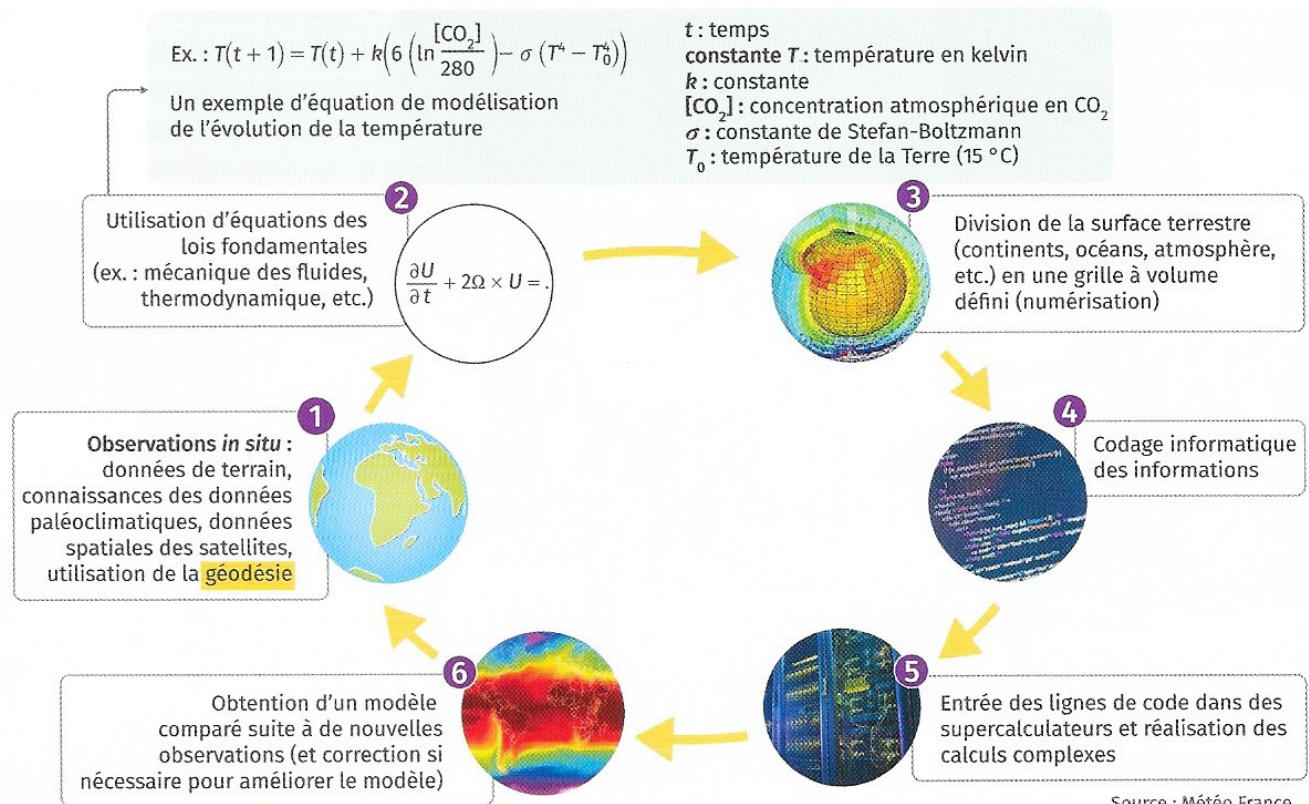


Sommaire

<i>En commun. La modélisation du climat (documents 1 à 7).....</i>	<i>2</i>
<i>Travail 1. Augmentation de la température et activités humaines (document 8 à 15).....</i>	<i>5</i>
<i>Travail 2. Les scénarios d'évolution du climat et les conséquences attendues (documents 16 à 24).</i>	<i>9</i>
<i>En commun : des conséquences attendues du réchauffement climatique (documents 25 à 27).</i>	<i>15</i>
<i>Les derniers scénarios du GIEC (6^{ème} rapport).</i>	<i>18</i>

Document 1. La construction d'un modèle climatique.

D'après Enseignement scientifique Terminale Le Livre Scolaire 2020



Document 2. La construction d'un modèle numérique du climat.

D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan 2020

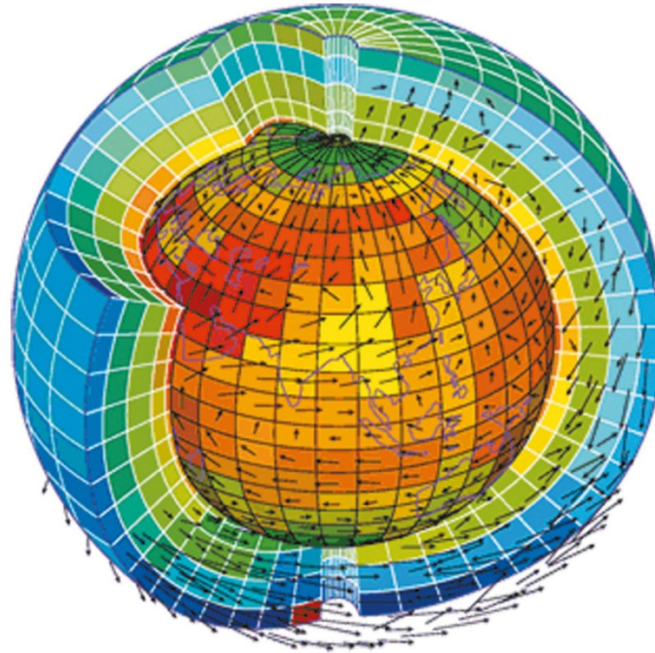
La planète est **divisée en de multiples mailles** sur une grille en **trois dimensions**. En utilisant les **équations** des lois fondamentales de la physique (conservation de l'énergie, de la masse, de la quantité de mouvement), du mouvement des fluides et de la chimie, **les modèles calculent** les vents, les transferts de chaleur, l'humidité etc. **dans chaque maille** de la grille et calculent également les **interactions entre les mailles**. On construit donc une **structure numérique 3D** correspondant à un découpage en cases de la surface terrestre et de son atmosphère.

Pour chaque case, les ordinateurs calculent les échanges avec les cases voisines et établissent les nouvelles valeurs des paramètres physico-chimiques. **Plus les cases seront petites, plus le modèle sera précis**, mais il y aura davantage de valeurs et le temps de calcul sera long.

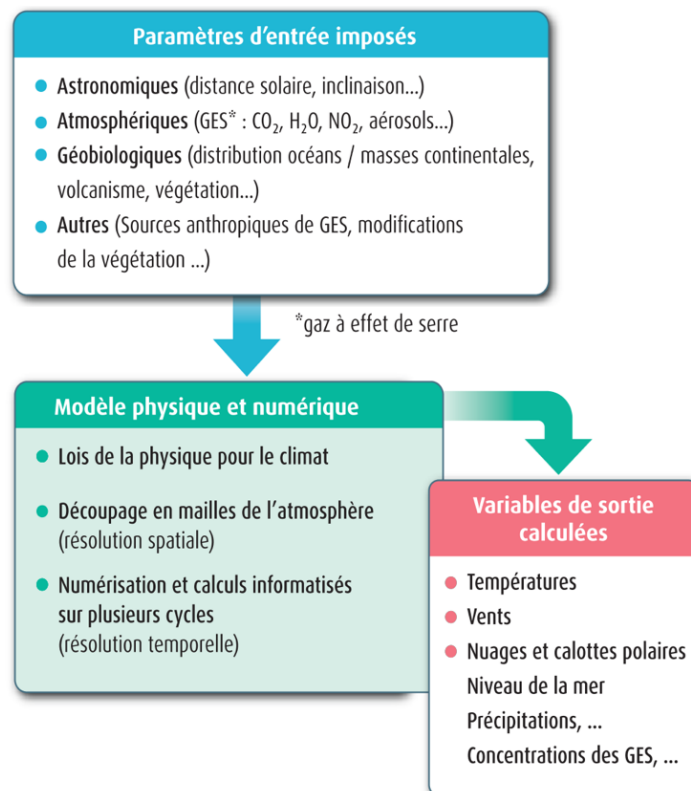
Le nombre d'années simulées influe aussi sur la durée des calculs. Les plus puissants ordinateurs sont utilisés, mais malgré cela, les temps de calcul peuvent aller jusqu'à plusieurs mois.

Si les équations sont correctes, et les conditions de départ exactes, le modèle devrait mimer la réalité des changements climatiques, aussi bien passés qu'à venir. **Pour s'assurer que le modèle est valide, on le teste en simulant des variations anciennes du climat dont on connaît déjà les conséquences.**

Document 3. Structure 3D d'un modèle climatique. D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan 2020
Les couleurs représentent la température et les flèches le vent.



Document 4. Détail du fonctionnement d'un modèle de circulation atmosphérique.
D'après Enseignement scientifique Terminale Belin 2020



Document 5. La modélisation du climat en vidéo :

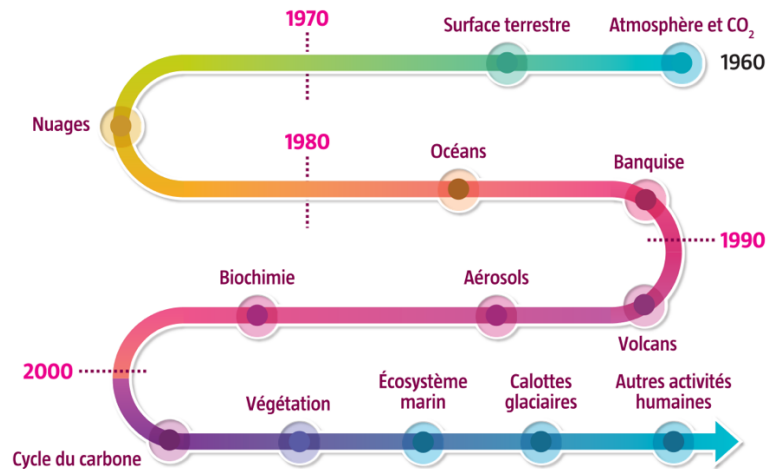
https://api.bear2b.com/media/out.res/50461/res/733761_p1c3_p063_simulation_climat.mp4.mp4
(version QR code à gauche)



Document 6. L'amélioration des modèles : les paramètres pris en compte dans les modèles climatiques.

D'après Enseignement scientifique Terminale Magnard 2020

Les modèles climatiques gagnent sans cesse en précision et incluent de plus en plus de facteurs. Ainsi, les premiers modèles prenaient uniquement en compte les précipitations et la composition de l'atmosphère. La meilleure connaissance progressive du système climatique a permis d'ajouter de nouveaux paramètres. En effet, de nombreux scientifiques issus de domaines différents (climatologues, océanographes, glaciologues, spécialistes de l'atmosphère, de la végétation et des sols, spécialistes en calcul) s'impliquent désormais dans la modélisation. L'évolution de la puissance de calcul des ordinateurs a permis l'intégration de ces paramètres mais aussi d'augmenter le nombre de mailles.



Document 7. Évolution de la moyenne planétaire de la température de l'air près de la surface.

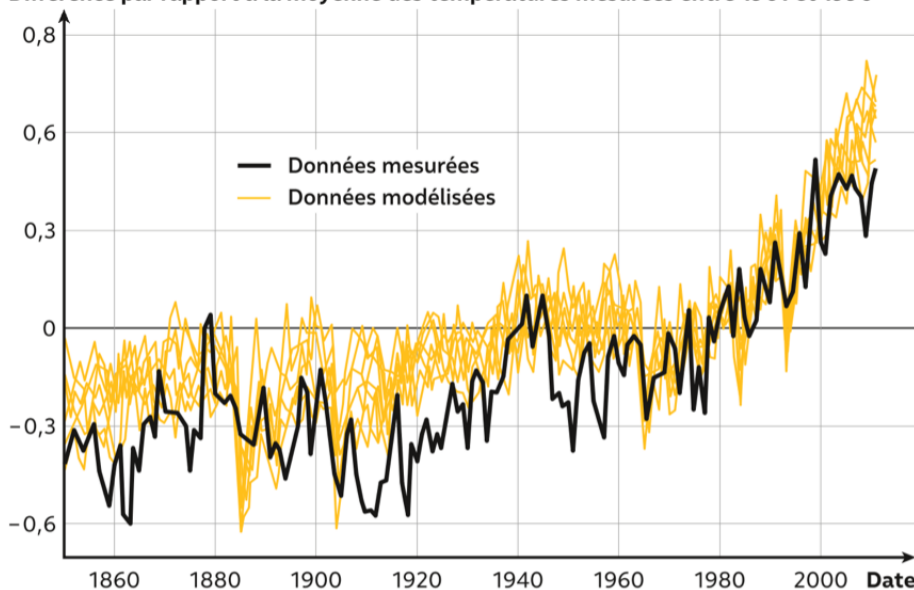
D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan 2020

Dix simulations ont été réalisées, de manière à évaluer la variabilité¹ du modèle. Ces simulations prennent toutes en compte les évolutions des concentrations atmosphériques des GES, ainsi que les éruptions volcaniques majeures : chacune d'entre elles se traduit par un refroidissement global de plusieurs dizaines de °C, relativement brutal mais temporaire. Cet effet est notamment visible dans nos simulations en 1883 (Krakatoa), 1902 (Santa Maria), 1964 (Agung), 1982 (El Chichon) et 1991 (Pinatubo).

L'impact des volcans apparaît également dans les observations, même s'il est probablement sous-estimé dans le cas de l'éruption du Krakatoa. Enfin, l'évolution générale à la hausse de la température est correctement simulée par le modèle : une première phase de réchauffement des années 1920 aux années 1940, puis un léger refroidissement, suivi d'un réchauffement prononcé à partir de la fin des années 1970. D'après CRNM.

1. Certaines équations intégrant des variations chaotiques de certains paramètres, la réitération d'une même situation de départ peut mener à des résultats sensiblement différents.

Différence par rapport à la moyenne des températures mesurées entre 1961 et 1990



1.

Travail 1. Augmentation de la température et activités humaines (document 8 à 15).

Document 8. Activités humaines et GES.

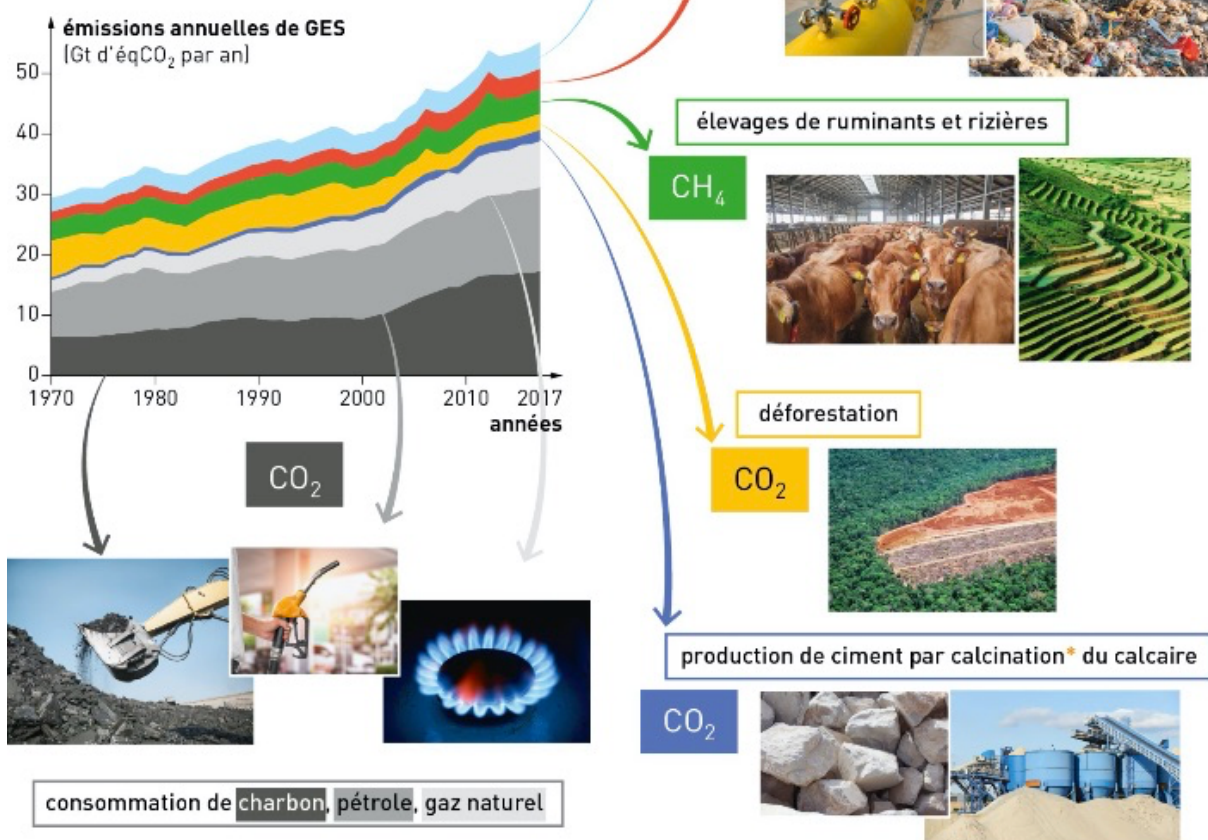
D'après Enseignement scientifique Terminale Bordas 2020 et Le Livre Scolaire 2024

Le graphique ci-dessous présente l'évolution des émissions annuelles anthropiques de gaz à effet de serre (GES) de 1970 à 2017.

Les valeurs sont exprimées en milliards de tonnes d'équivalent CO_2 afin d'évaluer plus facilement l'impact des autres GES.

La conversion est basée sur la comparaison des potentiels de réchauffement de chaque gaz (PRG).

Par exemple, une tonne de CH_4 équivaut à 28 tonnes de CO_2 .



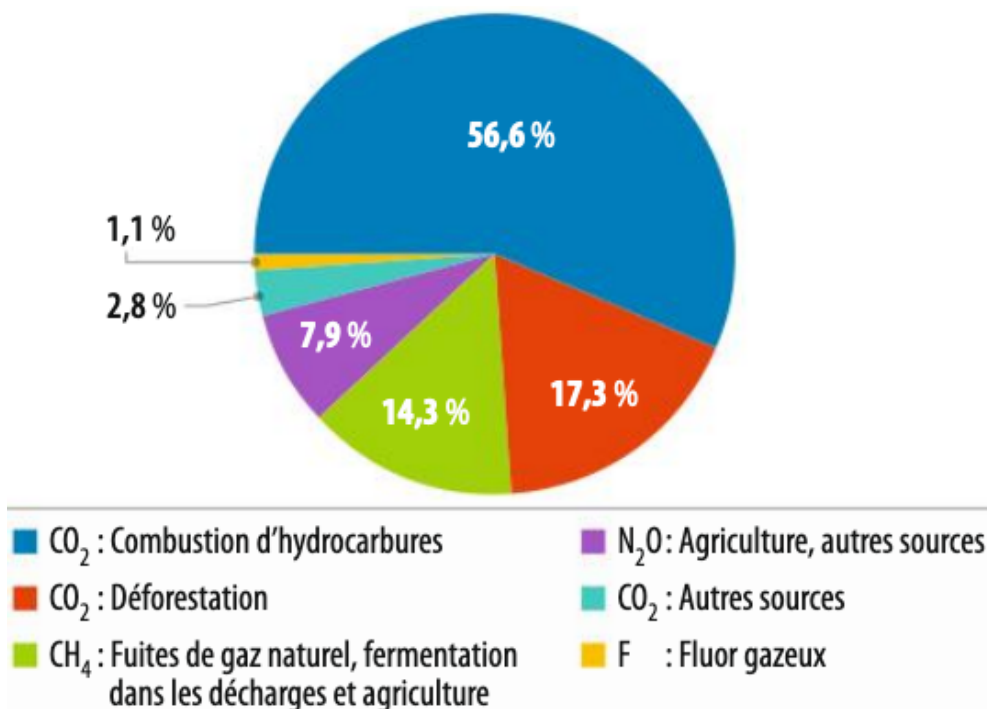
Précisions.

- Le ciment est fabriqué grâce à la calcination de calcaires et d'argiles (chauffage à $1\,450^\circ\text{C}$). Ce processus se nomme clinkérisation. En 2021, la France a produit 17,5 millions de tonnes de ciment. En moyenne, 565 kg de CO_2 sont émis pour la production d'une seule tonne de ciment. Cela représente 3 % des émissions de CO_2 françaises, soit 10 millions de tonnes par an.
- La déforestation correspond à la perte de surface forestière au profit d'une autre utilisation, comme l'agriculture ou encore l'artificialisation des sols (construction de logements, de bureaux ou d'infrastructures routières, par exemple). En 2022, la planète a perdu 4,1 millions d'hectares de forêts primaires, soit l'équivalent de 11 terrains de football par minute. Les forêts primaires tropicales détruites cette année-là ont ainsi libéré 2,7 milliards de tonnes de CO_2 , soit l'équivalent des émissions annuelles de l'Inde. En 2023, la déforestation représentait 11,3 % des émissions anthropiques mondiales de CO_2 , soit autant que le secteur des transports routiers. La reforestation peut contribuer à diminuer les émissions de CO_2 à court terme, mais elle n'absorbe du carbone (puits de carbone) que pendant sa phase de croissance.

Document 9. Parts des sources anthropiques de GES.

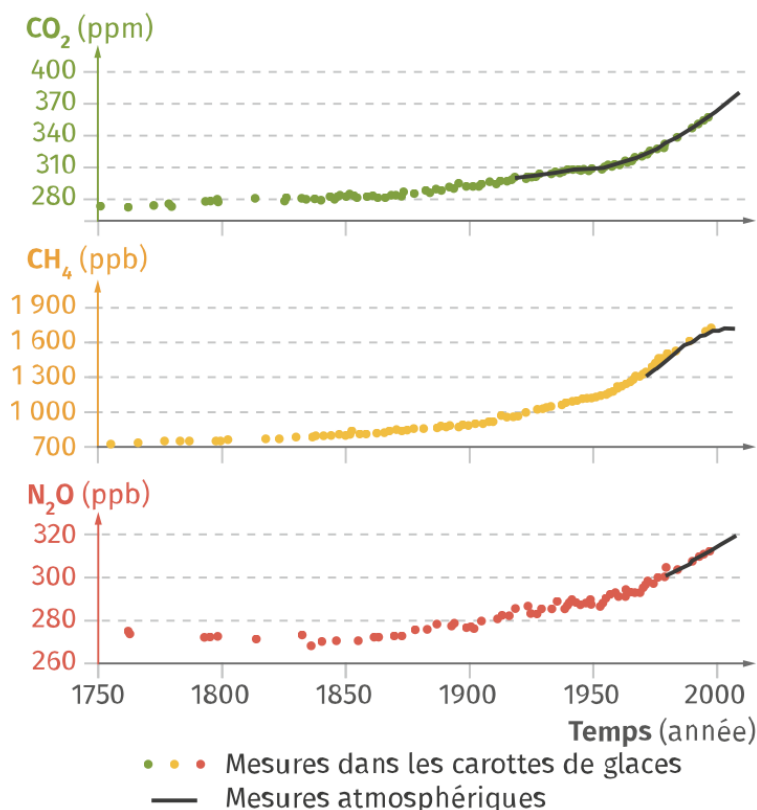
D'après Enseignement scientifique Terminale Hachette Éducation 2020

Les modèles climatiques, combinés aux observations et éléments théoriques, ont établi que l'augmentation de température constatée depuis le début de l'ère industrielle est liée à la production de GES due à l'activité humaine.



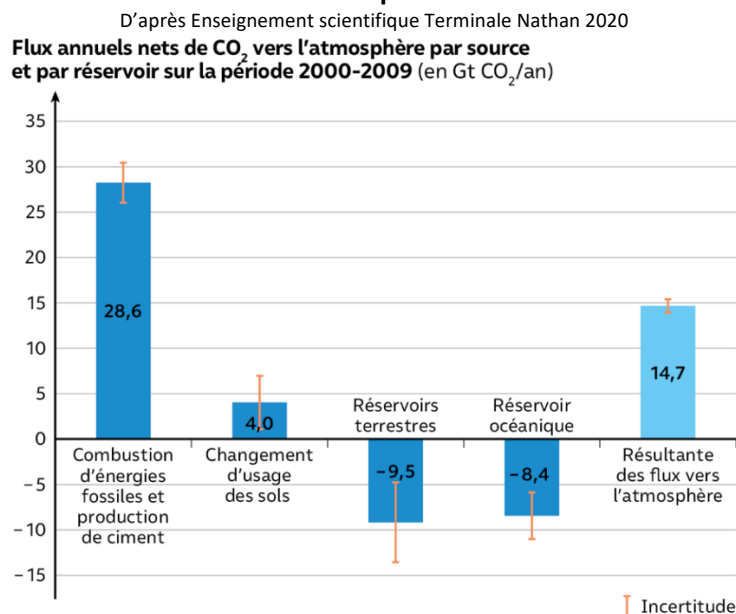
Document 10. Évolution de la concentration des principaux gaz à effet de serre depuis 1750.

D'après Enseignement scientifique Terminale Le Livre Scolaire 2020



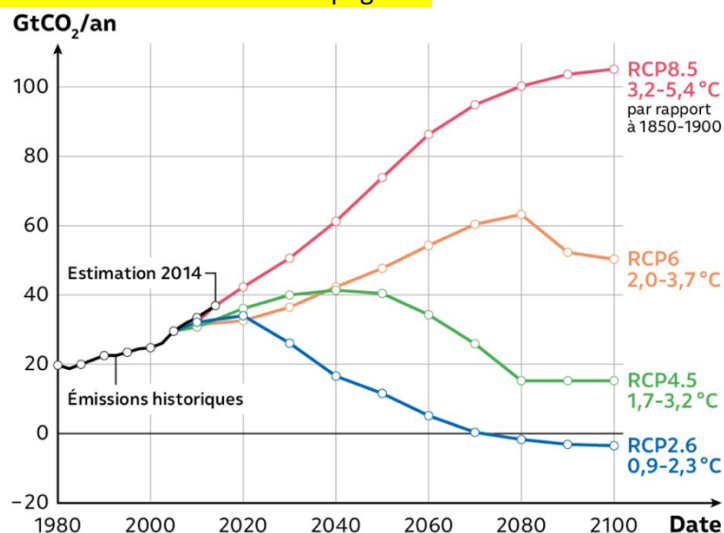
Les données ont été mesurées directement dans l'atmosphère ou bien déduites des glaces (avant 1958). ppm = parties par million, ppb = parties par milliard.

Document 11. Les émissions anthropiques de CO₂ à l'origine d'un flux positif de CO₂ vers l'atmosphère.

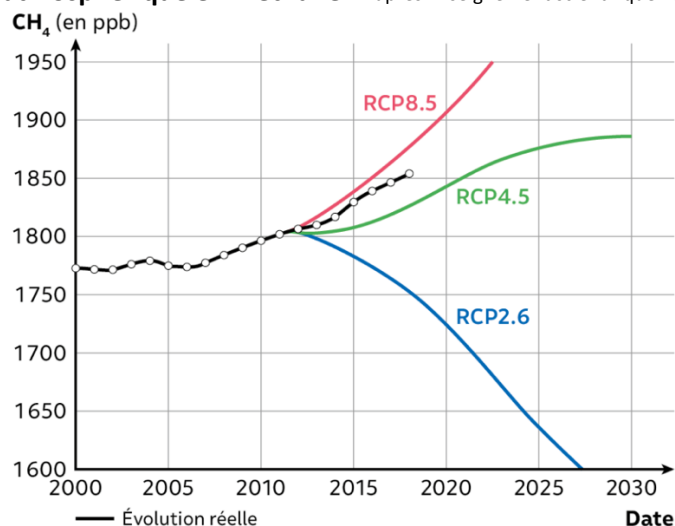


Document 12. Quatre scénarios d'émissions annuelles anthropiques de CO₂ et les températures qu'ils prévoient pour la fin du siècle. D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan 2020

Les RCP qui spécifient les scénarios sont définis page 10.



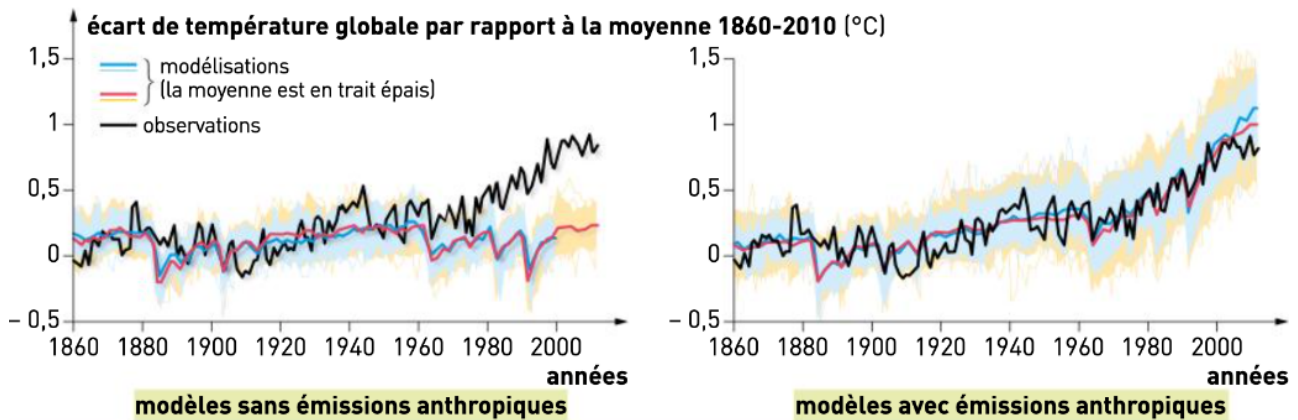
Document 13. Graphique de l'évolution réelle et modélisée (scénarios climatiques) de la concentration atmosphérique en méthane. D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan 2020



Document 14. De la corrélation à la preuve par la modélisation : la comparaison de la température observée avec les températures simulées.

D'après Enseignement scientifique Terminale Bordas 2020

A l'aide de plus d'une dizaine de modèles, les chercheurs simulent l'évolution de la température en tenant compte ou non des émissions anthropiques de GES, puis comparent les résultats obtenus à la réalité.



Température observée (courbes noires) et températures simulées (courbes colorées).

Document 15. Quelques affirmations des climatosceptiques.

D'après Enseignement scientifique Terminale Hatier 2020 et lectures personnelles

« Le réchauffement climatique est naturel et s'est déjà produit dans le passé quand l'être humain n'était pas présent ».

« De très nombreuses vagues de froid sont de plus en plus fréquentes, et vous parlez de réchauffement ! »

« Le réchauffement n'est pas dû au CO₂ mais au rayonnement solaire puisque, sur Mars également, on observe une augmentation de la température. »

« Il n'y a pas d'élévation du niveau des océans car la fonte de l'Arctique n'en entraîne pas, de même que la fonte d'un glaçon dans un verre d'eau ».

« Comment peut-on prévoir le temps qu'il fera dans 100 ans alors qu'on ne peut pas le prédire au-delà de 5 jours ? »

« Il fait chaud, c'est normal c'est l'été ! »

« Canicule ? Il faisait frais chez moi ce matin et j'ai dû mettre un pull ! »

Points sur lesquels insister.

Montrer que :

- les activités humaines libèrent une diversité de GES ;
- les GES s'accumulent en partie dans l'atmosphère ;
- l'avenir climatique dépend de la quantité de GES libérés ;
- contrairement à ce qu'affirment les climatosceptiques, les modélisations sont en accord avec l'évolution observée.

Travail 2. Les scénarios d'évolution du climat et les conséquences attendues (documents 16 à 24).

Document 16. Graphique publié en 2019 dans un rapport spécial du GIEC intitulé « Réchauffement à 1,5°C ». D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan 2020

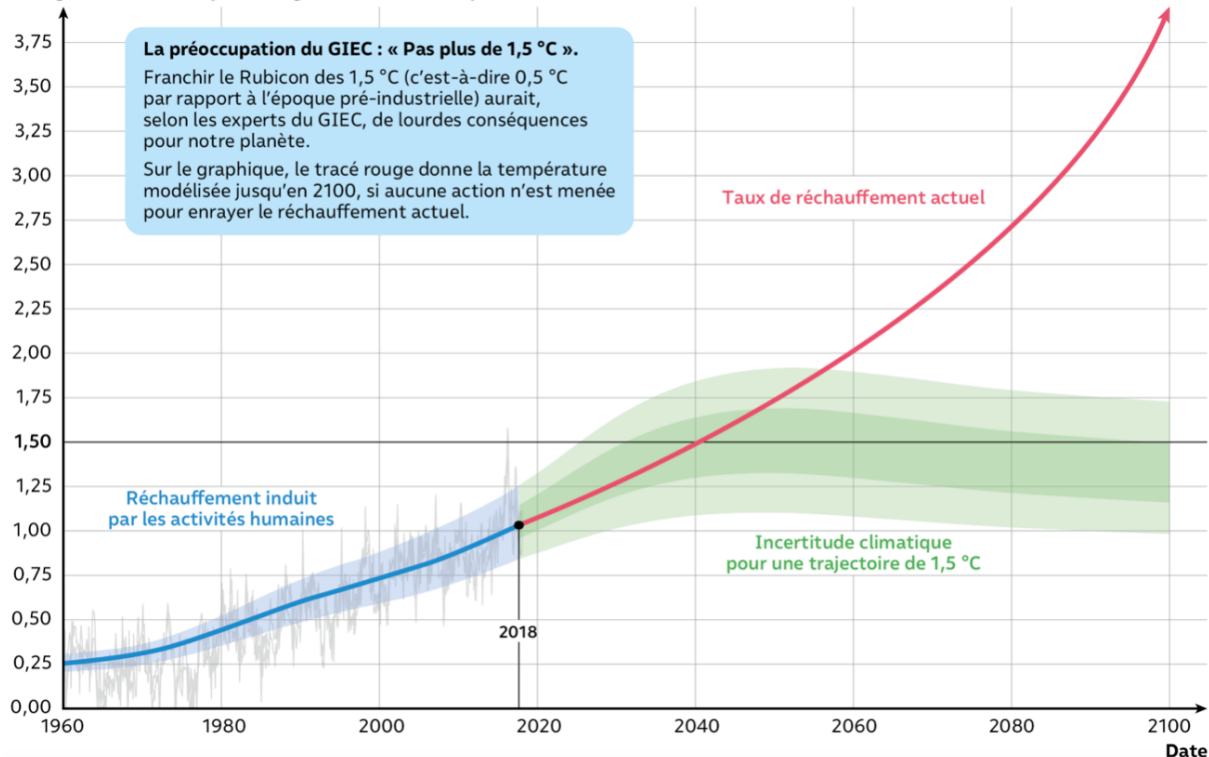
Le rapport plaide en faveur de toute action visant à contenir le réchauffement aux alentours de 1,5°C.

Avant 1750 (début de l'ère industrielle), la température de référence était de 13,4 °C.

En 2018, la température mondiale a déjà augmenté de 1°C depuis 1880, début des mesures internationales.

Un monde plus chaud de 1,5 °C par rapport à la période préindustrielle signifie donc un monde plus chaud de 0,5 °C par rapport à la température en 2018.

Changement de la température globale relative à la période 1850-1900 (en °C)



Note : extrait du communiqué de presse du 9 août 2021 du GIEC :

Le rapport fournit de nouvelles estimations de la possibilité que le réchauffement planétaire excède 1,5 °C au cours des prochaines décennies et fait valoir qu'à moins de réductions immédiates, rapides et massives des émissions de gaz à effet de serre, la limitation du réchauffement aux alentours de 1,5 °C, ou même à 2 °C, sera hors de portée.

Le rapport montre que les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines ont élevé les températures d'environ 1,1 °C depuis la période 1850-1900 et conclut que la température mondiale, en moyenne sur les 20 prochaines années, devrait atteindre ou franchir le seuil de 1,5 °C.

Source : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release_fr.pdf

Document 17. Quatre grands scénarios retenus par les experts du climat.

D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan et le Livre Scolaire 2020

Un **scénario RCP** (*Representative Concentration Pathway*) désigne une trajectoire de concentration de GES.

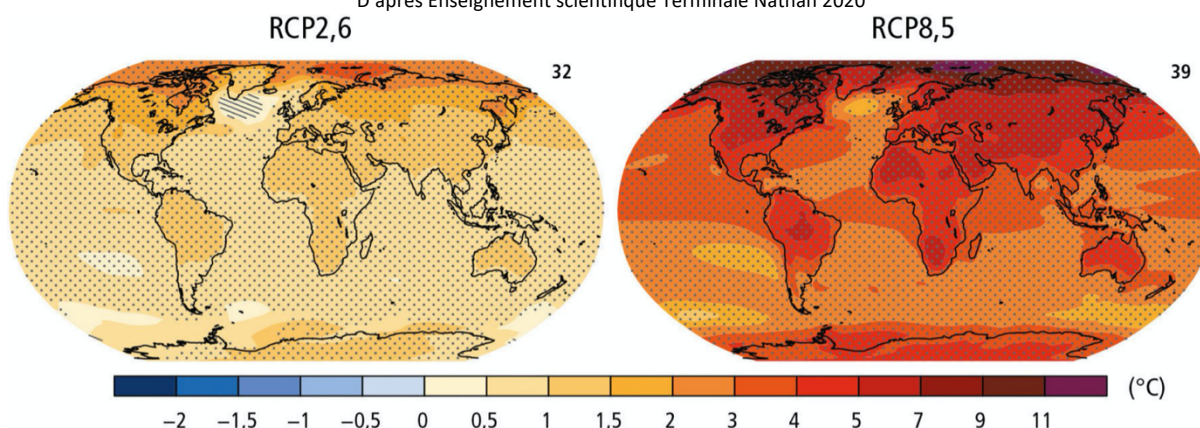
Ces scénarios ont été établis par le GIEC à l'occasion de son cinquième rapport d'évaluation en 2014. Un scénario RCP permet de modéliser le climat du futur.

Quatre RCP ont été sélectionnés pour la modélisation climatique : RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5, ce qui correspond aux valeurs de forçage radiatif en 2100 : respectivement 2,6, 4,5, 6 et 8,5 W.m^{-2} .

Scénario	Type de scénario	Augmentation moyenne de température prévue (°C)
RCP2.6	Forte atténuation des émissions de GES	1,5 à 2
RCP4.5	Atténuation des émissions de GES où le forçage radiatif est stabilisé avant 2100	2,7
RCP6.0	Atténuation des émissions de GES où le forçage radiatif est stabilisé après 2100	3,5
RCP8.5	Scénario extrême où les émissions de GES s'accroissent	4 à 5

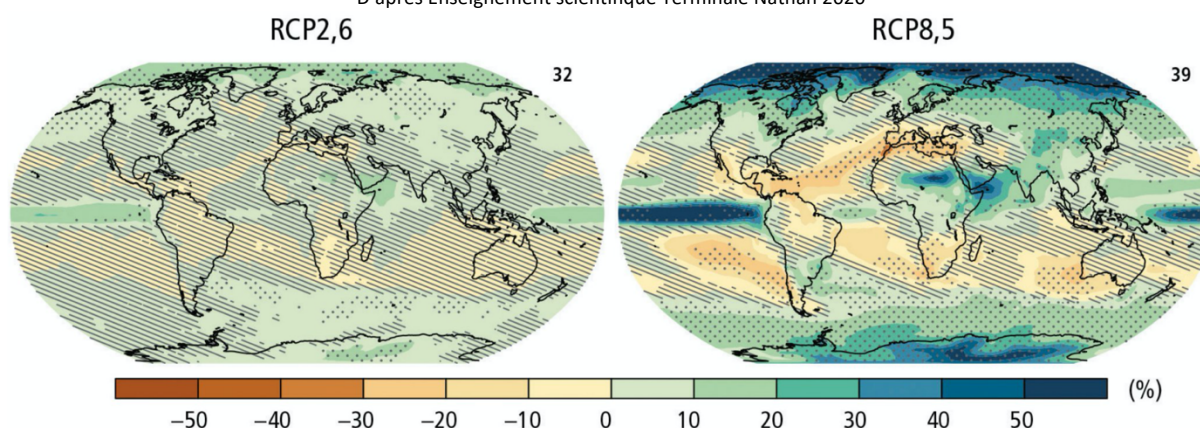
Document 18. Évolution de la température moyenne annuelle en surface pour les scénarios RCP2,6 et RCP8,5 sur la période 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005.

D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan 2020



Document 19. Évolution en pourcentage des précipitations moyennes annuelles en surface pour les scénarios RCP2,6 et RCP8,5 sur la période 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005.

D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan 2020



**Document 20. Vitesses moyennes de déplacement des provinces bioclimatiques (tableau)
comparées à la vitesse de migration des êtres vivants (d'après GIEC).**

D'après Enseignement scientifique Terminale Bordas 2020

De nombreuses espèces peuvent échapper à des conditions devenues défavorables par migration. Les documents ci-dessous comparent les vitesses de migration de quelques groupes d'êtres vivants continentaux (document de droite) et océaniques à la vitesse projetée de déplacement des provinces bioclimatiques pour l'année 2050 et pour différents scénarios (document de gauche).

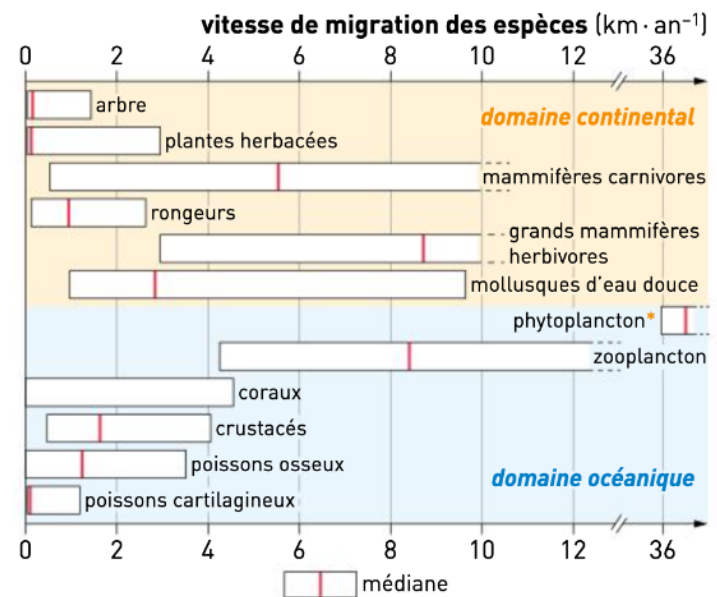
La moitié des espèces étudiées pour chaque groupe possède une vitesse inférieure ou supérieure à la valeur médiane.

Le réchauffement climatique s'ajoute à la destruction des habitats, à la pollution aux pesticides et aux espèces invasives comme causes principales de l'extinction des espèces.

Vitesse projetée de déplacement des provinces bioclimatiques pour l'année 2050

Scénario RCP	Domaine continental (km·an ⁻¹)	Domaine océanique (km·an ⁻¹)
2,6	0	1,3
4,5	2	5,5
6,0	4	6
8,5	7,1	10,6

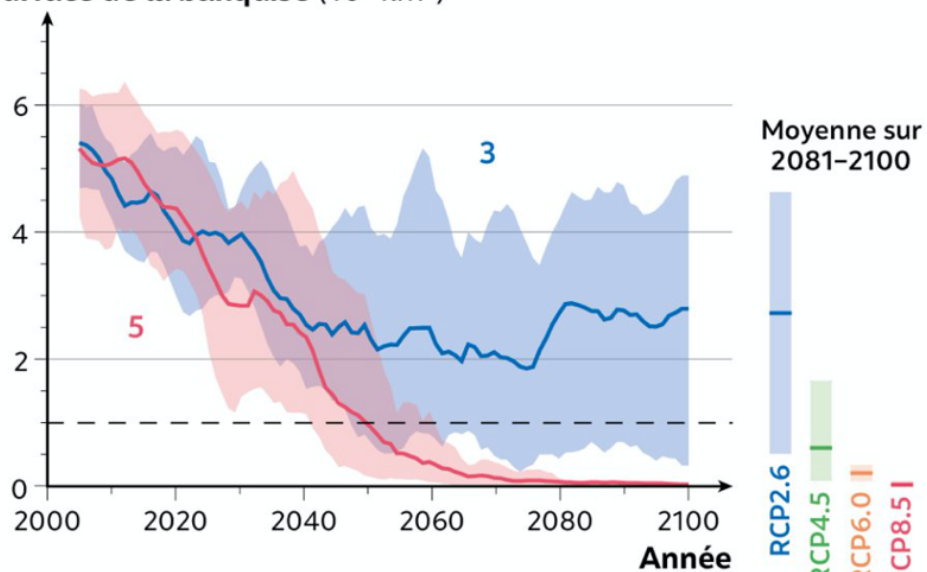
Vitesses de migration de quelques groupes d'êtres vivants continentaux



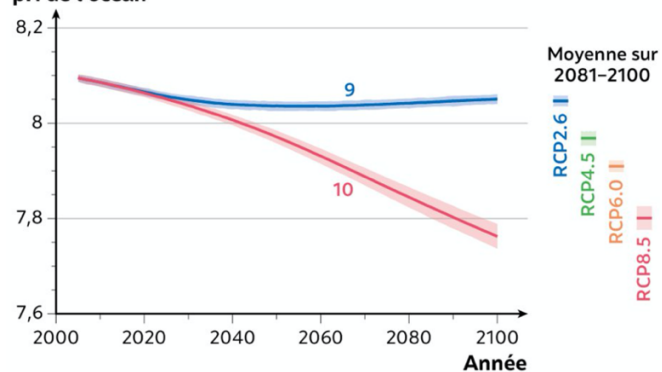
Document 21. Évolution modélisée de différents paramètres selon les quatre scénarios.

D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan 2020

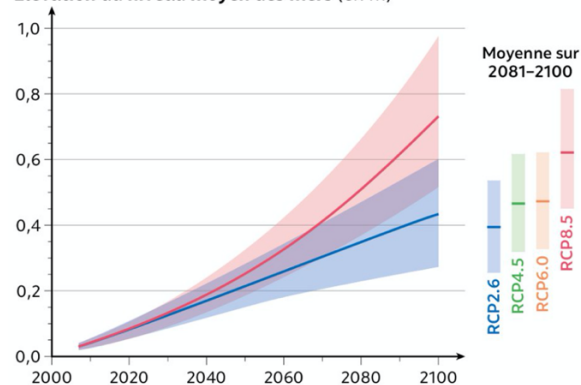
Surface de la banquise (10^6 km^2)



pH de l'océan



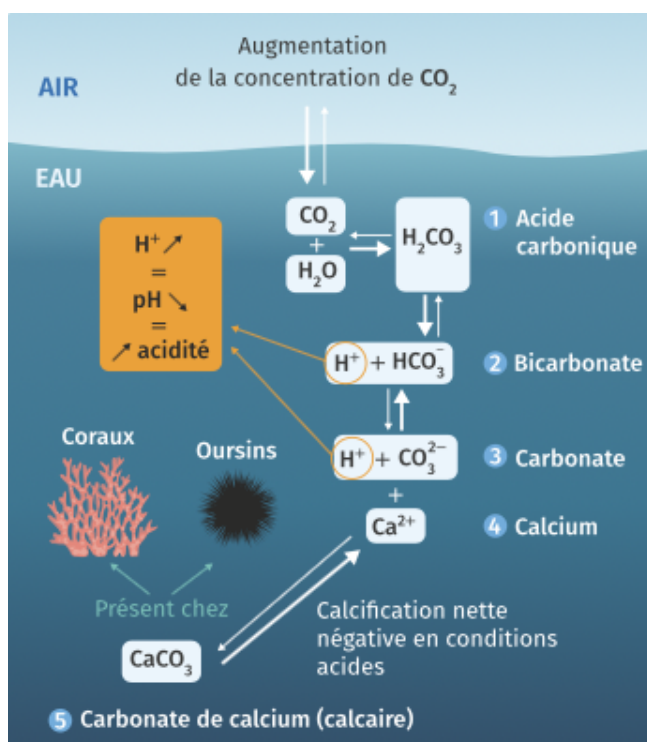
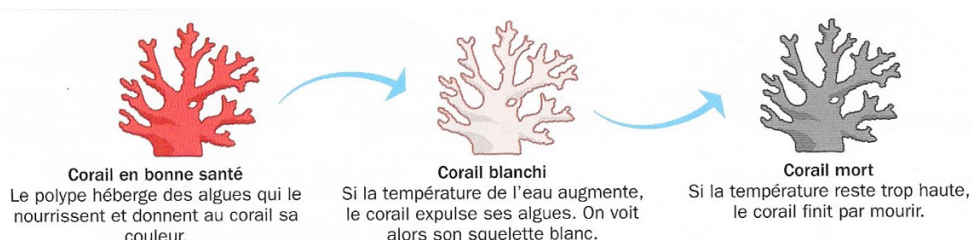
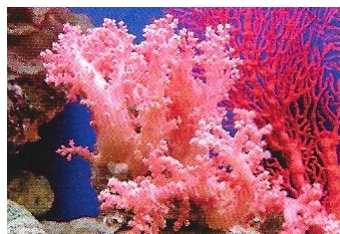
Élévation du niveau moyen des mers (en m)



Document 22. Les coraux, des espèces en danger à cause du réchauffement climatique.

D'après Enseignement scientifique Terminale Magnard, Bordas et Le Livre Scolaire 2020

Les récifs coralliens sont des bioconstructions composées de carbonate de calcium (CaCO_3). Ce sont des édifices fragiles constitués d'animaux nommés polypes qui vivent en symbiose avec des algues dans des colonies. L'augmentation de la température entraîne la rupture de la symbiose entre les polypes et les algues, mettant ainsi en péril la survie des coraux près de la surface dans les eaux chaudes.



De plus, le CO_2 atmosphérique diffuse dans les océans, d'où une augmentation de l'acidité des eaux qui fragilise leur squelette. Les coraux cessent de se développer pour un pH inférieur à 7,7.

Document 23. Évolution de l'acidité des océans.

D'après Enseignement scientifique Terminale Hachette Éducation 2020, modifié 2024

	Taux de CO_2 atmosphérique	pH océanique
Avant l'ère industrielle	280 ppm	8,18
Si le taux de CO_2 était multiplié par 2	560 ppm	7,93

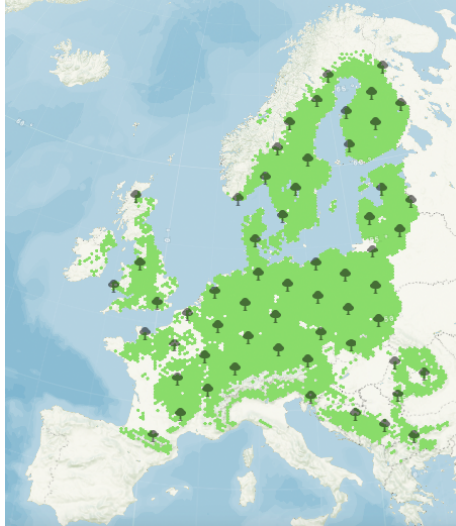
Document 24. L'évolution des écosystèmes : exemple des forêts européennes.

D'après <https://developmentseed.org/our-forests-tomorrow> (consulté le 2/09/24)

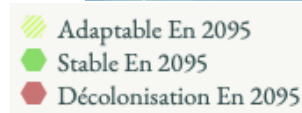
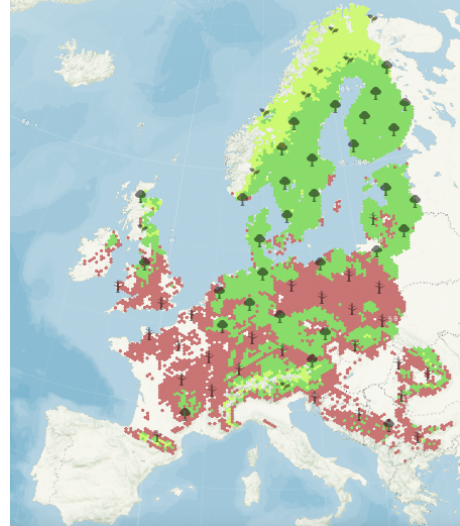
Bouleau verruqueux (*Betula pendula*).

Ce bouleau, autrement appelé bouleau blanc est un arbre à feuilles caduques pouvant atteindre 25 m de hauteur. Originaire d'Europe et d'Asie, c'est un arbre très rustique et qui a besoin de lumière. Il aime les sols secs à frais. C'est une essence pionnière, colonisatrice et très adaptable.

Situation 2005



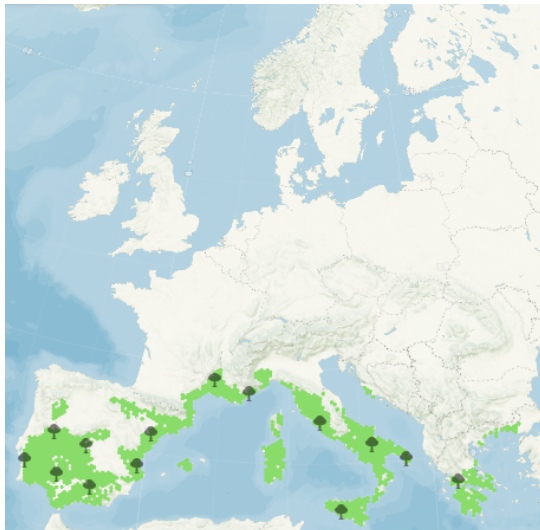
Situation 2095 RCP 8,5



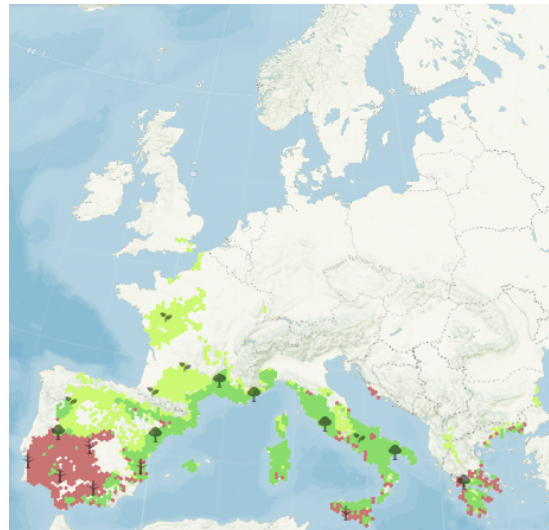
Olivier (*Olea europaea*).

L'olivier est une espèce d'arbre ou d'arbuste répandue à travers l'Afrique, l'Asie et l'Europe méditerranéenne, et dont une variété a été domestiquée et cultivée pour devenir l'olivier.

Situation 2005



Situation 2095 RCP 8,5



Points sur lesquels insister.

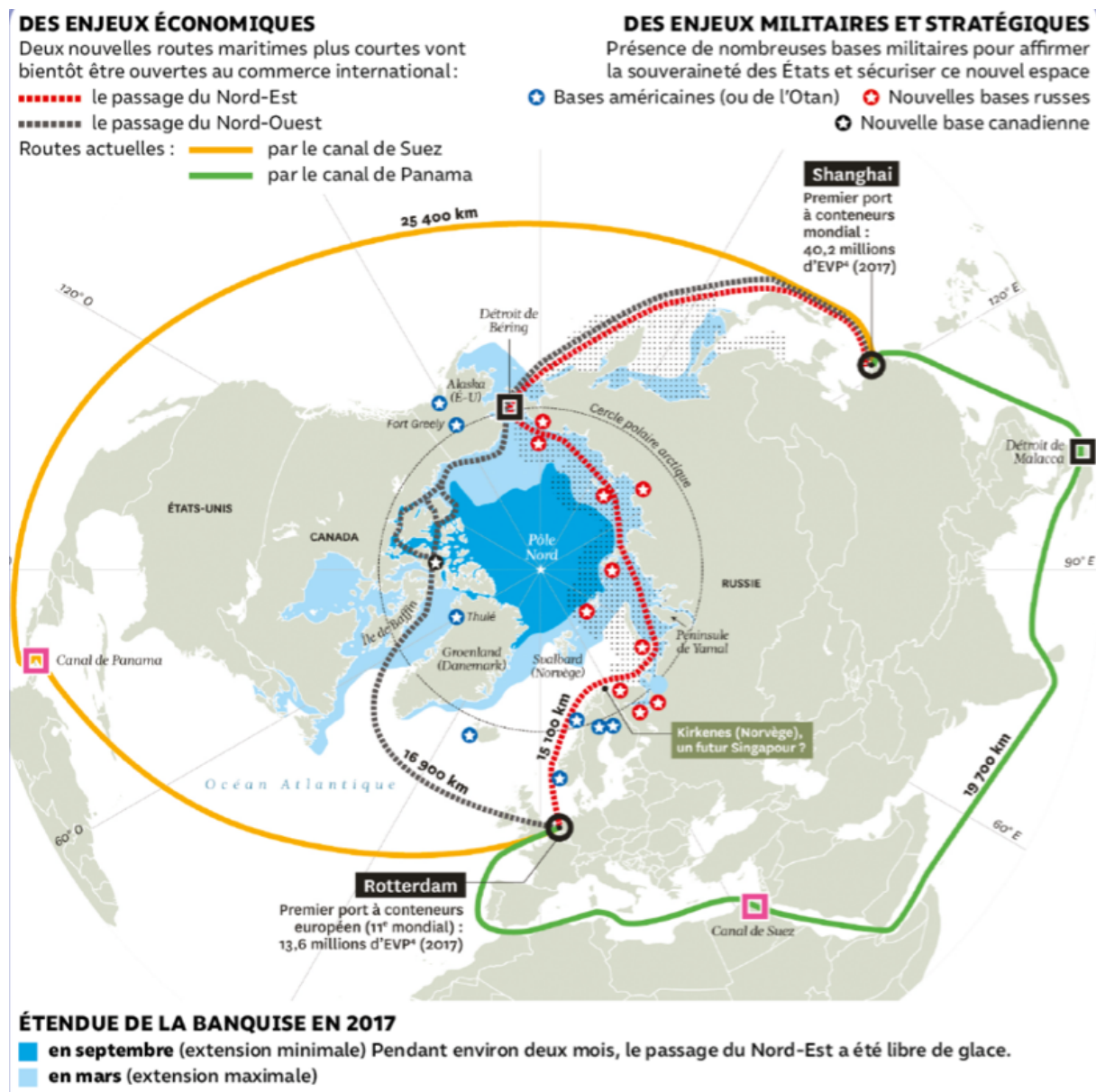
Montrer que :

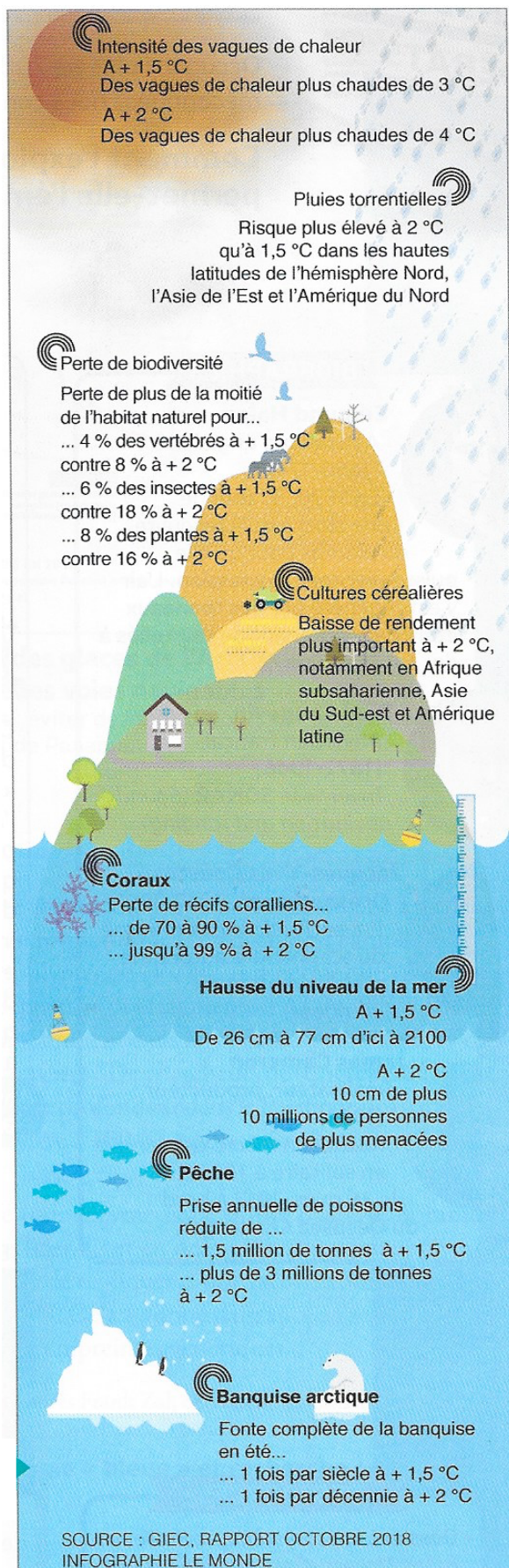
- la prévision de réchauffement d'ici 2100 se situe dans la fourchette haute des prévisions du rapport du GIEC de 2014 (confirmée par le communiqué de presse de 2021) ;
- que ce réchauffement aura de multiples impacts.

Document 25. La fonte des glaces de l'Arctique ouvre de nouvelles voies navigables.

D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan 2020

Leur atout : éviter de longs détours par les canaux de Suez et de Panama.



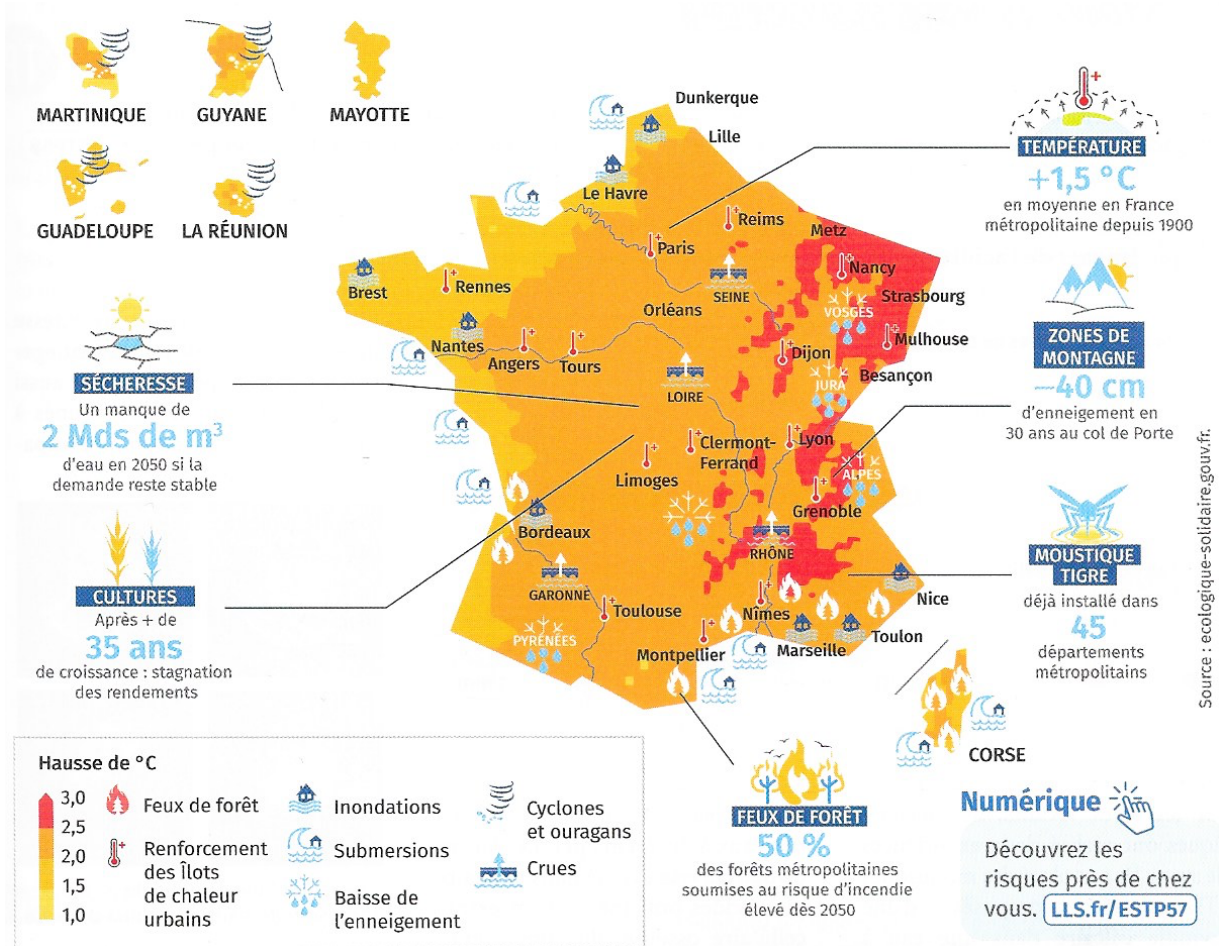


Document 26.
**La prévision par le GIEC des conséquences d'un
 réchauffement compris entre 1,5 et 2°C.**
 D'après Enseignement scientifique Terminale Nathan 2020

Document 27. Événements climatiques et météorologiques extrêmes et autres impacts dur le territoire français. D'après Enseignement scientifique Terminale Le Livre Scolaire 2020

En France, les impacts du changement climatique s'observent d'ores et déjà à travers des phénomènes nombreux et variés qui touchent tous les écosystèmes. Ces risques sont amenés à s'amplifier dans le futur.

Carte des impacts du changement climatique déjà visibles ou à venir d'ici 2050 (métropole et DROM).



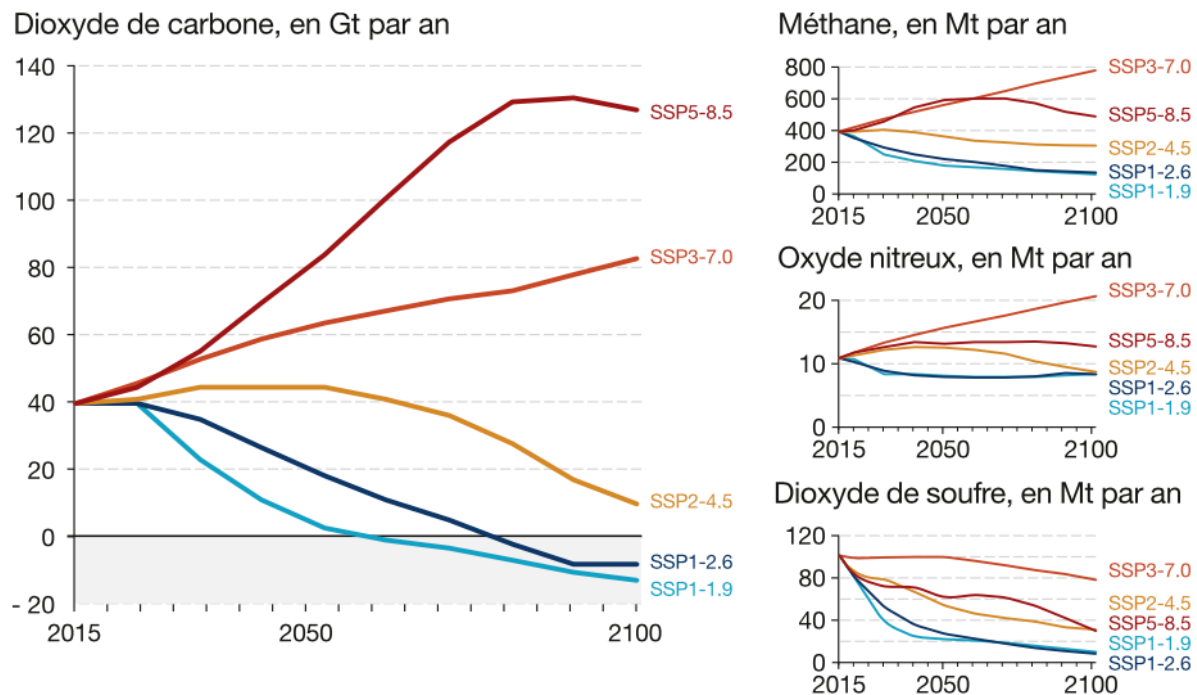
Les derniers scénarios du GIEC (6^{ème} rapport).

Documents 28. Les nouveaux scénarios du GIEC (6^{ème} rapport).

Le GIEC a publié son premier rapport (*First Assessment Report*) en 1990. Le premier volume de son sixième rapport (AR6) est paru en août 2021. À chaque publication, le GIEC communique des projections climatiques fondées sur des hypothèses de concentration de GES.

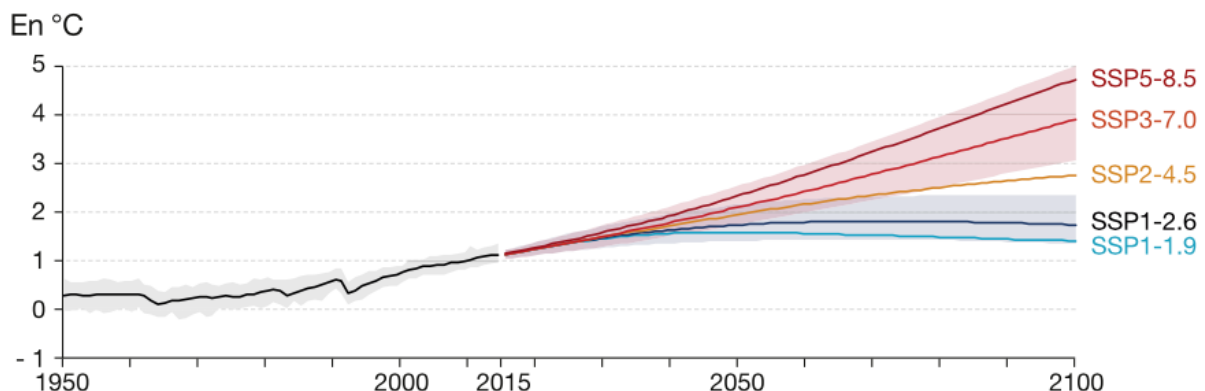
Un ensemble de base de cinq scénarios fondés sur les trajectoires socioéconomiques partagées (SSP qui remplacent les scénarios RCP) est utilisé de manière cohérente dans le 6^e rapport d'évaluation du GIEC (AR6). Ces scénarios incluent des trajectoires d'émissions de GES élevées sans atténuation du changement climatique ainsi que de nouvelles trajectoires d'émissions de GES faibles.

Projections des émissions de GES suivant les cinq scénarios SSP (*Shared Socio-economic Pathways*) du GIEC

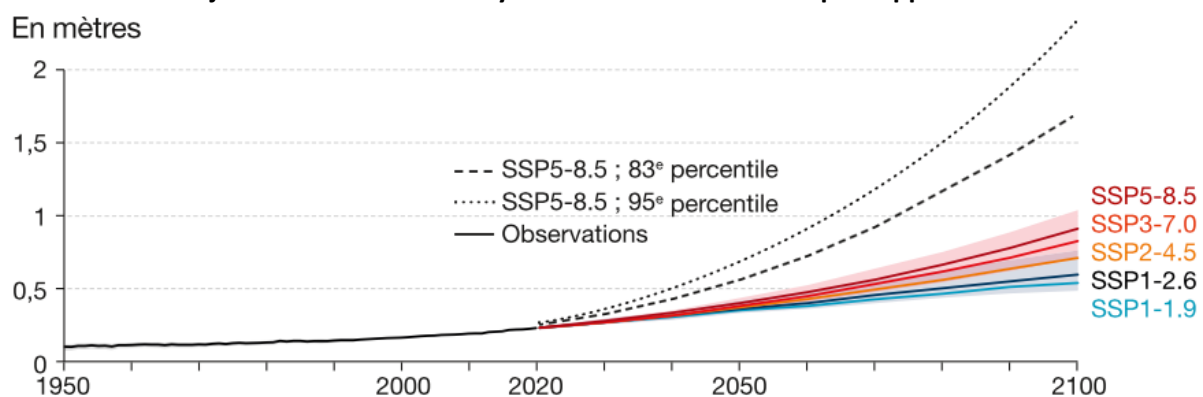


Note : les derniers nombres (1.9, 2.6, 4.5, 7.0 et 8.5) nommant chaque trajectoire correspondent aux forçages radiatifs induits à l'horizon 2100 par rapport à l'ère préindustrielle, exprimés en W/m^2 .

Projection de la variation de température moyenne mondiale par rapport à la période 1850-1900



Projection de la hausse moyenne du niveau des mers par rapport à 1900



Documents d'après <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2022/3-scenarios-et-projections-climatiques>

Plus d'infos : <https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation>