

UE Energie – Climat - Société

LU2PY125

Cours du Lundi

énergie



climat



Guillaume Ferlat

Institut de Minéralogie,
Physique des Matériaux,
et Cosmochimie (IMPMC)

Jean-Baptiste Madeleine

Laboratoire de Météorologie
Dynamique (LMD)

Enseignant.e.s de TD : Arnaud Raoux, Pierre Guillard, Pauline Yzombard, G. F.

UE Energie – Climat - Société

LU2PY125

Cours du Mardi

énergie



Laurent Coolen

Institut des NanoSciences
de Paris (INSP)

climat



Aymeric Spiga

Laboratoire de Météorologie
Dynamique (LMD)

Enseignant.e.s de TD : Delphine Hardin, Jean-Baptiste Madeleine, Laurent Coolen

UE Energie – Climat - Société

LU2PY125

Semaine du 25-29 septembre Limites planétaires

Semaine du 2-6 octobre

Semaine du 9-13 octobre

Semaine du 16-20 octobre

Semaine du 23-27 octobre

Climat

Energie

TD

Semaine du 30 octobre au 3 novembre : arrêt des enseignements

Mardi 7 novembre (14h - 15h15) : **Contrôle Continu à mi-parcours (1h15)**

Semaine du 13-17 novembre

Semaine du 20-24 novembre

Semaine du 27 nov.-1^{er}déc.

Energie

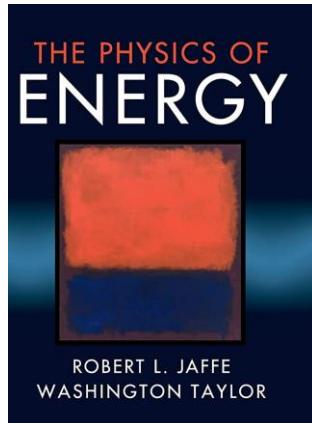
TD

Fin décembre ou début janvier : **CC de cohorte**

Modalité d'évaluation : 35 % x (mi-parcours) + 65 % x (cohorte)

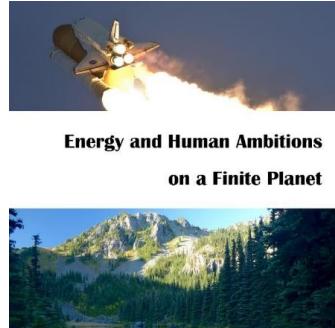
UE Energie – Climat - Société

Ouvrages utilisés pour ce cours [pas forcément à lire pour vous]



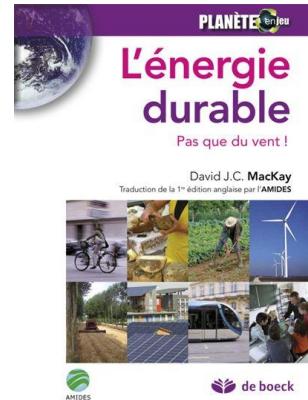
The Physics of Energy,
Jaffe & Taylor
(Cambridge 2018)

Toute la Physique vue sous l'angle de l'énergie !
Superbe ouvrage (850 p.).



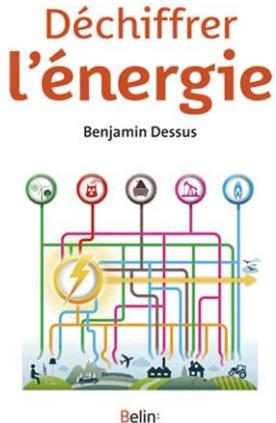
Energy and Human Ambitions on a Finite Planet, Murphy
(Open Textbook Library 2021)

Synthétique (donc moins complet que Jaffe & Taylor).
Tonalité inquiète assumée.



Sustainable energy without the hot air, traduction française :
[l'énergie durable, pas que du vent](#), MacKay (2009)

Démarche de physicien (ordres de grandeur).
Intéressant mais un peu daté.



Déchiffrer l'énergie,
Dessus (Belin 2016)

Ingénieur ADEME. Complément des autres (usages sociétaux, bilans nationaux).

+ cours similaires donnés par de nombreux collègues **ici remerciés** :

G. Charron, G. Blanc, G. Roux, R. Lehoucq, A. Le Tiec, A. Tantet

+ cours de Jancovici (Mines 2019), cours de l'école ECOCLIM (2023), Hugues Charles (INSA)

+ GIEC, IPBES, RTE, ADEME, OurWorldinData, wikipedia ...

Comment exploiter les transparents ?

**Quelques repères pour vous aider à hiérarchiser
les informations données dans ce cours :**

- 3 « niveaux » d'importance sont indiquées par un code en haut à droite :
N1 : contient des notions fondamentales, au cœur de l'UE (ça tombera sûrement à l'examen ...)
N2 : notions intermédiaires (ça pourrait tomber à l'examen ...)
N3 : pour votre culture générale (car y'a pas que l'examen dans la vie ...).
- Les formules ou les définitions les plus importantes sont encadrées (avec un code couleur noir – bleue – rouge, par importance croissante). Les valeurs numériques à savoir (transparents N1 ou N2) sont en gras. Ex. : émissions mondiales annuelles : **50 Gt CO₂eq.**
- Lorsqu'un mot est en italique et surmonté du symbole *t*, une définition vous est donnée dans le Glossaire (en fin de document). Exemple : *Holocène^t*.

[Facultatif] En bas à gauche : lien cliquable vers la référence scientifique dont sont extraites les figures ou les données principales (dans la mesure du possible, le texte et les légendes sont traduites en Français). Ces liens sont donnés à titre d'information ; il n'est absolument pas demandé de les lire.

[Facultatif] En bas à droite : lien cliquable vers une référence ou un média qui prolonge le thème. Donné au titre de la curiosité, il n'est absolument pas requis de les consulter.

UE Energie – Climat - Société

Motivations et objectifs

- Qu'est-ce que l'énergie ?
- Quels sont les flux d'énergie dans le système terrestre ?
- Comment l'énergie est-elle utilisée par les humains ?
- Quelles sont les limites physiques sur les quantités disponibles ?

Les principes de la Physique mettent non seulement des **limites sur les quantités disponibles** de certaines sources mais aussi sur **l'efficacité dans les conversions** d'une forme d'énergie vers une autre.

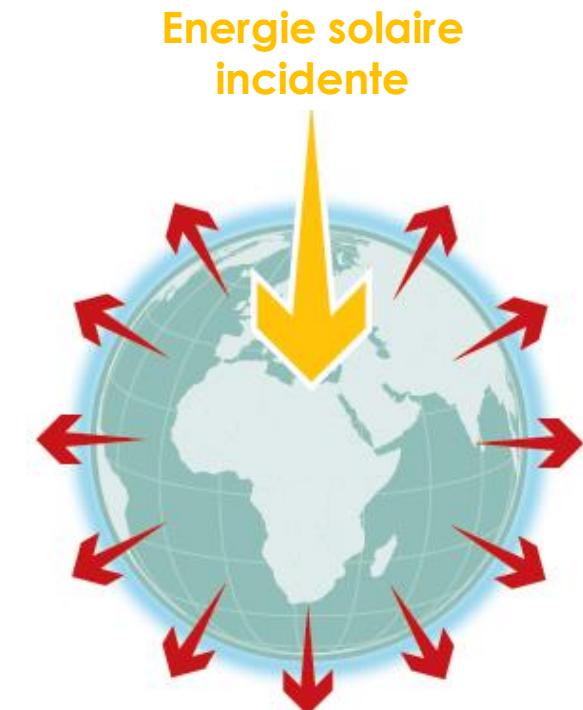
Par ailleurs, les problèmes évoqués ici (limites planétaires) résultent de déséquilibres faisant intervenir des notions de **stock, flux et bilans** (énergie ou matière).

Compréhension de base de la physique qui sous-tend ces sujets ; développer une vision globale ; raisonner en ordre de grandeur ; évaluer quantitativement les systèmes énergétiques

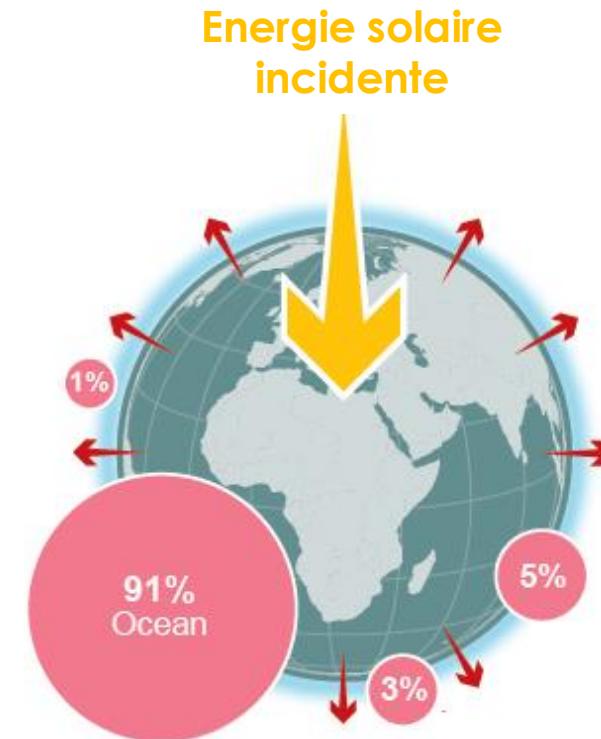
Motivation (1): Le budget énergie de la Terre

Un (dés)équilibre de flux

Climat stable : à l'équilibre



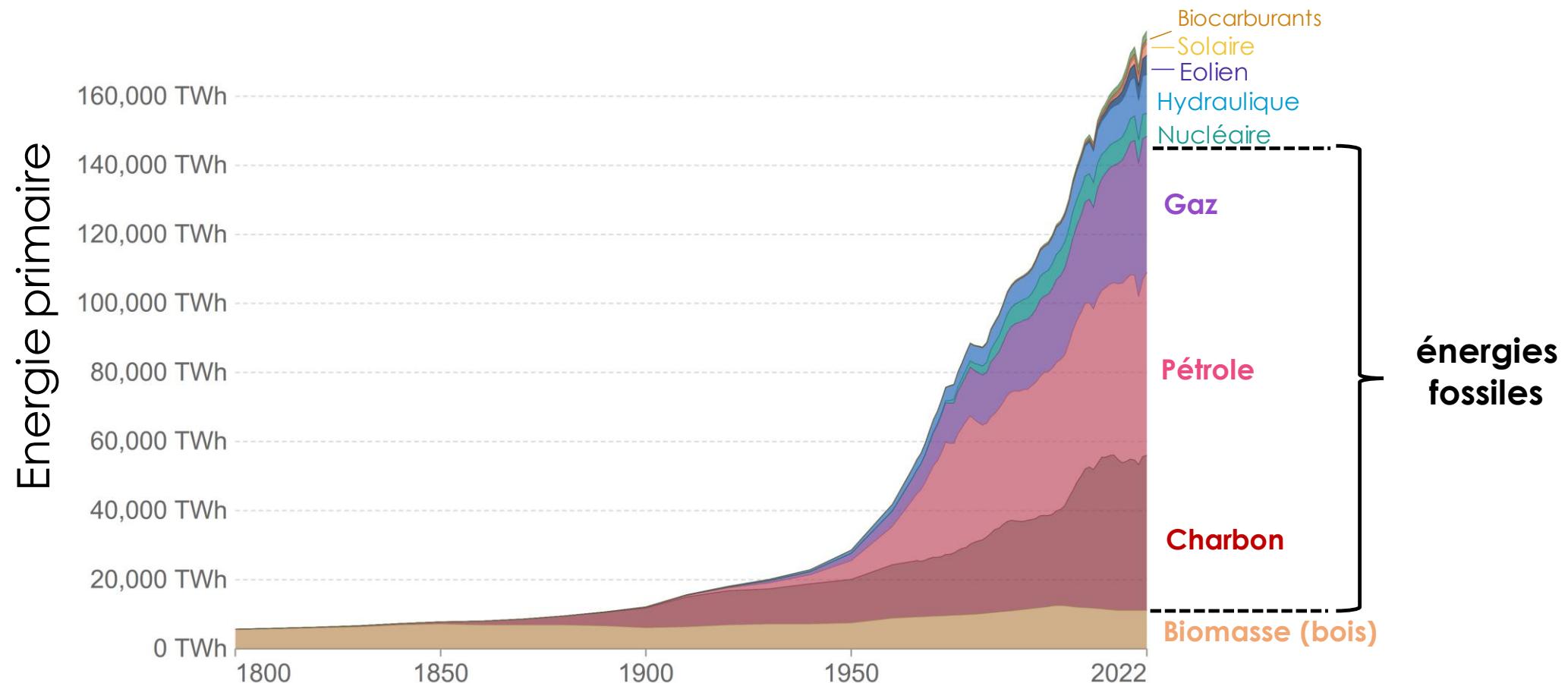
Aujourd'hui : hors-équilibre



Depuis les années 1970 au moins, il y a un déséquilibre persistant des flux d'énergie (il sort moins d'énergie qu'il n'en entre), conduisant à un excès d'énergie absorbée par différentes composante du système climatique (les océans, les terres, la glace et l'atmosphère).

Motivation (2): les enjeux de la transition énergétique

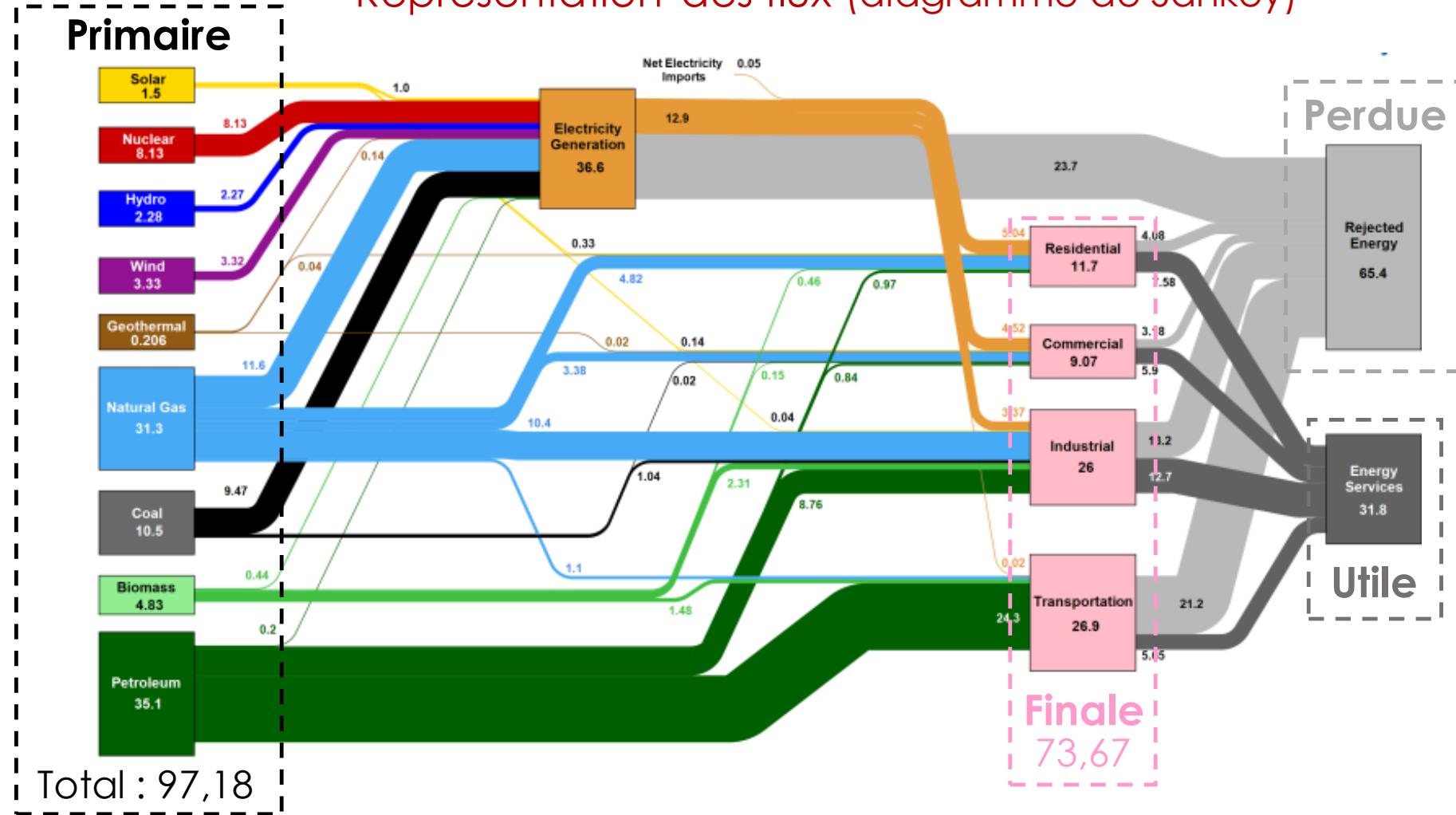
Consommation mondiale d'énergie primaire



Le système énergétique actuel est insoutenable car **trop carboné** (80+ %) et basé sur des **ressources finies** (85+ %). Il est par ailleurs **inefficient** (beaucoup de pertes).

Motivation (3) : Les flux d'énergie dans la Société

Représentation des flux (diagramme de Sankey)



Consommation d'énergie U. S. en 2021 : 97.1 Quads = $97.1 \times 1.055 \times 10^{18}$ J ~ 100 exajoules

Cours d'aujourd'hui : Anthropocène & limites planétaires

Motivation

La « crise écologique » actuelle est complexe^t, systémique^t, et prend de nombreuses formes : réchauffement climatique, pollutions chimiques, chute de la biodiversité, ...

La transition écologique ne se limite pas à une transition énergétique.

Plan de cours

- **L'Anthropocène** (introduction) et la grande accélération.
- **Les limites planétaires.**

Focus sur 4 de ces limites : - **Le changement climatique** et ses conséquences,
- **L'acidification des océans,**
- **Le cycle biogéochimique de l'azote,**
- **La chute de la biodiversité.**

- [Non traité en séance] Notions de non-linéarité, rétroaction et points de bascule.

Anthropocène

- Apparition du vivant : 3,7 milliards d'années ;
Apparition du genre Homo : ~ 3 millions d'années ;
de l'espèce Homo sapiens : 300 000 années
Période géologique actuelle : Holocène

L'humain modifie son environnement depuis (au moins) 10 000 ans (sédentarisation, agriculture, élevage) [il se trouve que ça correspond au début de l'*Holocène*^t].

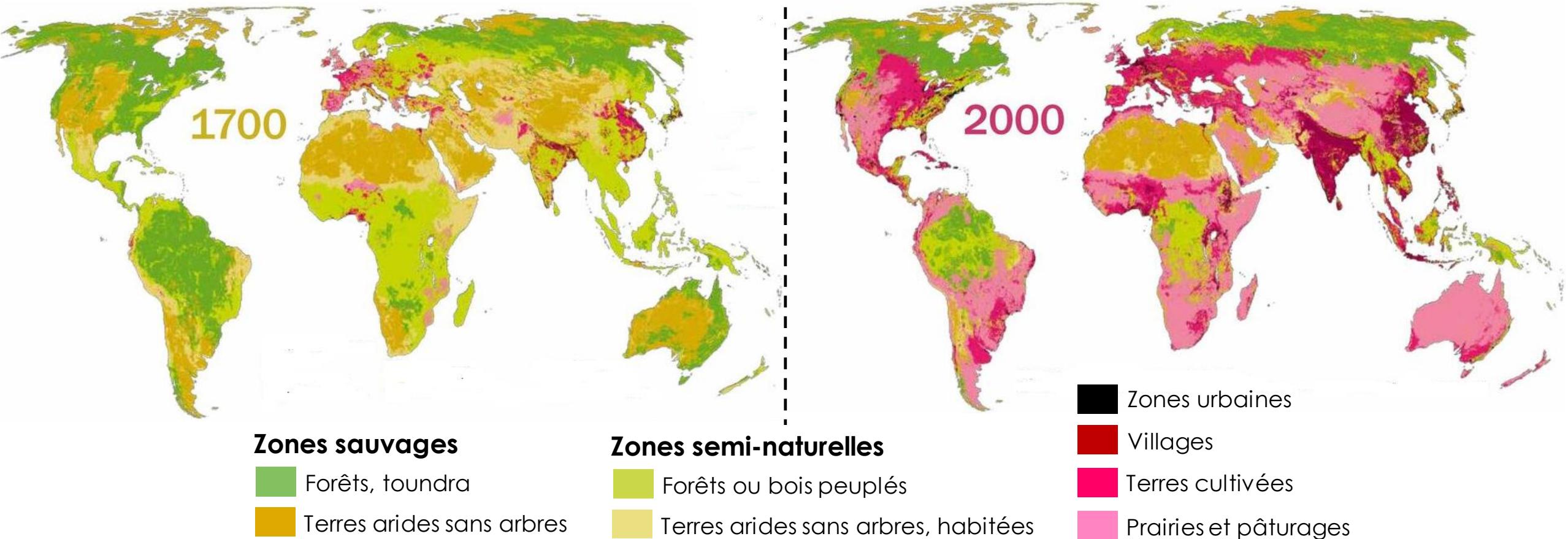
Depuis 2 siècles : révolutions industrielles. Découplement des usages de l'énergie (essentiellement fossile) et des matériaux, via les machines. Accélération des modifications de l'environnement.

Anthropocène (« période de l'humain ») : proposition récente de nouvelle époque géologique qui débute quand **l'influence de l'humain** sur la géologie et les écosystèmes est devenue **significative à l'échelle de la Terre et de son histoire**.

A ce stade, il s'agit d'un concept pour caractériser les 250 dernières années. Sa possible « officialisation » (dans la communauté des géologues) est en cours (points de débat : date du début de cette époque, marqueur géologique, lieu de référence) : on acterait alors le passage de l'*Holocène* à l'*Anthropocène*.

Anthropocène

De la pression sur l'usage des terres



De 1700 à 2000 : les zones inhabitées reculent, les forêts déclinent

Anthropocène

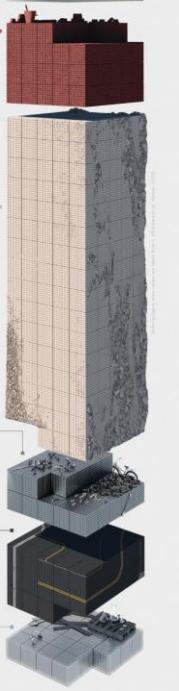
1154 Gt

Massé anthropogénique
Total créé entre 1900 et 2020



549 Gt Béton

Matériau le plus utilisé
dans la construction
2^e substance la plus
utilisée après l'eau



92 Gt Brique

~ 1500 milliards de briques
par an (85 % en Asie)

386 Gt Agrégats

Sable, gravier, argile,
pierre, stériles ...
Matériaux miniers les
plus extraits.

39 Gt Métaux

Plus utilisé : Fer (acier)

65 Gt Asphalte

23 Gt Autres

Bois, verre, plastique ...

Production de matériaux

Biomasse globale

Massé sèche de toute
la vie sur terre (plantes,
bactéries, animaux ...)

1120 Gt



**En 2020, la masse de matériaux produits par l'humain
excède la masse de tous les êtres vivants (biomasse)**

Anthropocène

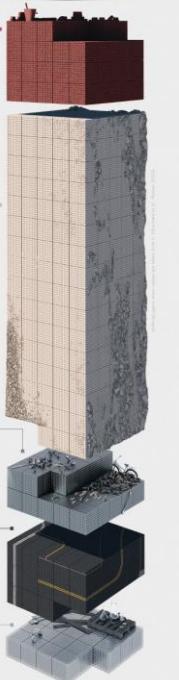
1154 Gt

Massé anthropogénique
Total créé entre 1900 et 2020



549 Gt Béton

Matériau le plus utilisé
dans la construction
2^e substance la plus
utilisée après l'eau



92 Gt Brique

~ 1500 milliards de briques
par an (85 % en Asie)

386 Gt Agrégats

Sable, gravier, argile,
pierre, stériles ...
Matériaux miniers les
plus extraits.

39 Gt Métaux

Plus utilisé : Fer (acier)

65 Gt Asphalte

23 Gt Autres

Bois, verre, plastique ...

Production de matériaux

En 2020, la masse de matériaux produits par l'humain excède la masse de tous les êtres vivants (biomasse)



Biomasse globale

Massé sèche de toute
la vie sur terre (plantes,
bactéries, animaux ...)

1120 Gt



Ensemble des animaux
~ 0,4 % biomasse

4 Gt



Anthropocène

1154 Gt

Massé anthropogénique
Total créé entre 1900 et 2020



549 Gt Béton

Matériau le plus utilisé
dans la construction
2^e substance la plus
utilisée après l'eau

92 Gt Brique

~ 1500 milliards de briques
par an (85 % en Asie)

386 Gt Agrégats

Sable, gravier, argile,
pierre, stériles ...
Matériaux miniers les
plus extraits.

39 Gt Métaux

Plus utilisé : Fer (acier)

65 Gt Asphalte

23 Gt Autres

Bois, verre, plastique ...

Production de matériaux

**En 2020, la masse de matériaux produits par l'humain
excède la masse de tous les êtres vivants (biomasse)**

Taux actuel de matériaux produits : 30 Gt par an
(en croissance ~ 5,6 % par an).

Projection en 2040 : masse accumulée = trois fois biomasse

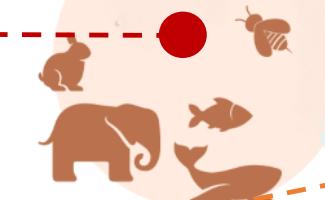


Humains
~ 0,01 % biomasse



Ensemble des animaux
~ 0,4 % biomasse

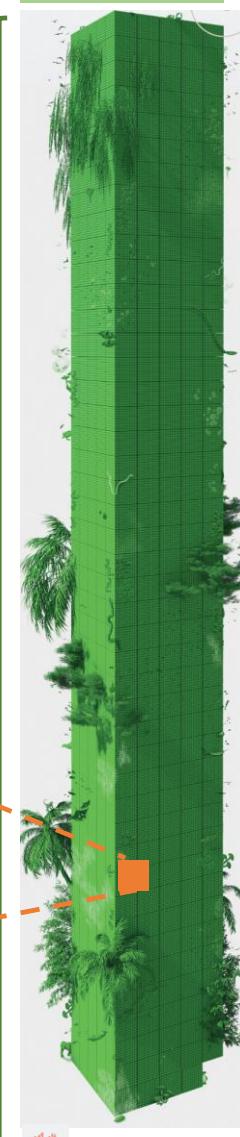
4 Gt



1120 Gt

Biomasse globale

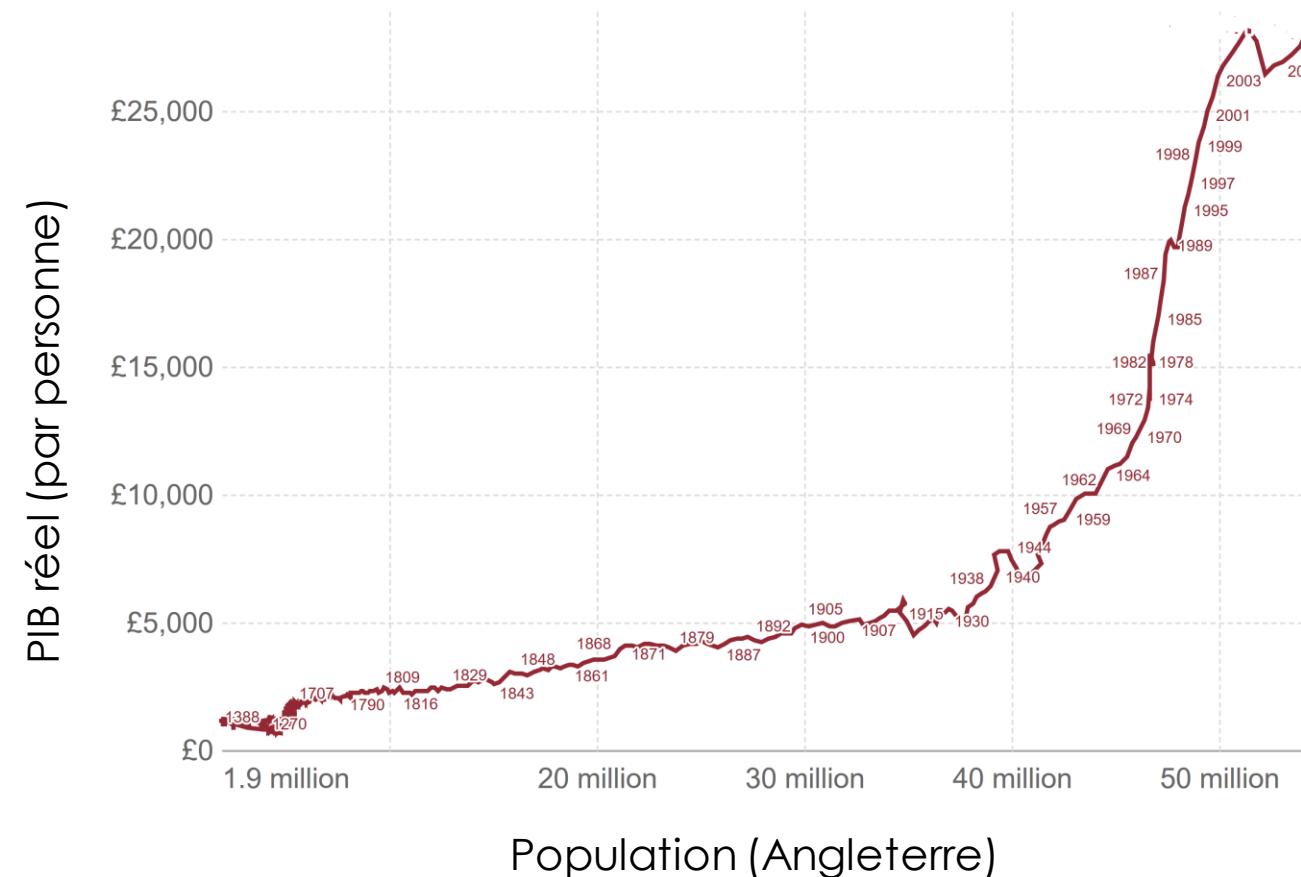
Massé sèche de toute
la vie sur terre (plantes,
bactéries, animaux ...)



Anthropocène

PIB et population

Evolution du Produit Intérieur Brut réel* par personne et de la population en Angleterre de 1200 à 2016



*PIB réel : PIB mesuré à prix constant

Anthropocène

Une envolée à partir de ~ 1945 : la Grande Accélération

Divers indicateurs de tendance (socio-économiques et géologie-environnement-climat) présentent un taux d'accélération spectaculaire (courbes exponentielles en général). Contexte d'intense mondialisation et d'accélération des progrès scientifiques, techniques et des communications.

Indicateurs de tendances socio-économiques

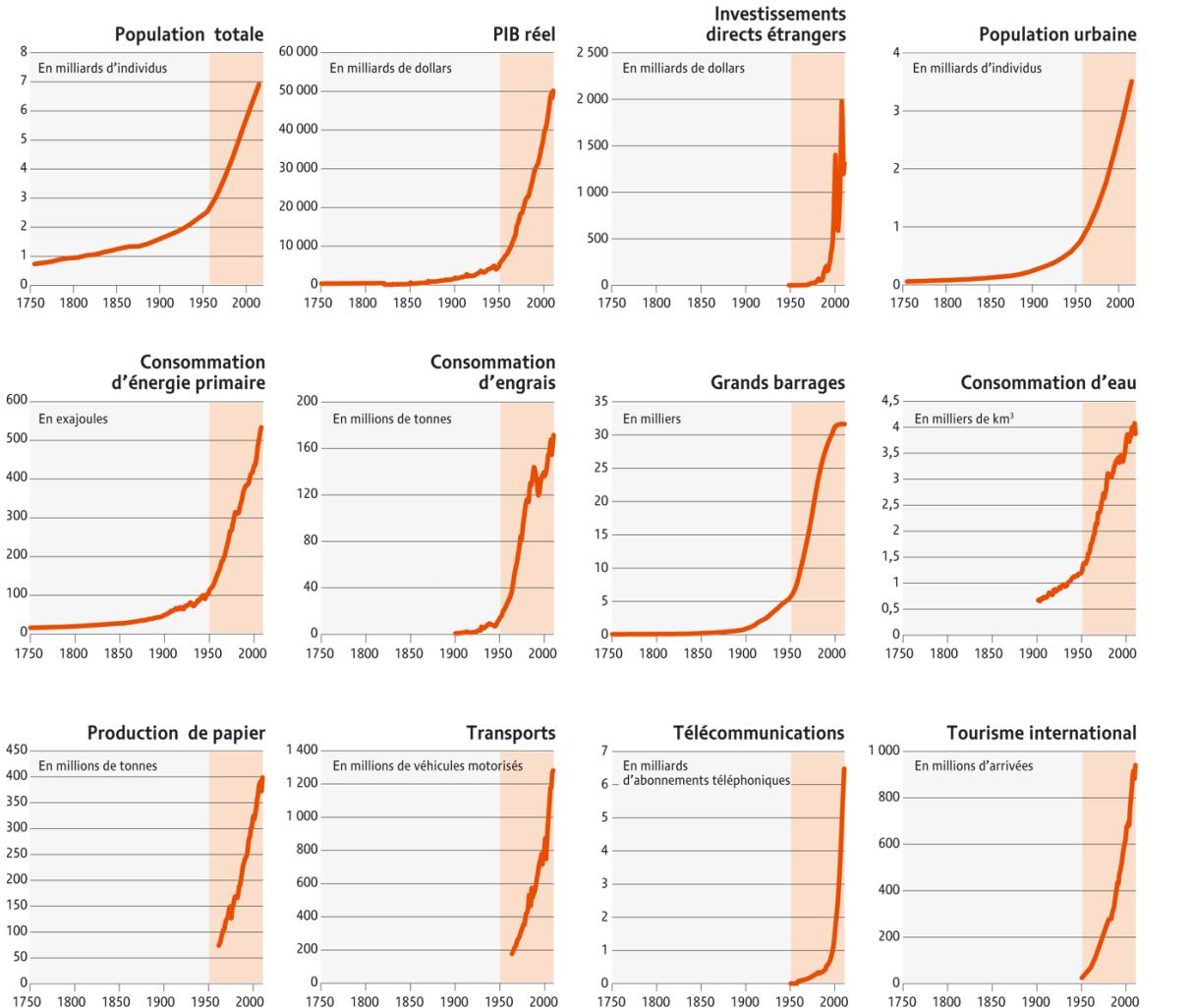
1. Population/démographie
2. PIB réel
3. Investissement étranger direct
4. Taux de population urbaine
5. Utilisation d'énergie primaire
6. Consommation d'engrais
7. Grands barrages
8. Utilisation d'eau
9. Production de papier
10. Transports
11. Télécommunications
12. Tourisme international

Indicateurs de tendance pour le système Terre

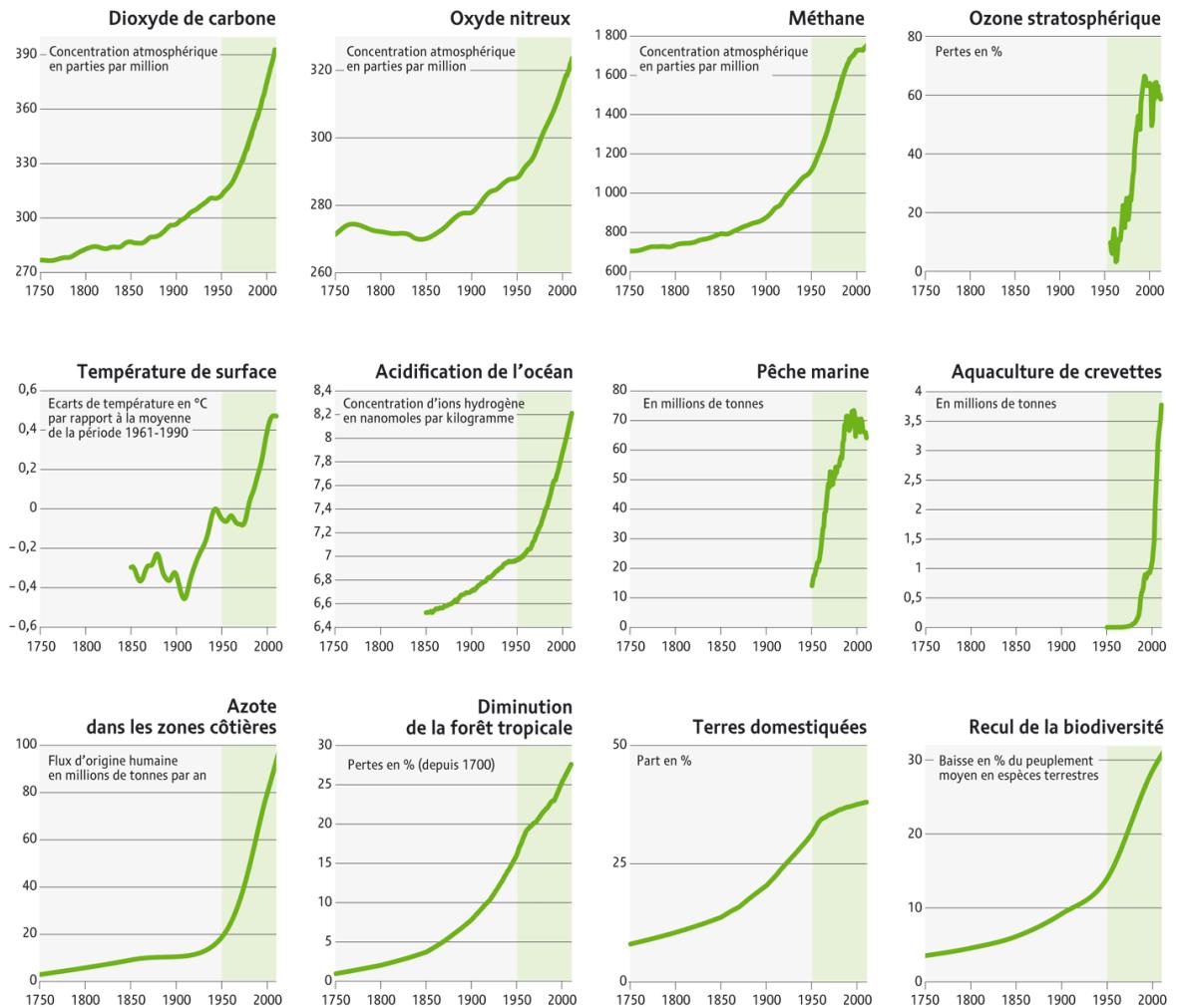
1. Gaz carbonique (CO_2)
2. Protoxyde d'azote (N_2O)
3. Méthane (CH_4)
4. Ozone stratosphérique
5. Température de surface
6. Acidification des océans
7. Surpêche (halieutique)
8. Aquaculture de crevettes
9. Azote en zone côtière
10. Déforestation en zone tropicale
11. Occupation du sol
12. Dégradation de la biosphère^t

Anthropocène [la Grande Accélération]

Développement socio-économique

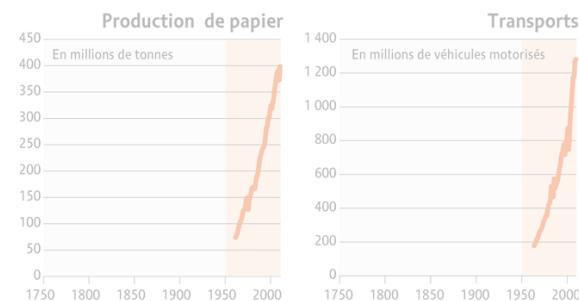
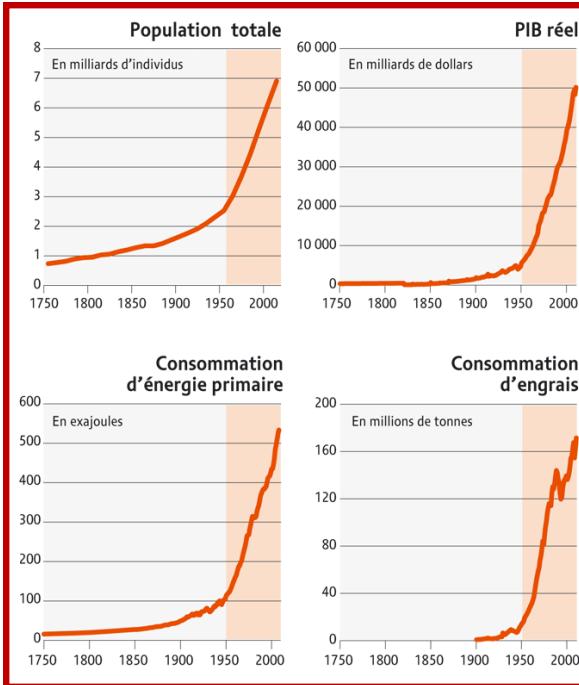


Evolution du système Terre

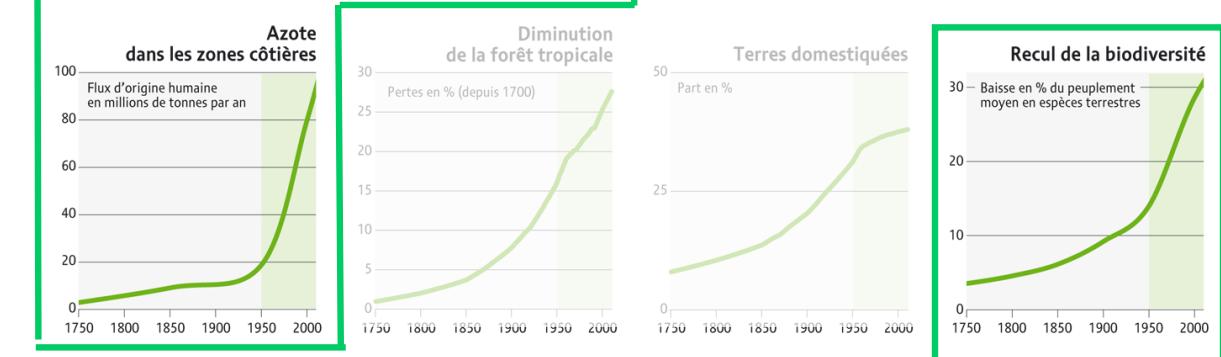
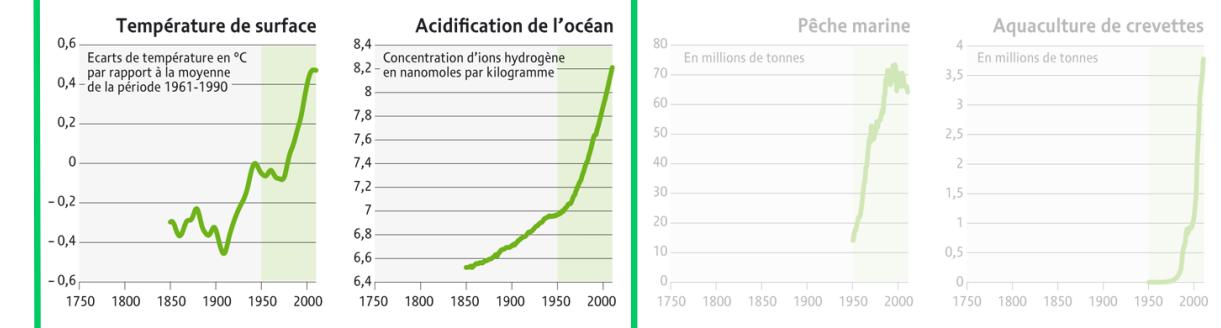
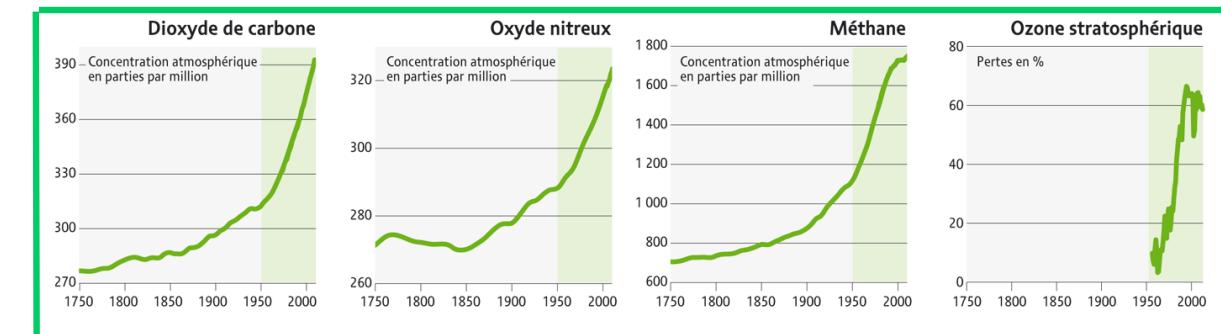


Anthropocène [la Grande Accélération]

Développement socio-économique



Evolution du système Terre



Limites planétaires

Considérer les dégâts que l'humanité se fait à elle-même

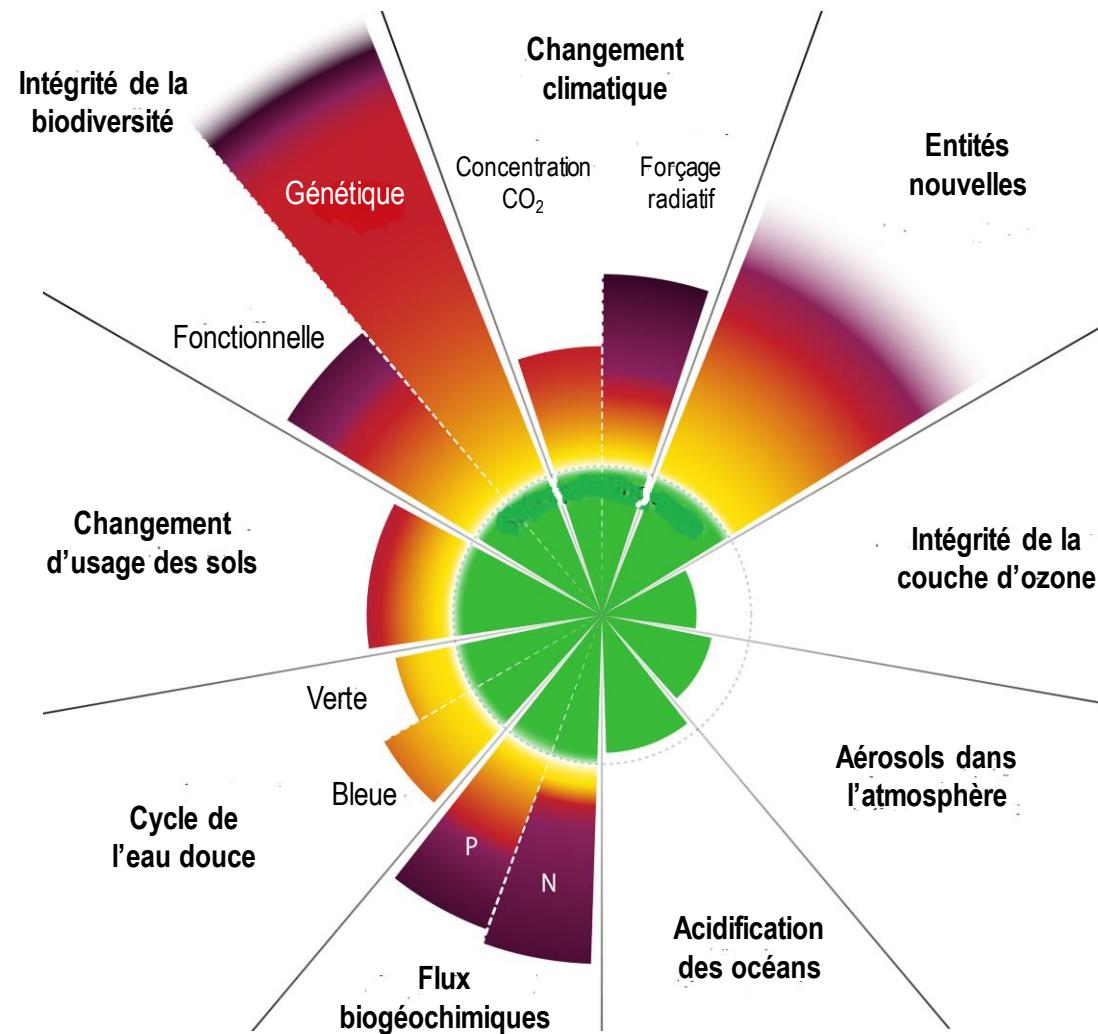
Limites planétaires : seuils quantitatifs à ne pas dépasser pour que l'humanité puisse vivre durablement dans un écosystème sûr (sans modifications soudaines/imprévisibles et potentiellement catastrophiques de l'environnement).

9 limites dont **6 déjà dépassées** à ce jour et **une autre en passe de l'être** :

- **Changement climatique** [quantité de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère],
- **Flux biogéochimiques** [quantité d'azote (N) et de phosphore (P) dans l'environnement],
- **Intégrité de la biosphère[†]** (biodiversité et ses fonctions),
- **Changement d'usage des sols** [superficie des terres forestières]
- **Entités nouvelles** introduites dans l'environnement [quantités de polluants physico-chimiques : plastiques, métaux lourds, pesticides,...],
- **Cycle de l'eau douce** [disponibilité de l'eau dite verte contenue dans le sol et la végétation ; eau dite bleue dans les rivières, les lacs, les nappes],
- **Acidification des océans**,
- **Aérosols dans l'atmosphère**,
- **Intégrité de la couche d'ozone**.

Limites planétaires

Ce cadre propose une gamme de valeurs pour ses variables de contrôle : cette fourchette couvre le seuil entre un "espace opérationnel sûr" (celui de l'Holocène) et un monde très incertain et peu prévisible (dans lequel les changements du système terrestre accroissent les risques pour les sociétés).



N. B. : certaines de ces valeurs sont difficiles à quantifier : ce sont des estimations affectées d'incertitudes (manque de connaissances).

Limites planétaires

Processus du système terrestre	Variable de contrôle	Valeur frontière	Valeur préindustrielle	Limite haute de la zone de risque	Valeur actuelle
Changement climatique	CO ₂ atmosphérique (en ppm)	350	280	450	420
	Augmentation du forçage radiatif (en W/m ²) depuis 1750	1,0	0	1,5	2,91
Perte de biodiversité	Diversité génétique. Taux annuel d'extinctions par million d'espèces	< 10	1	100	> 100
	Intégrité fonctionnelle. Energie disponible pour les écosystèmes	Prod. primaire utilisée par l'humain < 10 %	1,9 %	20 %	30 %
Perturbation des cycles biogéochimiques	Azote fixé industriellement (en Mt / an)	62	0	82	190
	Phosphate global : flux vers les océans	11	0	100	22,6
	Phosphate régional : flux des fertilisants vers les sols (en Mt / an)	6,2	0	11,2	17,5
Acidification des océans	Concentration en carbonate, taux de saturation global moyen dans l'océan de surface (en unité Ω)	≥ 80 % Ω du taux de saturation préindustriel	3,44 Ω	2,75 Ω	2,8 Ω

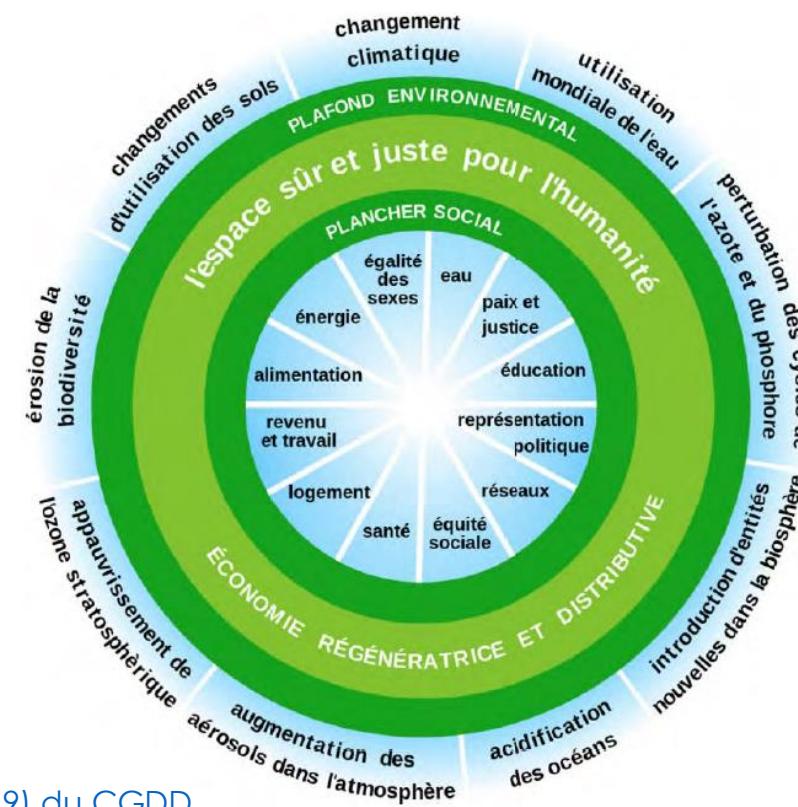
Limites planétaires

Processus du système terrestre	Variable de contrôle	Valeur frontière	Valeur préindustrielle	Limite haute de la zone de risque	Valeur actuelle
Changement climatique	CO ₂ atmosphérique (en ppm)	350	280	450	420
	Augmentation du forçage radiatif (en W/m ²) depuis 1750	1,0	0	1,5	2,91
Perte de biodiversité	Diversité génétique. Taux annuel d'extinctions par million d'espèces	< 10	1	100	> 100
	Intégrité fonctionnelle. Energie disponible pour les écosystèmes	Prod. primaire utilisée par l'humain < 10 %	1,9 %	20 %	30 %
Perturbation des cycles biogéochimiques	Azote fixé industriellement (en Mt / an)	62	0	82	190
	Phosphate global : flux vers les océans	11	0	100	22,6
	Phosphate régional : flux des fertilisants vers les sols (en Mt / an)	6,2	0	11,2	17,5
Acidification des océans	Concentration en carbonate, taux de saturation global moyen dans l'océan de surface (en unité Ω)	≥ 80 % Ω du taux de saturation préindustriel	3,44 Ω	2,75 Ω	2,8 Ω

Limites planétaires

L'économie du donut (doughnut economy) : combiner limites planétaires et plafonds sociaux

Dans ce modèle, une économie est considérée comme prospère lorsque les fondements sociaux (au nombre de douze) sont réunis sans dépasser aucun des neuf plafonds écologiques. Cette situation est représentée par la zone entre les deux anneaux, à savoir l'espace *sûr et juste* pour l'humanité (diagramme développé par l'économiste Kate Raworth. Repris par le Commissariat Général au Développement Durable).



Source : [Rapport sur l'état de l'environnement \(2019\) du CGDD](#)

K. Raworth, A Safe and Just Space for Humanity. Rapport Oxfam (2012)

K. Raworth, La théorie du donut : l'économie de demain en 7 principes (2018)

Pour approfondir : lien vers une vidéo UVED (10'30)

Plan de cours (rappel)

- L'Anthropocène
- Les limites planétaires

Focus sur 4 de ces limites : 1) Le changement climatique (et ses conséquences),

2) L'acidification des océans,

En résumé : le cycle (simplifié) du carbone,

3) Le cycle de l'azote,

4) La chute de la biodiversité.

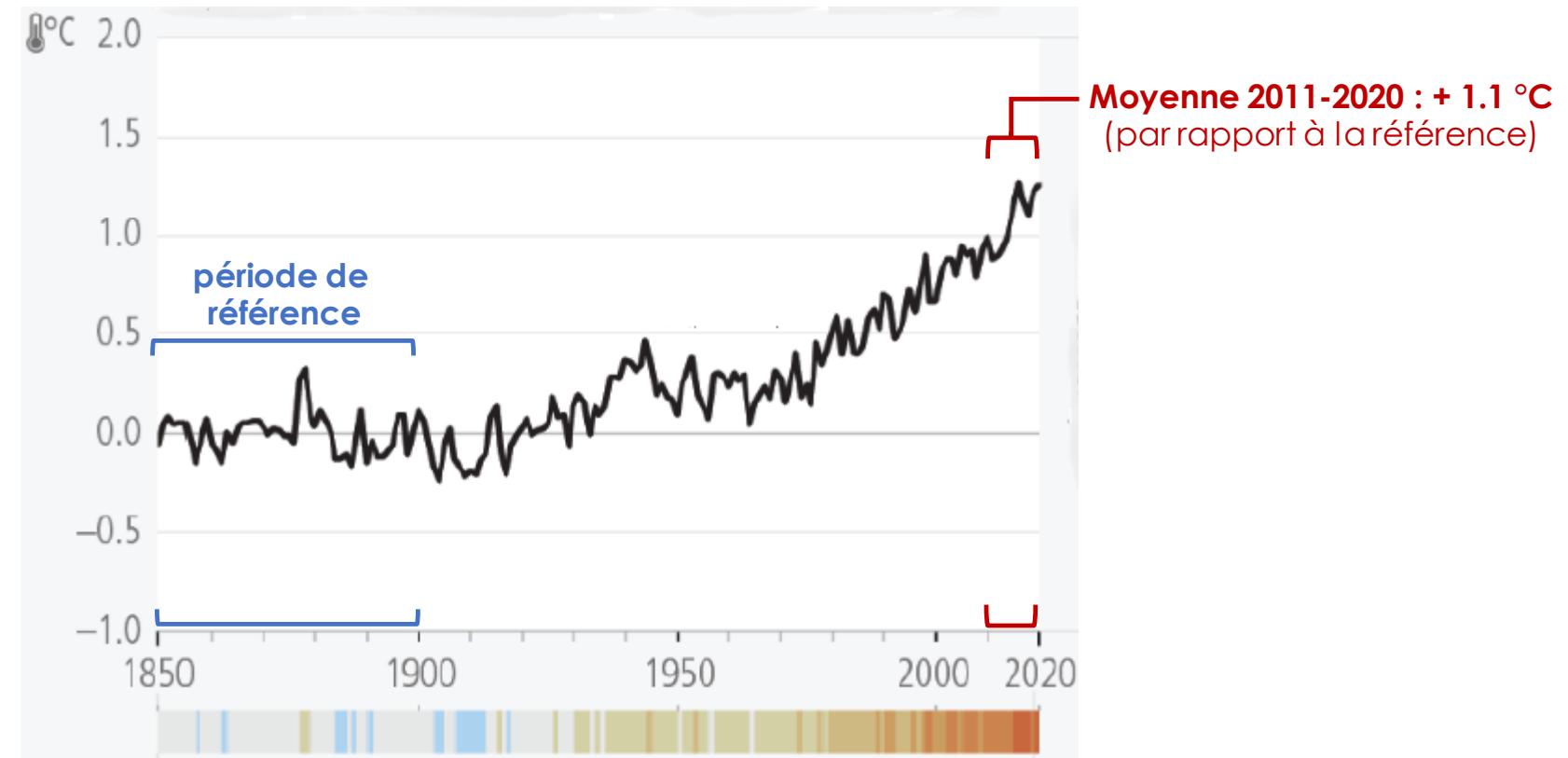
Figures extraites du 6^e rapport du GIEC (2021), sauf mention contraire.

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change ; GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Les observations

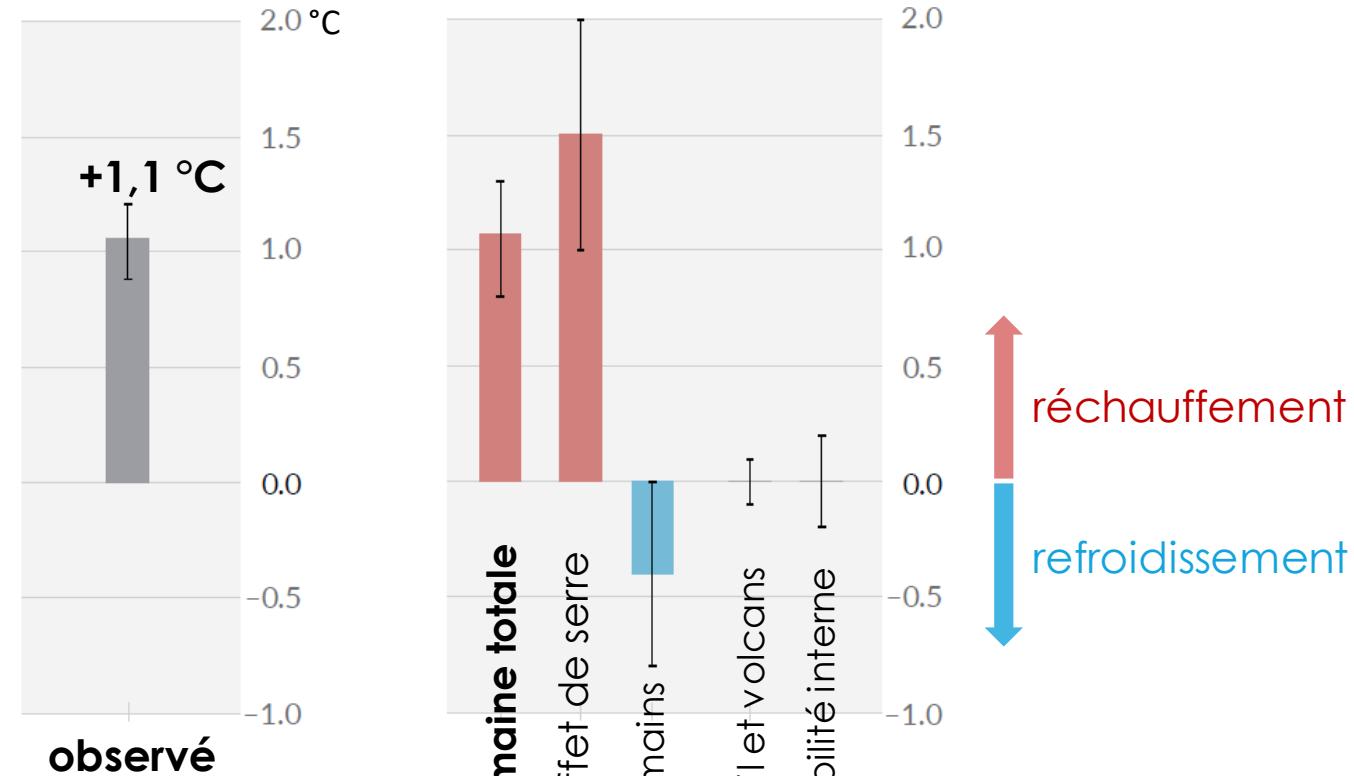
Variation de la **température moyenne à la surface** du globe



Le réchauffement actuel est défini par une moyenne décanale (moyenne glissante sur 10 ans) par rapport à la **période de référence 1850-1900**.

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

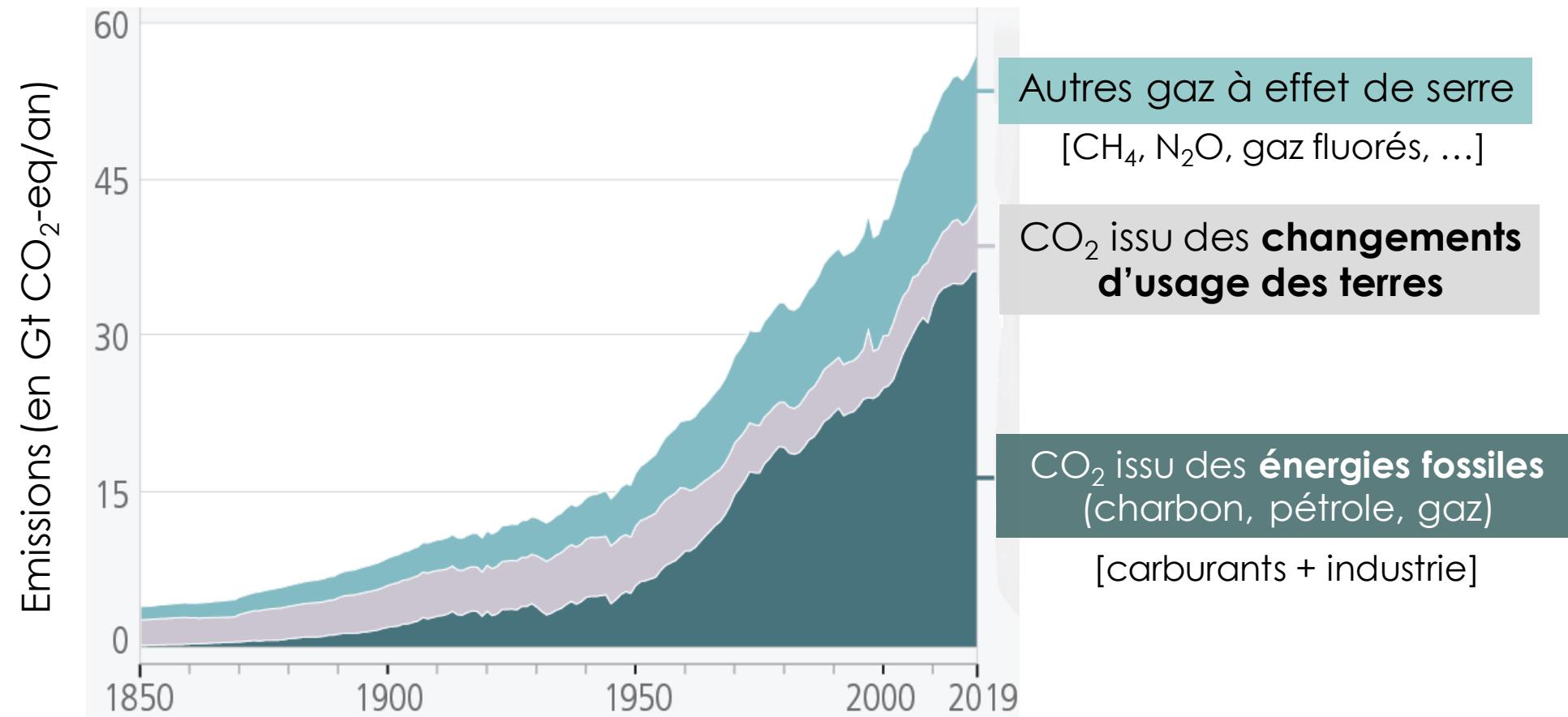
Les activités humaines sont responsables du réchauffement actuel



Le réchauffement observé résulte des **activités humaines**.
Le réchauffement dû aux gaz à effet de serre est partiellement compensé par le refroidissement induit par d'autres activités (pollutions par aérosols, type SO₂).

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Les origines des gaz à effet de serre (GES)



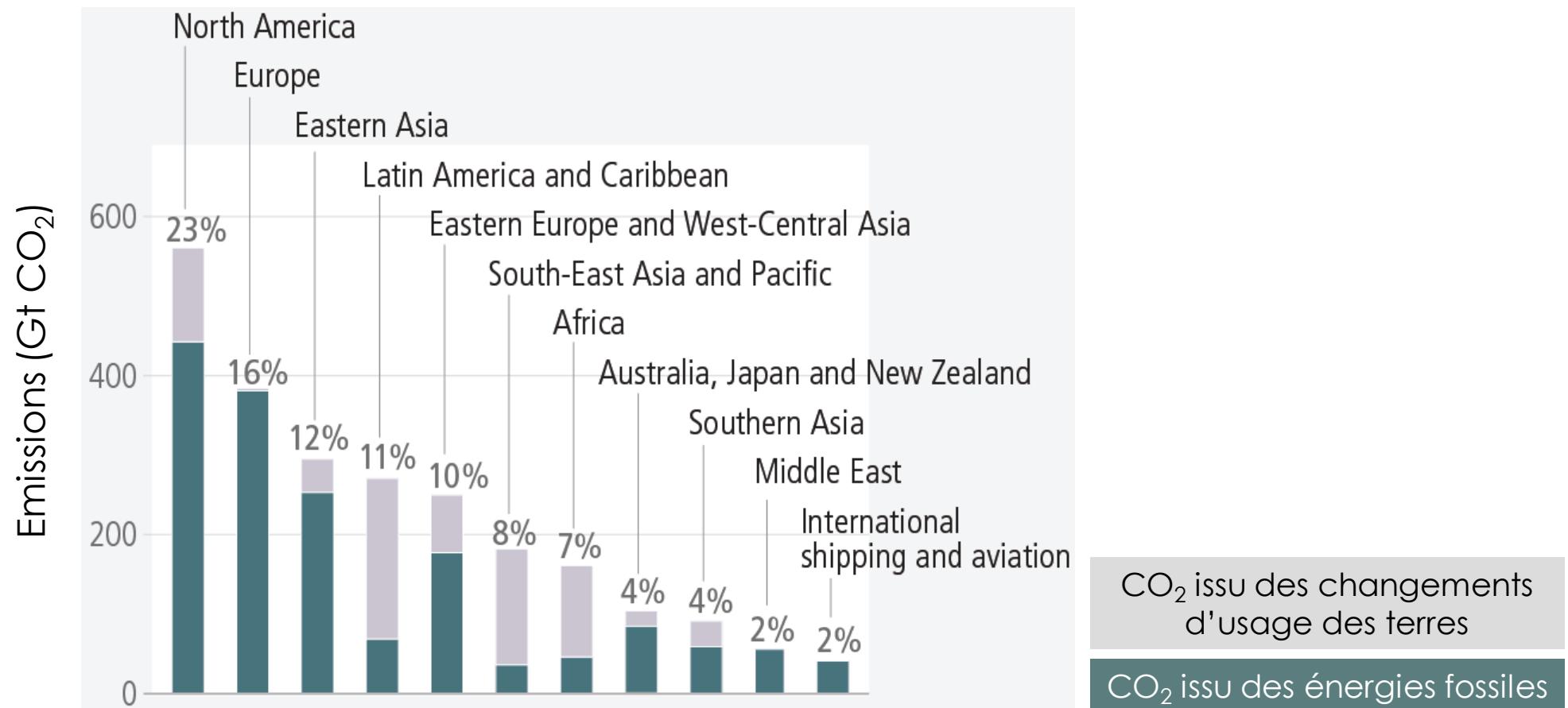
Emissions actuelles ~ **50 Gt CO₂-eq^t par an** (en augmentation)

[Énergies fossiles ~ 35 Gt (70 %) ; Changement d'usage des sols ~ 5 Gt (10 %) ; Autres ~ 10 Gt (20 %)]

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Une distribution inégale des émissions

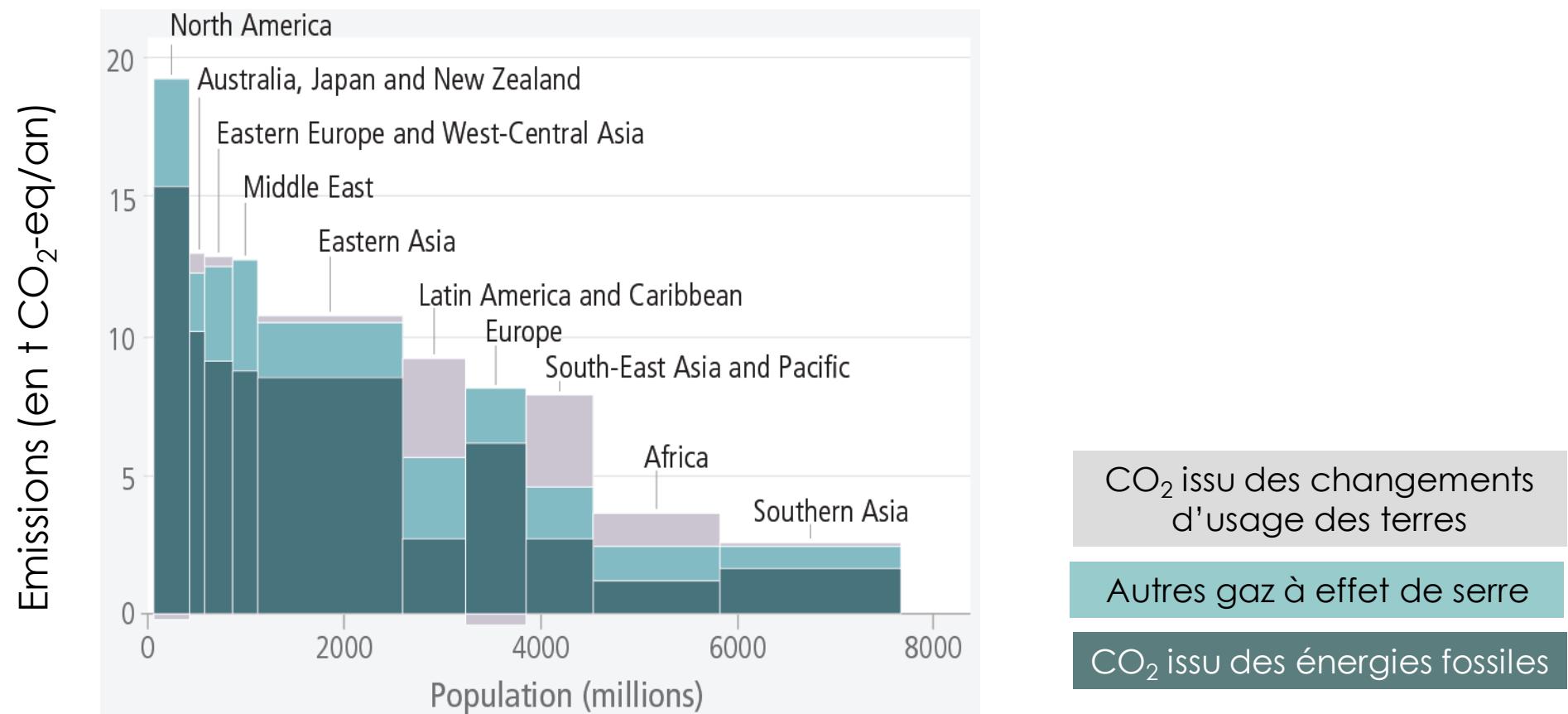
Cumul historique [1850-2019] des émissions nettes de CO₂ par région



Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

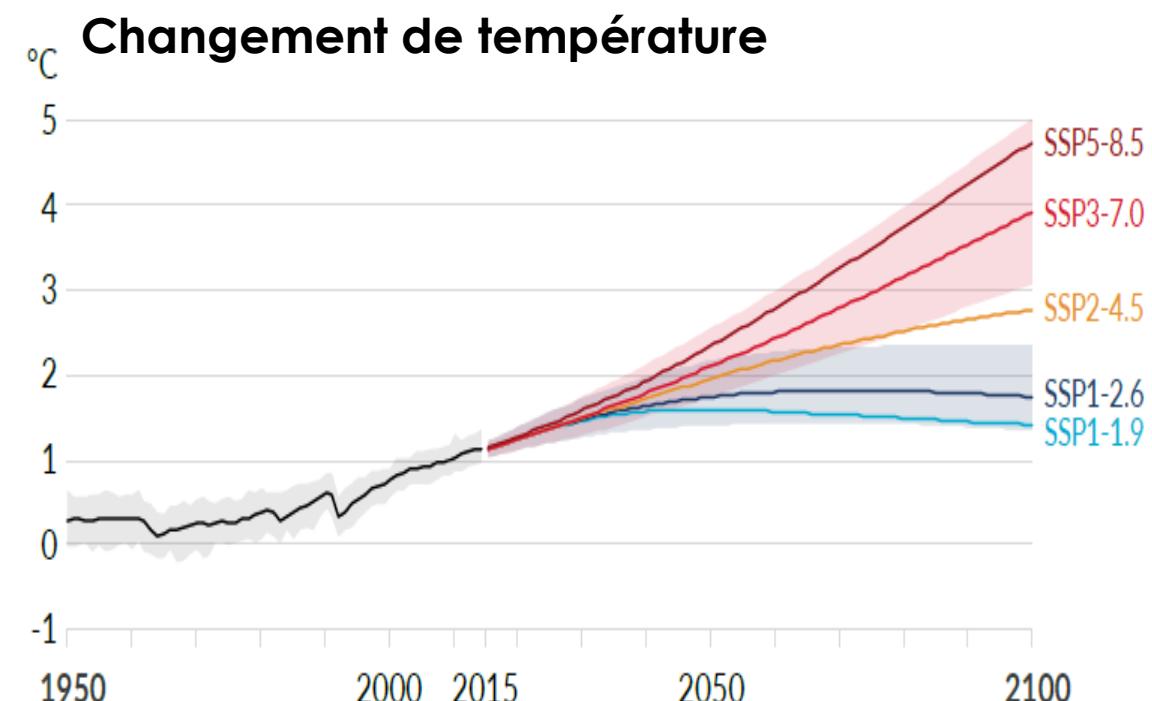
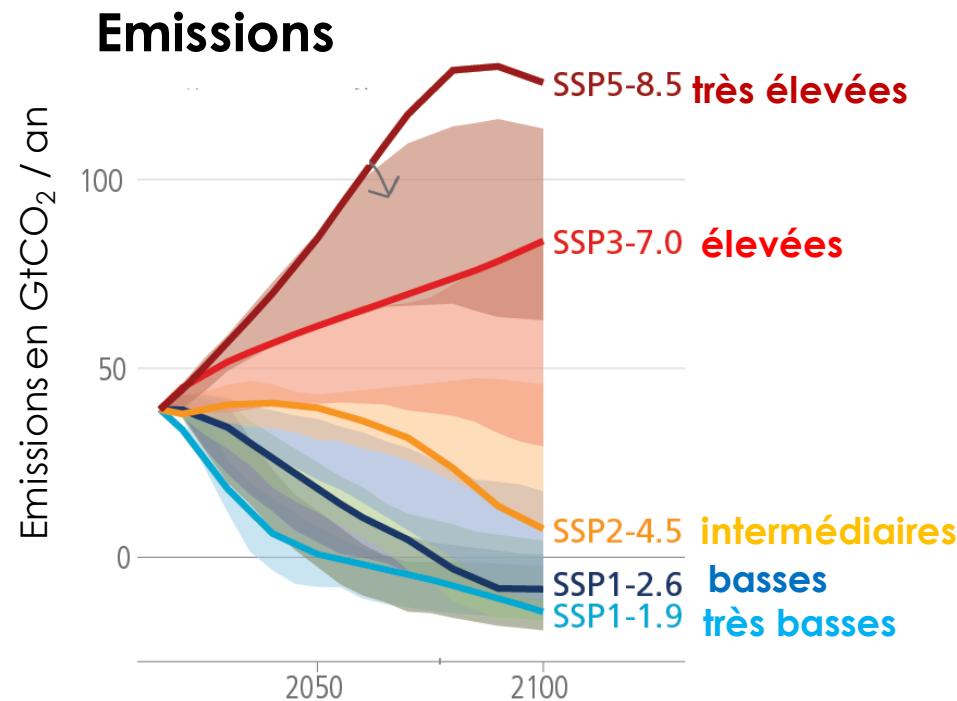
Une distribution inégale des émissions

Emissions nettes tous gaz à effet de serre **en 2019 par région et par personne**



Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Les scénarios SSP (*Shared Socio-economic Pathways*)



Les scénarios SSP sont des narratifs, traduits en ensembles d'hypothèses socio-économiques (population, éducation, urbanisation, PIB). Pour chacun d'eux, il en résulte une trajectoire d'émissions de GES (donc un forçage radiatif), et donc un changement de température.

Différents futurs sont possibles : ils dépendent de nos choix

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Budget carbone

Le niveau de réchauffement futur et sa **stabilisation** dépendent des **émissions cumulées** (passées, présentes et futures) de CO₂.

Cela signifie que :

- chaque tonne de CO₂ émise contribue au réchauffement
- pour ne pas dépasser un plafond maximal de réchauffement que l'on s'est fixé (ex. : 1.5°C), il existe un volume maximal d'émissions cumulées à ne pas dépasser.

D'où la notion de : **Budget carbone** : volume maximal d'émissions futures possibles pour rester en-deçà d'une température moyenne donnée.

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Budget carbone

Le niveau de réchauffement futur et sa **stabilisation** dépendent des **émissions cumulées** (passées, présentes et futures) de CO₂.

Cela signifie que :

- chaque tonne de CO₂ émise contribue au réchauffement
- pour ne pas dépasser un plafond maximal de réchauffement que l'on s'est fixé (ex. : 1.5°C), il existe un volume maximal d'émissions cumulées à ne pas dépasser.

D'où la notion de : **Budget carbone** : volume maximal d'émissions futures possibles pour rester en-deçà d'une température moyenne donnée.

Émissions passées (cumul 1850 -2020)	Budget carbone	Température cible
2400 Gt CO ₂	500	1.5°C

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Budget carbone

Le niveau de réchauffement futur et sa **stabilisation** dépendent des **émissions cumulées** (passées, présentes et futures) de CO₂.

Cela signifie que :

- chaque tonne de CO₂ émise contribue au réchauffement
- pour ne pas dépasser un plafond maximal de réchauffement que l'on s'est fixé (ex. : 1.5°C), il existe un volume maximal d'émissions cumulées à ne pas dépasser.

D'où la notion de : **Budget carbone** : volume maximal d'émissions futures possibles pour rester en-deçà d'une température moyenne donnée.

Émissions passées (cumul 1850 -2020)	Budget carbone	Température cible
2400 Gt CO ₂	500	1.5°C
2400 Gt CO ₂	1000 Gt	2.0°C

Plus précisément, compte-tenu des incertitudes des modèles :
900 Gt CO₂ pour une confiance de 83 %,
1200 Gt CO₂ pour une confiance de 67 %.

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Quizz

Sachant que les émissions historiques, émises sur 170 ans, représentent **2400 Gt CO₂**, en combien d'années sera épuisée la valeur haute du budget carbone 2,0°C : **1200 Gt CO₂** ?

~~2400 Gt CO₂ ↔ 170 ans.~~
~~1200 Gt (2,0°C) → 85 ans~~

Le taux d'émission annuel n'est pas constant ; il a augmenté constamment depuis 1950 de ~ 3 % par an.

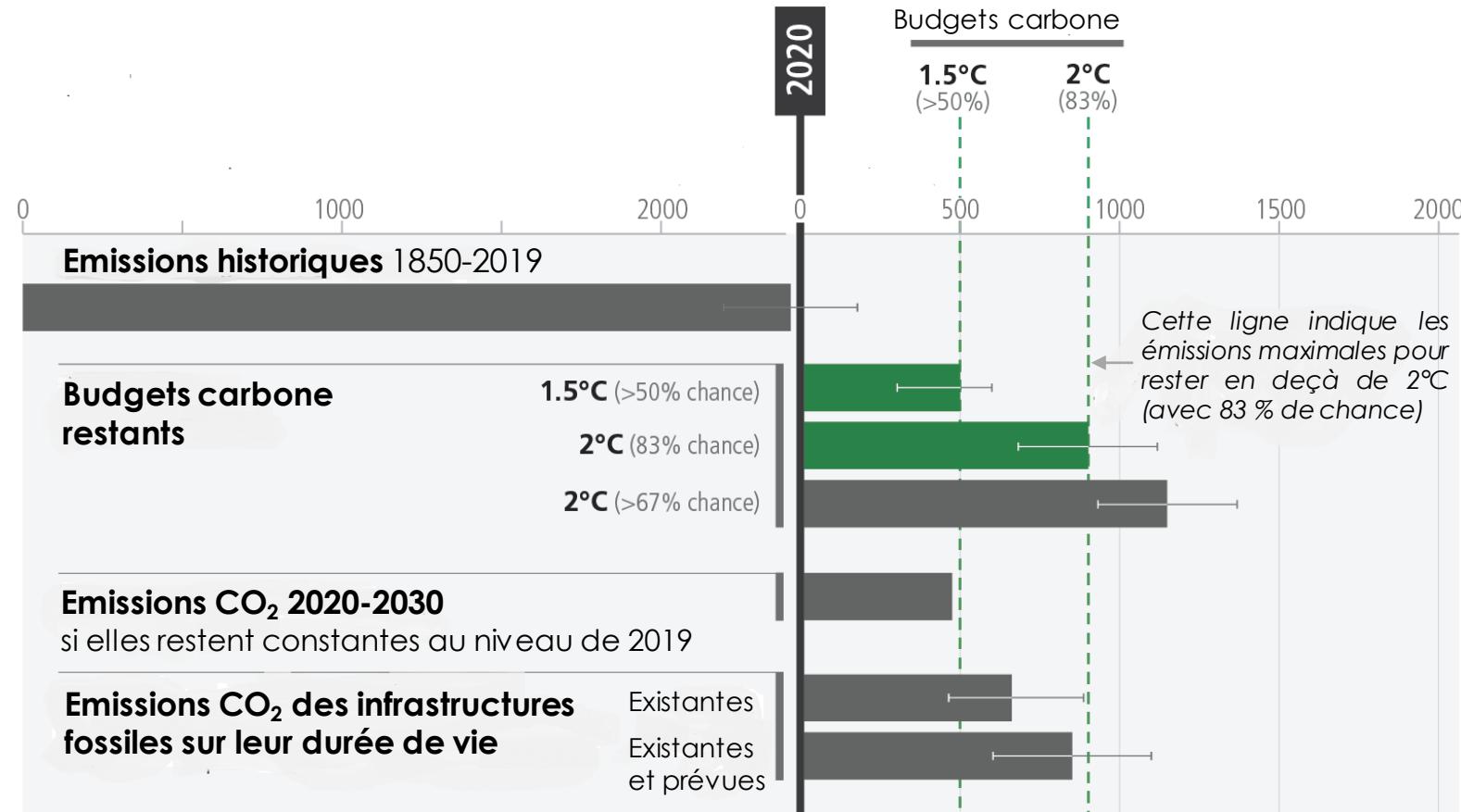
Taux d'émission actuel : 50 Gt/an.

Si les émissions futures sont maintenues fixes et à ce niveau [sans croissance exponentielle], épuisement des budgets carbone en :

10 ans (1,5°C)
22 ans (2,0°C)

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Budget carbone

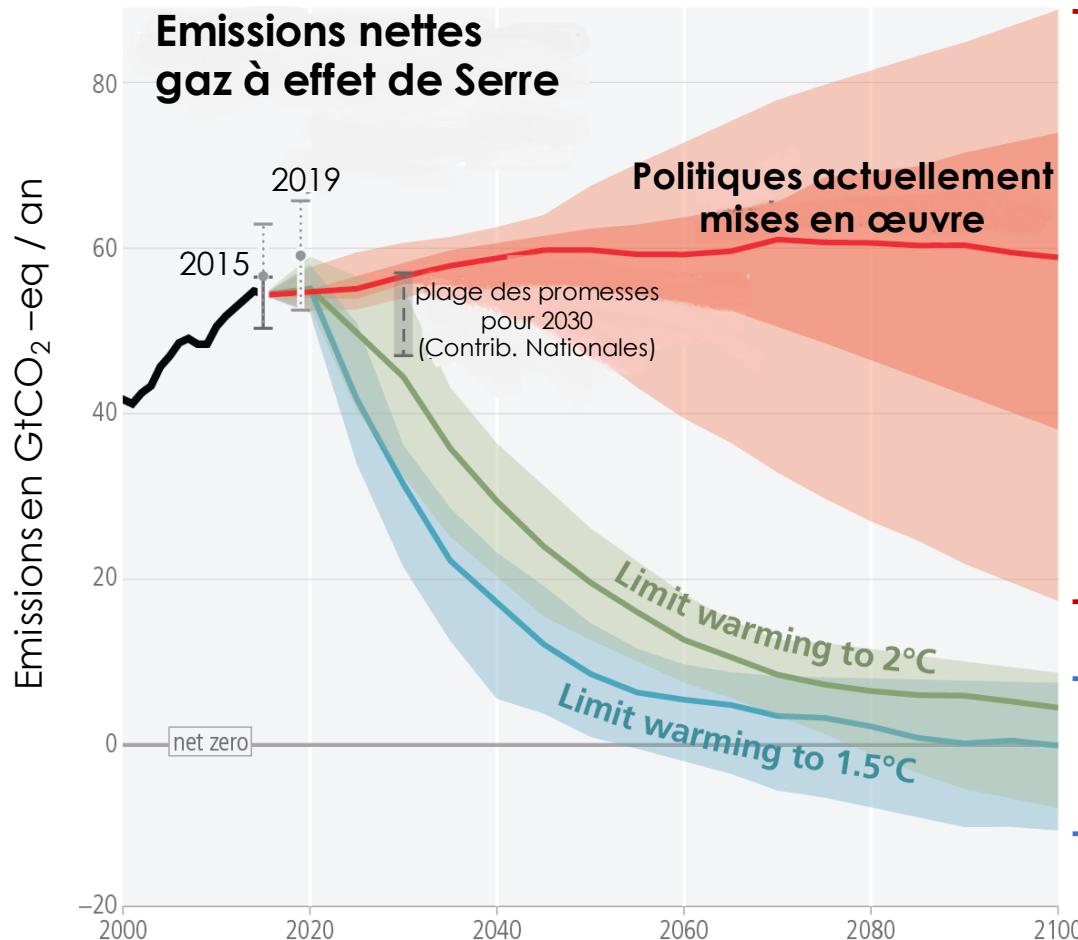


Les émissions des infrastructures fossiles* existantes et prévues suffisent à épuiser le budget carbone restant pour un réchauffement de 2°C (et dépassent l'objectif de 1,5°C).

* mines de charbon, puits de pétrole, gazoducs, ...

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Trajectoires d'émissions. Accord de Paris



Réchauffement de 3,2°C
[plage de 2,2 et 3,5°C]

Ce qu'il
faut suivre

Objectif en 2100 :	+1,5 °C	+2,0 °C
Réduction des émissions (par rapport à 2010)	en 2030 : - 43 %	- 27 %
	en 2050 : - 84 %	- 63 %
	après 2050 : zéro net	

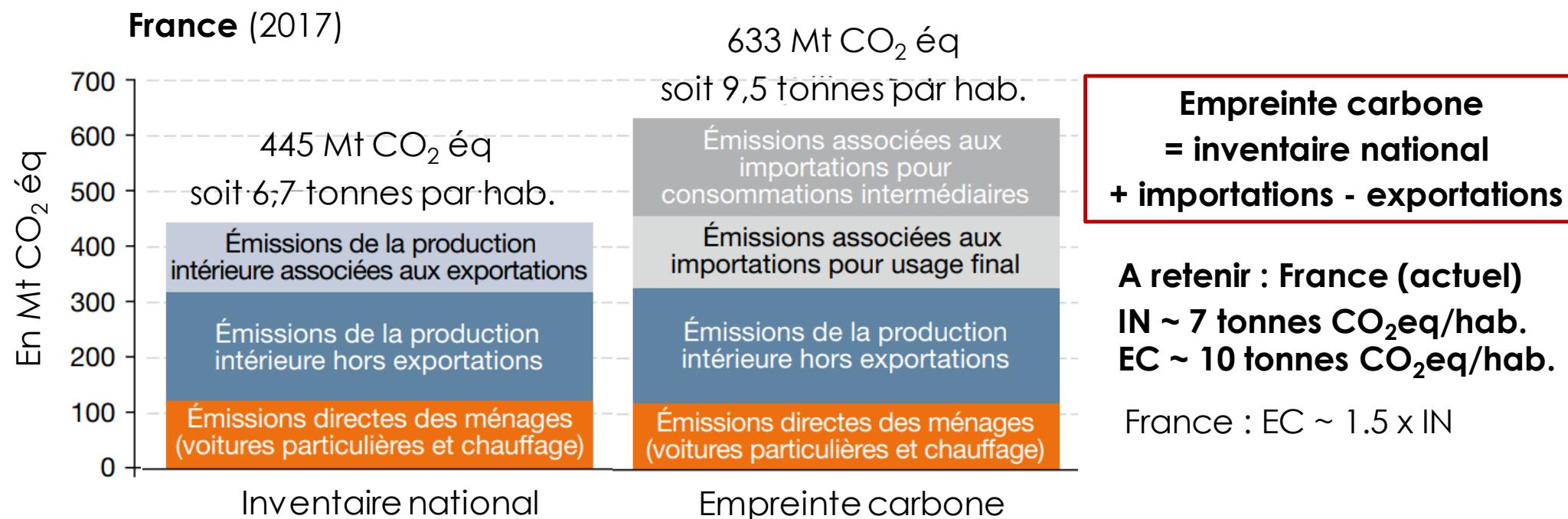
A retenir : respecter les accord de Paris requiert une division des émissions d'ici 2050 par ~ 3 à 5 selon l'objectif (2 ou 1,5°C).

Atteindre **zéro net** nécessite des émissions négatives de CO₂ pour compenser les régions/secteurs qui ne peuvent atteindre zéro. Ces émissions négatives reposent sur le déploiement de méthodes d'éliminations qui posent actuellement des questions de faisabilité, de soutenabilité et de risques.

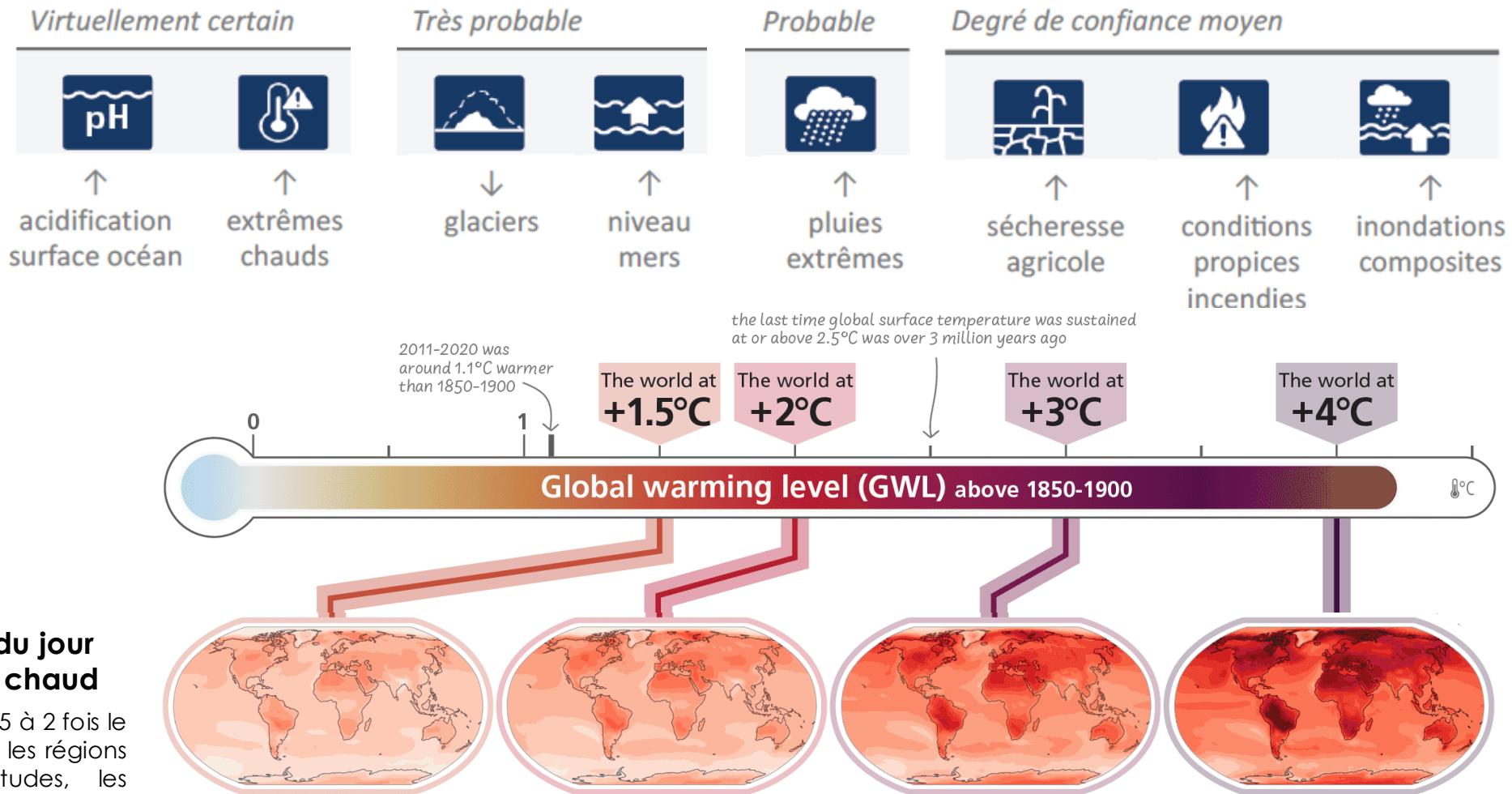
Inventaire national et empreinte carbone

Deux méthodes complémentaires permettent d'apprécier les pressions d'un pays sur le climat :

- **l'inventaire national** : calcul des quantités de GES physiquement **émises à l'intérieur du pays** par les ménages (voitures et logements) et les activités économiques (consommation d'énergie fossile, procédés industriels et émissions de l'agriculture). Données actuellement privilégiées pour le suivi des politiques nationales et internationales
- **l'empreinte carbone** : calcul des GES **induits par la demande finale** intérieure du pays (consommation finale et investissements). L'empreinte est constituée par les émissions directes des ménages, les émissions de la production nationale (hors exportations) et les émissions des activités économiques étrangères dont la production est destinée aux importations du pays.



Réchauffement climatique : les conséquences



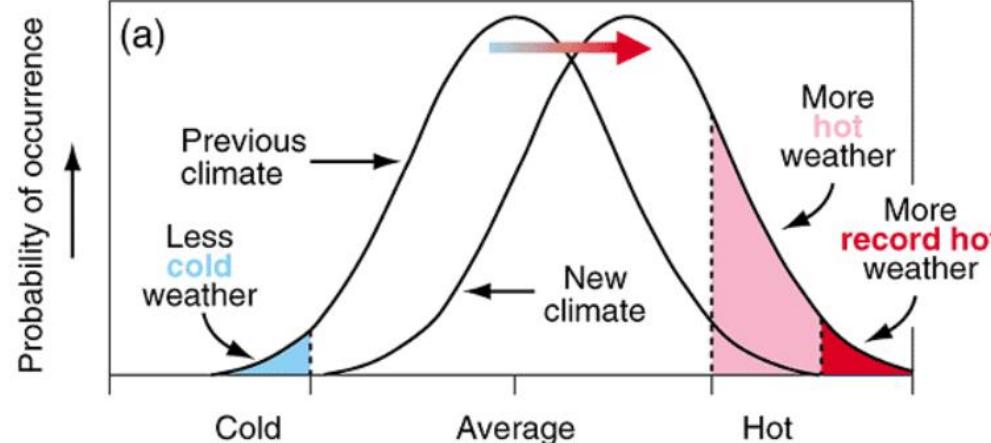
N. B. : Les extrêmes chauds sont amplifiés dans les zones urbanisées (îlots de chaleur).

Pour chaque incrément de réchauffement supplémentaire, les changements régionaux de climat moyen et d'extrêmes deviennent plus généralisés et plus prononcés

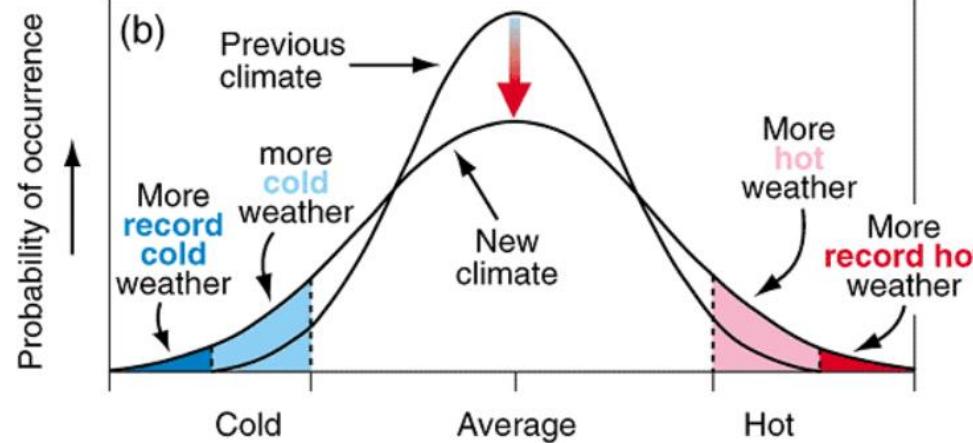
Réchauffement climatique

Moyenne, variance et extrêmes

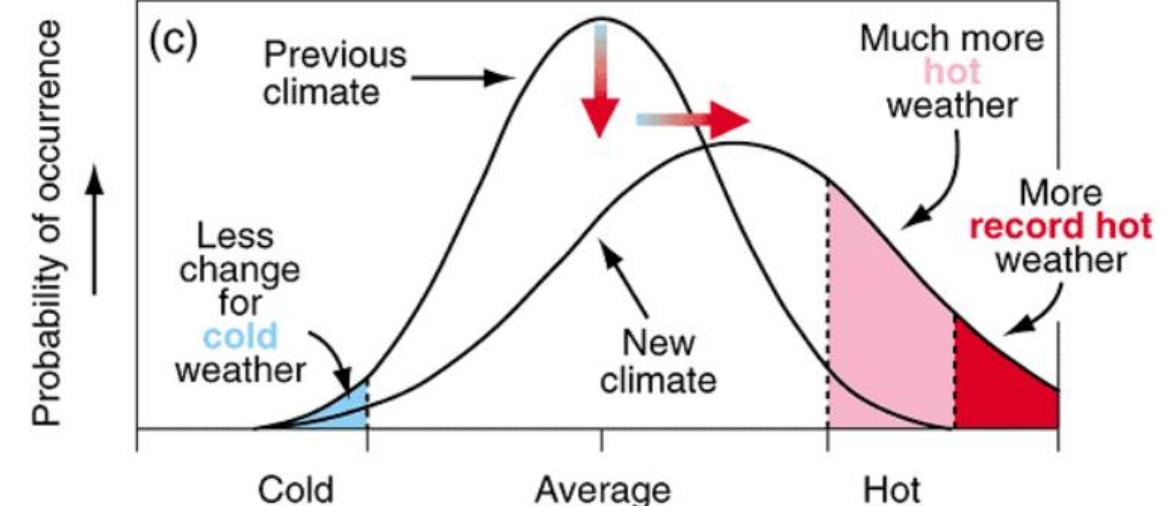
Augmentation de la **moyenne**



Augmentation de la **variance**



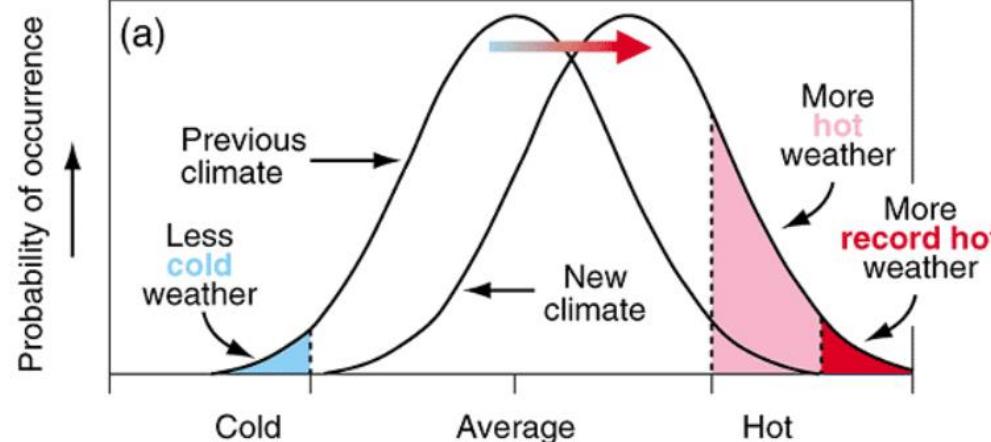
Augmentation de la **moyenne et de la variance**



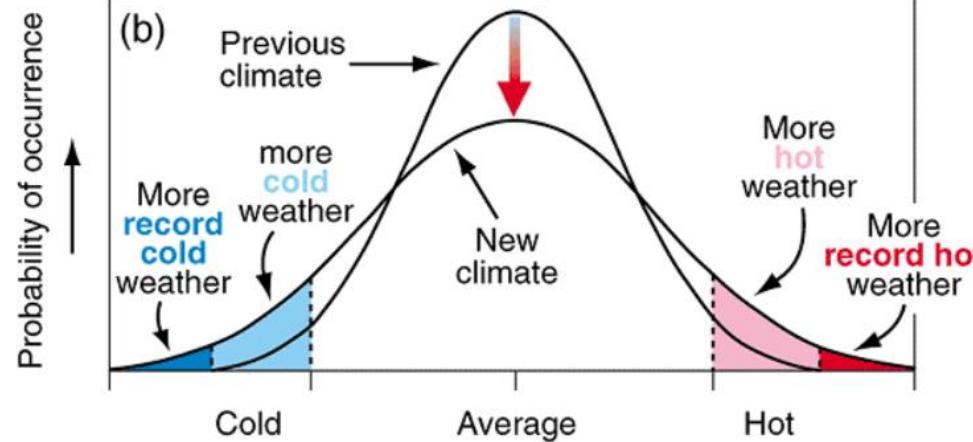
Réchauffement climatique

Moyenne, variance et extrêmes

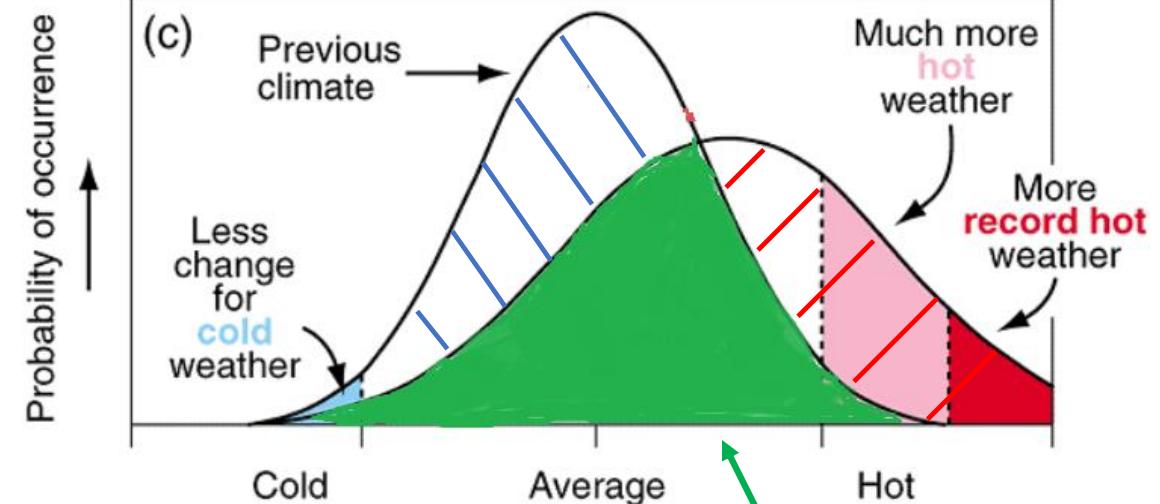
Augmentation de la **moyenne**



Augmentation de la **variance**



Augmentation de la **moyenne et de la variance**



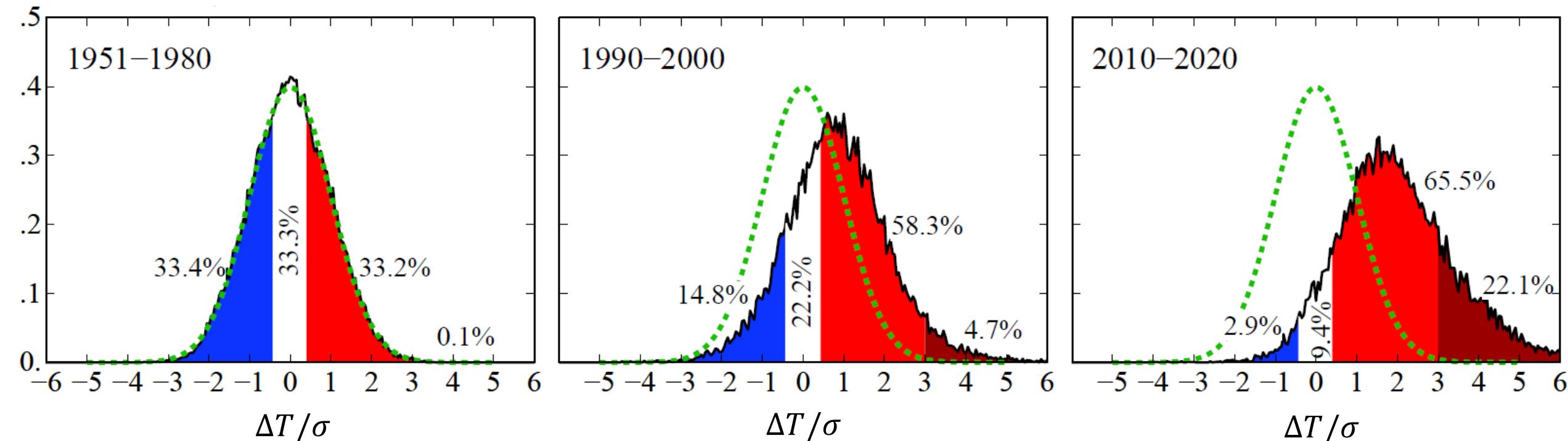
distribution commune à l'ancien et au nouveau climats

Changement de l'ancien au nouveau climat :
aire hachurée bleue → aire hachurée rouge

Réchauffement climatique

Moyenne, variance et extrêmes

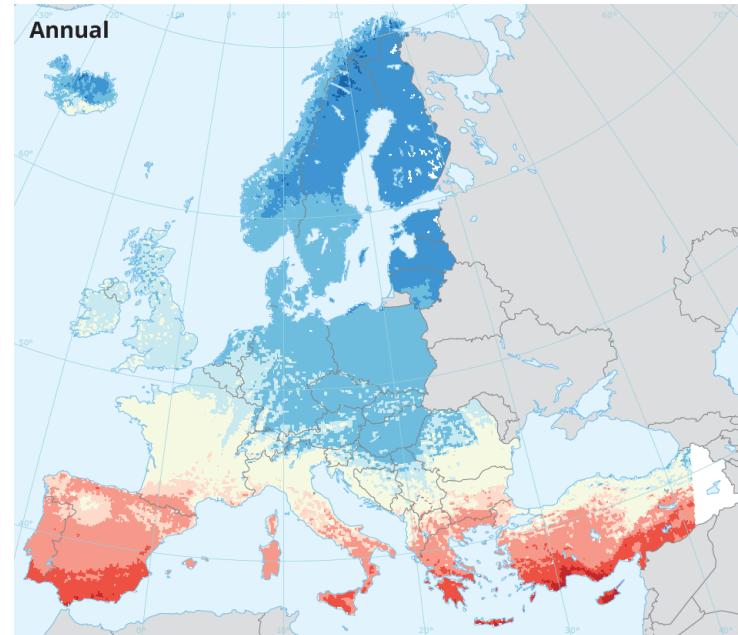
Températures d'été [juin-juillet-août] dans l'hémisphère Nord



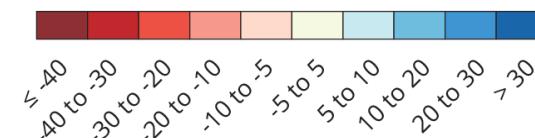
Réchauffement climatique : moyenne et extrêmes

Projection des changements de précipitations, 2071 – 2100
[scénario +4°C en 2100]

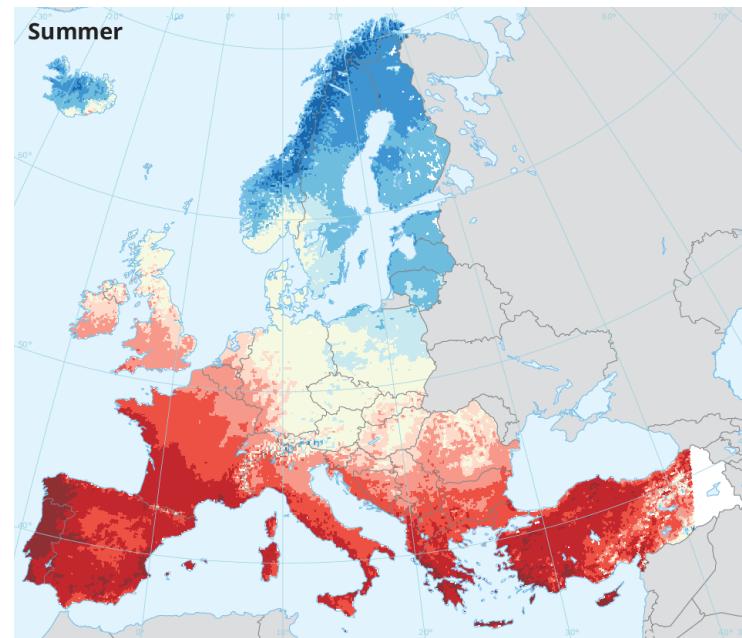
Précipitations **annuelles**



Variation en pourcentage :



En été



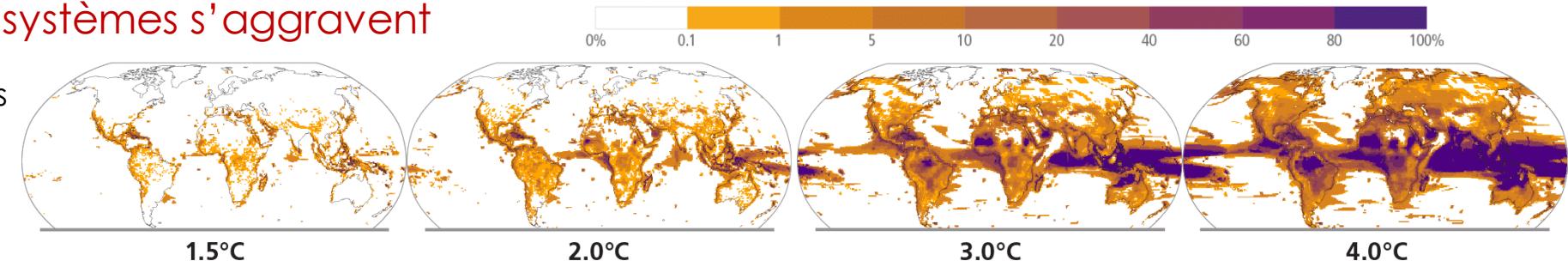
Source : Agence européenne de l'environnement

Réchauffement climatique : les conséquences

Pour chaque incrément de réchauffement supplémentaire,

→ les impacts sur les écosystèmes s'aggravent

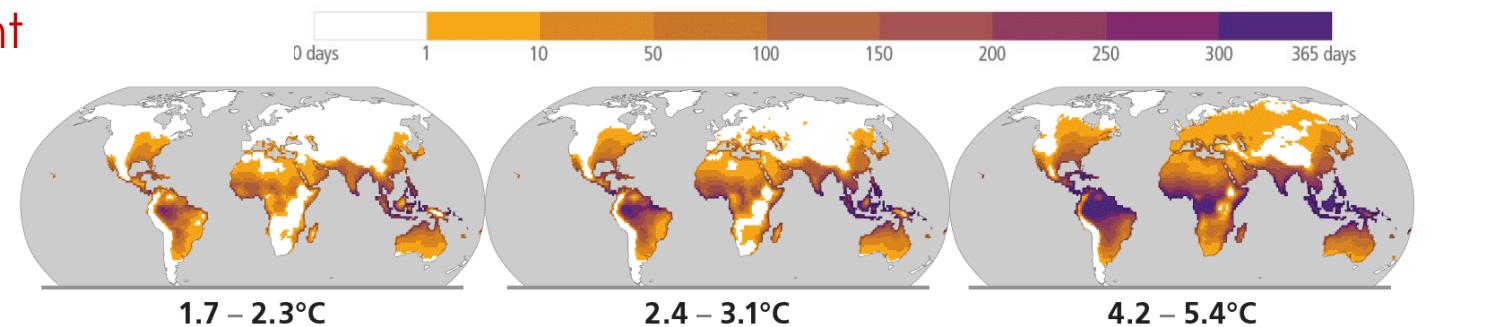
Pourcentage d'espèces animales exposées à des températures potentiellement dangereuses (sans relocalisation)



→ Les risques pour la santé augmentent



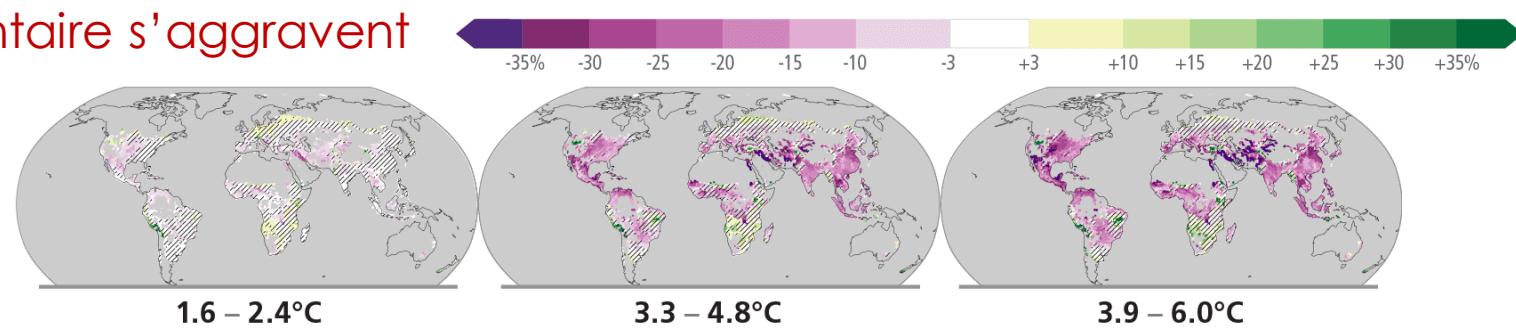
Nombre de jours par an où les conditions de température et d'humidité exposent les individus à un risque mortel



→ Les risques pour la production alimentaire s'aggravent



Rendement maïs (%)
(ne tient pas compte de :
limitation en eau, maladies,
changements techniques)

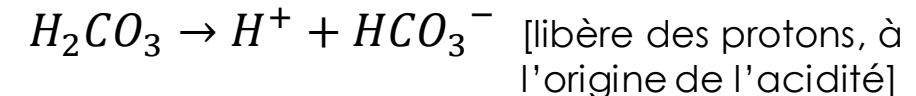


Emissions de CO₂ et acidification des océans

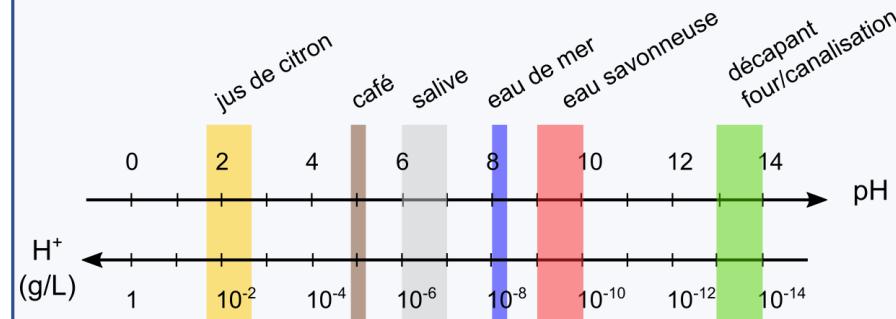
« *The other carbon problem* »

Les océans absorbent environ 30 % du CO₂ émis dans l'atmosphère.

Or, plus de CO₂ dissout, c'est plus d'**acidité** : $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$ [acide carbonique]

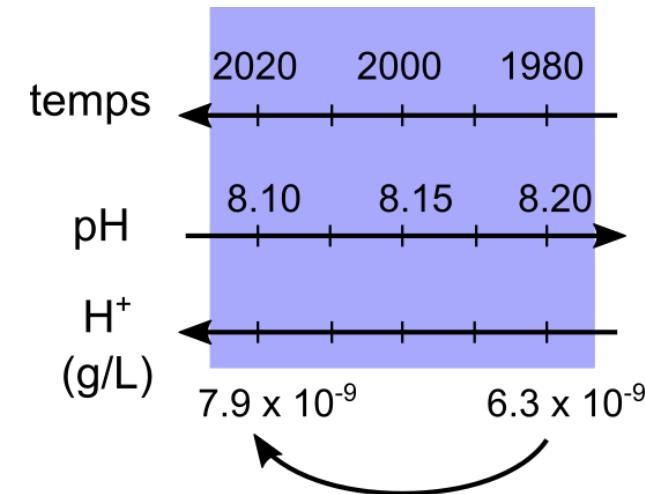


Rappel : échelle Log du pH



À chaque fois que la concentration en H⁺ est multipliée par 10, le pH baisse d'une unité.

Relevés temporels de pH :



La concentration en ions H⁺ de la surface des océans a augmenté de 25 % en 40 ans !

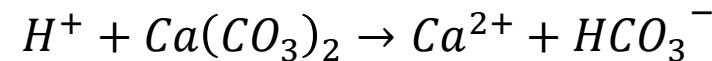
Emissions de CO₂ et acidification des océans

« *The other carbon problem* »

Les océans absorbent environ 30 % du CO₂ émis dans l'atmosphère.

Or, plus de CO₂ dissout, c'est plus d'**acidité**.

L'acidité rend instable les coquilles et squelettes des organismes marins :

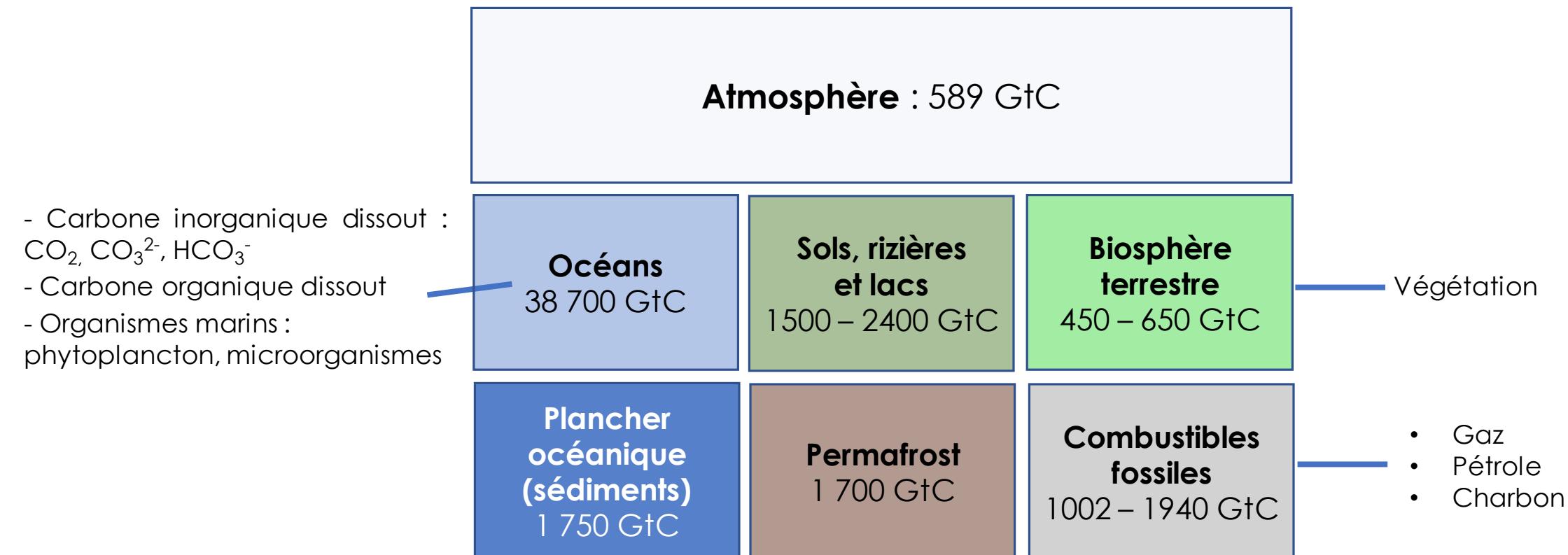


Exposée aux conditions de pH projetées pour 2100, cette coquille d'aragonite se dissout significativement en 45 jours.

N. B. : Il y a 66 millions d'années, l'acidification des océans lors de la crise du Crétacé Tertiaire avait balayé 75 % des espèces marines. L'acidification était de 0.25 unités. Nous sommes déjà à 0.1 unité de pH.

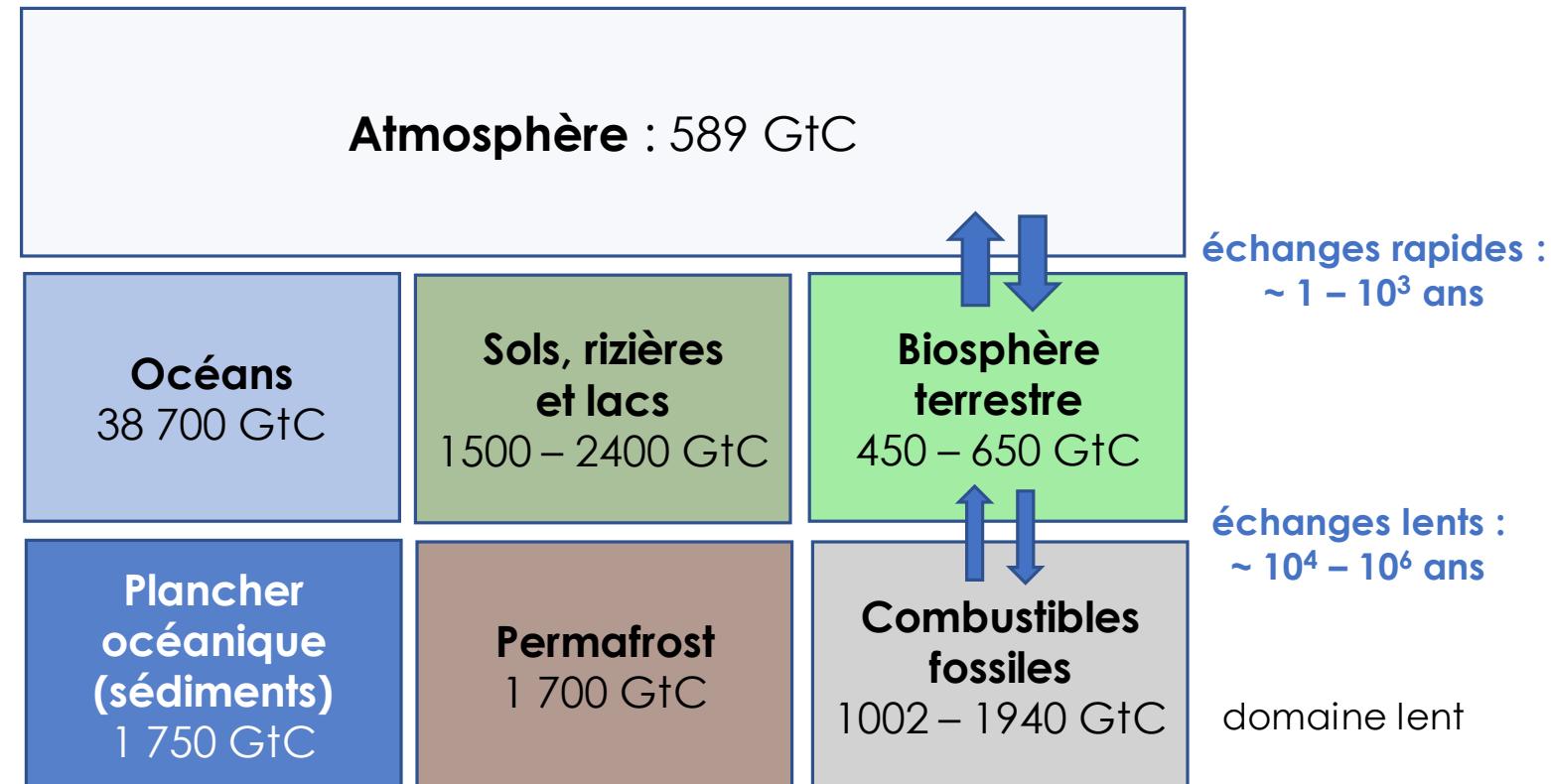
Le cycle du carbone

Les réservoirs et les flux de carbone sur Terre avant 1750



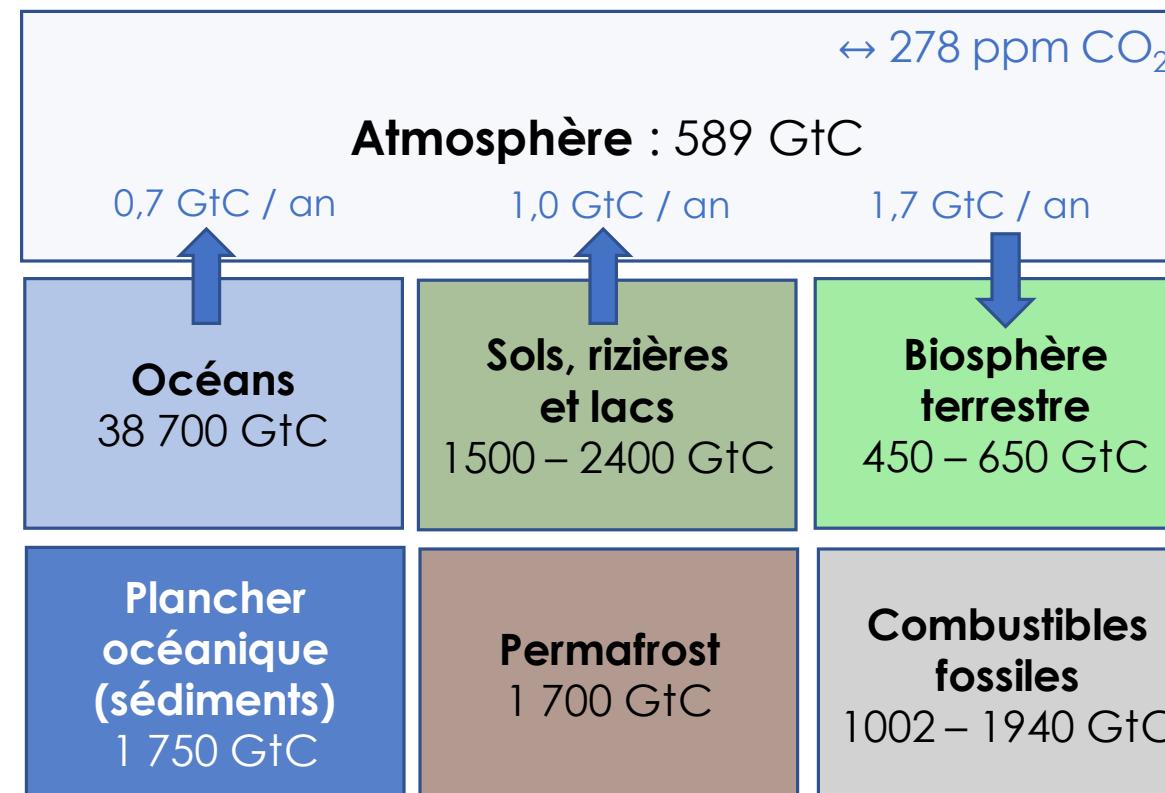
Le cycle du carbone

Les réservoirs et les **flux** de carbone sur Terre avant 1750



Le cycle du carbone

Les réservoirs et les **flux** de carbone sur Terre avant 1750

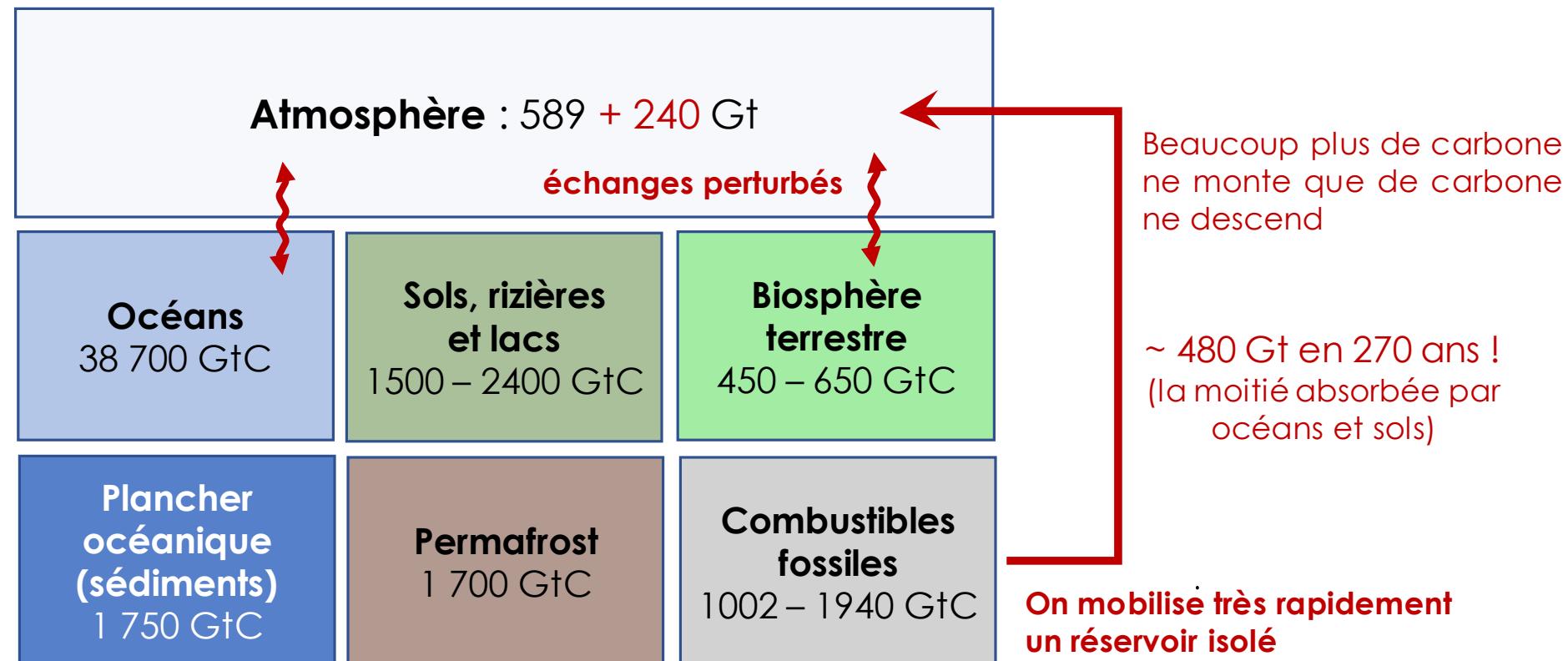


Autant de carbone monte
(ex. : respiration) que de carbone
descend (photosynthèse)

→ Concentration en carbone atmosphérique quasi-stationnaire (278 ppm CO_2).

Le cycle du carbone

Les flux de carbone sur Terre depuis 1750 [valeurs de 2013]



→ Perturbation de l'état stationnaire. Accumulation de carbone atmosphérique.

1 GtC = un train de 230 000 km de long, dont chaque wagon (de 18 m) contient ~ 100 tonnes de charbon (80 % de carbone).

Plan de cours (rappel)

- L'Anthropocène
- Les limites planétaires

Focus sur 4 de ces limites : **1) Le changement climatique** (et ses conséquences),
2) L'acidification des océans,

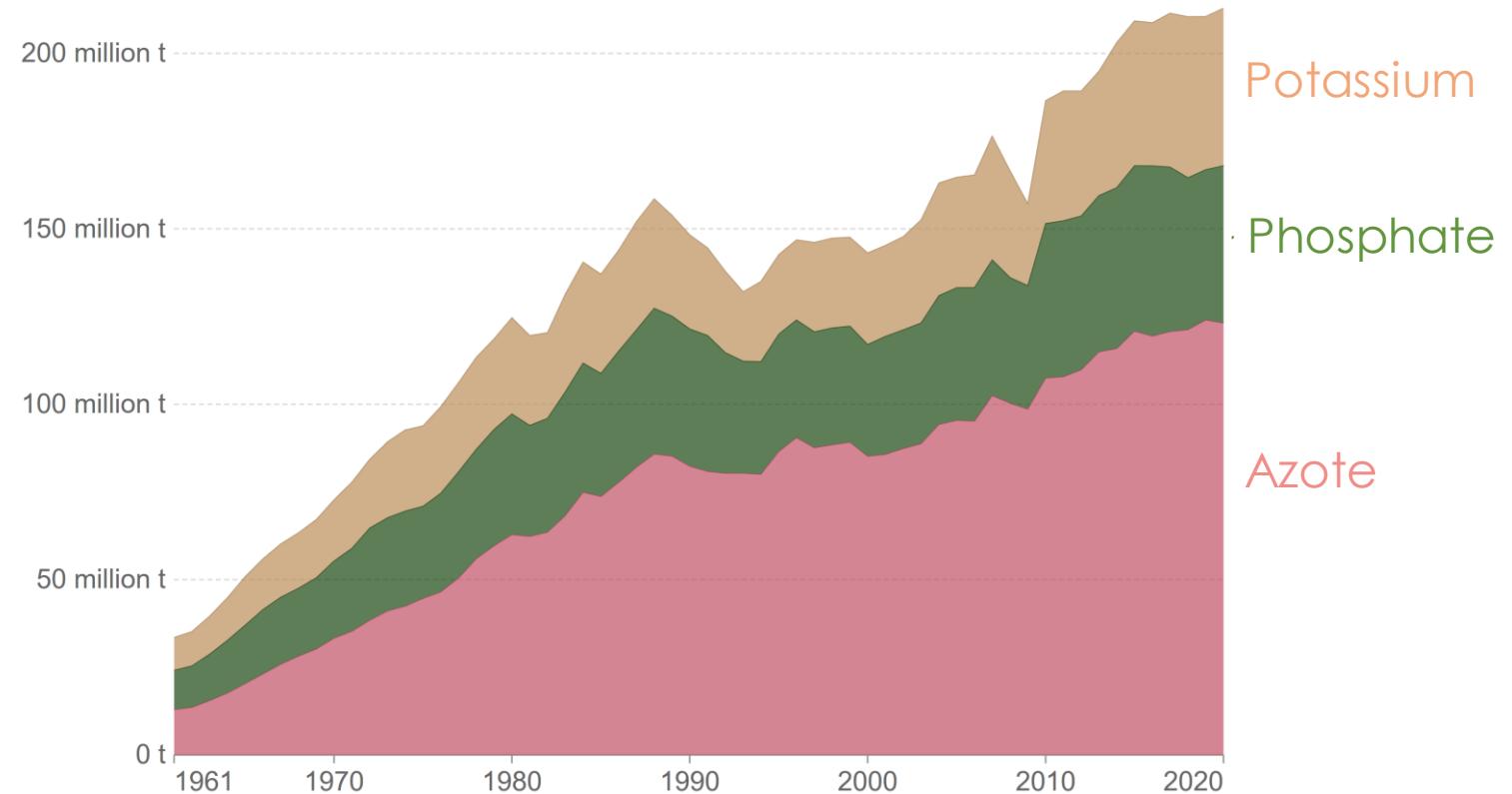
En résumé : le cycle (simplifié) du carbone,

3) Le cycle de l'azote,

4) La chute de la biodiversité.

Perturbation des cycles biogéochimiques

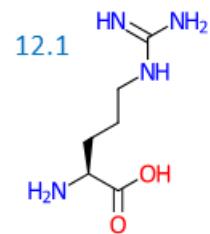
Production mondiale de fertilisants, 1961 - 2020



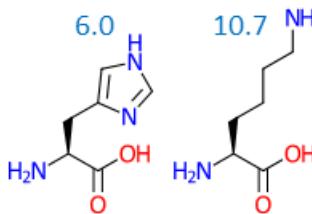
Perturbation des cycles biogéochimiques

Le cas de l'azote

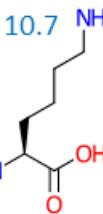
- L'azote est un constituant des protéines, elles-mêmes constituants essentiels des êtres vivants.



Arginine



Histidine



Lysine

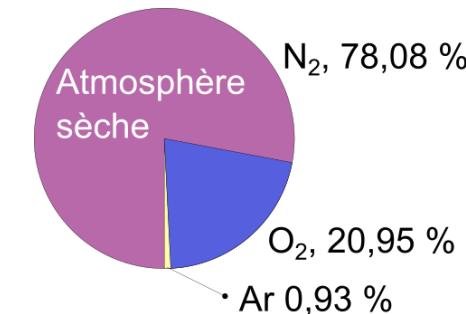


Quelques acides aminés,
briques de construction des protéines.

60 % de protéine en masse (sèche)

30 % de protéine en masse (sèche)

- De l'azote, il y en a partout sous forme de diazote (N_2) :
78 % de notre atmosphère

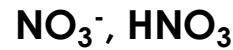


- Mais N_2 est non biodisponible : la liaison (triple) est très dure à casser (coût énergétique élevé).**

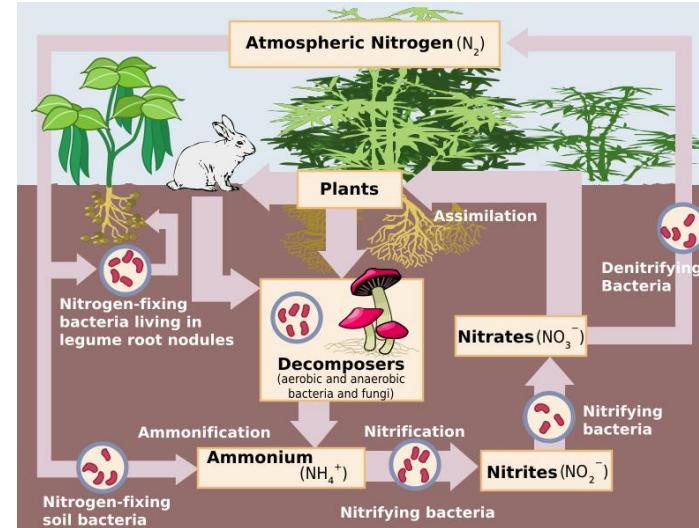
Perturbation des cycles biogéochimiques

Comment obtenir de l'azote ?

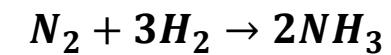
La foudre



Les réactions enzymatiques



La production industrielle d'ammoniac



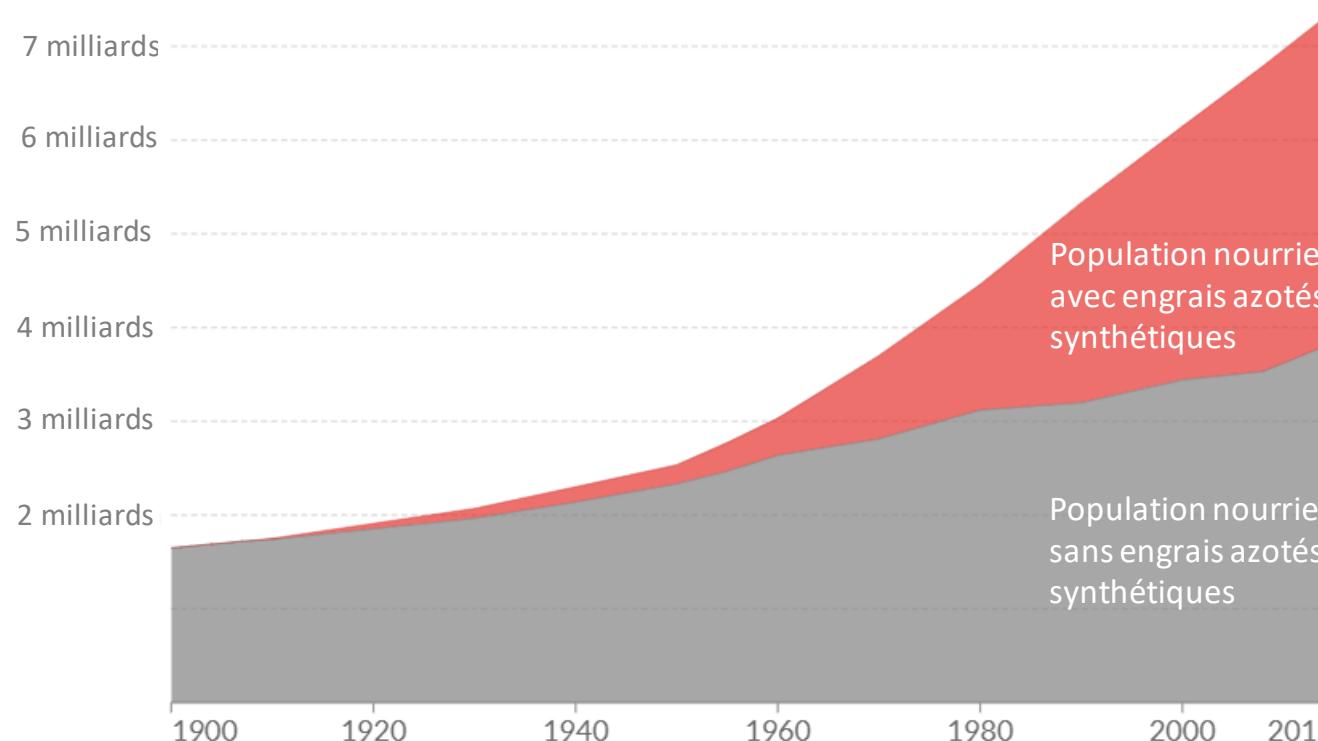
[procédé de Haber – Bosch]

Puis, à partir de l'ammoniac,
on synthétise des **engrais azotés**

Perturbation des cycles biogéochimiques

Le procédé Haber - Bosch

Estimation de la fraction de la population mondiale nourrie avec et sans engrais azotés synthétiques (via le procédé Haber – Bosch)



Les engrains chimiques représentent environ la moitié de l'apport d'azote dans l'agriculture mondiale, tandis que la fixation biologique de l'azote dans les légumineuses représente l'autre moitié. Cela signifie qu'environ la moitié des atomes d'azote présents dans le corps d'une personne moyenne vivant dans un pays développé sont passés par une usine chimique et ont participé à la réaction de Haber - Bosch qui transforme l'azote en ammoniac.

Perturbation des cycles biogéochimiques

Le procédé Haber - Bosch



- 230 millions de tonnes d'ammoniac anhydre produits par an, soit 13 tera moles !
- Synthèse à haute température (400 - 600°C) et haute pression (20 - 40 MPa = 200 – 400 atm) : très coûteuse en énergie
→ 1 % de la demande mondiale en énergie
- 1,4 % des émissions de gaz à effet de Serre

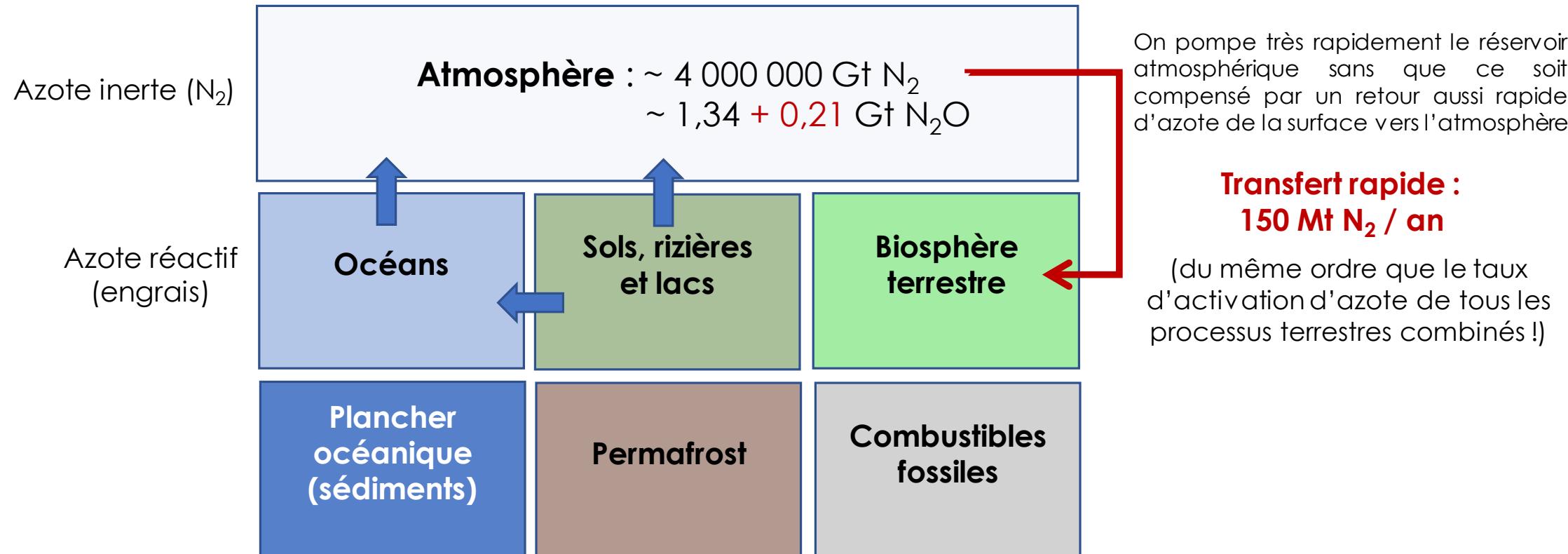
L'application d'engrais azotés accroît la nitrification et la dénitrification par les micro-organismes des sols et des eaux de surface → augmentation de la concentration de N₂O atmosphérique.

Depuis 1750, la concentration atmosphérique de N₂O a cru de 20 % (de 270 à 332 ppb).

N. B. : on retire du diazote (N₂) de l'atmosphère mais on ajoute du protoxyde d'azote (N₂O) [pas dans les mêmes quantités cependant]

Perturbation des cycles biogéochimiques

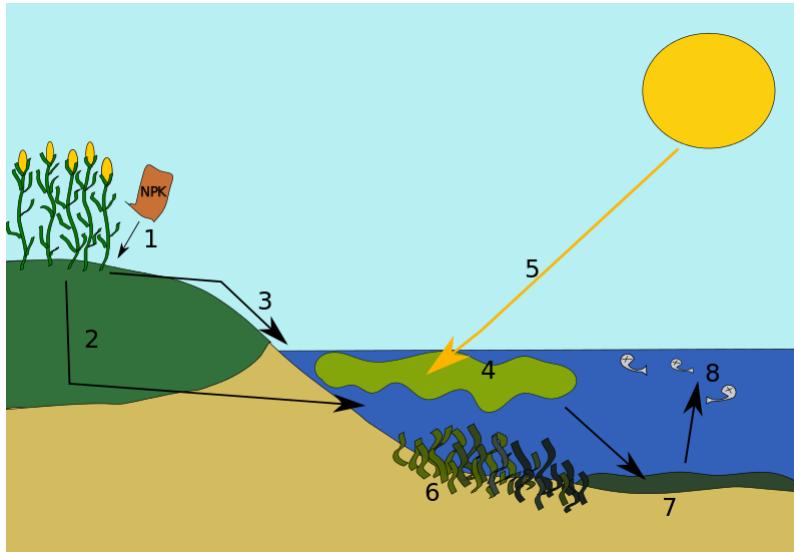
Le cycle de l'azote



- Augmentation de protoxyde d'azote dans l'atmosphère
 - Accumulation d'azote dans l'hydrosphère (océans, fleuves, nappes phréatiques, ...)
- Conséquence : phénomène d'eutrophisation

Perturbation des cycles biogéochimiques

L'eutrophisation

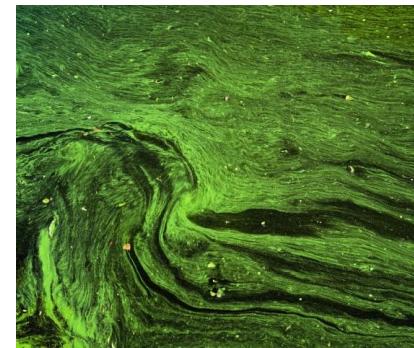


Un grand gâchis : seuls 50 % des engrains appliqués sont absorbés par les plantes.

Efflorescence algale sur la rivière Spree à Berlin.
Image : Lars Plougmann | Flickr Creative Commons

1. Application **excessive de nutriments** sur les sols.
2. Une part des nutriments s'infiltra dans le sol et percole jusqu'aux eaux de surface.
3. Une part des nutriments ruisselle directement vers les eaux de surface.
4. L'excès de nutriments génère une efflorescence (croissance massive) algale (bloom).
5. Le bloom algal bloque la pénétration de la lumière dans l'eau.
6. Les plantes sous le bloom meurent de l'insuffisance de photosynthèse.
7. Le bloom algal meurt et sédimente vers le fond.
8. Les micro-organismes décomposent la matière organique morte. Cela crée un pic de consommation en oxygène qui appauvrit le milieu.
9. Les plus gros organismes, comme les poissons, meurent des **conditions anoxiques**.

Conséquences : Pollution aux algues vertes



Saint-Michel-en-grève
(Bretagne, 2016)

Plan de cours (rappel)

- L'Anthropocène
- Les limites planétaires

Focus sur 4 de ces limites : **1) Le changement climatique** (et ses conséquences),
2) L'acidification des océans,

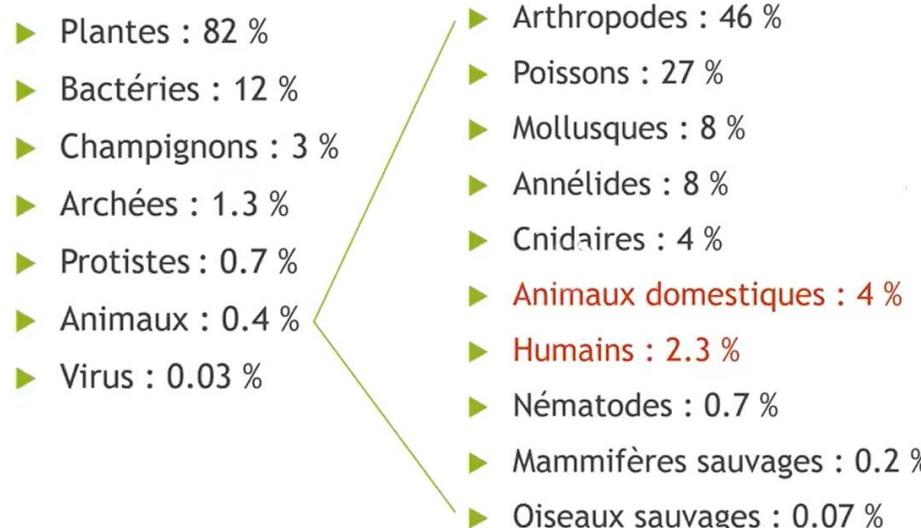
En résumé : le cycle (simplifié) du carbone,

3) Le cycle de l'azote,

4) La chute de la biodiversité.

La biodiversité et l'humain

- Apparition du vivant : 3,7 milliards d'années ;
Apparition du genre Homo : ~ 3 millions d'années ;
de l'espèce Homo sapiens : 300 000 années
- Biosphère : épaisseur comprise entre -15 et + 15 km autour de la Terre.
En fait, ~ 75 % du vivant compris entre -100 et + 100 m !
- 2 M d'espèces décrites
10 à 100 M d'espèces vivantes estimées → 80 à 98 % des espèces actuelles nous sont encore inconnues !
- Estimation de la biomasse : 1120 Gt (550 Gt Carbone)



Masse animaux domestiques ~ 20 x mammifères sauvages
~ 2 x humains

[Humains : $2.3 \times 0.4\% \sim 0.01\%$ de la biomasse]

Chute de la biodiversité

Les 3 piliers de la biodiversité

- **Diversité des écosystèmes** (zones humides, forestières, désertiques, ...)

- **Diversité des espèces**

Plus il y a d'espèces, plus l'écosystème est robuste (vis-à-vis d'une perturbation).

- **Diversité des individus (donc des gènes)**

Plus il y a de gènes différents, plus l'espèce est capable de s'adapter à un changement.



Chute de la biodiversité

Les 3 piliers de la biodiversité

- Diversité des écosystèmes (zones humides, forestières, désertiques, ...)

*Disparition des milieux humides : - 87 % dans le monde (depuis le XVIII^e siècle)
- 50 % en France entre 1960 et 1990*

- Diversité des espèces

Plus il y a d'espèces, plus l'écosystème est robuste (vis-à-vis d'une perturbation).

40 % des espèces d'amphibiens et 25 % des mammifères menacées de disparition

- Diversité des individus (donc des gènes)

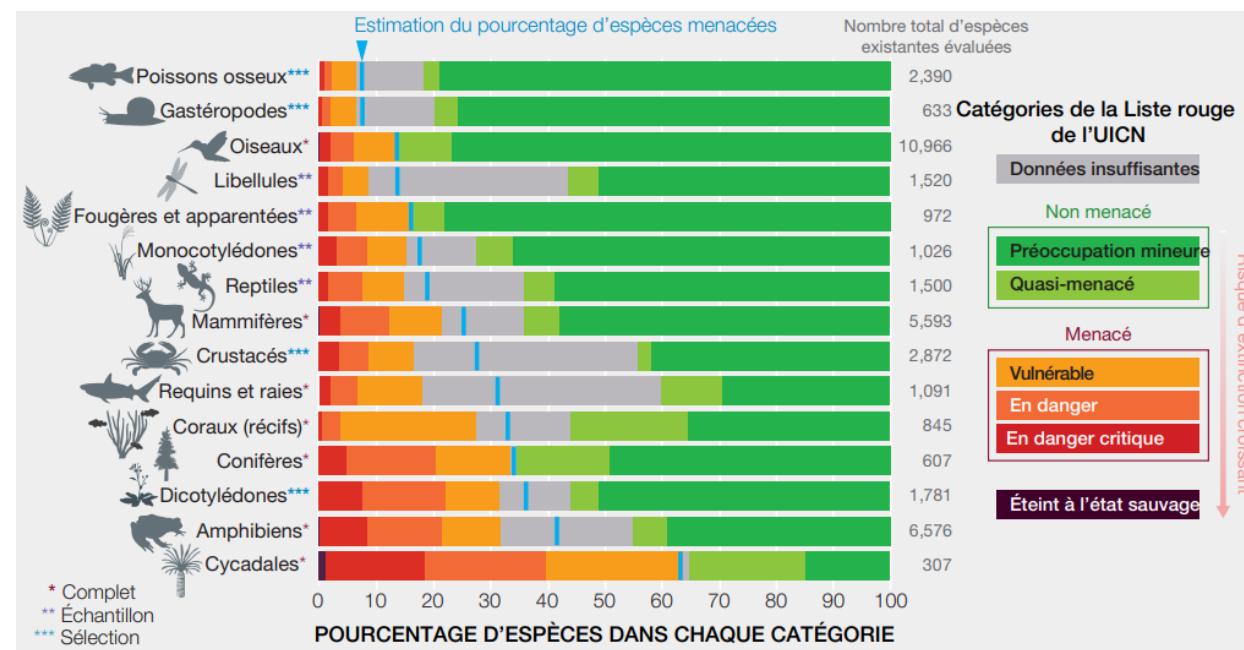
Plus il y a de gènes différents, plus l'espèce est capable de s'adapter à un changement.

69 % de réduction des populations entre 1970 et 2018 (selon l'indice planète vivante)

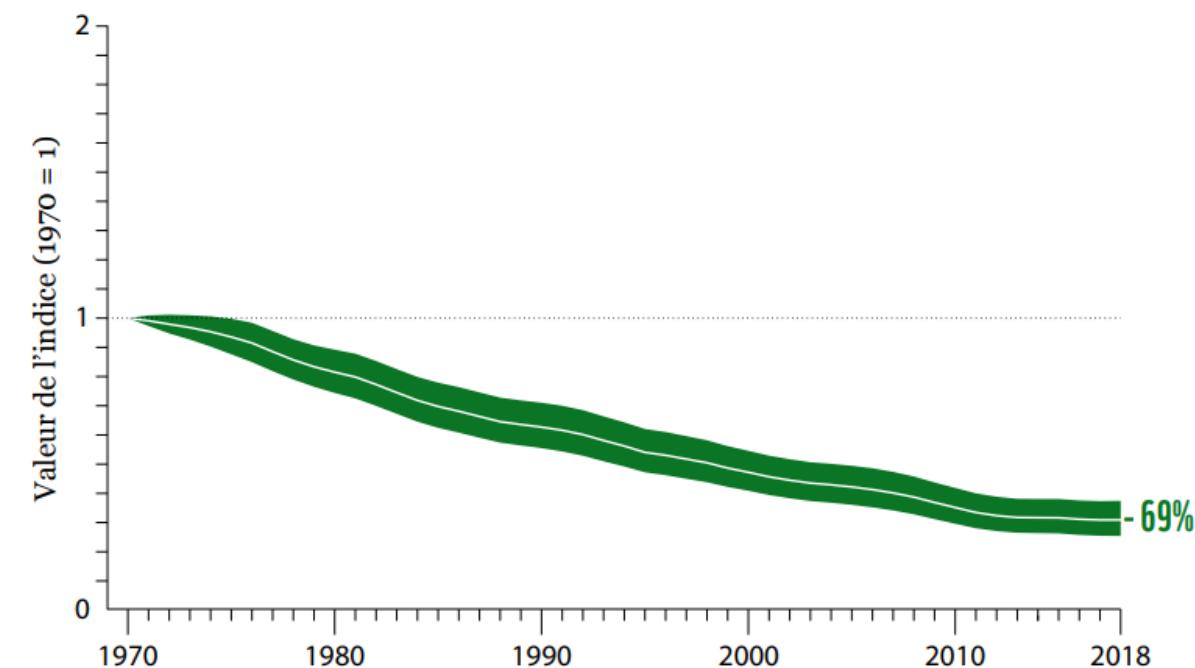


Chute de la biodiversité

Risque d'extinction au niveau mondial (IPBES 2019)



Indice Planète vivante (WWF 2022)



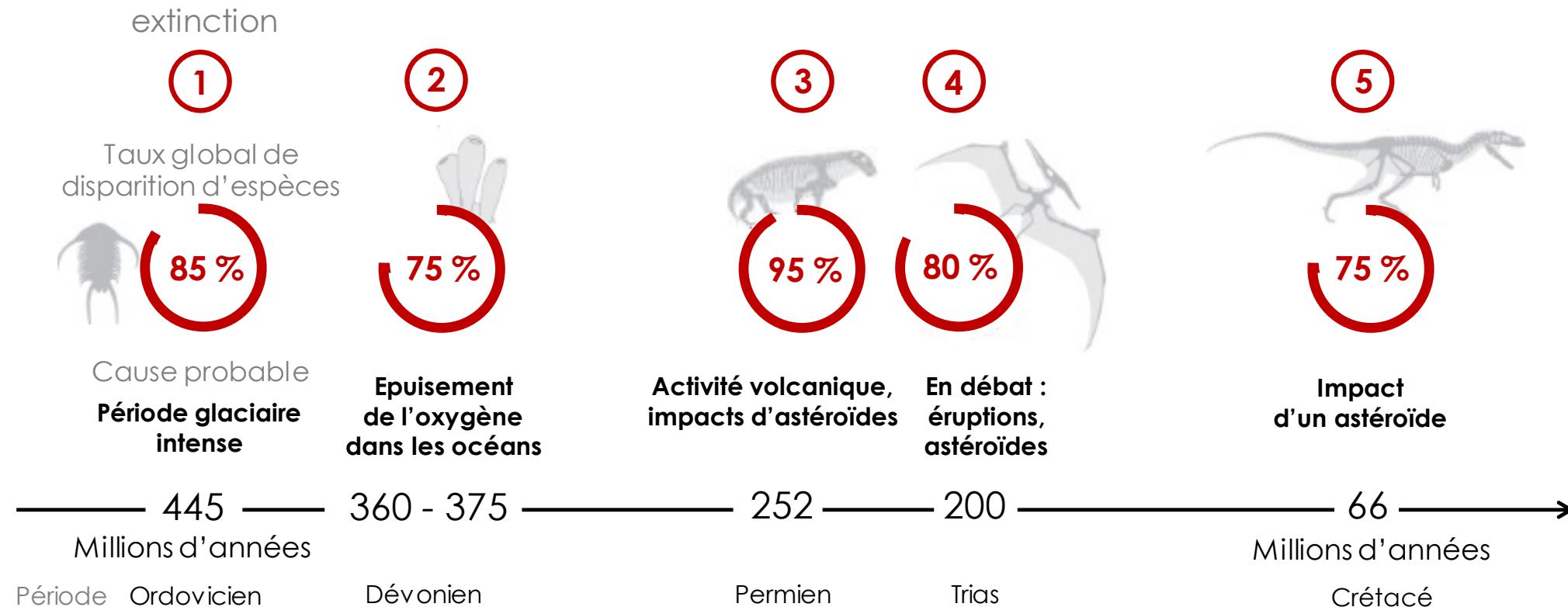
« 1 million d'espèces animales menacées d'extinction, au cours des prochaines décennies (inédit dans l'histoire de l'humanité) »

L'évolution moyenne de l'abondance relative de 31 821 populations représentant 5 230 espèces suivies dans le monde a diminué de 69 %. La ligne blanche indique les valeurs de l'indice et les zones colorées l'intervalle de confiance entourant la tendance (95 % d'intervalle de confiance, écart de 63 % à 75 %). Source : WWF/ZSL (2022)

Chute de la biodiversité

Les principales extinctions de masse

Depuis 500 millions d'années, la Terre a connu **5 principales crises d'extinction massive d'espèces** :



Extinction de masse (définition usuelle) :

75 % des espèces de la planète éradiquées dans un temps « court » (1 M années)

Chute de la biodiversité

Une 6^e extinction de masse ?

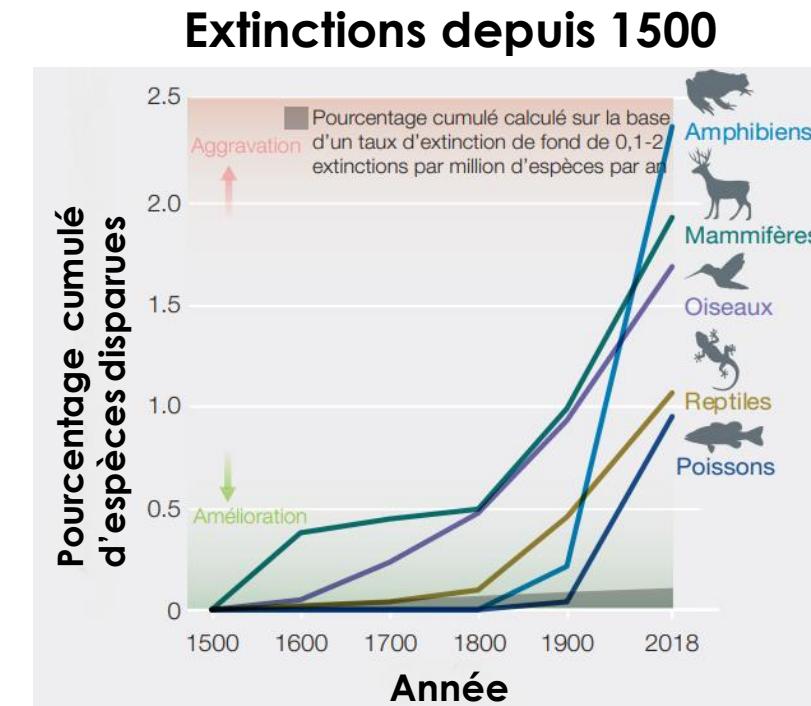
Formellement pas encore atteinte mais les tendances sont très inquiétantes.

Taux d'extinction actuel : ~ 100 - 1000 fois plus important que le *taux naturel* (incertitudes grandes).

1 million d'espèces animales menacées d'extinction dans les prochaines décennies (inédit dans l'histoire de l'humanité).

La santé des écosystèmes dont nous dépendons se dégrade plus vite que jamais. Nous sommes en train d'éroder les fondements mêmes de nos économies, nos moyens de subsistance, la sécurité alimentaire, la santé et la qualité de vie dans le monde entier. R. Watson (président de l'IPBES).

La bonne nouvelle : il est encore temps d'inverser la tendance. Il existe de nombreux exemples de conservation qui ont marché et le vivant est extrêmement prompt à rebondir quand la pression est supprimée [tant que des seuils d'irréversibilité ne sont pas franchis].



Chute de la biodiversité

Les 5 causes principales

**La destruction des habitats
[changements d'usage des sols]**

**La surexploitation des ressources
(chasse / pêche)**

Le changement climatique

La pollution

Les espèces exotiques envahissantes

Chute de la biodiversité

Destruction des habitats [changements d'usage des sols] : exemples

Pratiques agricoles et forestières : déforestation, assèchement des zones humides, ...

Déforestation et plantations.

Monocultures de soja (Brésil), huile de palme (Indonésie), ...



Remembrement agricole (France 50-70's)

Suppression du bocage (haies, vergers) pour agrandir les parcelles



Pontivy (Morbihan), en 1952 (à gauche) et 2023 (à droite)

Autres exemples (France) : assèchement des Landes (19^e s), du Marais poitevin et de la Camargue (20^e s), monocultures de résineux (Landes, Morvan), ...

Chute de la biodiversité

Destruction des habitats [changements d'usage des sols] : exemples

Artificialisation des sols (par les infrastructures, l'urbanisation, ...)

- En France, depuis 1981, les terres artificialisées sont passées de 3 à 5 millions d'hectares (+66 %).
- Chaque année, entre 20 000 et 30 000 ha sont artificialisés : c'est l'équivalent de la surface d'un département tous les 8 ans (ou de 100 terrains de football par jour).
- Cette croissance est presque 4 fois plus rapide que celle de la population.

Exemples : une retenue d'eau, un aéroport, une autoroute, une rocade, l'extension d'une zone industrielle, commerciale ou pavillonnaire, un rond-point, un entrepôt logistique, etc.



- Outre son rôle de support et réservoir de biodiversité, le sol rend de nombreux services écosystémiques : stockage carbone, filtration de l'eau, décomposition de la matière organique, etc. Une fois imperméabilisé, il ne peut plus jouer ces différents rôles.
- Le sol n'est pas une ressource renouvelable. Temps pour former un cm de sol : 1000 ans.

L'essentiel à retenir

- Notion d'Anthropocène
- Limites planétaires (définition)
- Réchauffement climatique et émissions de gaz à effet de serre :
 - définition du réchauffement,
 - quelques ordres de grandeur : émissions mondiales (50 Gt/an), concentrations atmosphérique de CO₂ (valeurs actuelle et préindustrielle),
 - notion de budget carbone, notions d'inventaire national et d'empreinte carbone (valeurs moyennes d'un français),
 - cycle du carbone : notions de stock et de flux ; les réservoirs impactés (sans apprendre les valeurs)
- Cycle de l'azote : les réservoirs impactés
- Biodiversité : définition des 3 étages de biodiversité (écosystèmes, espèces, individus), les 5 causes principales de la chute

Compléments

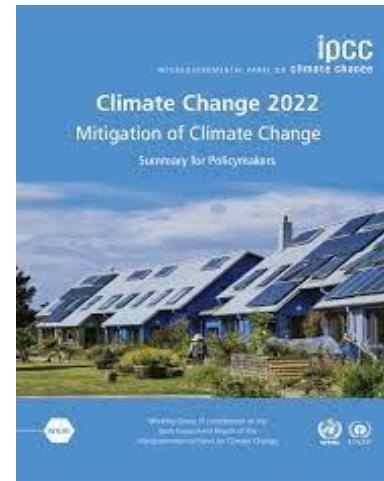
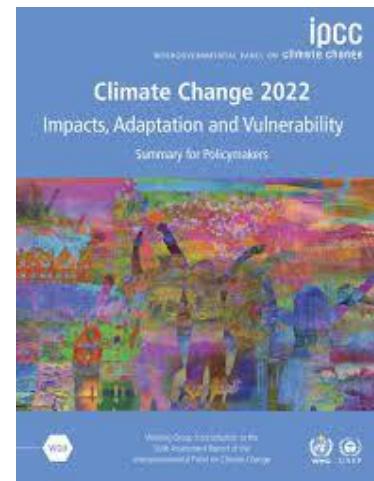
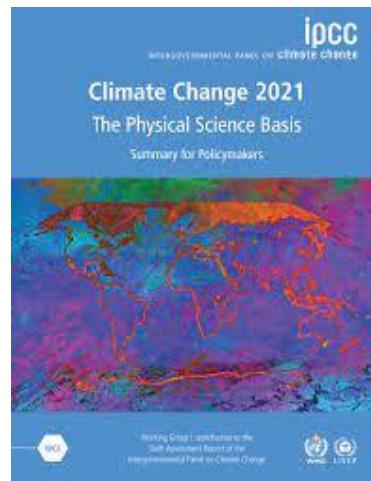
- Changement climatique :**
- Le GIEC
 - Part des forçages naturel et humain
 - Ensemble des mesures de températures depuis 1850
 - Disparité de la température (juillet 2023) à la surface de la Terre
 - Evolution de la concentration atmosphérique de CO₂ :
 - a) sur les 65 dernières années
 - b) sur les 300 dernières années
 - c) sur les 10 000 dernières années
 - d) sur les 800 000 dernières années
 - Les 3 principaux gaz à effet de serre
 - Elévation du niveau de la mer
- Biodiversité :**
- IPBES
 - L'ensemble des extinctions d'espèces dans le temps
 - Des statistiques en France (ONB)

[Non traité en séance] Rétroactions, transitions, points de bascule

Glossaire

Le GIEC (IPCC)

6^e rapport d'évaluation (AR6), 2021-2023



[disponible ici](#)

Rapport complet : 2392 pages

3056 pages

2029 pages

170 pages

Résumé technique : 144 pages

118 pages

148 pages

85 pages

Résumé pour décideurs : 41 pages

34 pages

48 pages

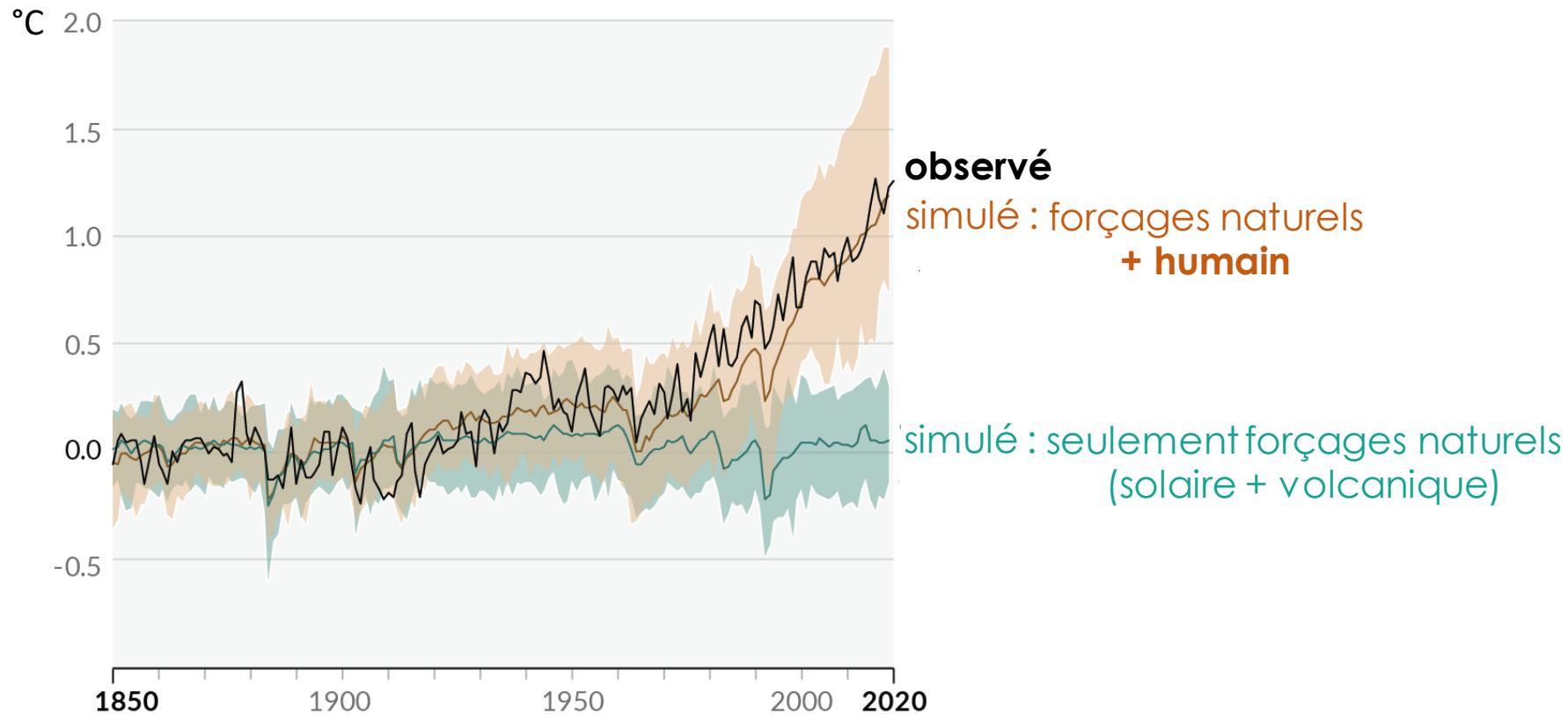
36 pages

- Plus de 8000 pages, rédigées par 787 chercheur.se.s,
- S'appuie sur plusieurs dizaines de milliers d'articles
(et +100 000 commentaires de scientifiques extérieurs)

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

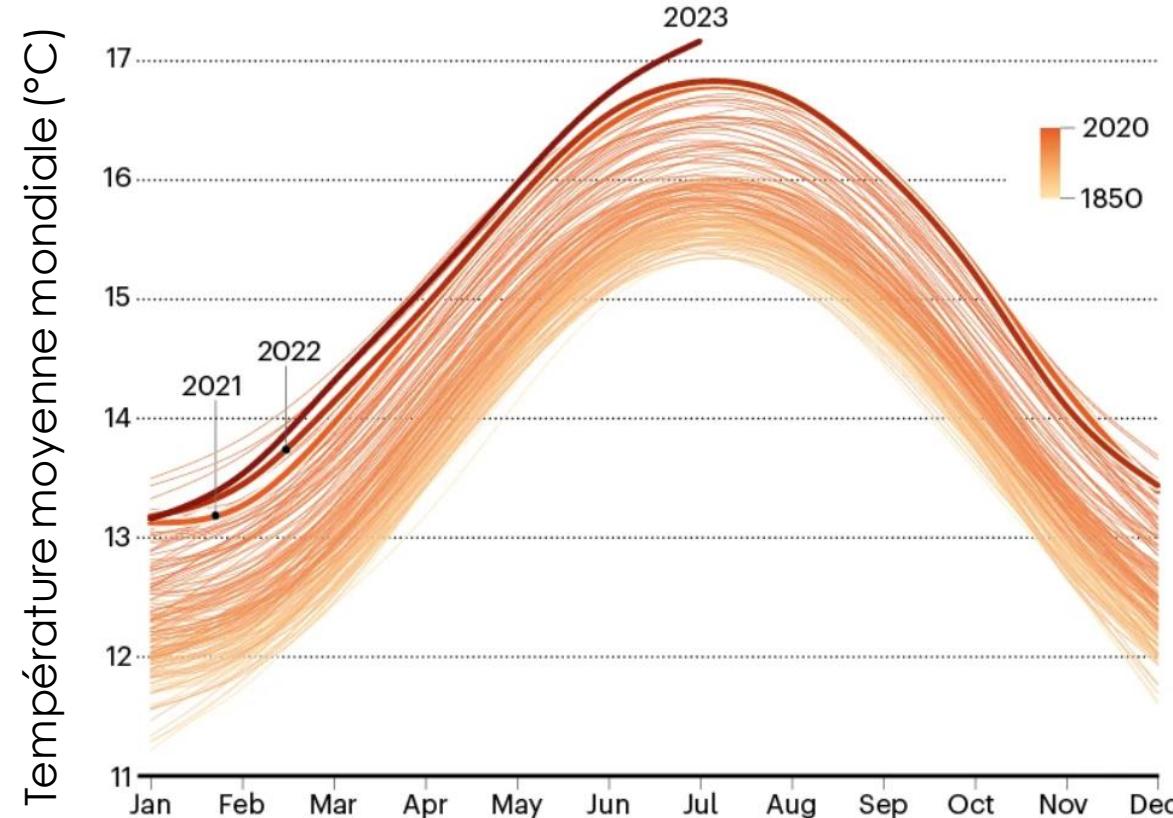
Les activités humaines sont responsables du réchauffement actuel

Variation de la **température moyenne à la surface** du globe



Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

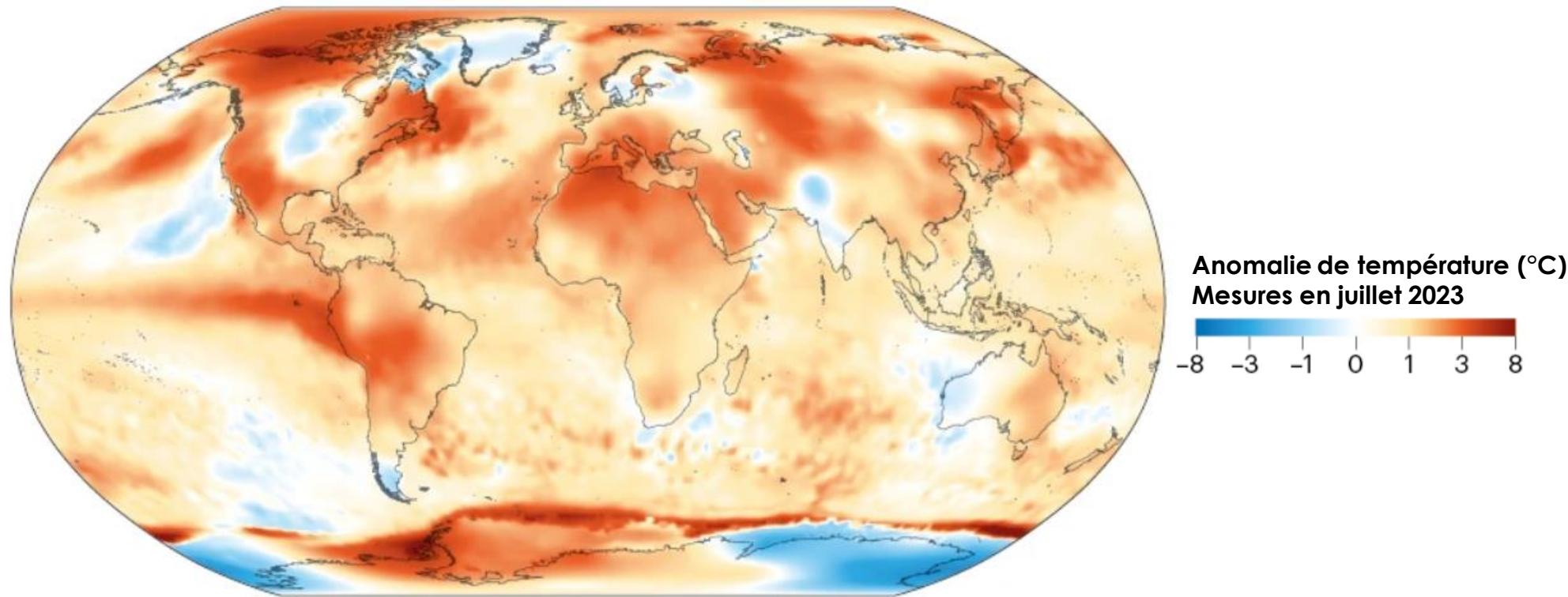
Les observations



Juillet 2023 : mois le plus chaud de toute l'histoire des enregistrements (depuis 1850).
+1,54°C par rapport à la période pré-industrielle.

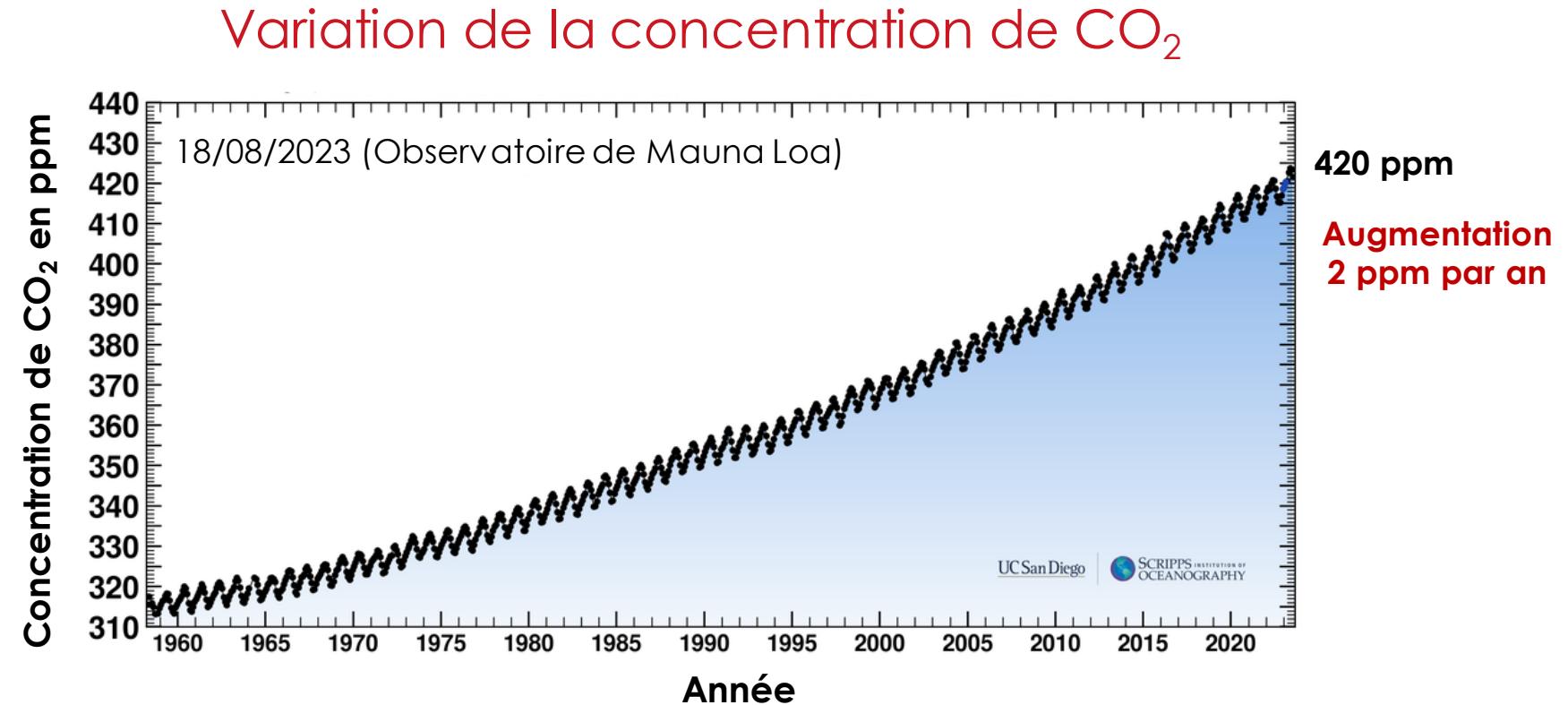
Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

L'élévation de la température moyenne (+1,14°C) cache des disparités importantes



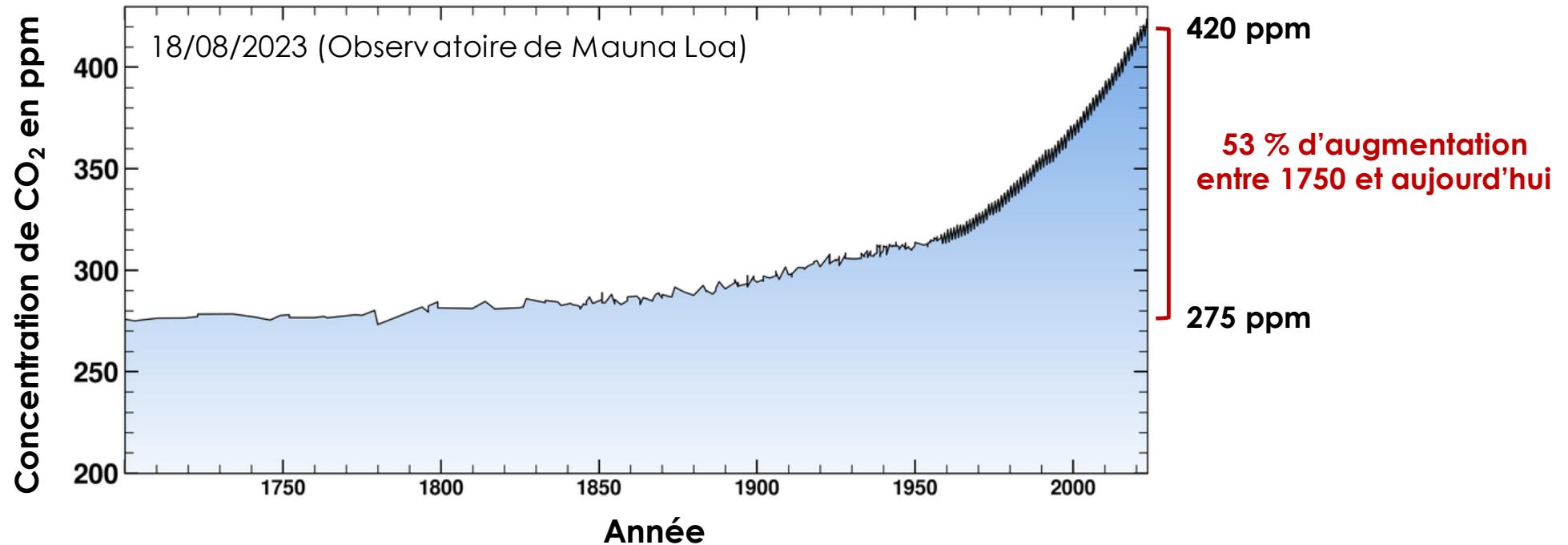
Juillet 2023 : des anomalies jusqu'à +8°C dans l'hémisphère Nord par rapport à la moyenne historique 1950-1980 des mois de juillet.

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique



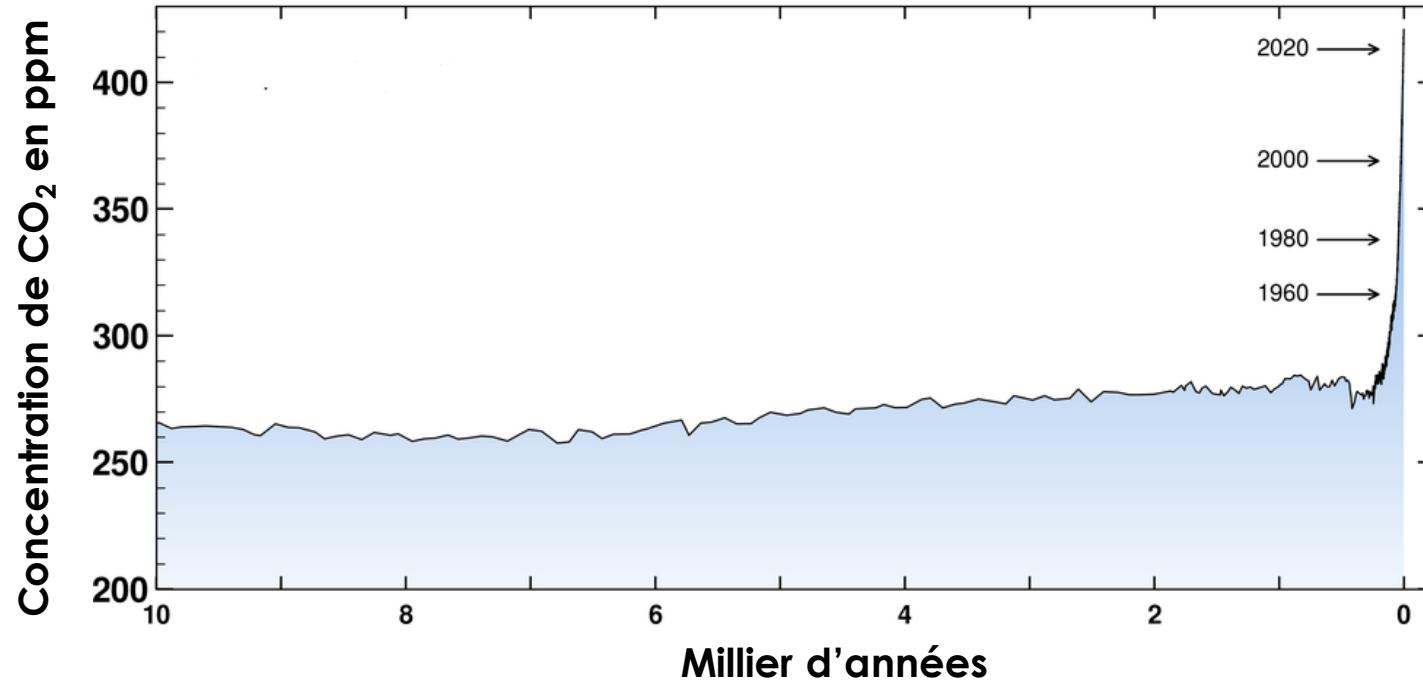
Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Variation depuis l'ère pré-industrielle



Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

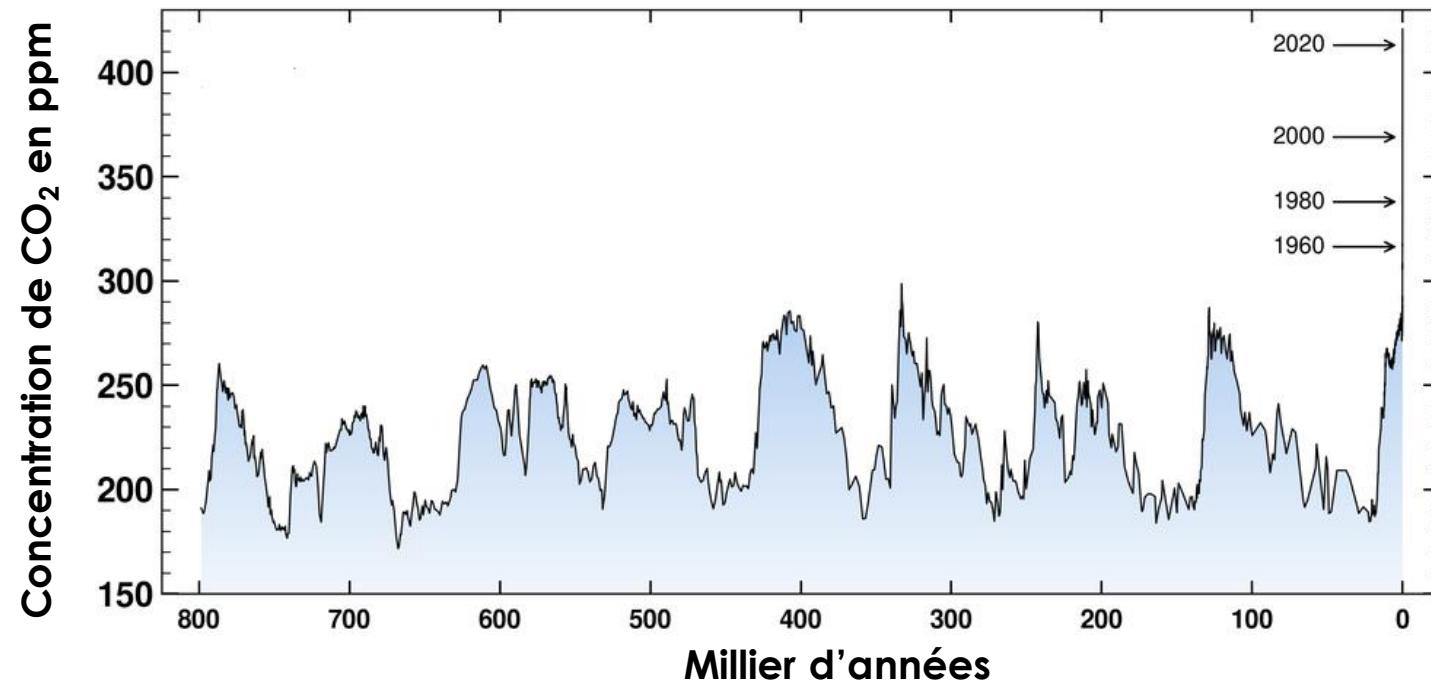
Variation depuis 10 000 ans



Echelle de temps sur laquelle l'humanité s'est développée
(agriculture, élevage, civilisations).

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Variation depuis 800 000 ans

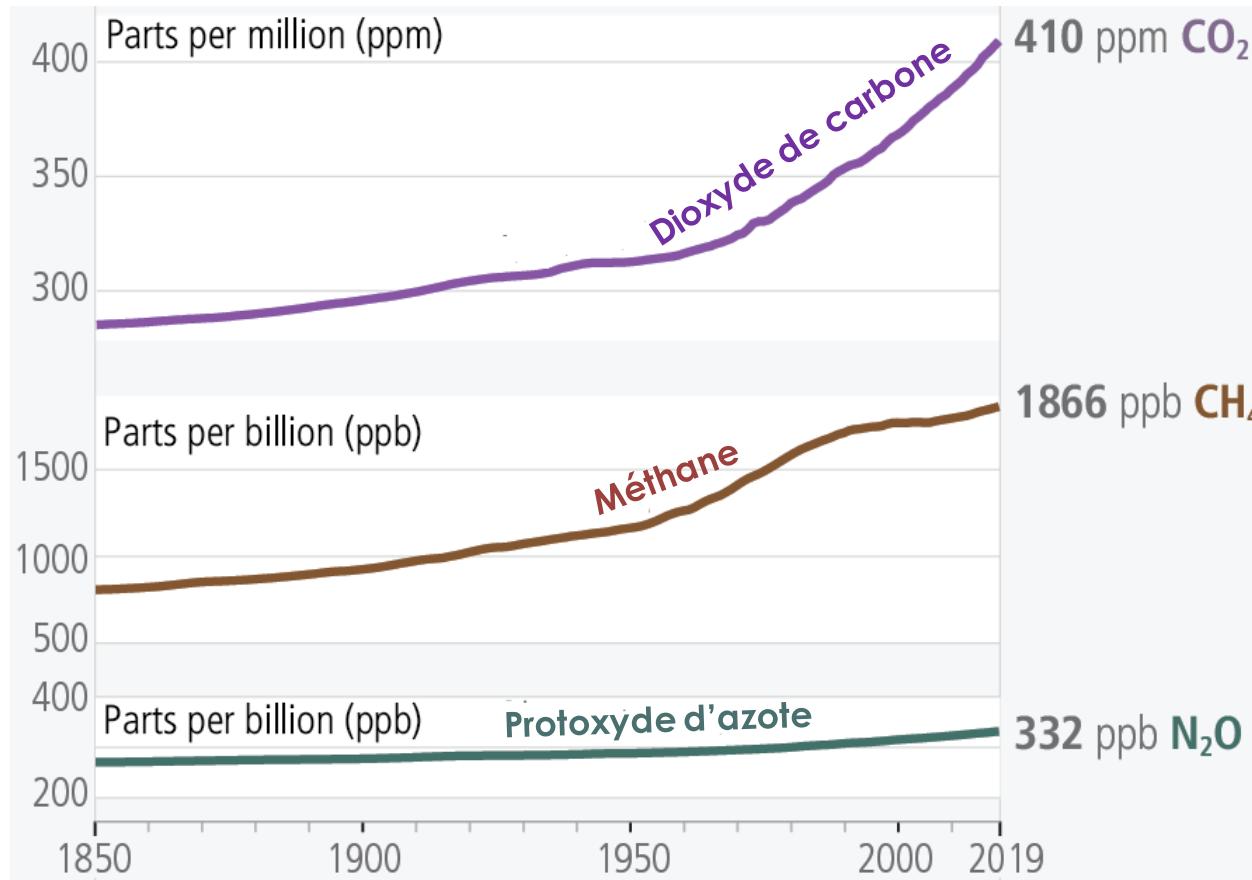


Les niveaux atmosphériques actuels apparaissent comme des pics instantanés relativement aux échelles de temps des variations glaciation – interglaciation.

Le système climatique est hors-équilibre.

Gaz à effet de serre & réchauffement climatique

Les 3 principaux gaz à effet de serre



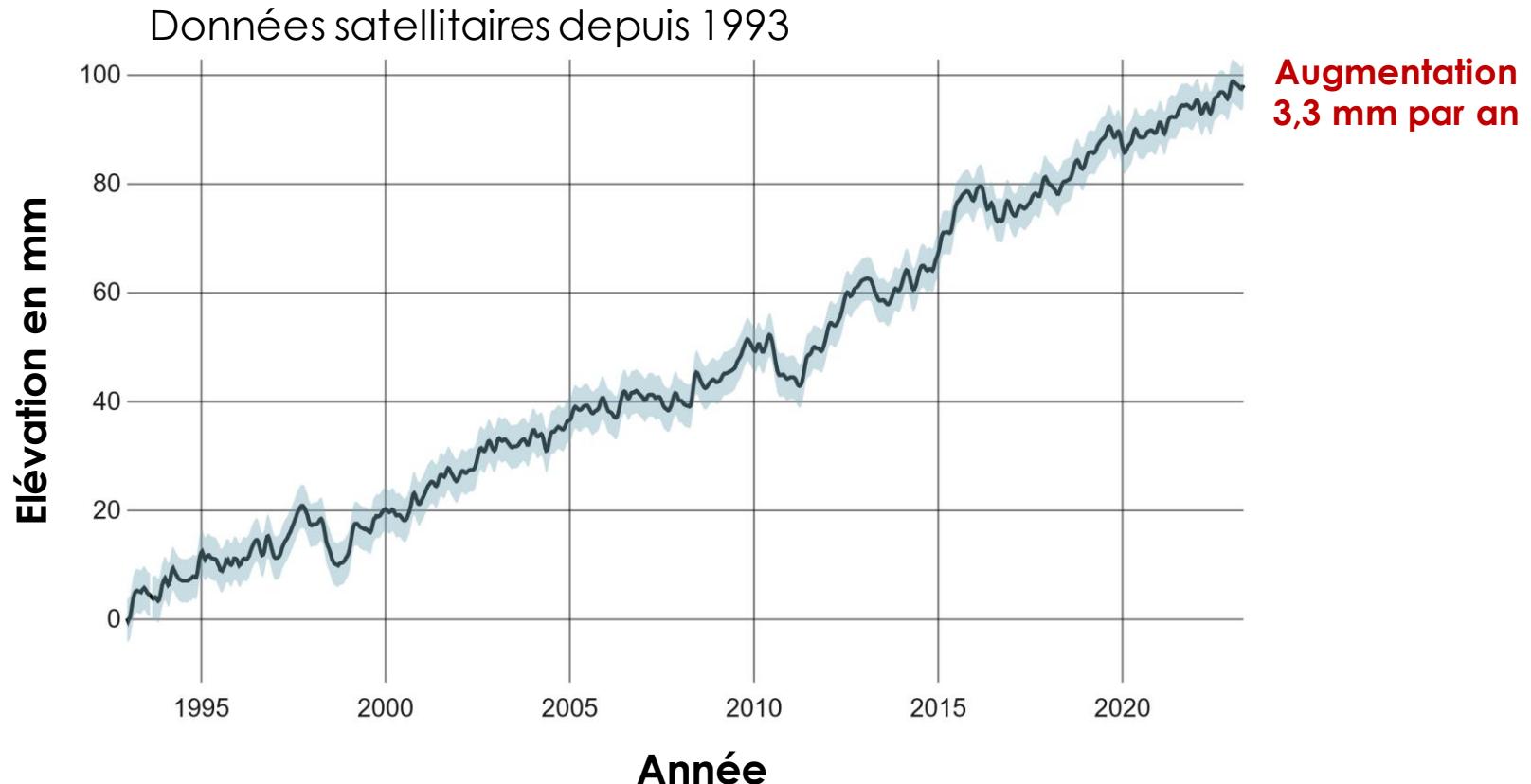
220 fois moins abondant que CO₂ mais pouvoir réchauffant^t 27 à 30 fois supérieur.
origine : gaz naturel, décharges publiques, digestion du bétail, rizières, ...

123 fois moins abondant que CO₂ mais pouvoir réchauffant^t 298 fois supérieur.
origine : engrais azotés, procédés industriels (synthèse du nylon), pollution routière

[Dimension verticale des graphiques proportionnelle aux émissions historiques de chacun des gaz]

Réchauffement climatique : les conséquences

Elévation du niveau de la mer



IPBES

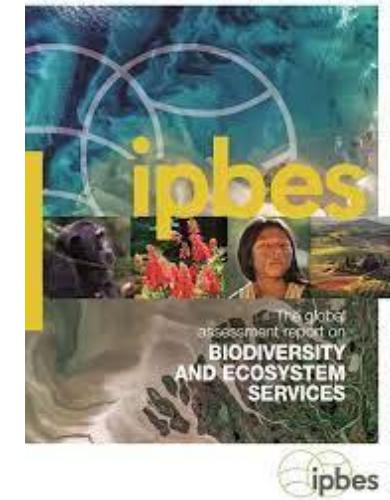
1^{er} rapport d'évaluation 2019

Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services

Élaboré par 145 experts issus de 50 pays (+ contributions additionnelles de 310 autres experts), le rapport évalue les changements au cours des cinq dernières décennies.

Rapport complet : 1148 pages.

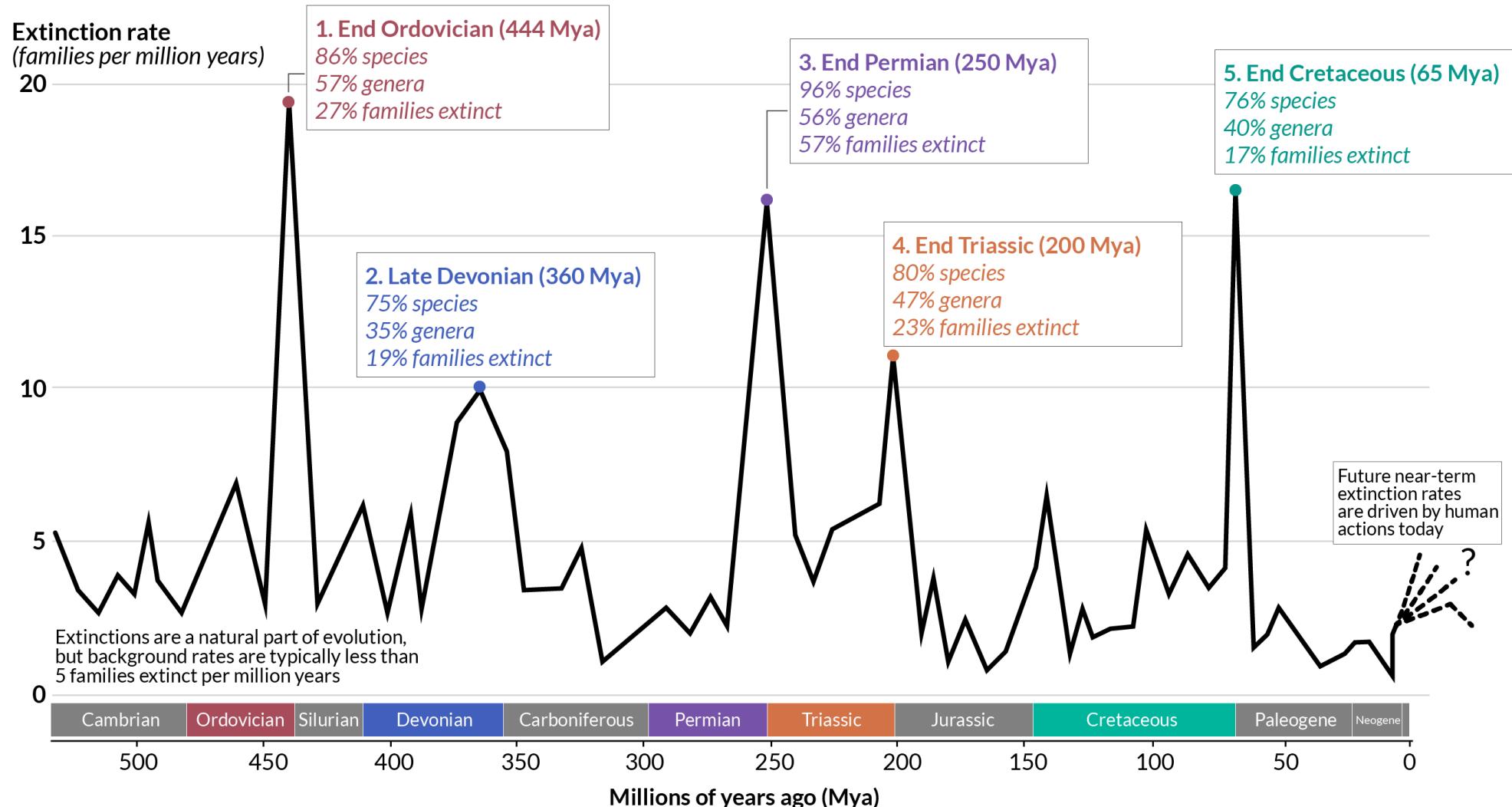
Résumé pour décideurs (60 pages) disponible en français [ici](#)



04/09/2023 : Rapport spécial sur les espèces invasives (Invasive Alien Species Assessment).

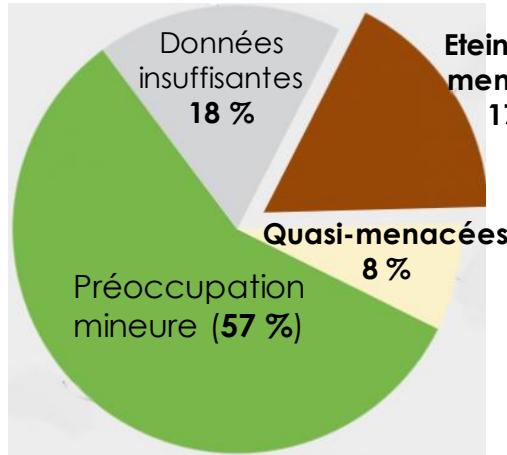
Chute de la biodiversité

Les 5 principales extinctions de masse

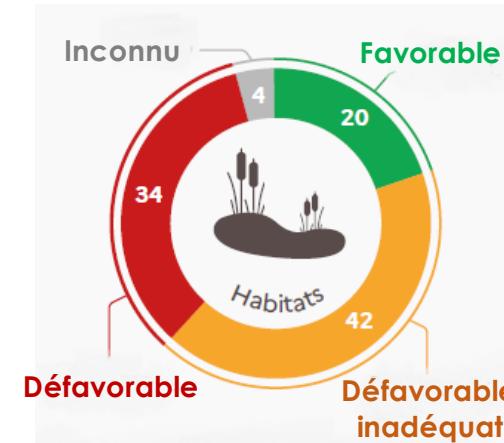


Chute de la biodiversité

En France



Un quart des espèces (faune et flore) éteintes, menacées ou quasi-menacées



76 % des habitats en état défavorable / inadéquat

Rapport 2023 de l'Observatoire national de la biodiversité (ONB)

La biodiversité continue de s'effondrer en France : « les principales pressions n'ont pas été réduites significativement en France, et se sont, pour certaines, intensifiées pendant la dernière décennie ».

En cause :

- **destruction et fragmentation des habitats naturels :** « l'artificialisation continue de progresser à un rythme supérieur à celui de l'accroissement de la population »
- **Prélèvement direct des espèces sauvages**
- **Pollutions.** Housse de la vente des produits phytosanitaires (+14 % sur la dernière décennie)
- **Changement climatique** (pressions sur les cours d'eau, modification des aires de répartition des espèces, ...)
- **Espèces exotiques envahissantes**

Des dynamiques qui entraînent une homogénéisation de la biodiversité (faune et flore), une des formes de son déclin.

État de conservation des habitats d'intérêt communautaire sur la période 2013-2018 (en % d'évaluations)

Non-linéarité, rétroaction

Exemples de boucles de rétroaction **positive** (amplifient l'effet du mécanisme initial) :

+

- Température moyenne **augmente** → Couverture des zones de neige/glace **diminue** → Réflexion du rayonnement solaire (albédo) **diminue**
- Epaisseur du permafrost **diminue** → Méthane libéré dans l'atmosphère : **augmentation** de l'effet de serre
- Humidité des sols **diminue** → Végétation dépérit : humidité générée par évapotranspiration **diminue**

Exemple de boucles de rétroaction **négative** (s'opposent à l'effet initial) :

-

- $[CO_2]$ atmosphérique **augmente** → Fertilité des arbres **augmente** → Stockage carbone **augmente**

Il en existe beaucoup et certains de ces mécanismes sont couplés entre eux.

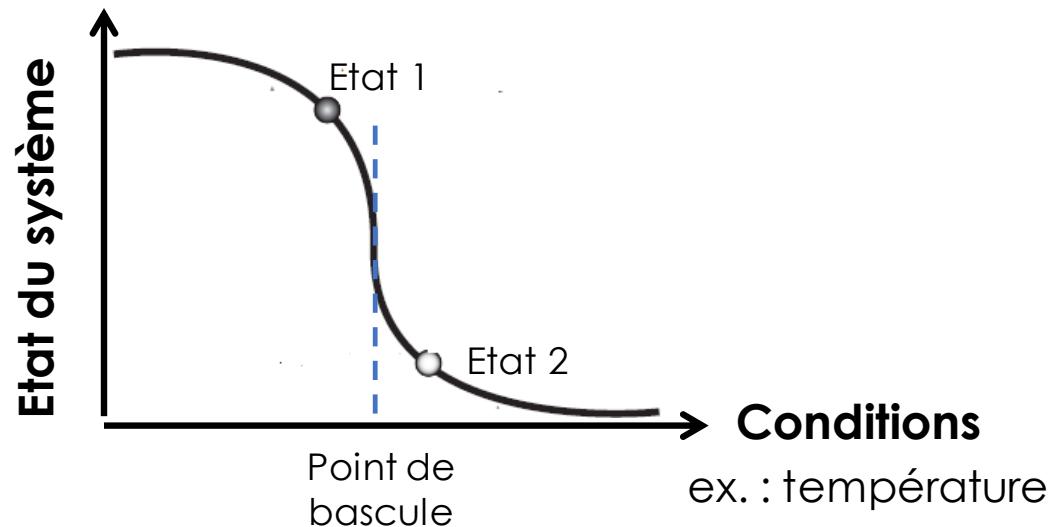
Transitions. Points de bascule

Au fur et à mesure qu'augmentent la concentration atmosphérique en CO₂ et la température moyenne, la croissance des arbres augmente mais leur mortalité aussi (réduisant le temps de résidence du carbone). A partir d'un certain seuil en température, c'est la mortalité/pourrissement de la biomasse qui domine.

→ Une forêt passe d'une situation de puits de carbone à une situation de source de carbone.

Cette transition (puits → source) s'est déjà opérée dans la [partie sud-est de l'Amazonie](#). [Nature, 620, 712 \(2023\)](#)

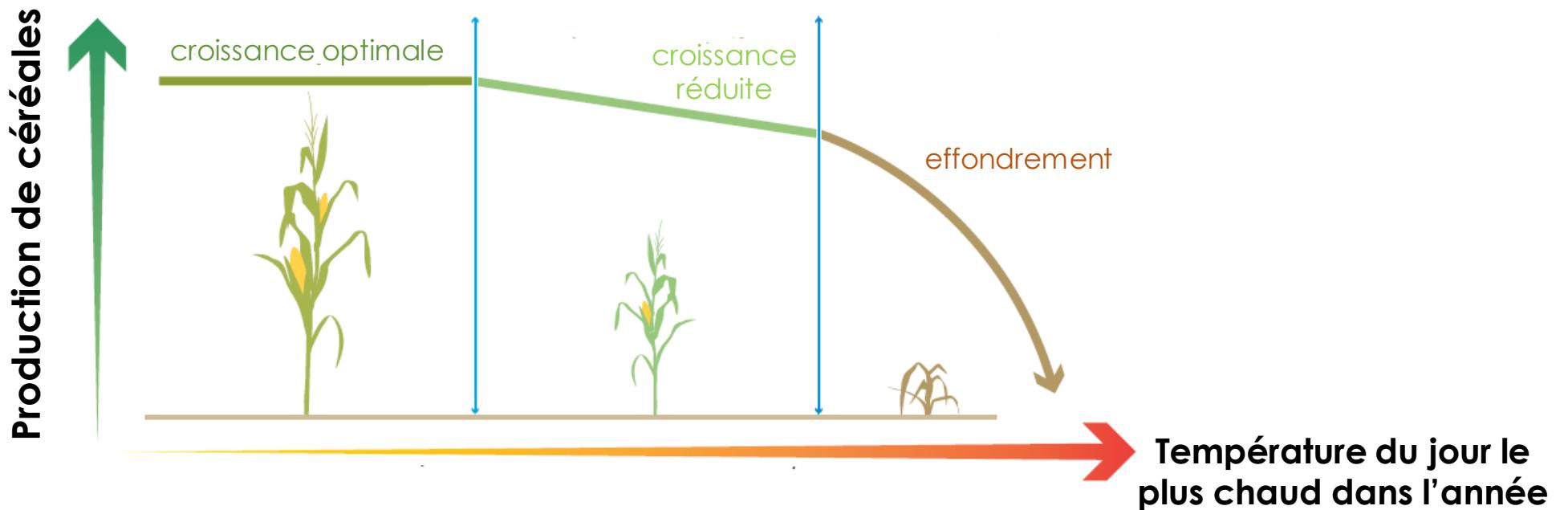
Si ce changement est marqué/soudain, on parle de basculement ou de **transition critique**, à laquelle est associée un point de bascule (*tipping point*) ou **seuil critique**.



Ex. : la température critique au-delà de laquelle la machinerie photosynthétique des arbres tropicaux commence à tomber en panne est d'environ 46,7 °C (ce seuil sera atteint pour un réchauffement de +4°C). [Nature, 621, 105 \(2023\)](#)

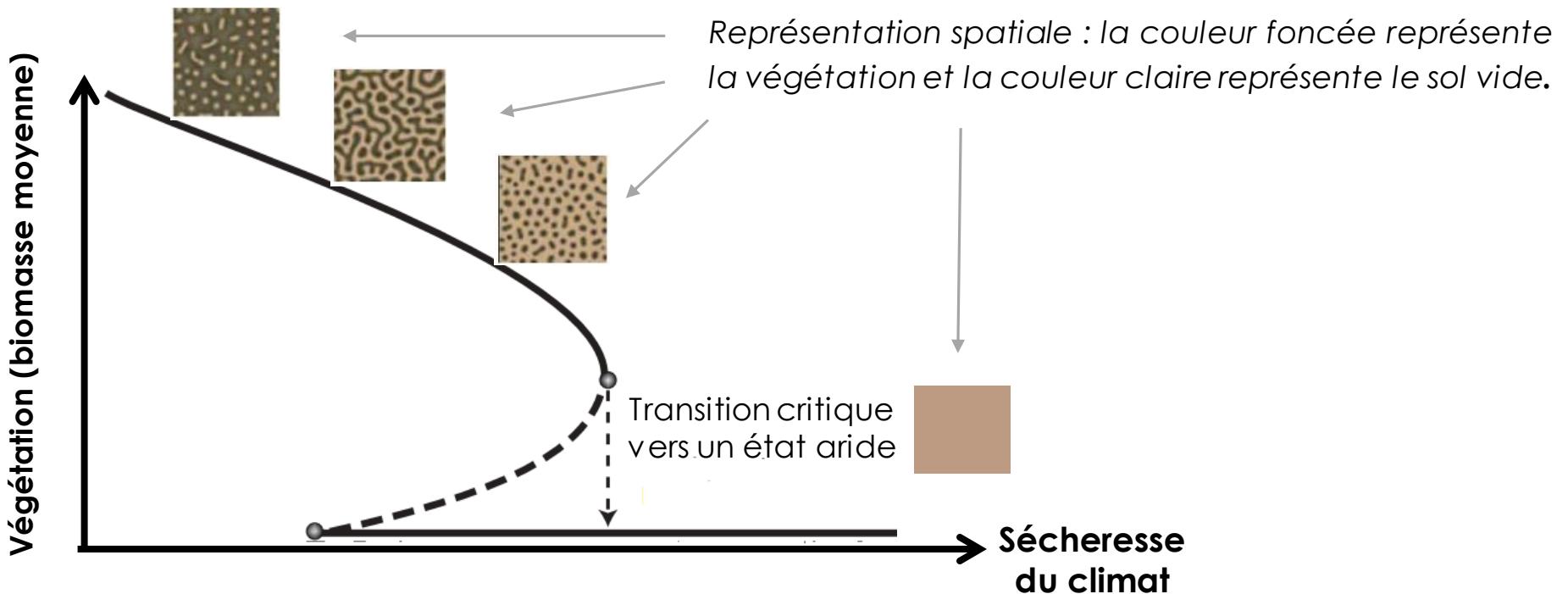
Transitions. Points de bascule

Réponse des rendements agricoles aux extrema de température



Transitions. Points de bascule

Réponse (modélisée) de la végétation semi-aride à l'augmentation de la sécheresse du climat

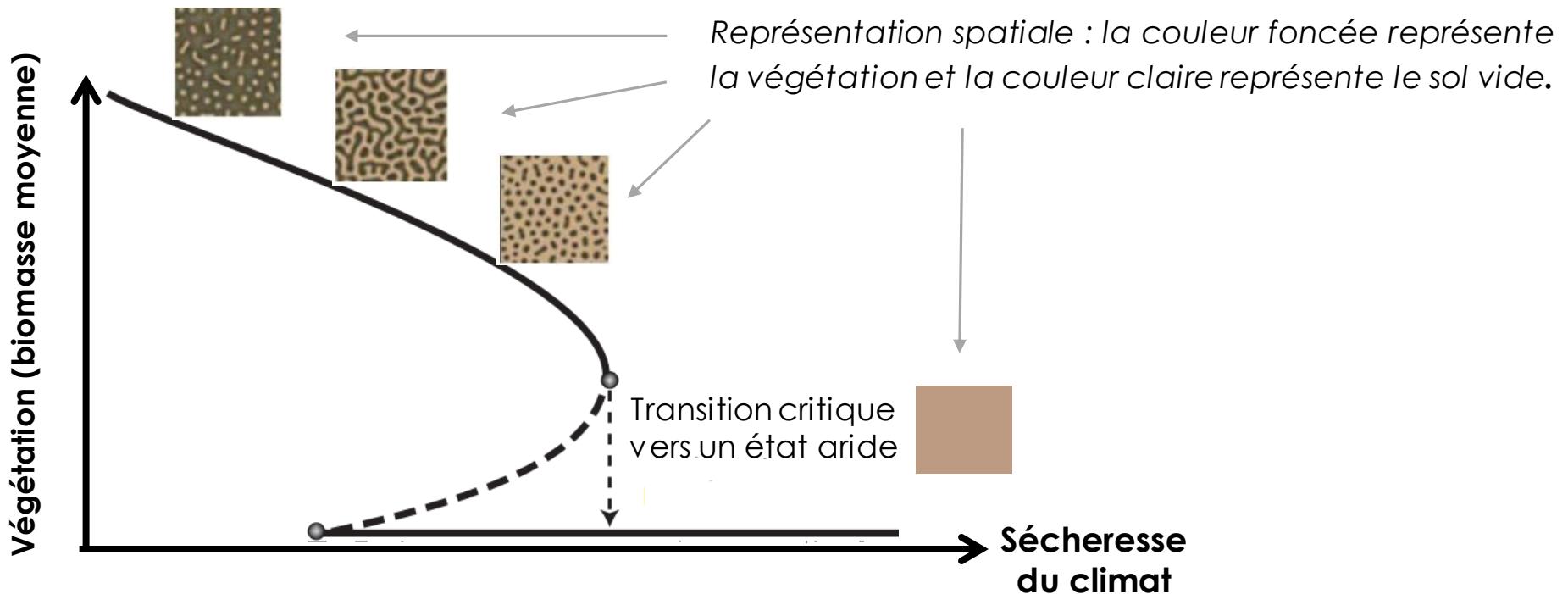


Les lignes pleines représentent les densités moyennes de végétation à l'équilibre.

Dans ce type de transition, le « retour en arrière » est difficile.

Transitions. Points de bascule

Réponse (modélisée) de la végétation semi-aride à l'augmentation de la sécheresse du climat



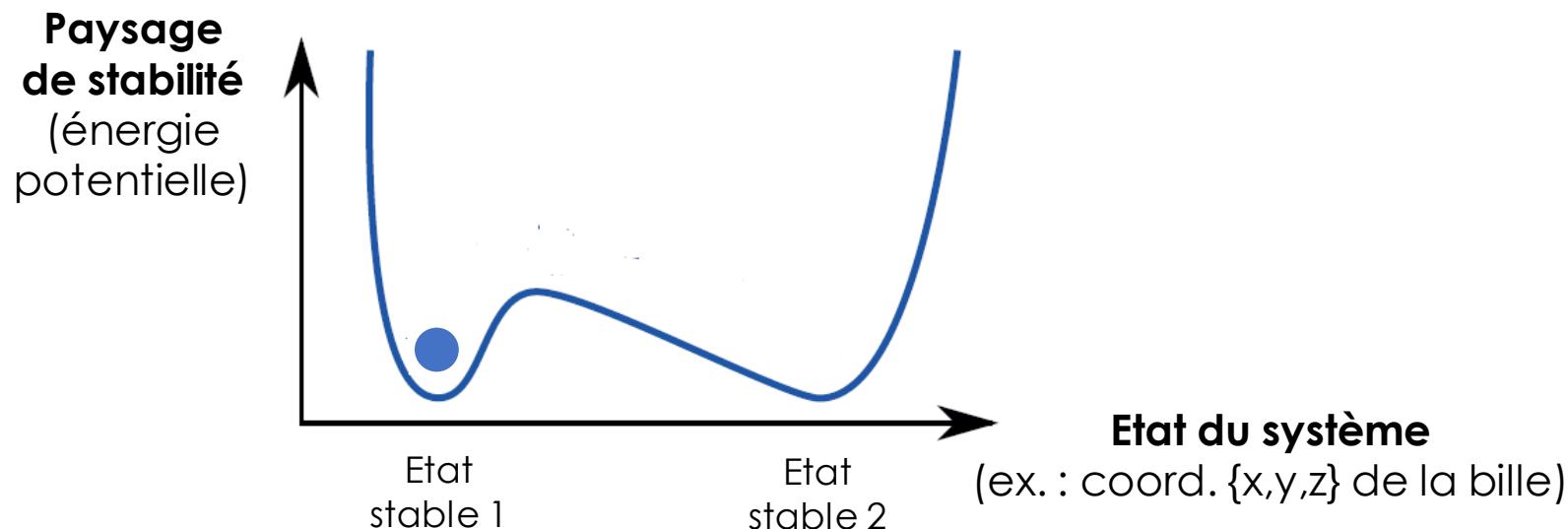
La forêt amazonienne pourrait se transformer en savane.

Point de bascule estimé : réchauffement de +4°C (ou déforestation supérieure à 40 %).

Transitions. Points de bascule

Les différents états possibles du système et leur stabilité peuvent être représentés dans un diagramme appelé paysage de stabilité.

Analogie avec un système mécanique : l'axe des ordonnées est l'énergie potentielle du système, l'axe des abscisses est une variable (ou un ensemble de coordonnées) caractérisant l'état du système. La bille représente la position du système dans ce paysage.



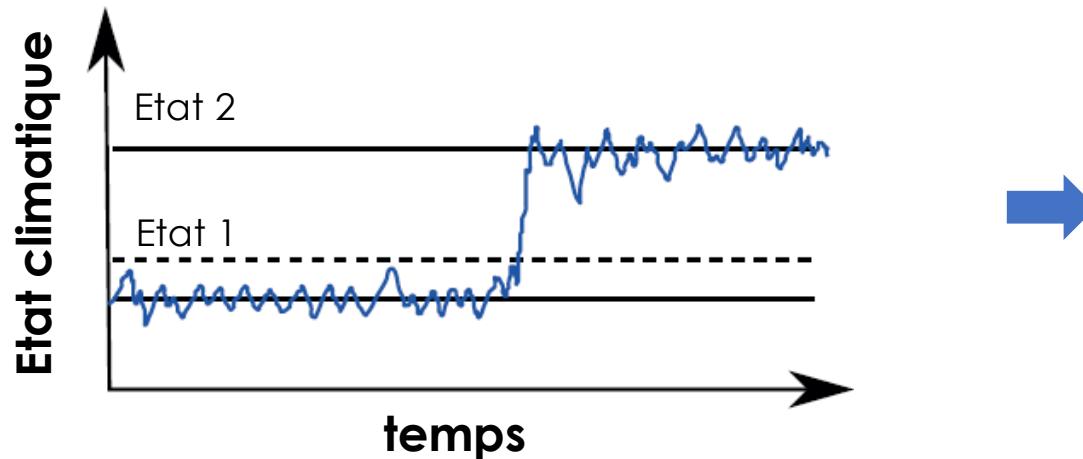
Les "vallées" représentent les différents états stables que le système peut occuper, les "sommets de colline" séparant les états stables. La résilience d'un état est déterminée par la profondeur de la vallée. Ici, le système est initialement dans l'état stable 1.

Transitions. Points de bascule

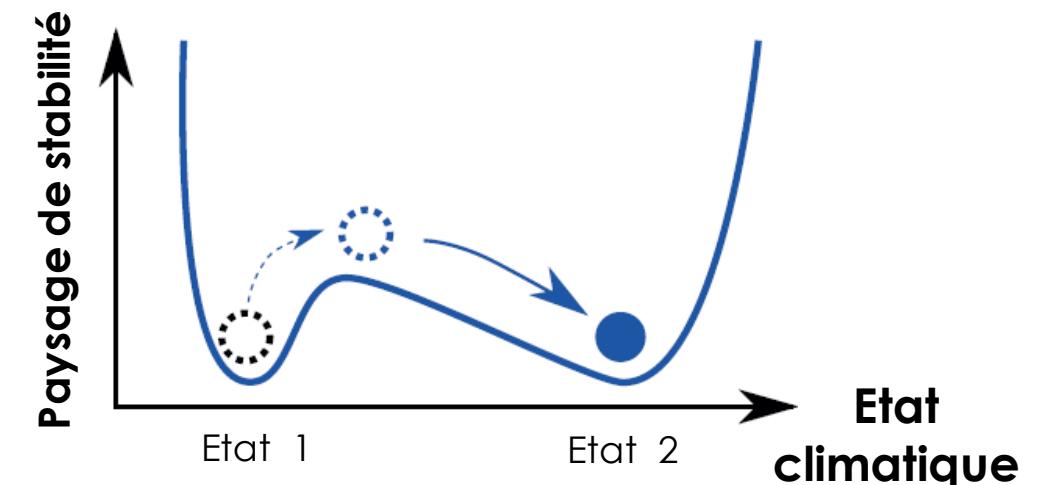
Les paysages de stabilité permettent de comprendre intuitivement les différents types de points de basculement.

1) Transition induite par le « bruit » (des fluctuations au sein du système induisent le basculement)

Ex. : sécheresses provoquant un dépèrissement soudain de la forêt amazonienne



Les lignes noires pleines indiquent les états climatiques stables (par exemple, faibles ou fortes précipitations). La ligne en pointillés représente la limite entre les états stables.



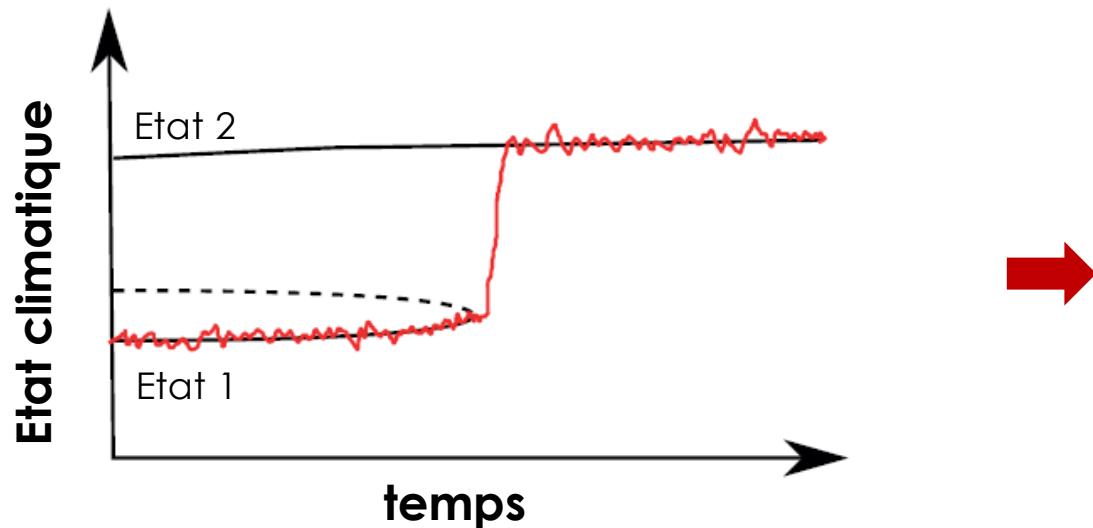
Dans ce scénario, le paysage de stabilité reste fixe et stationnaire. Une série de perturbations dans la même direction, ou une seule perturbation importante, est nécessaire pour forcer le système à franchir le sommet de la colline et à atteindre l'autre état stable.

Transitions. Points de bascule

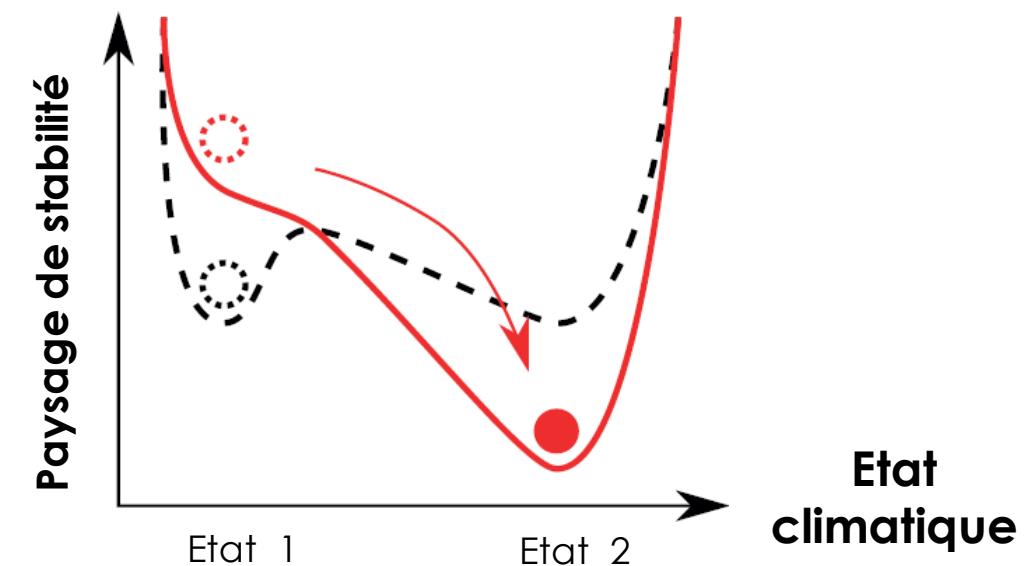
Les paysages de stabilité permettent de comprendre intuitivement les différents types de points de basculement.

2) Transition de bifurcation (se produisent lorsque le niveau critique du forçage est atteint)

Ex. : effondrement de la circulation thermohaline dans l'océan Atlantique



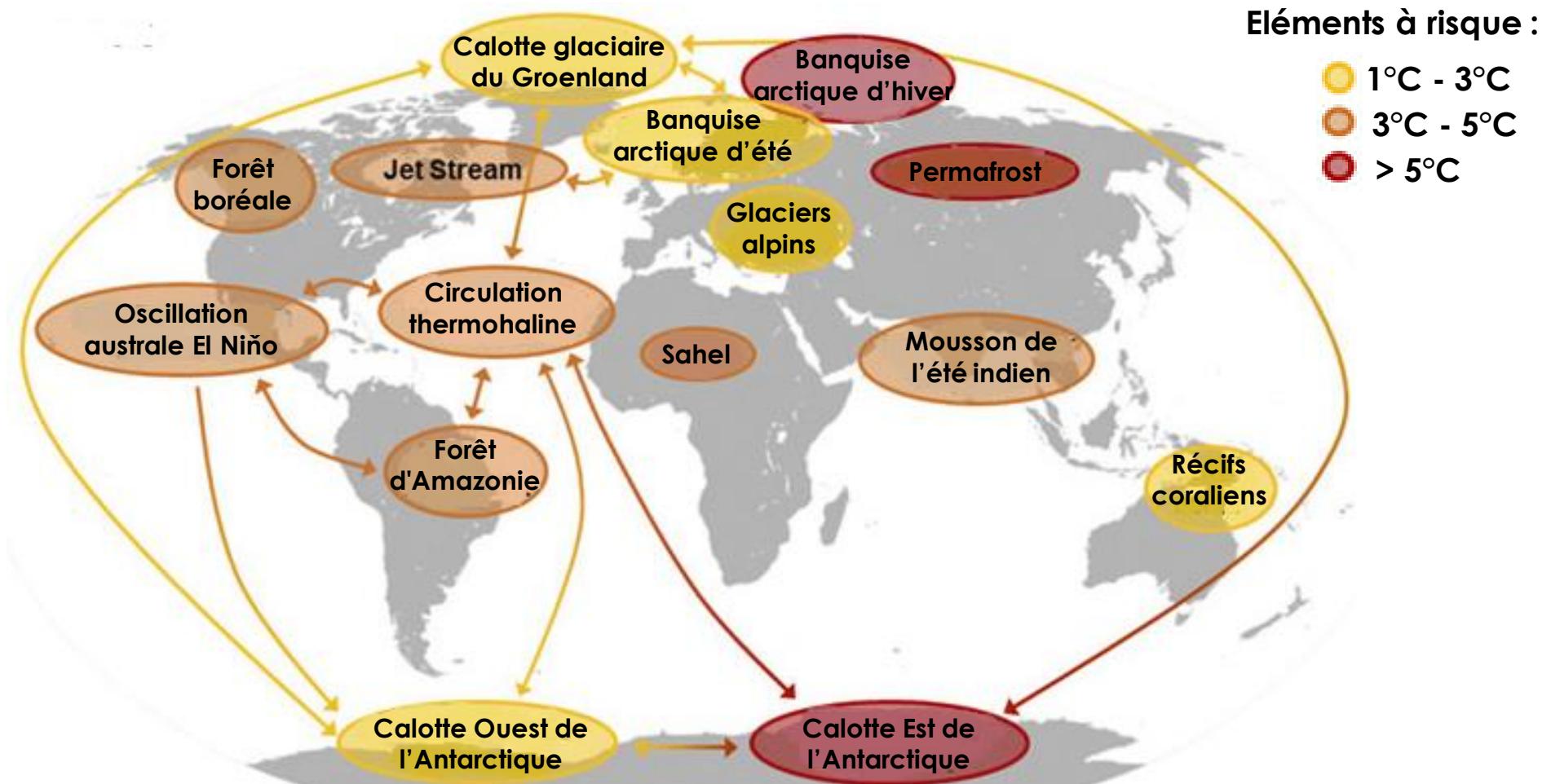
Les lignes noires pleines indiquent les états climatiques stables.
La ligne en pointillé représente la limite entre les états stables.



Dans ce cas, le paysage de stabilité est soumis à un changement de forme. Sous l'effet d'un forçage anthropique progressif, la vallée de gauche commence à s'affaisser et finit par disparaître au point de basculement, obligeant le système à passer à la vallée de droite.

Transitions (points de bascule ?)

Des évènements à risque



Eléments à risque :

- 1°C - 3°C
- 3°C - 5°C
- > 5°C

Glossaire

[Définitions pour la plupart issues de wikipedia. Classées par ordre d'arrivée dans le cours]

Système complexe : ensemble constitué d'un grand nombre d'entités en interaction. Système caractérisé par des propriétés émergentes qui n'existent qu'au niveau du système et ne peuvent pas être observées au niveau des constituants.

Approche **systémique** : manière de définir, étudier, ou expliquer tout type de phénomène, qui consiste avant tout à considérer ce phénomène comme un système : un ensemble complexe d'interactions, souvent entre sous-systèmes, au sein d'un système plus grand. Se distingue des approches traditionnelles qui s'attachent à découper un système en parties sans considérer le fonctionnement et l'activité de l'ensemble, c'est-à-dire le système global.

Holocène (11 000 dernières années) : dernière période géologique interglaciaire en date ; elle succède à l'époque glaciaire du Pléistocène et est marquée par une remontée des températures et du niveau des mers. Phase particulièrement stable pour le mode de développement de l'espèce humaine.

GES : gaz à effet de serre.

L'**équivalent CO₂** (abréviations : eqCO₂, éq. CO₂, CO₂e ou CO₂-eq) d'une émission de gaz à effet de serre est la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) qui provoquerait le même *forçage radiatif* cumulé sur une période de temps donnée (même capacité à retenir le rayonnement solaire). Il est exprimé en appliquant un facteur de conversion, *le pouvoir réchauffant*, qui dépend du gaz et de la période considérée.

Forçage radiatif (en W/m²) : contribution d'un facteur climatique donné (ex. les nuages) sur un système climatique donné (ex. le système Terre), exprimée par un bilan de puissance surfacique (puissance radiative reçue moins puissance radiative émise). Forçage positif : tend à réchauffer le système ; forçage négatif : tend à refroidir le système.

Glossaire

Empreinte carbone : calcul des GES induits par la demande finale intérieure du pays. L'empreinte est constituée par les émissions directes des ménages, les émissions de la production nationale (hors exportations) et les émissions des activités économiques étrangères dont la production est destinée aux importations du pays.

Inventaire national : calcul des quantités de GES physiquement émises à l'intérieur du pays par les ménages (voitures et logements) et les activités économiques (consommation d'énergie fossile, procédés industriels et émissions de l'agriculture). Données privilégiées pour le suivi des politiques nationales et internationales.

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change. En français, **GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

IPBES : Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (trad. Française : *Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques*)

Pouvoir réchauffant (ou potentiel de réchauffement global) d'un gaz : facteur de conversion utilisé pour comparer l'impact de ce gaz, rapporté à celui de la même masse de dioxyde de carbone, sur le réchauffement climatique, en se fondant sur leur forçage radiatif cumulé sur une période donnée.

Biosphère : ensemble des organismes vivants et leurs milieux de vie, donc la totalité des écosystèmes présents que ce soit dans la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère.