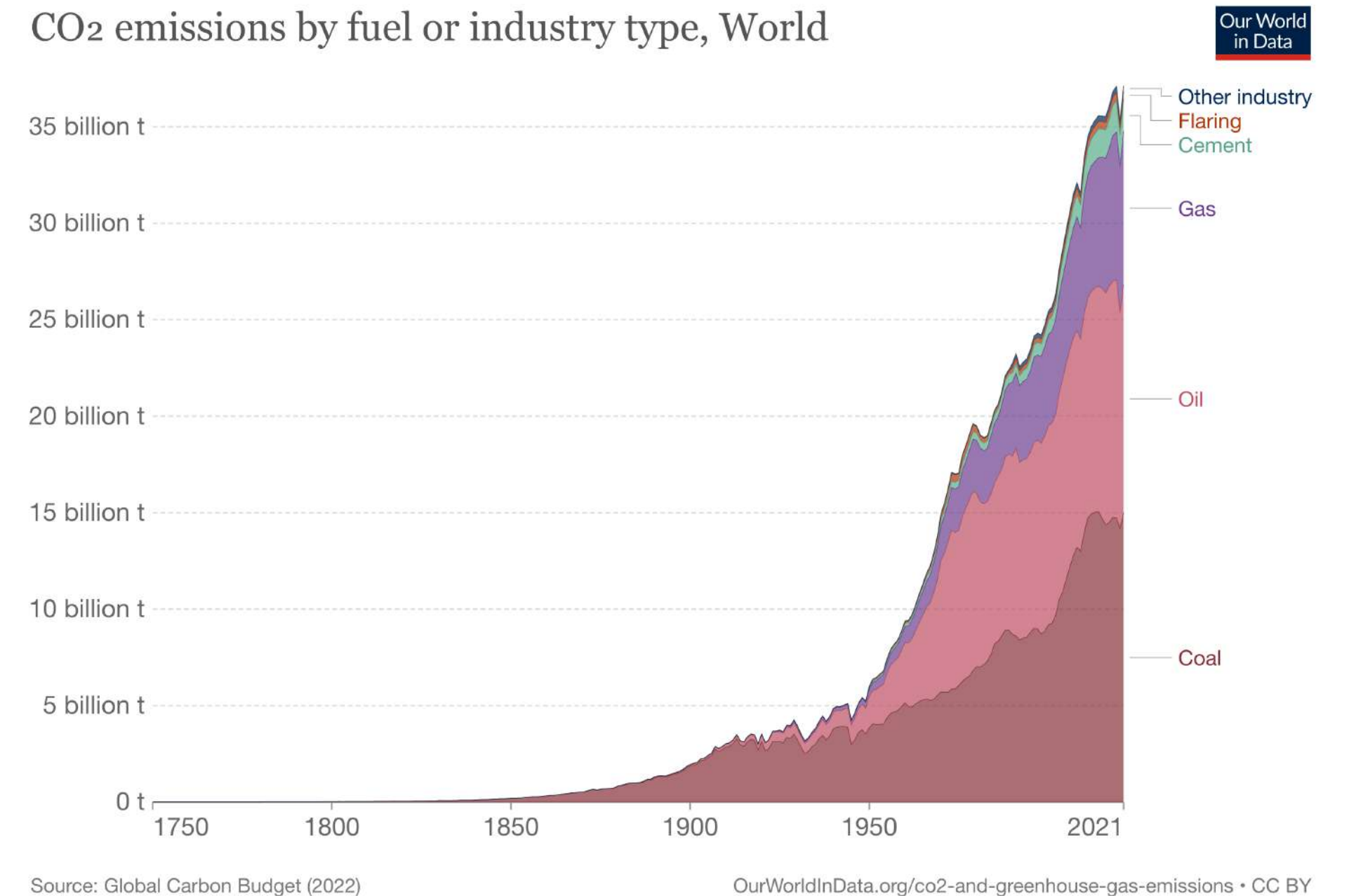
Tous ces hydrocarbures proviennent du cycle géologique du carbone. Ce sont des ressources très énergétiques: c'est le concentré de siècle de photosynthèse. Quand on brûle du pétrole, on consomme l'énergie solaire lentement accumulée par les arbres durant toute leur vie.

Les hydrocarbures sont donc une source d'énergie, qui peut servir à alimenter des machines thermiques:

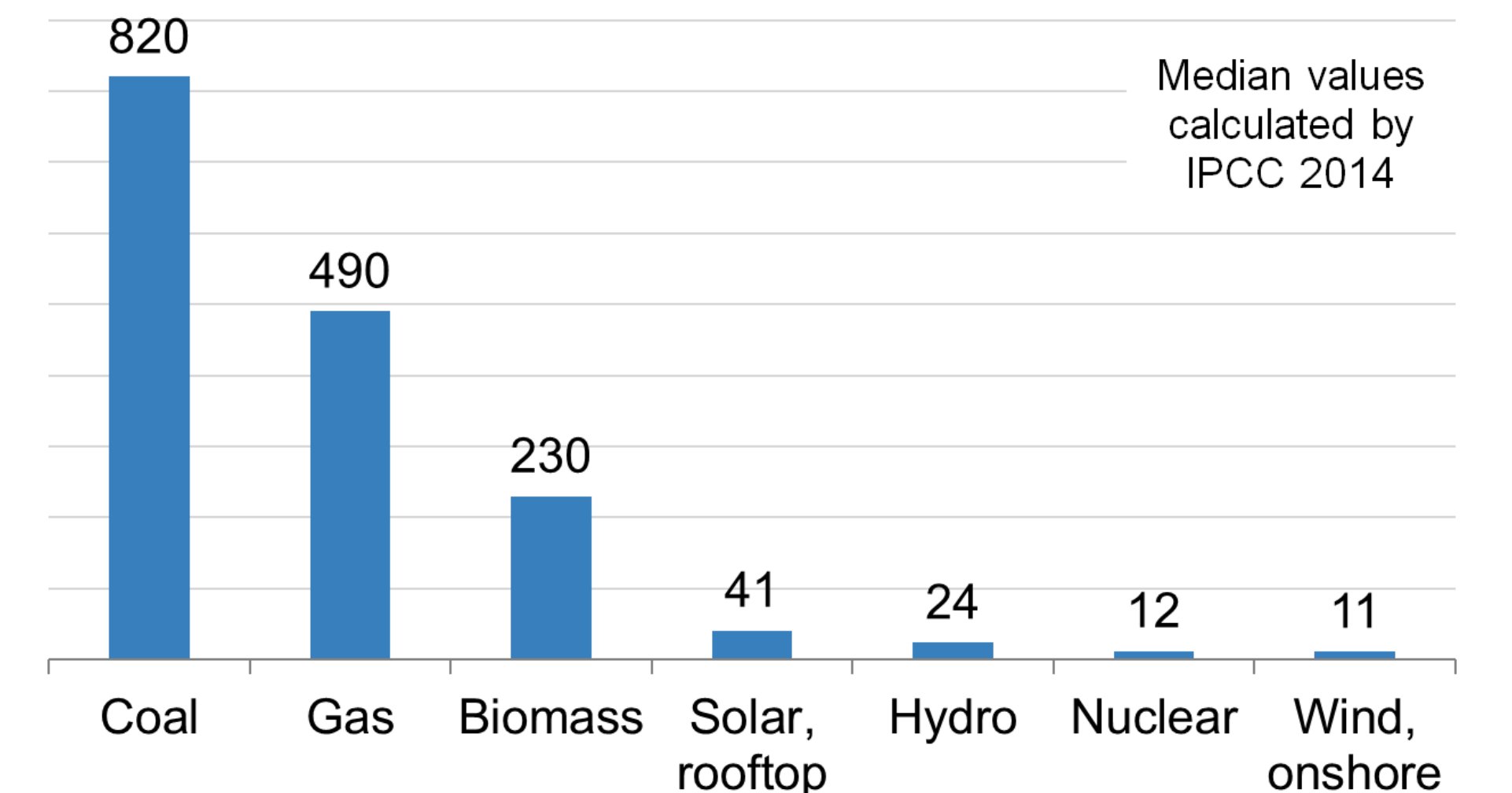
- Moteurs thermiques: transformation en énergie cinétique.
- Chauffage: transformation en chaleur.
- Centrales thermiques: transformation en électricité.

Historiquement, l'utilisation de ces hydrocarbures est ce que l'on appelle la "révolution industrielle". Le réchauffement climatique est le prix des gains historiques de l'industrialisation. Les différents hydrocarbures se sont ajoutés et très peu remplacés au cours du temps: le monde n'a jamais utilisé autant de charbon qu'aujourd'hui.

CO₂ emissions by fuel or industry type, World



Lifecycle CO₂-equivalent emissions (g/kWh)



Conséquences socio-économiques

La Révolution industrielle a apportée de nombreuses révolutions observables:

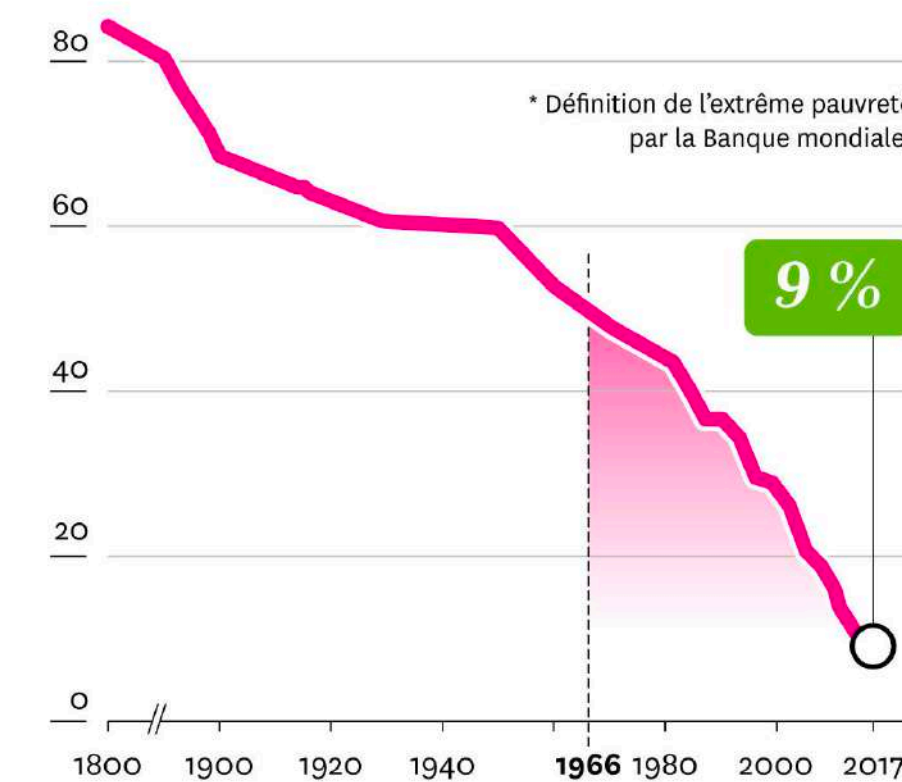
- Explosion de la population
- Explosion du PIB/habitant (ou tout autre mesure de richesse)
- Boom du niveau de vie
- Chute de la pauvreté

Elle a aussi permis de remplacer du "travail humain" par le travail de machines et de libérer des travailleur pour d'autres objectifs. Aussi, c'est la révolution industrielle qui a permis, de façon moins évidente:

- La fin de l'esclavage (majoritairement au 19ème)
- Les avancés sociales (semaine plus courte, retraites, ...)
- L'éducation pour tous, la santé pour tous, ...

Il sera donc difficile de s'en passer...

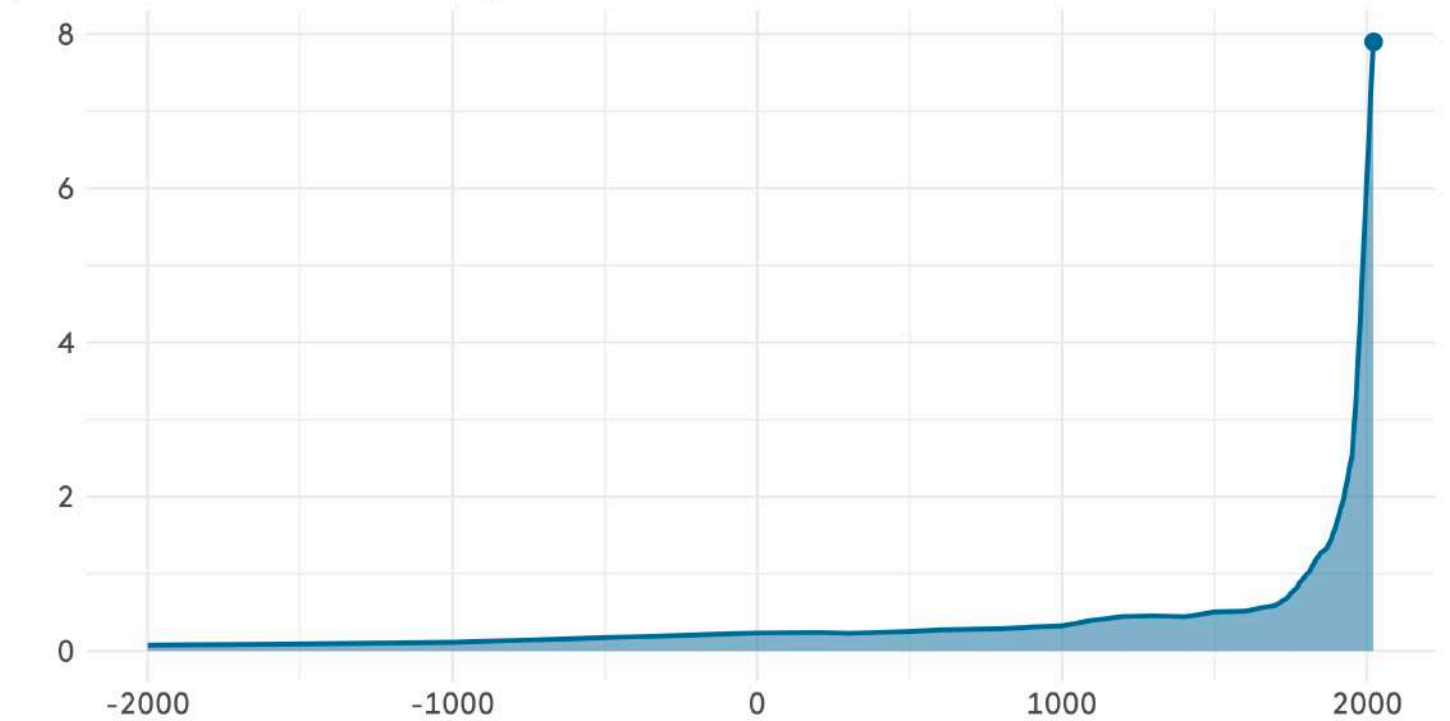
Part de la population mondiale vivant avec moins de 2 dollars par jour*
(en %, dollars corrigés de l'inflation, en parité de pouvoir d'achat)



SOURCE : "THE GUARDIAN", GAPMINDER

La population mondiale atteint 8 milliards de personnes sur Terre

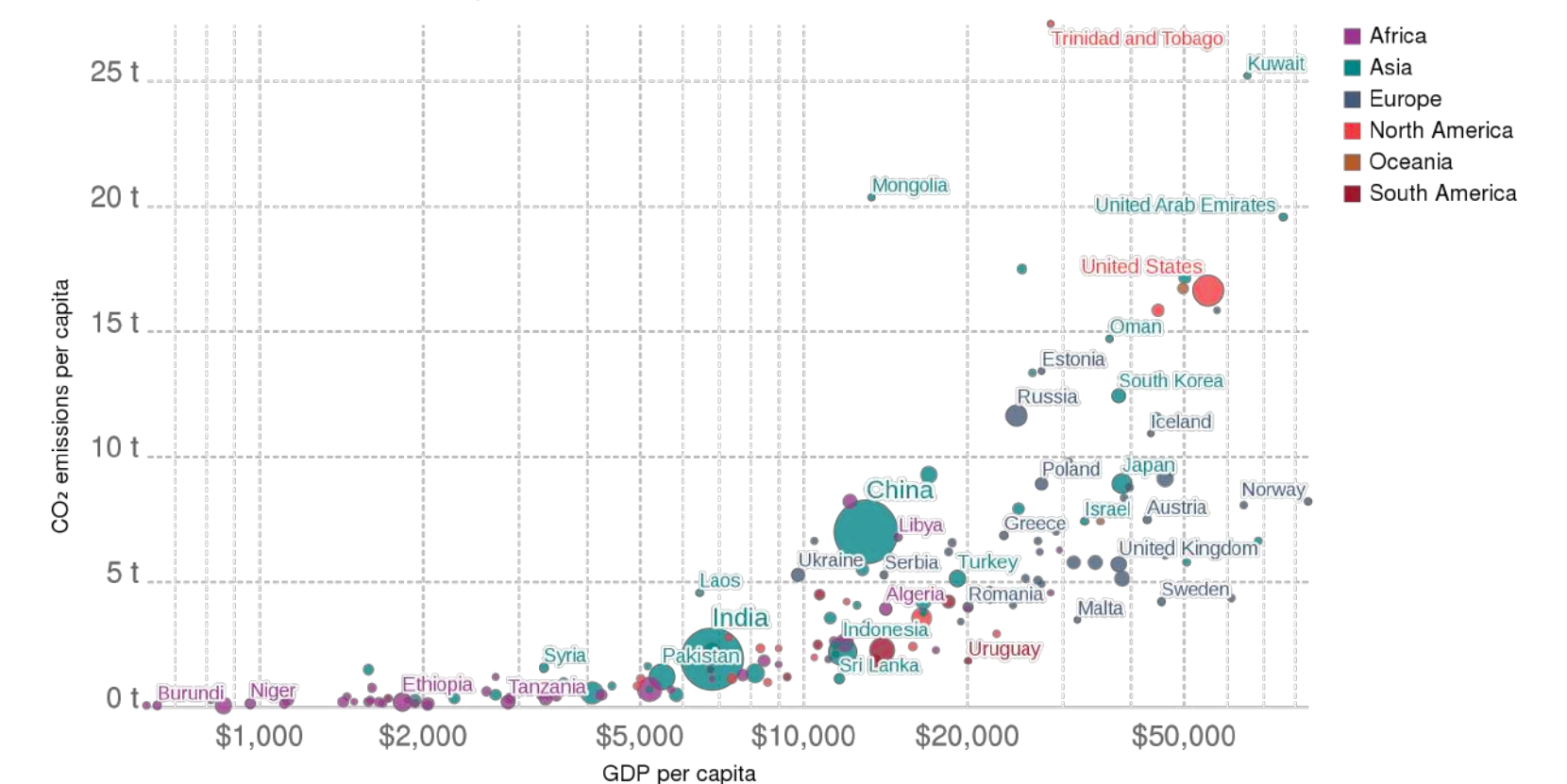
Estimation de la population de 2 000 avant J.-C. à aujourd'hui (en milliards d'habitants)



Source: Gapminder, Hyde, Nations Unies. Données compilées par Our World in Data
Crédit : franceinfo

CO₂ emissions per capita vs GDP per capita, 2018

This measures CO₂ emissions from fossil fuels and cement production only – land use change is not included. Gross domestic product (GDP) per capita is measured in international-\$ in 2011 prices to adjust for price differences between countries and adjust for inflation.



Source: Global Carbon Project; Maddison Project Database 2020 (Bolt and van Zanden (2020))



Sixième partie:

Détail des émissions
carbone

Remarque sur les unités

Pré-fixes:

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W} = 1\ 000 \text{ W}$$

$$1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W} = 1\ 000\ 000 \text{ W}$$

$$1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W} = 1\ 000\ 000\ 000 \text{ W}$$

$$1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000 \text{ W}$$

Energie (= accumulation de puissance):

Unité de base: J

Définition: $1 \text{ J} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$

Puissance (= flux d'énergie):

Unité de base: W

Définition: $1 \text{ W} = 1 \text{ J}/\text{s}$ (donc une puissance de 1 W pendant 1s c'est une énergie de 1 J)

Variante pour l'énergie: le kWh

Définition: $1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW}$ pendant 1h = 1 kW pendant 3600 s = 3600 kJ = 3,6 MJ

Variante pour la puissance: le kWh/an

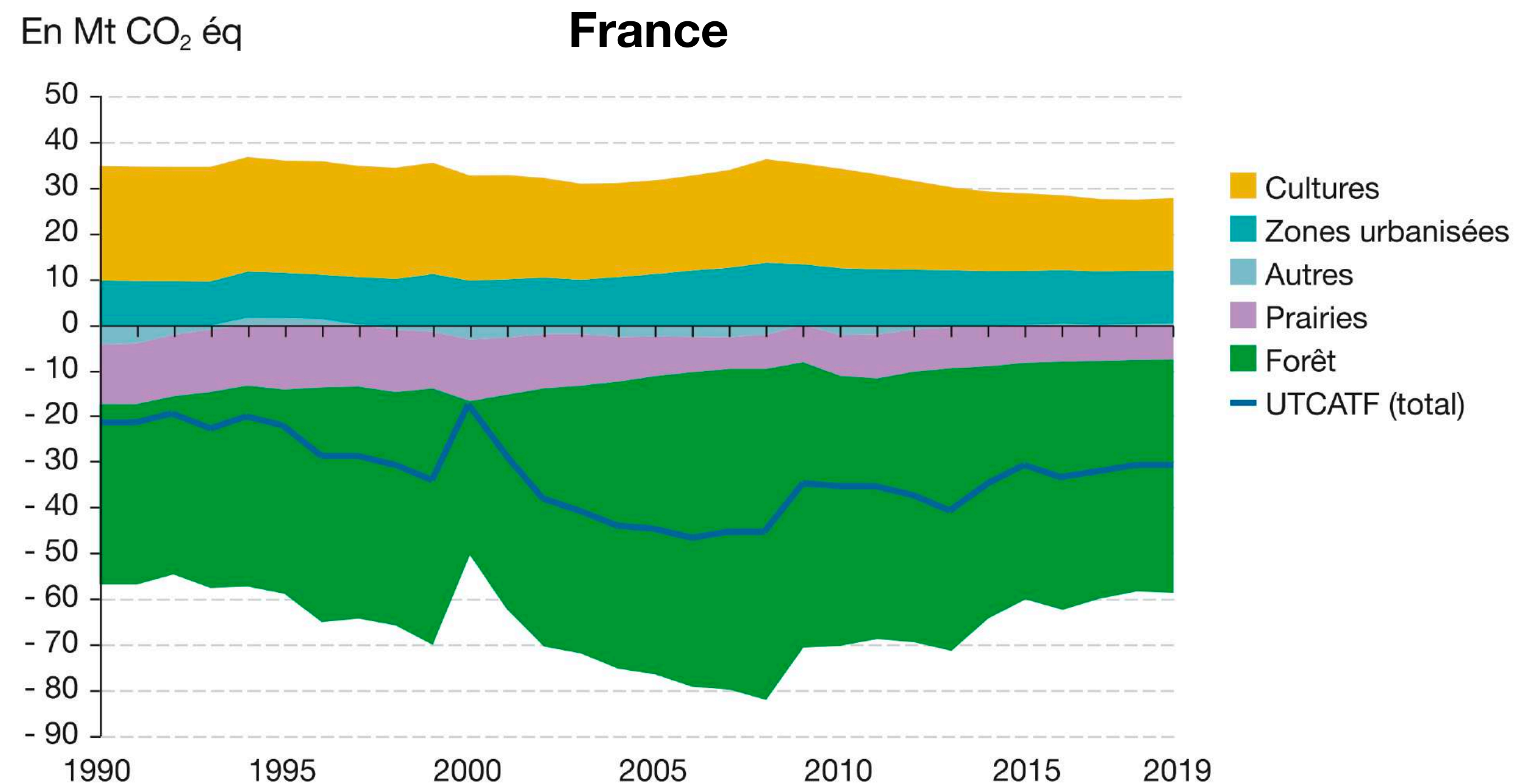
Définition: $1 \text{ kWh}/\text{an} = 1 \text{ kWh}$ sur 1 an = 1 kWh sur 8760 h = $\frac{1}{8760} \text{ kWh}$ sur 1 h = $\frac{1}{8760} \text{ kW}$

Ainsi, $1 \text{ GWh}/\text{an} \approx 114 \text{ W}$

Neutralité carbone

Les forêts constituent des puits de carbone: ils stockent du CO₂ dans la terre. Leur contribution au réchauffement climatique est donc négative: cf. à droite pour la France.

Atteindre la **neutralité carbone**, cela ne signifie pas ne plus émettre de gaz à effet de serre, mais d'en émettre suffisamment peu pour être compensé par les puits de carbone comme les forêts.



Quelques ordres de grandeur

Empreinte carbone d'un pays

Définition: émission carbone tenant compte des importations et exportations.

Empreinte carbone d'un produit (= en cycle de vie)

Définition: émission carbone en prenant en compte la fabrication et le recyclage

Puissance d'un homme: 100 W = 2000 kCa/jour

Puissance d'un réacteur nucléaire: 1 GW = 10^{12} W

Objection d'émission carbone pour atteindre la neutralité: 2 tCO₂eq/an/personne

En France

Consommation d'énergie: 300 GW

Par personne: 5000 W/personne

Empreinte carbone: 10 tCO₂eq/an/personne

Il faut baisser de 80%

Dans le monde

Consommation d'énergie: 12 000 GW

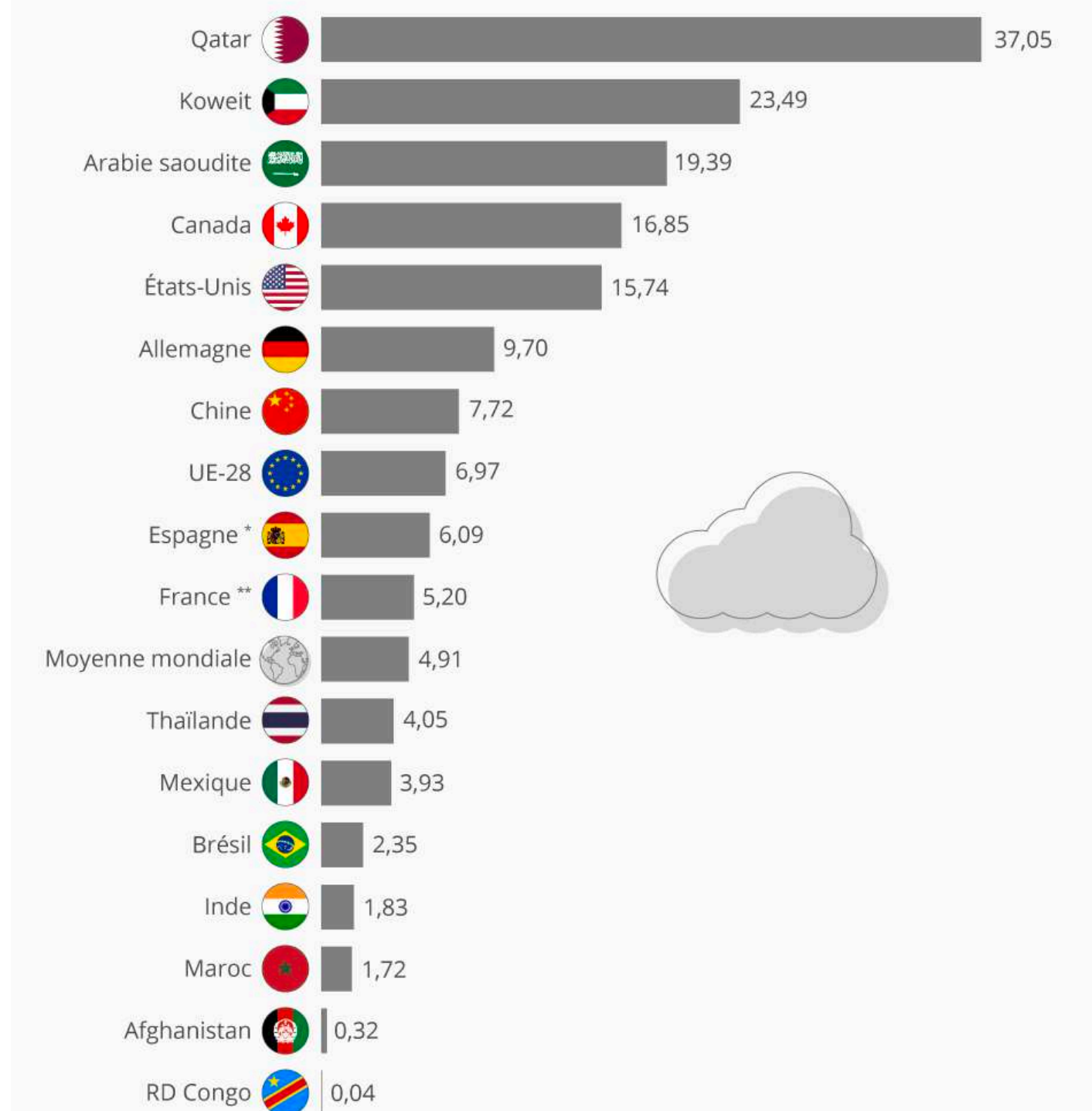
Par personne: 1500 W/personne

Empreinte carbone: 5 tCO₂eq/an/personne

Il faut baisser de 40%

Les émissions de CO₂ par habitant à travers le monde

Émissions de CO₂ par habitant dans une sélection de pays en 2017 (en tonnes)



CC BY ND
@Statista_FR

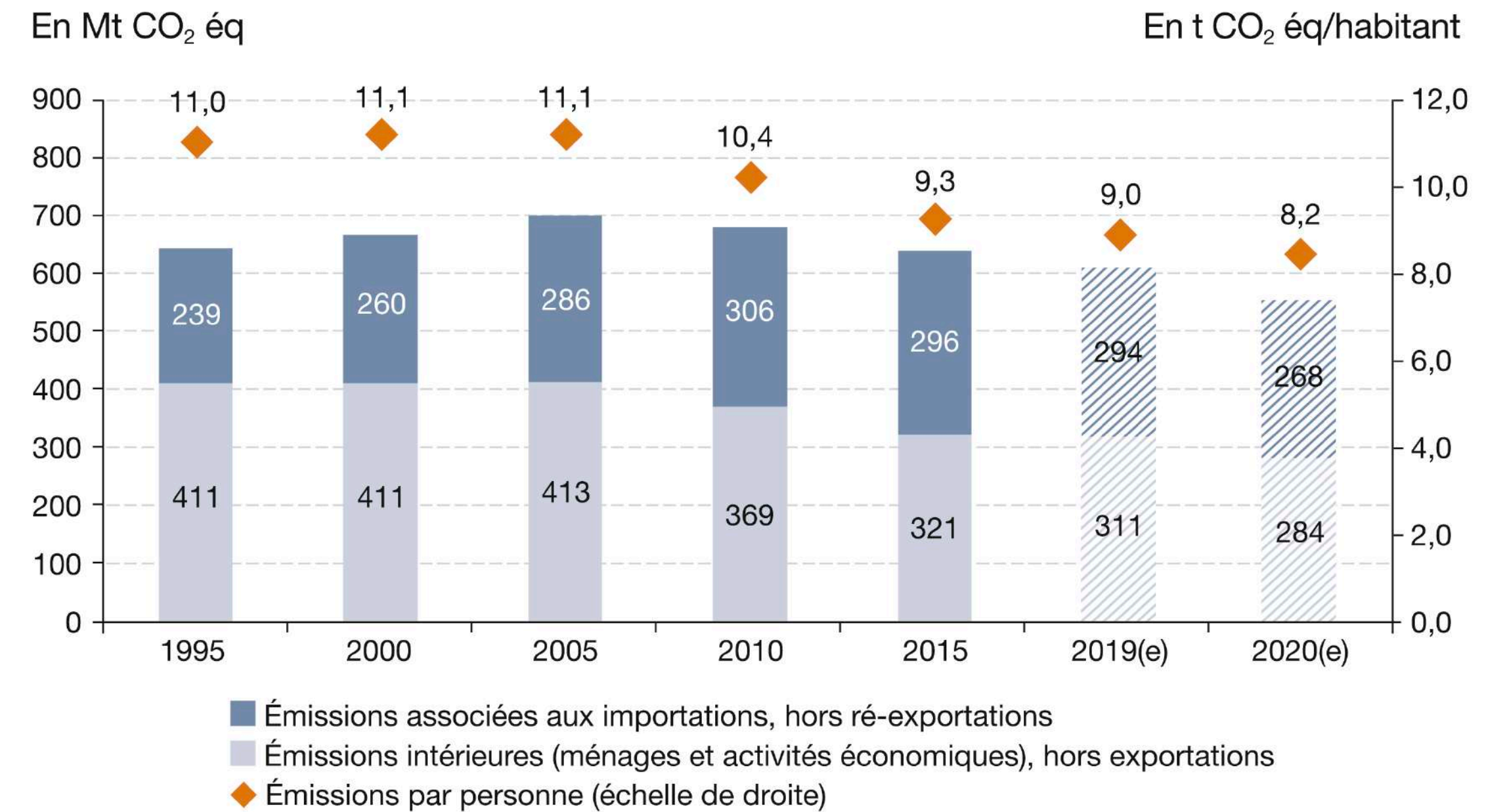
* incluant Andorre.
** France métropolitaine incluant Monaco.
Source : Commission européenne

statista

Evolution des émissions

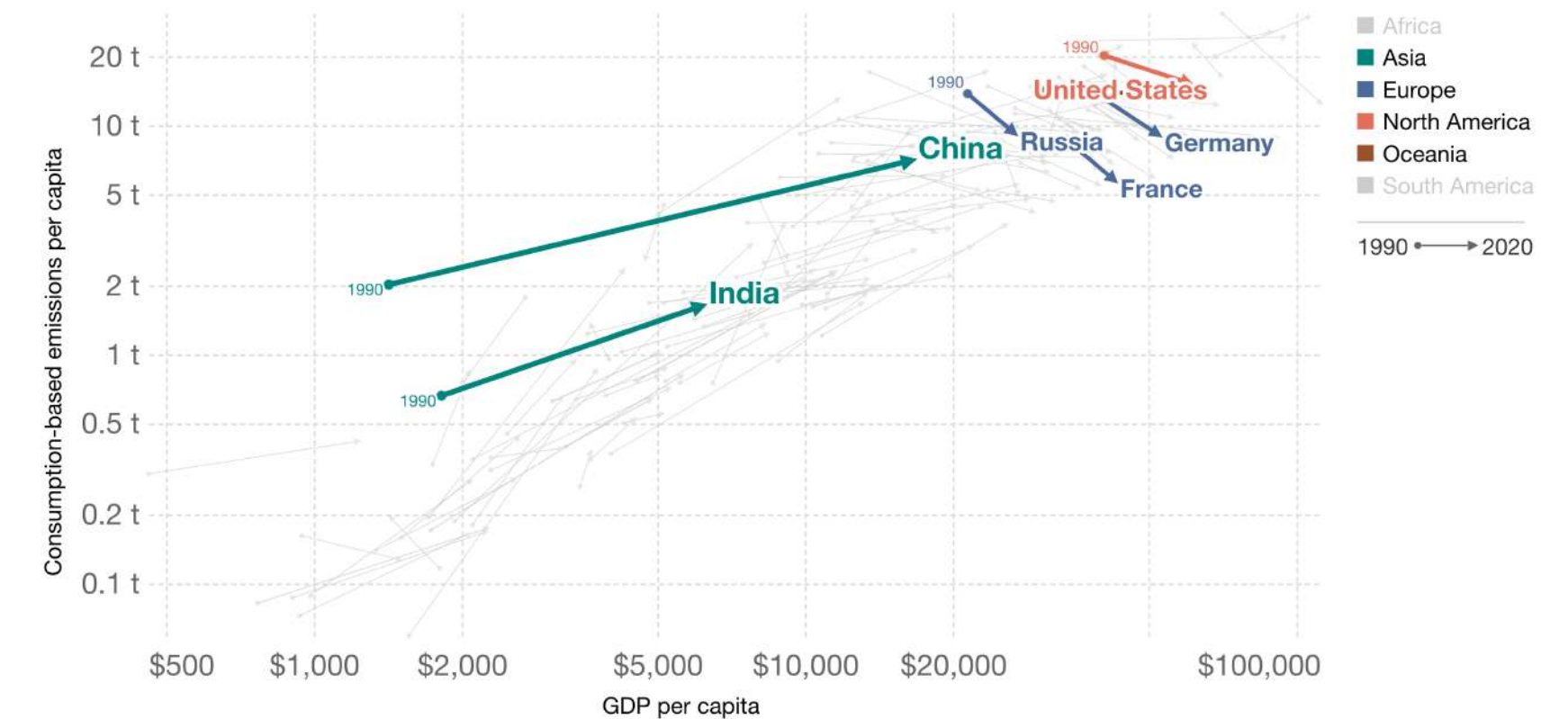
En France, l'impact carbone baisse, mais lentement (cf. en haut). L'augmentation des importations compense la majorité de la baisse des émissions intérieures. La situation est similaire dans la plupart des pays occidentaux.

En revanche, les pays émergents s'enrichissent rapidement et leur émissions carbone augmente avec. Au total, les émissions mondiales de carbone continuent donc d'augmenter.



Consumption-based CO₂ emissions per capita vs. GDP per capita, 1990 to 2020

– Consumption-based emissions¹ are national emissions that have been adjusted for trade. It's production-based emissions minus emissions embedded in exports, plus emissions embedded in imports.
 – GDP per capita is adjusted for price differences between countries (PPP) and over time (inflation).



Source: Global Carbon Budget (2022); Gapminder (2022); UN (2022); HYDE (2017); Gapminder (Systema Globalis), Data compiled from multiple sources by World Bank
 OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions • CC BY

1. Consumption-based emissions: Consumption-based emissions are national or regional emissions that have been adjusted for trade. They are calculated as domestic (or 'production-based' emissions) emissions minus the emissions generated in the production of goods and services that are exported to other countries or regions, plus emissions from the production of goods and services that are imported. Consumption-based emissions = Production-based – Exported + Imported emissions

Détail des émissions par secteur

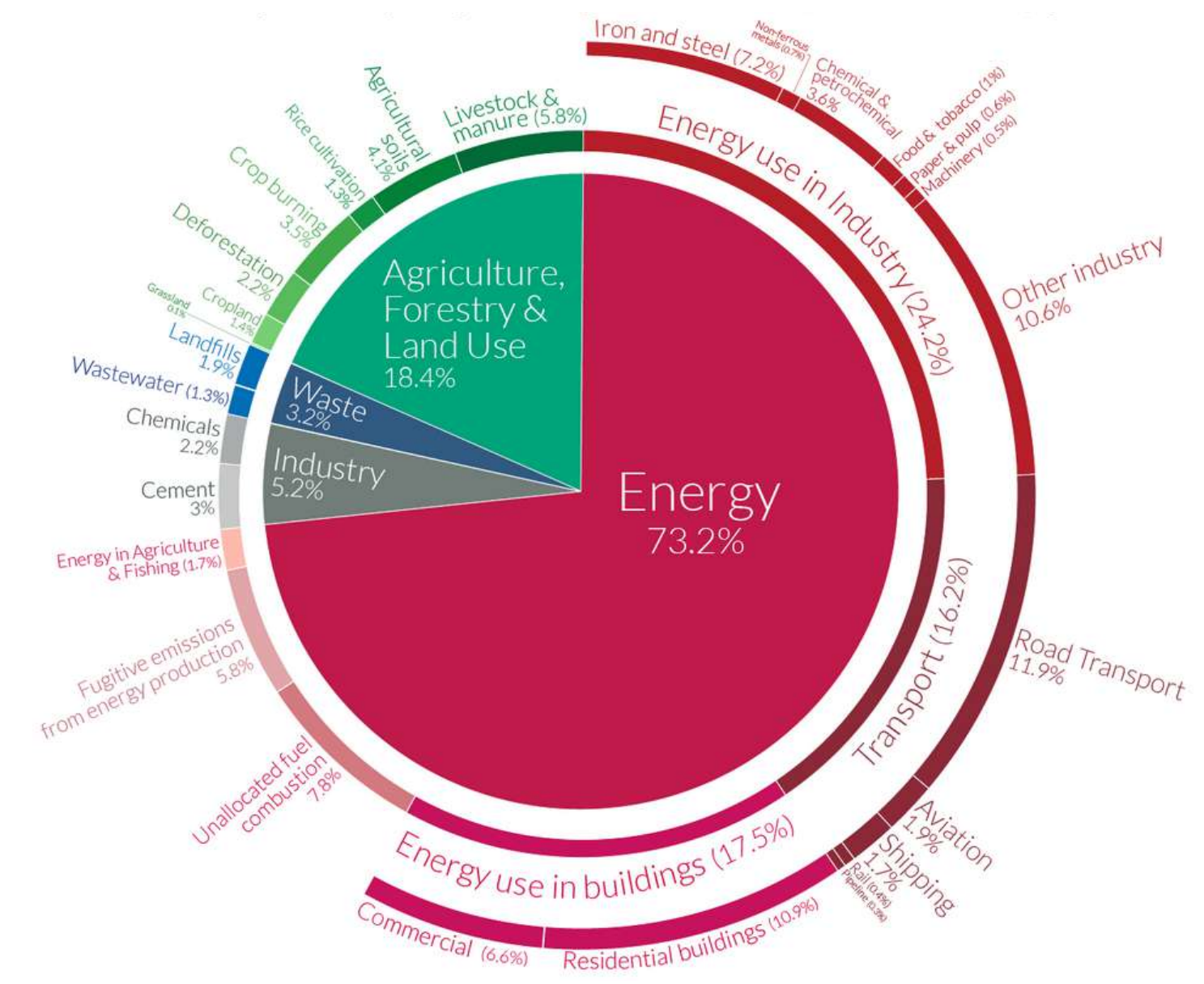
Les 3/4 des émissions de CO₂eq dans le monde viennent de la combustion d'énergie. C'est cette partie que nous allons étudier plus en détail grâce à la physique. Le reste vient essentiellement de la gestion des terres et de l'agriculture, qui seront plutôt étudiés par les biologistes.

Les principaux domaines d'émission sont les suivants :

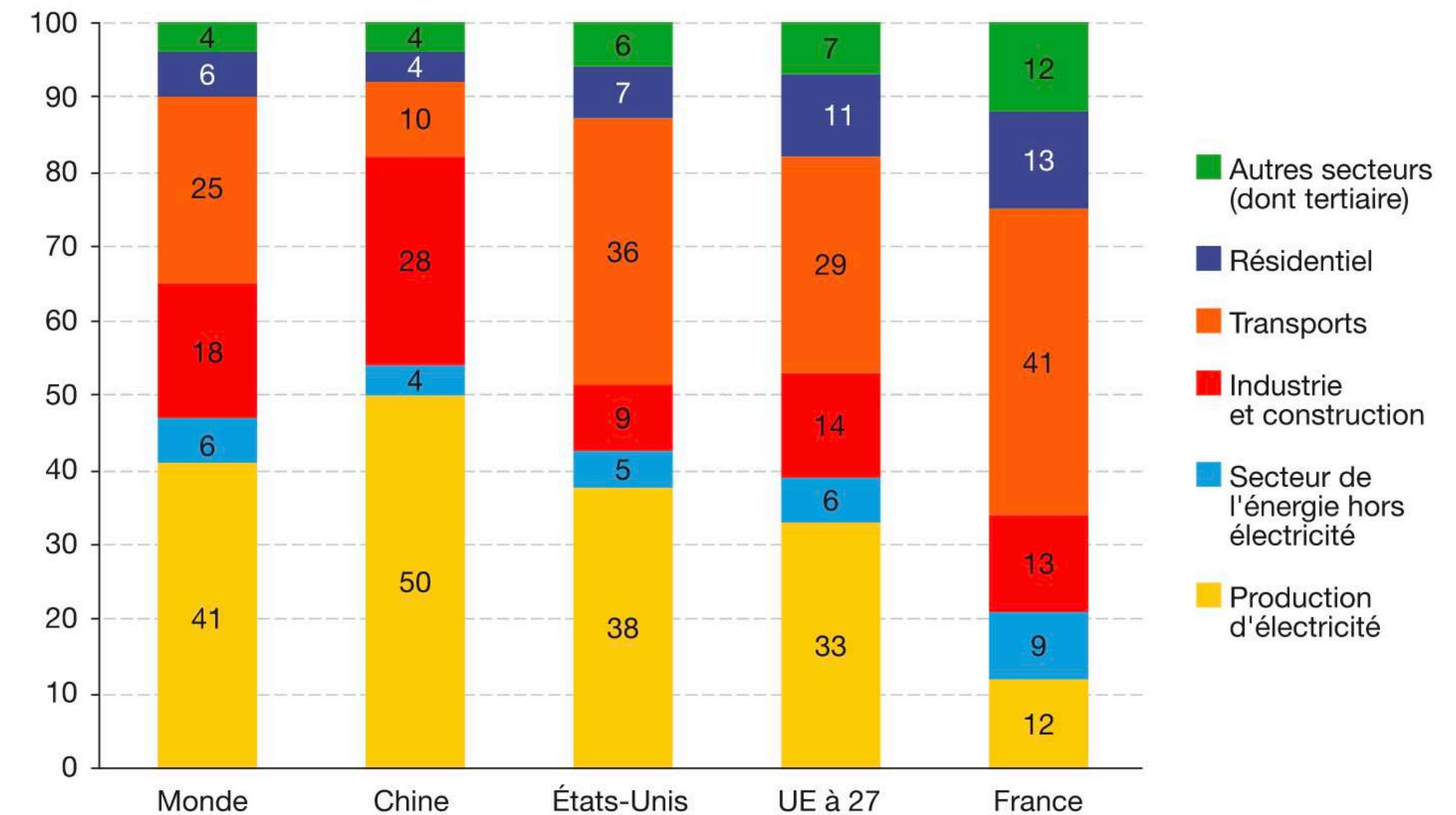
- **Production d'électricité**: 40% dans le monde, 10% en France
- **Industrie** (au sens large): 20% dans le monde, 15% en France
- **Transports** (essentiellement routier): 25% dans le monde, 40% en France
- **Résidentiel & Tertiaire** (le chauffage): 10% dans le monde, 25% en France

Quelques remarques:

- Dans le monde le premier poste est de loin la production d'électricité. En France celle-ci est assez décarbonée grâce au nucléaire, d'où sa contribution plus faible.
- Les transports sont essentiellement l'effet des voitures thermiques individuelles (pour 45%) et des camions (pour 30%). L'avion et les transports de marchandises par la mer représentent tous deux 10% des émissions des transports.
- En France, le premier poste d'émission, ce sont donc les véhicules thermiques.



ORIGINE DES ÉMISSIONS DE CO₂ DUES À LA COMBUSTION D'ÉNERGIE EN 2018
En %



Source : AIE, 2020

Questions!

Quelques références pour aller plus loin:

Tous les rapports du GIEC (IPCC)

<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

Futurs énergétiques 2050 (RTE)

<https://rte-futursenergetiques2050.com/>

Bilan énergétique de la France pour 2020 (Ministère de l'Ecologie)

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-energetique-2020/>

Vulgarisation scientifique: Le Réveilleur

<https://lereveilleur.com/>

Association écologiste scientifiquement pertinente:
The Shift Project

<https://theshiftproject.org/>

Influenceur écologiste scientifiquement pertinent:

Jean-Marc Jancovici

<https://jancovici.com/>

Livre: *L'énergie durable — Pas que du vent !* (MacKay)

http://www.inference.org.uk/sustainable/book/translate/french/sewtha_20111001_lowres.pdf



Prochain cours:
Physique du climat 2
*La physique des solutions au
réchauffement climatique*