Exposé Labos1point5

Qu'est-ce que le réchauffement climatique ?

Cet exposé et ce document sont distribués avec la licence Labos1point5, 2022. Ce document est partagé selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC : Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les mêmes Conditions.

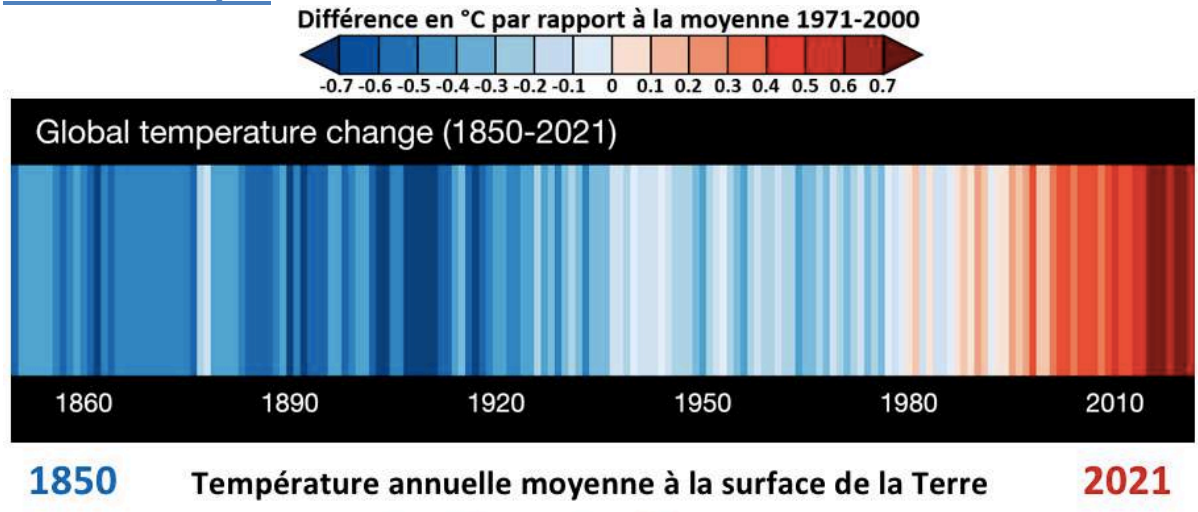
Diapo d'ouverture : Objectif et philosophie de l'exposé

L'objectif de cet exposé est de fournir une introduction générale à la problématique du réchauffement climatique. Cette présentation est mise à disposition par le Collectif Labos1point5 avec ce document d'accompagnement, afin de permettre à tous ses membres motivés de pouvoir présenter la problématique, en s'appropriant éventuellement l'exposé au nom du collectif.

Le matériel présenté provient pour une grande part d'exposés de membres du Collectif et a été validé par eux. Le niveau visé à ce stade est celui de licence/master approximativement.

Les contributeurs principaux sont : Françoise Billebaud, Guillaume Blanc, Isabelle Couchoud, François Dulac, Marie-Alice Foujols, Malgorzata Grybos, Patrick Hennebelle, Roland Lehoucq

Climate stripes



(Données : UK Met Office ; cf https://showyourstripes.info; Ed Hawkins, NCAS & Univ. of Reading, UK)

Nous parlerons beaucoup dans cette présentation de la température moyenne à la surface de la Terre : c'est le paramètre synthétique le plus représentatif du changement climatique. Cette sorte de code barre colorée est une représentation de cette température en moyenne annuelle de 1850 à 2021, avec une échelle de couleur qui va de -0.7 à +0 ,7 °C par rapport à la moyenne sur 30 ans à la fin du XXème siècle. Cette figure traduit bien qu'un réchauffement significatif est à l'œuvre et c'est ce que nous allons documenter et expliquer dans ce qui suit.

Diapo de Plan général :

1. **Deux mots sur le GIEC**
2. **La Terre, objet du système solaire**
3. **Les climats du passé et leurs déterminants**
4. **L'évolution des 2 derniers siècles - La Terre se réchauffe, quels indices ?**
5. **Augmentation du CO_2 dans l'atmosphère**
6. **Pourquoi la Terre se réchauffe-t-elle ?**
7. **Les modèles climatiques et leurs prévisions**

Notre exposé contient une petite **introduction au GIEC**, qui est la référence scientifique depuis trois décennies en matière d'évolution du climat, et six parties principales. Le point de vue adopté est de présenter dans un premier temps des faits et des mesures avec peu d'interprétations (parties 2 à 5) puis dans un second temps (parties 6 et 7), sont développées les explications et la modélisation de l'évolution du climat.

La **Partie 2** présentera d'abord brièvement ce qu'est la planète Terre et quelques notions importantes pour la suite. Ensuite, la **Partie 3** donnera un aperçu des facteurs de forçage du climat et des climats du passé, montrant que le climat est loin d'être quelque chose de figé dans l'histoire ancienne de notre planète. Dans la **Partie 4** nous verrons plus précisément ce qui s'est passé dans les deux derniers siècles, avec les indices de changement du climat et en particulier de réchauffement. La **Partie 5** illustrera l'augmentation de la teneur en CO_2 dans l'atmosphère du fait des activités humaines, cette augmentation étant la cause principale du réchauffement climatique. La **6ème partie** abordera le mécanisme de l'effet de serre atmosphérique qui explique ce réchauffement, et enfin la **dernière partie** parlera des modèles climatiques et des

projections qu'ils nous permettent d'établir sur l'évolution du climat et du réchauffement dans les prochaines décennies.

L'ordre proposé est indicatif et chaque orateur est libre de l'aménager selon sa sensibilité et son audience.

1. Deux mots sur le GIEC

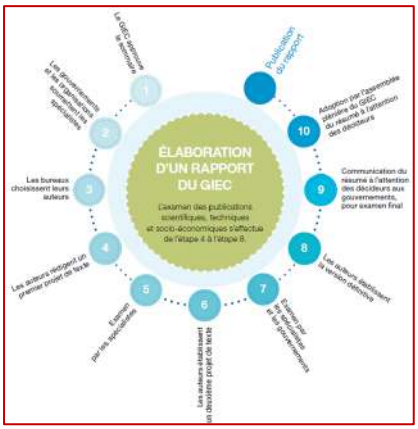
Le Giec

Cette présentation s'appuie sur la synthèse des connaissances scientifiques publiée par le GIEC. GIEC signifie Groupe Intergouvernemental d'expertise et de conseil sur l'Evolution du Climat (IPCC en anglais pour Intergovernmental Panel on Climate Change). Le GIEC a été créé en 1988 par deux institutions des Nations-Unies, l'Organisation Météorologique Mondiale, et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement. Les parties prenantes sont les différents états signataires de la Convention Cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques (CNUCC) adoptée au Sommet de la Terre de Rio en 1992, soit environ 200 états incluant l'Union Européenne. Le Bureau du GIEC a pour mission de faire régulièrement le point des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur l'évolution du climat, ses causes, ses impacts, et les stratégies de limitation et d'adaptation. Il est composé d'experts scientifiques et d'experts gouvernementaux. Le GIEC ne produit pas de recherche, il s'appuie sur l'ensemble ses recherches réalisées et publiées après évaluation par les pairs. Le GIEC n'émet pas non plus de recommandations, il se contente d'analyser les différents scénarios et trajectoires d'évolution publiés dans la littérature scientifique.

Le GIEC produit régulièrement tous les 6-7 ans depuis 1990 des rapports d'évaluation, que l'on abrège par AR pour « Assessment Report » avec leur numéro. Le dernier, l'AR5, date de 2013-2014 et le prochain, AR6, est prévu pour la fin de l'année 2021. A côté de ces rapports de synthèse réguliers, il est amené à publier des rapports spéciaux, que l'on abrège par SR pour « Special Report ». Le plus connu est le rapport SR1.5 sorti en octobre 2018, qui lui avait été demandé au moment des Accords de Paris pour évaluer le réchauffement et ses impacts à 1.5°C et au-delà. Deux autres rapports spéciaux sont parus en 2019, sur les océans et la cryosphère d'une part (SROCC) et les surfaces continentales (SRCCL).

Pour en savoir plus sur le GIEC : https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/ ;
https://www.ecologie.gouv.fr/comprendre-giec
Pour en savoir plus sur la CNUCC : https://unfccc.int/fr/

Elaboration d'un rapport du Giec



La publication d'un rapport du GIEC est soumise à un processus très rigoureux. Pour synthétiser les connaissances de façon aussi exhaustive et rigoureuse que possible à partir de la littérature scientifique, le GIEC fait appel à un large panel de scientifiques internationaux sélectionnés parmi les volontaires. La sélection des contributeurs veille à assurer des équilibres en termes de genre, de géographie, de discipline, et de renouvellement des contributeurs d'un rapport à l'autre.

Une première version de leur rapport est soumise en ligne à l'évaluation par tous les pairs volontaires, et les auteurs répondent aux dizaines de milliers de commentaires reçus pour réviser leur projet de rapport, qui est ensuite examiné et critiqué par les experts gouvernementaux. La version finale du rapport fait l'objet d'un résumé pour décideurs à destination des gouvernements, largement repris par les médias. Ce résumé est âprement débattu avec les représentants gouvernementaux. Jusqu'ici, tous les rapports du GIEC ont été adoptés à l'unanimité par l'ensemble des parties représentées, donc y compris par tous les états dont les économies reposent sur les combustibles fossiles ou la déforestation, les principales sources de l'excès de CO_2. Ceci démontre bien qu'il n'existe aucune base scientifique permettant de mettre en cause de façon fondée les conclusions tirées. Or le dernier rapport régulier (AR5) indique : **L'influence de l'homme sur le système climatique est claire et en augmentation, avec des incidences observées sur tous les continents. Si on ne les maîtrise pas, les changements climatiques vont accroître le risque de conséquences graves, généralisées et irréversibles pour l'être humain et les écosystèmes.**

2 ajouts en 2022 :

- La figure reprenant les 3 volets du 6e rapport du GIEC publiés en 2021 et 2022 en insistant sur l'atlas interactif, les fiches par région ou thème et les solutions secteurs par secteurs
- L'animation intitulé : quel climat en Europe pour 2050

2. La Terre, objet du système solaire

La Terre est une planète

Ce n'est pas une étoile ! Lapalissade ? Non, pas vraiment. Les planètes naissent à partir du même nuage de gaz et de poussières que leurs étoiles, mais puisqu'elles ne sont pas des étoiles*, cela implique qu'elles n'ont pas atteint une certaine masse critique (pas de consensus sur la valeur précise de cette masse critique, mais elle est souvent considérée de l'ordre d'une à plusieurs dizaines de fois la masse de Jupiter, pour rappel, Jupiter = environ 317 x masse de la Terre) qui permettrait la mise en place en leur coeur du processus de fusion thermonucléaire.

*Une étoile est un corps auto-gravitant, issu de l'effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz et de poussière, dont la masse est suffisante pour que la densité et la température atteintes en son coeur conduisent à la mise en route de réactions de fusion thermonucléaire, dégageant une grande quantité d'énergie. On peut donc dire qu'une étoile est un réacteur nucléaire fonctionnant sur le mode de la fusion, confiné et régulé par sa propre gravité.

Une planète est en quelque sorte un "sous-produit" de la formation d'une (ou plusieurs) étoile(s). Elle n'est donc pas un système isolé puisque sauf accident de parcours (éjection gravitationnelle par exemple), elle est en orbite autour d'une (ou plusieurs) étoile(s). De ce fait, elle reçoit la lumière de son étoile, dont le flux dépend des caractéristiques propres à l'étoile et de sa distance à l'étoile. Notons pour être complet que les caractéristiques de l'orbite de la planète jouent aussi sur l'éclairement reçu par cette dernière…
La planète reçoit également de l'étoile des particules chargées (électrons, ions) et en perd également un peu.

D'autre part, la planète, même dans le cas extrême où elle serait la seule planète en orbite autour de son étoile, n'est pas le seul corps résultant de la formation de l'étoile. Il reste a minima des "débris", corps plus petits tels les astéroïdes, les comètes et la poussière sous toutes ses formes (des grains micrométriques aux "gros cailloux"). Ces grains et cailloux qui tombent en permanence sur Terre sont ce que l'on appelle les météorites.

La Terre reçoit ainsi entre 100 et 1000 tonnes de matière par jour, qui accroissent donc sa masse d'autant (cet ajout de masse est totalement négligeable comparé à la masse de la Terre).

Pour terminer, la Terre perd aussi de la matière par le processus d'échappement atmosphérique, mais les quantités sont aussi très faibles.

En résumé, pour une planète telle que la Terre:

- entrent dans le "système Terre": rayonnement électromagnétique (lumière), matière (grains), particules chargées (électrons et ions)

- sortent du “système Terre”: rayonnement électromagnétique, matière (très peu), particules chargées (très peu)

Une planète échange du rayonnement avec l’extérieur

Ici une très courte description de l’effet de serre est faite. Elle sera reprise de manière beaucoup plus détaillée à la cinquième partie de l’exposé.

L’un des aspects les plus fondamentaux pour comprendre le réchauffement climatique tient au fait qu’une planète échange de l’énergie avec l’extérieur sous forme de rayonnement. En premier lieu donc, la planète rediffuse vers l’espace et absorbe la lumière reçue de son étoile. L’énergie absorbée la chauffe. Dans le cas de la Terre, l’énergie reçue du Soleil correspond en grande partie au domaine dit “du visible” (parce que perceptible par notre oeil).

Mais une planète, comme tous les objets, rayonne également. Dans le cas de la Terre, ce rayonnement est pour l’essentiel dans le domaine de l’infrarouge, invisible à l’oeil. En émettant de l’infrarouge vers l’espace, la Terre se refroidit. A l’équilibre, la planète rayonne autant d’énergie qu’elle en absorbe venant de son étoile.

La température du sol et de l’atmosphère de la planète dépend de la quantité d’énergie solaire reçue et absorbée, mais aussi de la capacité de l’atmosphère à retenir une partie du rayonnement infrarouge de la lumière et à la renvoyer vers le sol. C’est l’essence de l’effet de serre.

Précisons également qu’une planète possède aussi des sources de chaleur internes : stock de chaleur résiduelle issu des processus d’accrétion de matière qui l’ont formée, radioactivité de la matière qui la compose, énergie chimique… Mais la quantité d’énergie interne atteignant la surface de la Terre est négligeable par rapport à l’énergie reçue du soleil.

Le système Terre

Pour comprendre le climat terrestre et son évolution, il est nécessaire de prendre en compte un grand nombre de processus qui interagissent entre eux. Faire un bilan détaillé nécessiterait de longs développements qui vont bien au-delà du cadre de cet exposé mais il est possible de distinguer des grands ensembles qui correspondent aux différents états de la matière sur Terre.

En effet, le système Terre est composé de : la litosphère, l’atmosphère, l’hydrosphère, la cryosphère, la biosphère. On peut depuis peu également ajouter l’humanité dont l’activité à présent influence le climat.

La lithosphère est constituée de l’enveloppe rigide de la surface de la Terre, elle comprend la croûte terrestre et une partie du manteau supérieur. L’énergie reçue sur Terre depuis le Soleil est en partie absorbée par la lithosphère.

L’atmosphère est la couche gazeuse qui entoure la Terre. Elle absorbe une partie du rayonnement du Soleil et une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et l’atmosphère elle-même, qu’elle renvoie pour partie vers la surface.

L’hydrosphère est constituée des océans. Ceux-ci jouent un rôle fondamental en absorbant une partie du flux lumineux solaire mais aussi en redistribuant la chaleur à la surface de la Terre par le biais des courants océaniques, tels par exemple que le Gulf stream. L’océan, de par sa

capacité calorifique importante, constitue un véritable réservoir de chaleur.

La cryosphère est constituée de la glace présente à la surface des océans et des continents, dont l'essentiel de la masse se trouve au Groenland et en Antarctique. Du fait des capacités réfléchissantes de la glace, elle renvoie vers l'espace une grande partie du rayonnement solaire qu'elle reçoit. Par ailleurs, la fonte de ces deux inlandsis contribuera à une élévation du niveau des mers de plusieurs mètres.

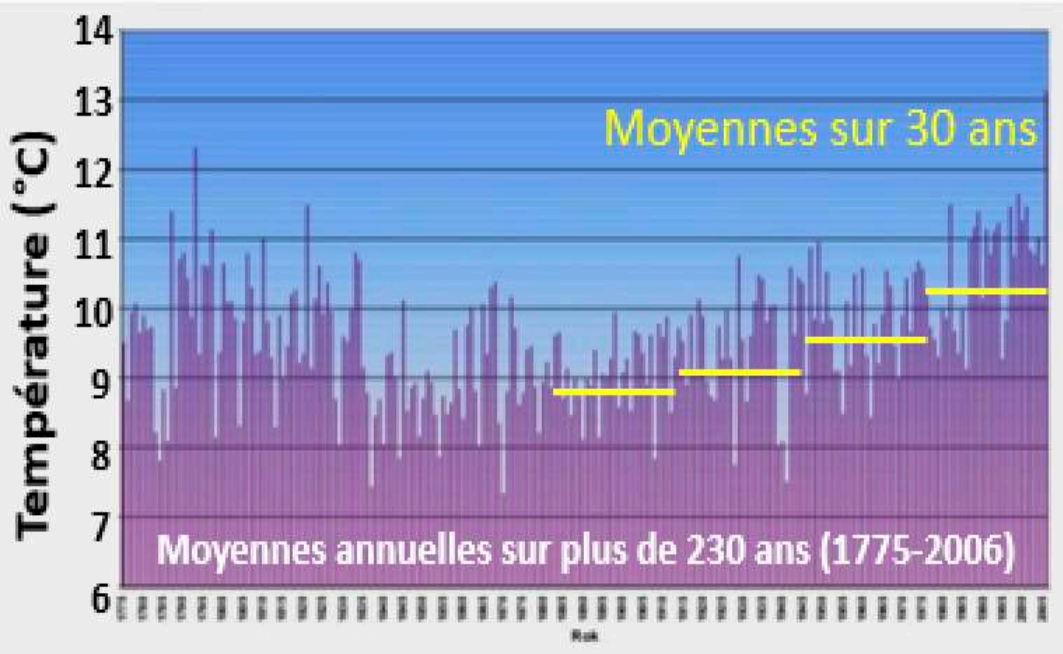
La biosphère est l'ensemble de la végétation terrestre. Celle-ci joue un rôle fondamental du fait notamment de sa capacité à absorber puis à piéger le carbone.

Pour en savoir plus : https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_climatique

Météo et climat

Il est important de bien distinguer la météo du climat. En effet, comme on le constate chaque jour, la météo, caractérisée par la température, la pression, mais également les précipitations et les vents, est très changeante. Chacune de ces quantités varient de manière importante au cours d'une même journée (par exemple du fait de l'alternance du jour et de la nuit) ou bien au cours d'une année du fait des saisons notamment. La météo concerne l'évolution des conditions atmosphériques à des échelles de durées relativement courtes.

En revanche, le climat s'intéresse aux valeurs moyennes de ces quantités obtenues sur des plages de temps assez longues, typiquement la trentaine d'années pour tenir compte de la variabilité naturelle, et éventuellement sur des régions géographiques larges (pays, voire continents).



La figure illustre parfaitement cette différence. Les températures moyennes annuelles dans la station météo considérée ici varient aisément de plusieurs degrés d'une année à l'autre et ce de manière stochastique. En revanche, les 4 dernières moyennes de températures effectuées sur 30 ans montrent une tendance à l'augmentation continue avec des écarts consécutifs inférieurs

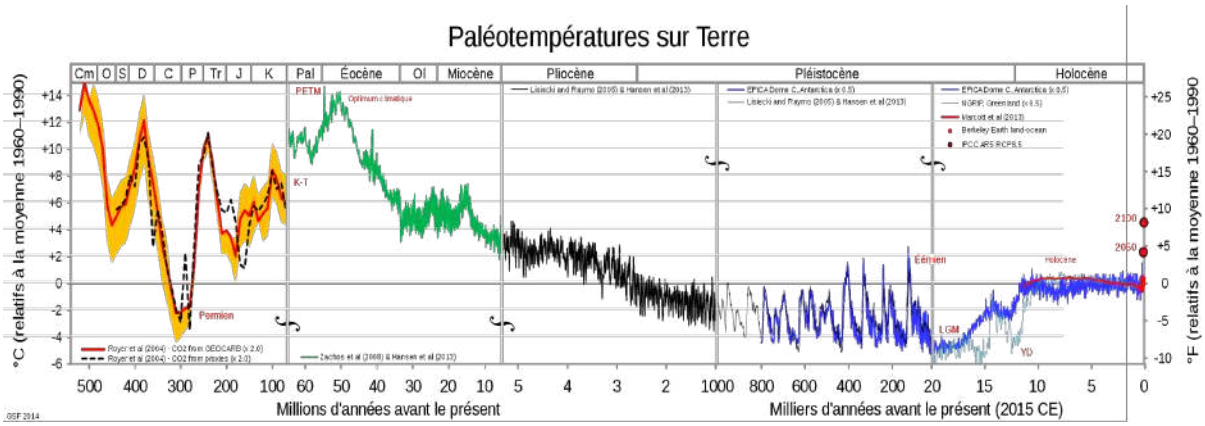
au degré.

3. Les climats du passé et leurs déterminants

Un point de vocabulaire
Le climat de la Terre est piloté par son bilan énergétique, en particulier l'équilibre entre le rayonnement reçu du soleil et le rayonnement infrarouge réémis vers l'espace. Pour comparer entre-eux les différents phénomènes affectant le climat, les scientifiques parlent de « forçage radiatif ».

Le forçage radiatif (en watts par mètre carré, w/m^2) mesure l'impact de certains facteurs sur l'équilibre énergétique du système Terre/océan/atmosphère, qui contrôle le climat et la température moyenne à la surface de la Terre. Le terme «radiatif» est utilisé du fait que ces facteurs déplacent l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant absorbé causant un réchauffement et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère causant un refroidissement.

La température dans le passé a varié énormément …mais très lentement



Wikipedia, Glen Fergus, d'après les travaux cités sur le graphe, traduction Ariel Provost

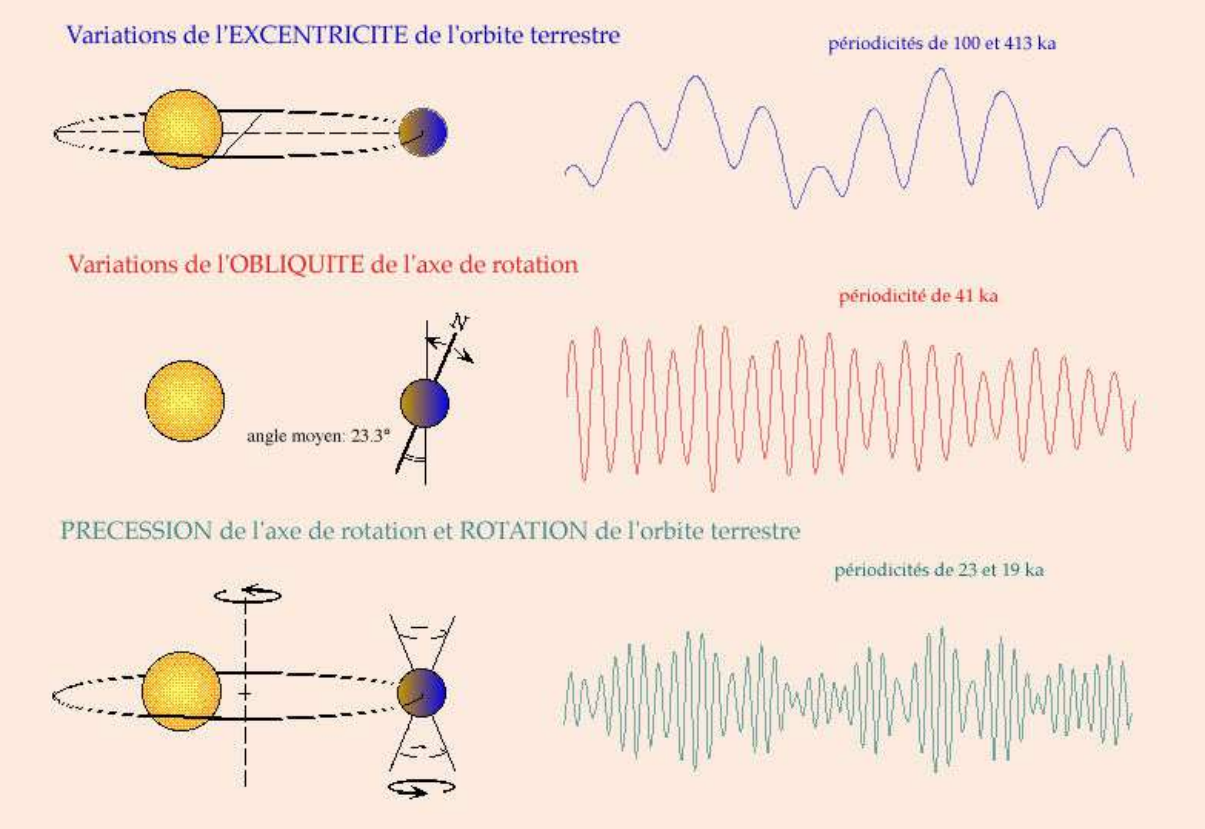
Il y a des âges glaciaires et interglaciaires depuis le début du quaternaire (il y 2,588 Millions d'années) au moins. On sait également qu'il y a eu des périodes plus chaudes qu'actuellement dans un passé plus lointain, mais il faut se souvenir que l'apparition d'Homo Sapiens remonte à environ 350 000 ans seulement, un instant dans l'histoire de la Terre. Pour la plupart de ces variations climatiques, les variations ont été très lentes, laissant au système Terre le temps de s'adapter aux nouvelles conditions en trouvant un nouvel équilibre. On peut voir par exemple que lors de la dernière grande période glaciaire il y a environ 18000 ans, la température moyenne était de 5°C plus basse. Il y avait une énorme calotte de glace sur la Scandinavie et la France ressemblait à une zone arctique actuelle (steppe froide et toundra). Le réchauffement vers la température actuelle a pris plusieurs milliers d'années.
(Noter que les moments où ces variations ont été plus brutales correspondent aux moments où la biosphère a été violemment affectée, conduisant à des extinctions de masse. Voir par exemple *Burgess S. et al.*, PNAS 111, no. 9, 2014)

Pour aller plus loin : https://fr.wikipedia.org/wiki/Registre_de_température

Théorie astronomique des paléoclimats

En 1941, l'astronome Milutan Milankovitch formule une théorie selon laquelle les fluctuations climatiques **à long terme** sont liées aux variations des paramètres orbitaux : excentricité, obliquité et précession (de l'axe de rotation et de l'orbite). Ces paramètres ont des variations périodiques (présentant parfois plusieurs périodes) qui se combinent, induisant des variations de l'énergie reçue du Soleil mais aussi des variations de sa répartition à la surface du globe. En particulier, la quantité d'éclairement des hautes latitudes de l'hémisphère Nord en été va piloter un éventuel dégel estival, ou permettre l'accumulation de la neige et de la glace. C'est la **théorie astronomique des paléoclimats**.

La théorie astronomique des paléoclimats est utilisée en particulier pour expliquer les alternances de périodes glaciaires/interglaciaires au moins lors du quaternaire. Il faut noter qu'étant donné les échelles de temps en jeu, cette théorie n'intervient pas pour expliquer les variations à court terme (quelques centaines d'années) du climat, même si les paramètres sont évidemment pris en compte dans les modèles climatiques.



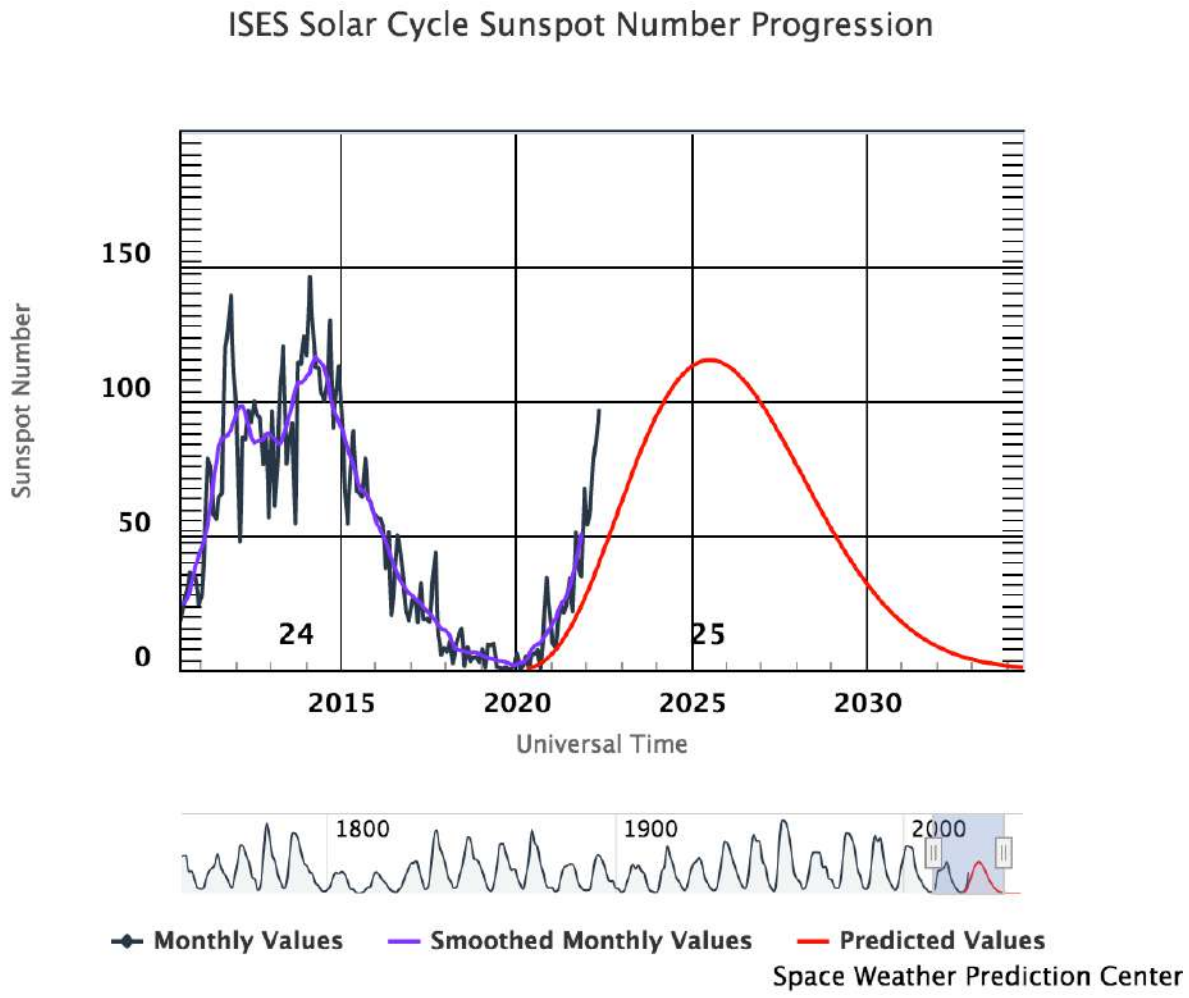
https://planet-terre.ens-lyon/ressources/milankovitch-passe.xml

Le forçage solaire

La Terre recevant quasiment toute son énergie de son étoile, très logiquement, si celle-ci rayonne plus (envoie plus d'énergie dans toutes les directions de l'espace), elle recevra plus d'énergie et la température moyenne à sa surface sera plus élevée, à autres paramètres constants.

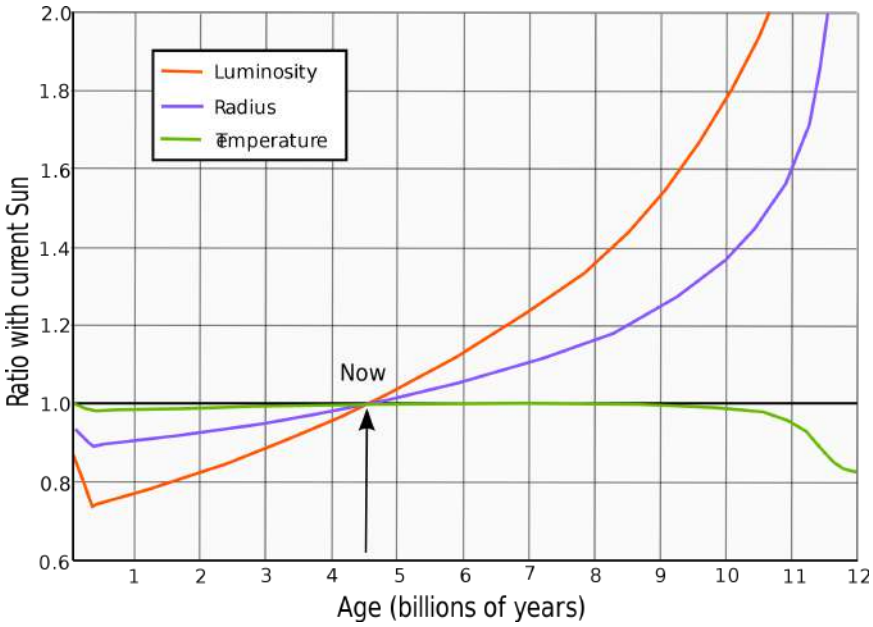
Certaines étoiles ont un rayonnement qui peut varier de façon importante sur de courtes périodes, ce n'est pas le cas du Soleil dont le rayonnement varie très peu… mais il varie néanmoins selon un cycle d'environ 11 ans (mais pouvant en réalité être compris entre 8 et 15 ans), connu sous le nom de « cycle solaire ».
Le cycle solaire a une durée moyenne de 11,2 ans. Il est lié à l'activité magnétique à l'intérieur du Soleil.

Historiquement, le cycle solaire a pu être déterminé par le comptage des taches solaires, qui se révèle être un bon indicateur de l'activité solaire (lorsque l'activité solaire augmente, le nombre de taches solaires augmente, ainsi que l'énergie rayonnée). Les taches solaires sont comptées depuis le début du 17e siècle, grâce au développement des lunettes astronomiques.
Depuis 1978, le flux rayonné par le Soleil, ou irradiance solaire, est mesuré régulièrement par satellite. Ceci a permis de montrer que **les variations de l'irradiance totale sont faibles : ≃0,1%, soit de l'ordre de 1 W/m2, entre les minima et les maxima de l'irradiance solaire totale, qui vaut environ 1361 W/m2**.
Egalement, les maxima des cycles ne sont pas tous de la même intensité. Ils peuvent être plus marqués ou au contraire plus faibles. Par le passé, des successions de cycles avec des maxima de faible voire très faible intensité ont eu lieu (exemple du grand minimum de Maunder, de 1645 à 1715) et ont été associés à des périodes de refroidissement important. Il s'avère cependant que ces phénomènes sont d'une part affectés de fortes disparités régionales et d'autre part que l'effet réellement attribuable à l'activité solaire est vraisemblablement faible, surtout comparé à d'autres facteurs, tels que les éruptions volcaniques.



Nous sommes actuellement entre la fin du cycle 24, qui a été un cycle d'amplitude relativement peu élevée, et le tout début du cycle 25 (dont on prédit que l'amplitude sera probablement du même ordre, voir:
https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression)

En tant qu'étoile, le Soleil a aussi une évolution due au déroulement de sa « vie » d'étoile, mais cette évolution est extrêmement lente (sa luminosité augmente d'environ 7% par milliard d'années): voir ci-dessous.



Wikipedia, RJHall, d'après Ribas I., Proceedings of IAU Symp. 264, 2009

En résumé, les forçages "externes" (au système Terre) c'est à dire liés aux paramètres orbitaux et à l'activité du Soleil sont indéniables, mais ils ne sont pertinents que sur de très longues échelles de temps !

Forçage radiatif du volcanisme explosif

Les éruptions volcaniques explosives injectent des particules et du gaz – vapeur d'eau (H_2O), dioxyde de carbone (CO_2), dioxyde de soufre (SO_2) – avec du chlore (Cl-), du fluor (F-) ainsi que des cendres à grande altitude dans l'atmosphère. Ces cendres disparaissent rapidement du fait des vents et des pluies et ne résident que quelques minutes à quelques semaines dans la troposphère (couche de l'atmosphère proche de la surface terrestre).

De petites quantités de cendres peuvent demeurer quelques mois dans la stratosphère (cette couche atmosphérique entre 10-12 et 50 kilomètres), mais cela a relativement peu d'impact sur le climat car leur présence est limitée géographiquement et dans la durée.

L'effet climatique le plus important est dû à l'émission d'espèces soufrées, telle que SO_2, qui sont éjectées directement dans la stratosphère. En réagissant avec la vapeur d'eau le SO_2 est transformé en acide sulfurique (H_2SO_4) qui se condense ensuite en fines particules d'aérosols.

Ces aérosols stratosphériques diffusent les rayons du soleil et diminuent la quantité de rayonnement qui traverse l'atmosphère. Les aérosols sulfatés d'origine volcanique vont rester

dans la stratosphère un à deux ans, et vont donc avoir ainsi le temps de se répartir largement et d'accroître l'opacité atmosphérique dans la durée, pouvant entraîner un refroidissement de quelques dixièmes de degrés dans des cas extrêmes.

Pour aller plus loin :
https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01781395/document
Changement climatique : quel est le rôle des éruptions volcaniques ?
Cathy Clerbaux

Forçages radiatifs naturels vs anthropiques

Plusieurs phénomènes naturels tels que les émissions volcaniques, les phénomènes océaniques à grandes échelles (notamment El Niño et La Niña) ou encore les variations de l'irradiance solaire dues aux variations de l'activité solaire, ont des effets sur la température terrestre. On parle de forçage radiatif.
Ces variations mesurées au cours des cents dernières années, sont de l'ordre de 0.2 degrés Celcius et globalement elles se moyennent à 0. Elles n'ont pas entrainé de variations significatives sur des échelles de temps de l'ordre du siècle.

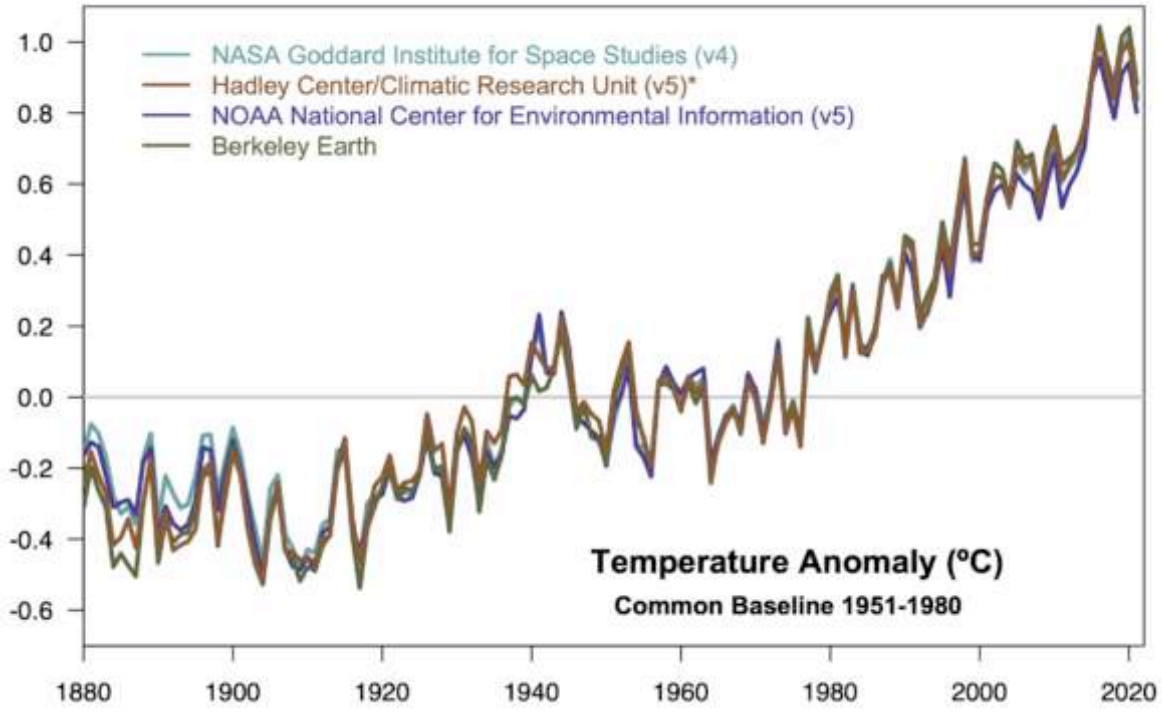
En revanche, le forçage lié aux activités humaines (voir également la partie 5 de cet exposé), conduit à des variations bien plus significatives, de l'ordre du degré à l'échelle du siècle.

Pour aller plus loin :
http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/comprendre-le-climat-mondial/el-ninola-nina
https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01781395/document

4. L'évolution des 2 derniers siècles - La Terre se réchauffe, quels indices ?

Quelles preuves avons-nous du réchauffement global ? C'est à cette question que se propose de répondre cette partie.

La Terre se réchauffe !



La preuve la plus directe du réchauffement est bien entendu constituée des mesures de températures elles-mêmes qui le montre sans ambiguïté. Les mesures de température existent depuis la mise en place des relevés météorologiques à la fin du 19e siècle. On construit un indicateur : l'anomalie, par rapport à la moyenne de la période 1951-1980 (30 ans pour être représentatif du climat), de la température moyenne globale à partir de ces relevés. Il s'agit bien sûr d'un indicateur. Plusieurs groupes dans le monde ont permis de construire ces courbes qui montrent le réchauffement global depuis 1880 jusqu'en 2020. Près de 1,2°C entre 1880 et 2020.

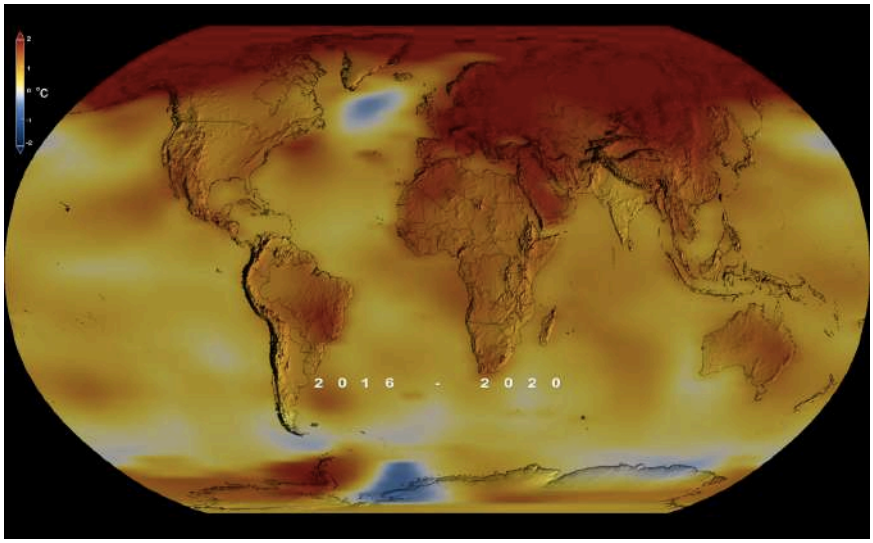
Précisons que l'obtention de températures moyennes à un dixième de degrés près n'est pas une chose aisée. Dans un premier temps, il est nécessaire de disposer d'une bonne couverture spatiale et de séries temporelles continues. Il faut également tenir compte de biais, comme par exemple la proximité de zones urbaines importantes. Il est ensuite nécessaire de procéder à des moyennes ou des interpolations de ces mesures. Les trois équipes principales (NASA Goddard Institute for Space Science, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), et des équipes britanniques associées du Hadley Centre de l'UK Met-Office et de la Climate Research Unit de l'université d'East Anglia) utilisent des techniques assez différentes dont la comparaison permet d'estimer la fiabilité de la reconstruction. La figure permet de visualiser que pour l'essentiel, les différentes estimations sont bien en accord les unes avec les autres et que les incertitudes sont comparables ou inférieures au dixième de degrés.

Pour aller plus loin :

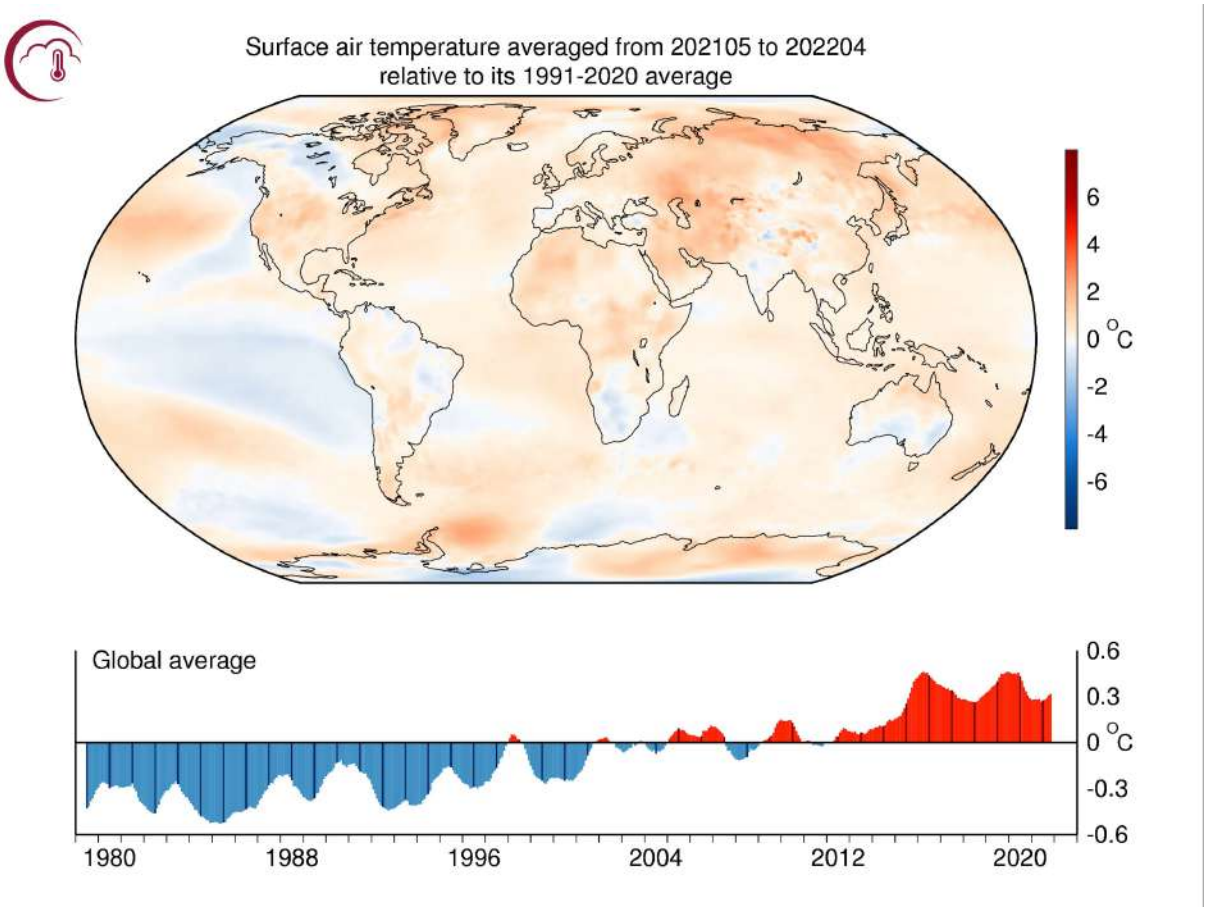
https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/temperature-moyenne-terre-rechauffement-climatique/

https://www.encyclopedie-environnement.org/zoom/calcul-erreurs-mesures-meteorologiques/

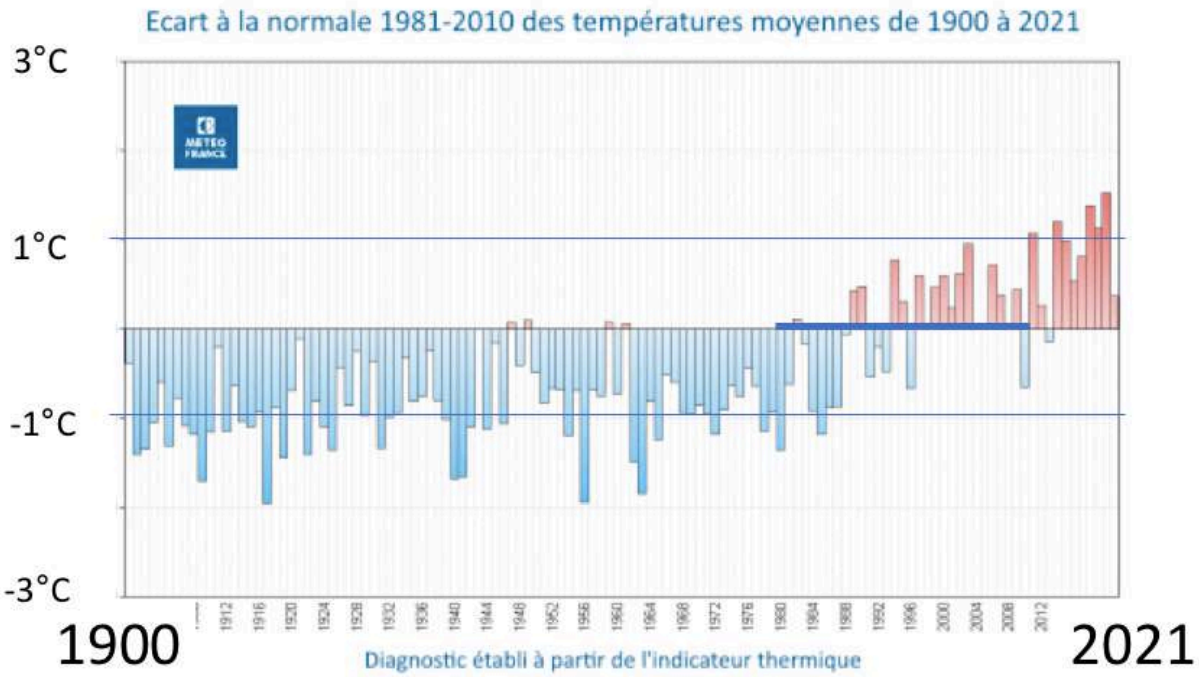
Températures : +1,2°C entre 1880 et 2020



Cette diapositive a été masquée en 2022 au profit de l'animation Copernicus. Ce film, produit par la NASA, retrace cette anomalie de température, sur une moyenne glissante de 5 ans, sur le globe entier. Cela permet de faire ressortir les zones d'anomalies froides et chaudes, l'ensemble allant globalement vers le chaud et de plus en plus chaud. On voit également l'amplification sur les continents par rapport aux zones océaniques, et encore plus l'amplification arctique, où la fonte en été de la banquise sur la mer et de la neige sur la terre remplacent des surfaces blanches très réfléchissantes en surfaces sombres absorbant le rayonnement solaire.
Cette animation en provenance du centre européen Copernicus a été ajoutée. Elle est mise à jour chaque mois et se termine là en avril 2022.

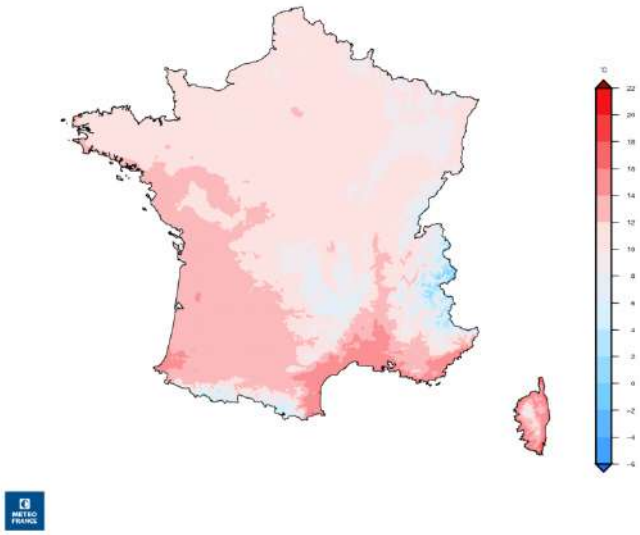


La France se réchauffe...



En France aussi, Météo France construit un indicateur thermique national sur la base des relevés dans les stations météorologiques, qui permet de montrer le réchauffement depuis 1900.

Ici le niveau d'ordonnée 0 est la moyenne sur 1981-2010 (la référence est toujours par rapport à une période de 30 ans au moins). On observe ainsi une hausse des températures moyennes en France de 1,7°C depuis 1900. C'est plus que le réchauffement constaté en moyenne mondiale (https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/2021-une-annee-de-forts-contrastes-en-france).
Voir aussi http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd.
Notez que la température moyenne annuelle de la France métropolitaine cache une grande variabilité géographique, comme le montre cette carte de la température moyenne sur la période 1981-2010 avec son échelle de -6 à +22°C (https://meteofrance.com/comprendre-climat/france/le-climat-en-france-metropolitaine):



La fonte des glaciers

La fonte des glaces continentales un peu partout à la surface de la Terre constitue également une très bonne indication du réchauffement climatique. Des photos prises à des intervalles de plusieurs dizaines d'années sont particulièrement éloquentes. Un glacier des Alpes, un glacier du Montana et un glacier arctique sont donnés ici pour exemple.

Des glaciers alpins qui fondent de plus en plus vite

Des études quantitatives (Vincent et al., Geophys. Res. Lett., 2017) ont été réalisées sur 6 glaciers de l'arc alpin de l'Autriche à la France. Ces glaciers qui ont été suivis depuis les années 1960, montrent clairement l'accélération de la fonte.

La fonte des glaces du Groenland

La fonte de la calotte groenlandaise est également observée, et sa disparition semble inexorable à l'échelle de quelques siècles, ce qui causera une élévation du niveau marin de 7 mètres.

La disparition de la banquise d'été

La couverture de glace de mer en Arctique diminue, en épaisseur et en étendue. La banquise arctique a perdu 3 fois la surface de la France en 30 ans. Les glaces pluri-annuelles sont de moins en moins étendues et un été sans glace de mer arctique est très probable dans le futur.

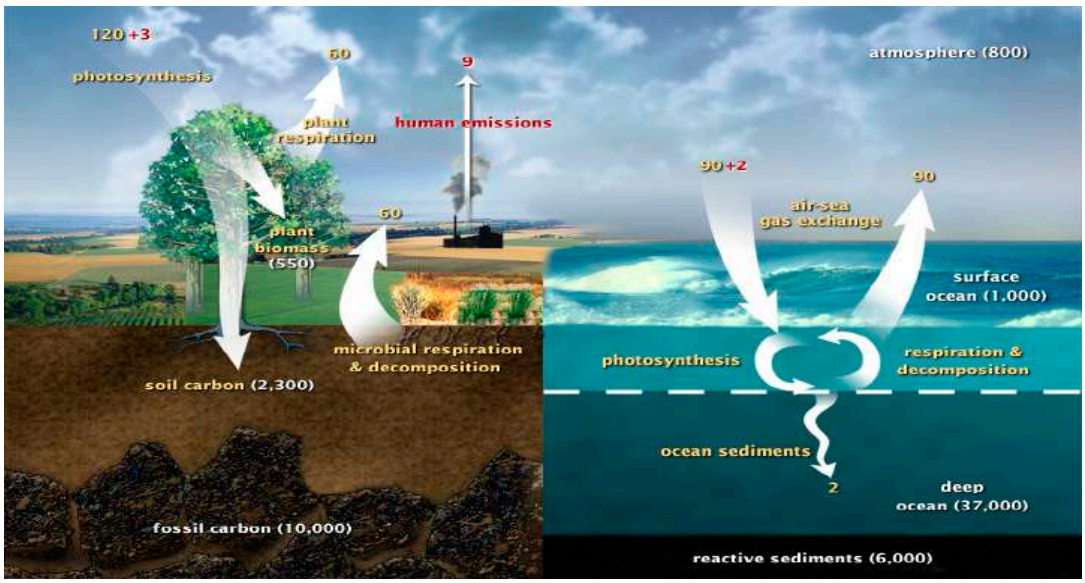
Pour la 1ère fois, la mer a été totalement libre au nord du Canada en 2007. D'ici une vingtaine d'années pour certains, et même plus tôt pour d'autres.

Elévation du niveau des mers

L'eau de fonte de la calotte polaire, comme de l'ensemble des autres glaciers continentaux, participe à l'élévation du niveau marin. Celui-ci augmente aussi à cause de l'accroissement du volume des océans associé à l'augmentation de leur température. Cette élévation du niveau des mers constitue une preuve supplémentaire indirecte du réchauffement global. L'élévation du niveau marin initiée se poursuivra pendant plusieurs siècles et sans doute au-delà de 100 ans.
On notera au passage que la fonte de la banquise arctique ne contribue pas à la montée du niveau marin, car c'est de l'eau de mer qui a gelé : sa fonte ne rajoute pas d'eau dans l'océan, contrairement à la fonte des glaces présentes sur les terres émergées. Une petite expérience facile pour s'en convaincre, avec 2 verres, 1 fourchette, 1 pile de livres plus haute que les verres, 2 glaçons, de l'eau pour remplir les verres, 1 support plat et stable qui ne se laisse pas bousculer, genre paillasse : disposer les deux verres sur le support; dans l'un disposer un glaçon et le remplir d'eau à ras bord, comme modèle de la banquise de mer; à côté mettre un glaçon identique sur une fourchette en équilibre grâce à la pile de livres au-dessus de l'autre verre que l'on doit remplir également à ras bord, dans lequel gouttera le glaçon placé sur la fourchette en fondant, comme modèle du glacier continental ; 1 seul des 2 verres va déborder.

5. Augmentation du CO2 dans l'atmosphère

Le cycle du carbone



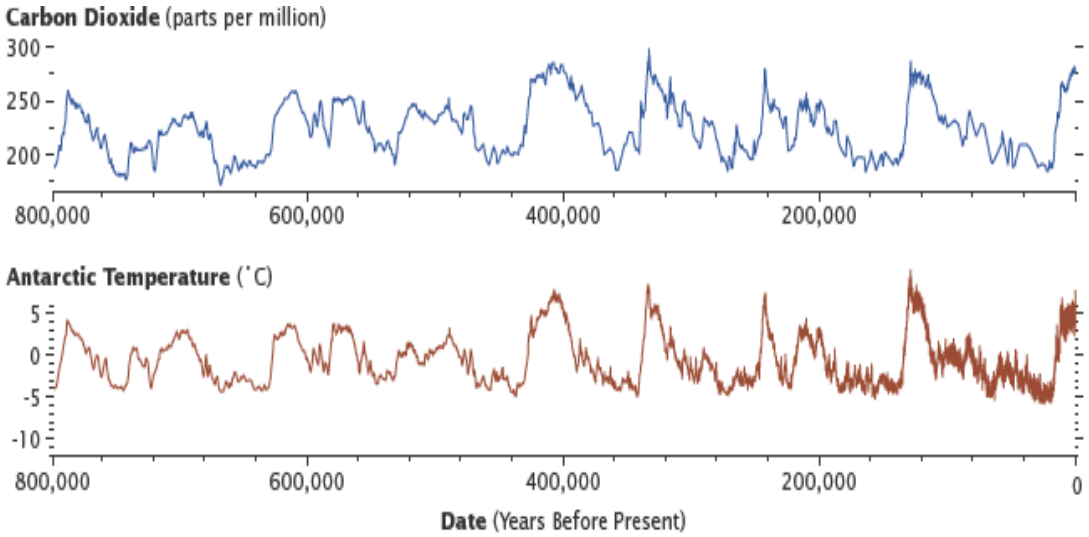
L'élément carbone, noté C est présent dans tous les réservoirs superficiels du système terrestre : l'atmosphère, l'hydrosphère (principalement les océans), la lithosphère (principalement roches carbonatées et les combustibles fossiles), la biosphère (organismes vivants) et les sols. La transformation et le transport du carbone entre les différents réservoirs terrestres jouent un rôle important dans la régulation de la température et du climat de la Terre et affectent la quantité de CO_2 dans l'atmosphère. Le flux naturel de CO_2 vers et depuis l'atmosphère est régulé par divers mécanismes/processus :

a. A l'interface surface continentale/atmosphère via la photosynthèse/respiration : les plantes terrestres et les organismes photosynthétiques des écosystèmes aquatiques transforment le CO_2 de l'atmosphère en glucides (ou autres molécules organiques) au cours de la photosynthèse. Après la mort de ces organismes, la matière organique est soit préservée dans les sols ou les sédiments lacustres à plus en moins long terme, soit au contraire rapidement minéralisée en CO_2 ou CH_4 et retourne alors dans l'atmosphère
b. A l'interface océan/atmosphère via des pompes à carbone : les océans superficiels sont très efficaces pour absorber le CO_2 atmosphérique. Une partie du CO_2 dissout dans l'eau océanique retourne dans l'atmosphère, et une partie du C est redistribuée verticalement dans la colonne d'eau, où il peut rester pendant de longues périodes (des milliers d'années). Seule une petite fraction du C parvient au fond des sédiments océaniques, où il est stocké pendant des millions d'années. Le transfert du C des eaux de surface vers les profondeurs est assuré par 3 pompes à carbone fonctionnant simultanément :
   - <u>Pompe biologique</u> : la séquestration du C par le phytoplancton océanique (= assimilation du C dans la masse cellulaire via la photosynthèse) et transfert de particules organiques (cellules mortes, pélots fécales…) via la décantation vers les eaux plus profondes.
   - <u>Pompe physique</u> : la solubilité de CO_2 est favorisée à basse température. Les eaux océaniques des hautes latitudes absorbent plus de CO_2 que les eaux des basses latitudes. La plongée des eaux froides et denses permet de transférer le carbone des eaux de surface vers le fond de l'océan.
   - <u>Pompe à carbonates</u> – Le C dissout dans l'eau peut précipiter sous forme de carbonates (synthèse de squelettes carbonatés, déplacement des équilibres acido-basiques)
c. il existe également d'autre mécanismes pouvant influencer les concentrations de CO_2 dans l'atmosphère :
   - Les émissions volcaniques,
   - Le métamorphisme
   - L'altération des silicates.

La quantité totale de carbone circulant dans le cycle naturel ne change pas sur de courtes échelles de temps (décennies, siècles). Les flux de C à l'interface « surface continentale/atmosphère » et à l'interface « surface océanique/atmosphère » sont équilibrés : autant de carbone est libéré qu'il en est de séquestré. Dans le cycle naturel (non perturbé), 90 Gt de C sont libérés chaque année des océans dans l'atmosphère, et autant et sont séquestrées par les océans. Sur les surfaces continentales, 60 Gt de C sont libérées par la respiration et 60 GT de C émis par la minéralisation de la matière organiques du sol correspondent à 120 Gt de C assimilées par la photosynthèse.

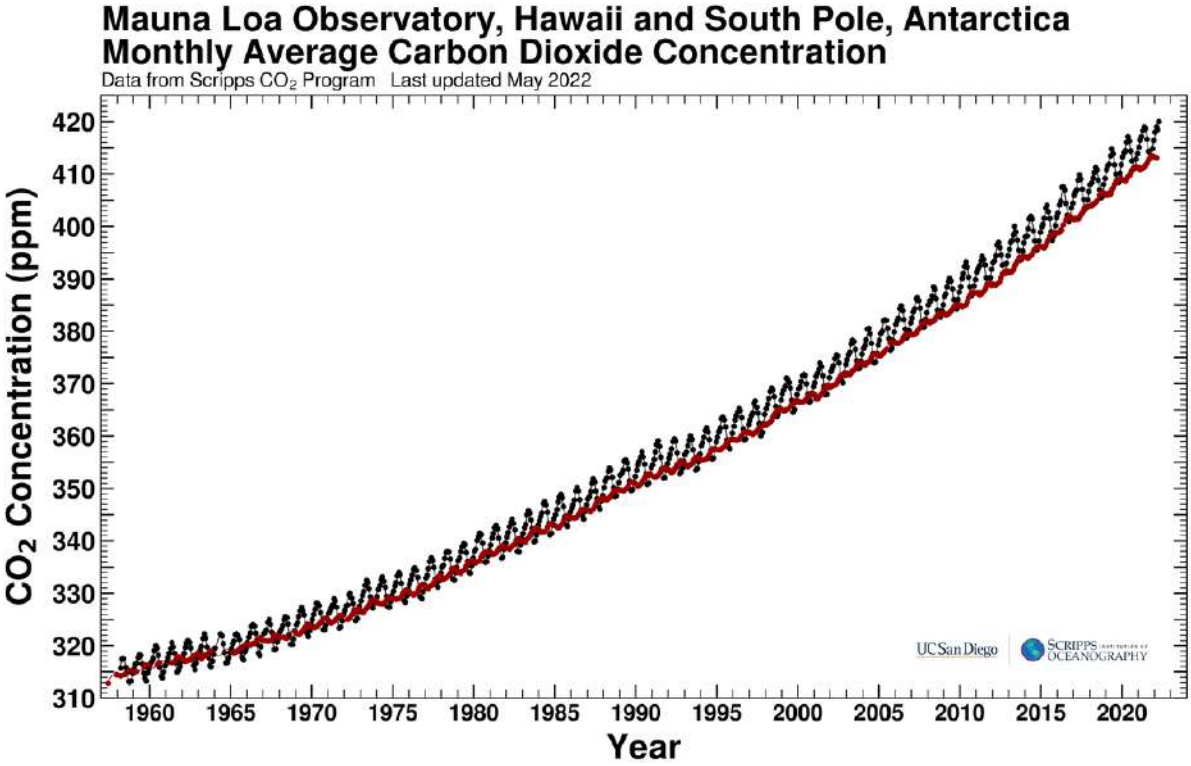
Depuis la révolution industrielle, le CO_2 produit par l'activité anthropique se rajoute aux flux naturels du C entrant dans l'atmosphère. Actuellement les océans et les plantes absorbent une quantité importante de carbone d'origine anthropique, atténuant ainsi le réchauffement climatique

L'évolution de la température et du CO2 dans l'atmosphère sont liées



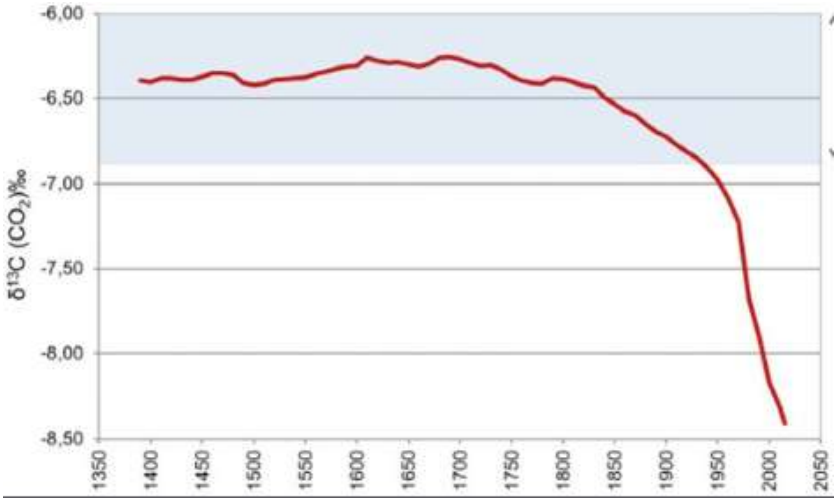
Les résultats des carottes de glaces de l'Antarctique indiquent que depuis 800 000 ans, le climat de la Terre a fluctué entre de courtes périodes interglaciaires « chaudes » et des périodes glacières « froides ». Les variations de températures moyennes sont généralement liées aux cycles astronomiques de l'ensoleillement de la Terre et selon les modèles, les fluctuations d'ensoleillement pendant cette période devraient entrainer un changement de température, d'environ 1°C. Toutefois, les variations de températures ont été plus importantes que prévu en raison d'un effet amplificateur (rétroaction positive, = effet renforçant). Comme le montre le graphique, les variations du CO_2 atmosphérique et de la température évoluent en parallèles. Le CO_2 est un gaz à effet de serre, il absorbe le rayonnement infra-rouge émis par la surface de la Terre chauffée par le Soleil, ce qui renvoie une partie de cette chaleur vers le sol. L'augmentation de CO_2 dans l'atmosphère augmente l'effet de serre, et par conséquent augmente la température de l'atmosphère. L'augmentation de température à la fin de période glaciaire ne se produit qu'après l'augmentation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère. Pendant les périodes glacières, les eaux océaniques et les écosystèmes terrestres des hautes latitudes ont stocké plus de carbone que pendant les interglaciaires chauds. Cela est dû à la température plus basse et au rythme plus lent de décomposition de la matière organique du sol ainsi qu'à une meilleure solubilité du CO_2 dans les eaux froides de l'océan. Le réchauffement a accéléré la dégradation d'une partie du pergélisol, libérant le carbone piégé dans le sol et la mobilisation de carbone des eaux superficielles des océans, qui à son retour a accentué l'effet de serre et par conséquent l'augmentation de la température.

Evolution récente de la quantité de CO2 dans l'atmosphère



Les concentrations de CO_2 dans l'atmosphère ont été globalement stables au cours des 800.000 dernières années, oscillant entre 180 et 300 ppmv pendant les périodes glacières et interglaciaires. Depuis la révolution industrielle (1850), on observe une augmentation significative du CO_2 dans l'atmosphère, la teneur en CO2 est passée de 280 ppmv à 416 ppmv en 2020, soit une augmentation de plus de 48% d'augmentation en 170 ans.
Le suivie temporelle du CO_2 dans l'atmosphère montre qu'il y existe des fluctuations saisonnières de la concentration de CO_2, qui sont liées à la consommation de CO_2 lors de la photosynthèse en été et en hiver, cependant les teneurs en CO_2 continuent d'augmenter, et chaque année le niveau de CO_2 dans l'atmosphère bat un raccord.

Origine humaine du CO_2 : la preuve par l'isotopie



Nous avons vu précédemment que différents processus/mécanismes sont impliqués dans la transformation du C (organique ou inorganique) en CO_2 et son transfert vers l'atmosphère. Ces processus/mécanismes comprennent : la respiration, la minéralisation de la matière organique dans les sols, le « dégazage » du CO_2 des océans, le volcanisme et la combustion d'énergie fossiles.

Nous avons également vu que depuis la révolution industrielle nous avons observé une augmentation significative du CO_2 dans l'atmosphère.

Est-il possible que l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère ne soit pas due à la combustion de combustibles fossiles, mais à une autre source ?

Un bon moyen de connaitre l'origine de CO_2 dans l'atmosphère est de regarder sa composition isotopique. Certains éléments chimiques possèdent plusieurs formes isotopiques stables, dont l'abondance varie selon la provenance. Dans le cas du carbone, ce sont les isotopes : C13 et C12.
Le rapport carbone C13/C12 dans les combustibles fossiles est relativement faible (delta δ13C bas), donc si le CO_2 était rejeté dans l'atmosphère par combustion, nous devrions nous attendre à ce que cet indicateur baisse dans l'atmosphère au cours du temps.
Ces graphiques montrent qu'en effet au début du XIXème siècle, la teneur relative en C13 dans l'atmosphère a commencé à décliner ; ce déclin s'est accentué au cours du temps. La diminution du delta en dessous du niveau de fluctuations observé pendant les périodes glacières et interglaciaires met en évidence le rôle important des rejets anthropiques dans l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère.
Pour en savoir plus : Graven, H., Keeling, R. F., & Rogelj, J. (2020). doi10.1029/2019GB006170

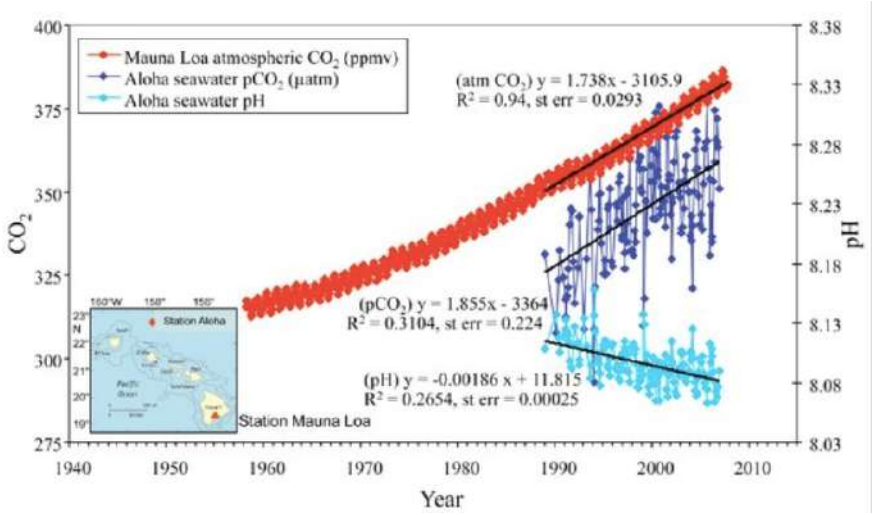
L'acidification des océans I

Près d'un tiers du C anthropique rejeté dans l'atmosphère est actuellement absorbé par les océans. Cependant l'absorption de CO_2 par les océans n'est pas sans conséquence car elle entraine des modifications de la chimie de l'eau et l'acidification des océans. En effet, les eaux

de surface des océans (et jusqu'à une profondeur d'environ 100 m) sont mélangées par le vent, et la pression partielle de CO_2 dans ces eaux tend à s'équilibrer avec celle de l'atmosphère. Lorsque le CO_2 est absorbé par les océans, il réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique ($CO_2 + H_2O$ <—> H_2CO_3), une molécule très instable qui se dissocie presque instantanément en ions d'hydrogène (H^+) et bicarbonate (HCO_3^-) selon la réaction : H_2CO_3 <—> $HCO^{3-} + H^+$. Les ions bicarbonates peuvent également se dissoudre selon la réaction : HCO_3^- <—> CO_3^{2-} H^+ et le CO_2 réagit avec CO_3^{2-} pour former $2HCO_3^-$ ($CO_2 + CO_3^{2-} + H_2O$ <—> $2\ HCO^{3-}$). Les proportions et l'équilibre entre ces différentes formes de C dépendent des conditions régnant à un endroit donné dans l'océan (température, pression, concentration ionique, etc). Dans les conditions qui prévalent actuellement dans les océans, près de 90% des molécules inorganiques contenant du C sont des ions HCO^3, les ions CO_3^{2-} représentent environ 10% et le CO_2 moins de 1%.
Dans une situation où l'équilibre chimique des concentrations de CO_2 entre l'atmosphère et les eaux océaniques est perturbé, par exemple par une augmentation de CO_2 dans l'atmosphère (comme on l'observe actuellement) les océans absorberont une certaine quantité de CO_2 pour rétablir l'équilibre chimique. Le CO_2 absorbé réagira avec H_2O ou CO_3^- dissous dans l'eau pour donner HCO_3^-. La transformation du CO_2 en HCO^{3-} permet d'éliminer le CO_2 de l'eau et de créer « une place » pour l'absorption ultérieure de CO_2.

Concentrons nous sur la valeur du pH de l'eau ($pH = -\log_{10}[H_3O^+]$). Plus la concentration en H_3O^+ dans l'eau est élevée, plus le pH est bas, c'est-à-dire plus l'acidité est élevée. Nous avons vu que les H_3O^+ sont produits dans l'eau lors des réactions : H_2CO_3 —> $HCO^{3-} + H^+$ et HCO_3^- —> CO_3^{2-} H^+.

L'acidification des océans II



Les mesures de teneurs en CO_2 dans l'atmosphère et dans l'eau ainsi que le pH des eaux de surface marines effectuées à Hawaï confirment une corrélation négative entre l'augmentation du CO_2 et une diminution du pH de l'eau.
Actuellement, les océans absorbent plus d'un million de tonnes de nos émissions de CO_2 par heure, ce qui affecte le rythme de changement de pH.
En 1800, le pH moyen de l'eau des océans était de 8.1 et il a baissé de 0,1 unité depuis l'ère industrielle ce qui est une modification très significative. Ce rythme de diminution du pH (0,017 à 0,02 unité par décennies) est considéré comme sans précédent au cours des 300 derniers millions d'années.

Une variation d'une unité de pH correspond en fait à une variation d'un facteur 10 de la

concentration en ions acides. En 30 ans, l'acidité de l'océan a ainsi augmenté de 15 à 20%, et l'augmentation pourrait atteindre 170% en 2100. Le pH de l'océan pourrait ainsi atteindre une valeur critique favorisant la solubilisation du carbonate de calcium. Cela menace de nombreux organismes marins. Cela concerne en particulier les récifs coralliens, menacés par ailleurs par le réchauffement de l'eau de mer et notamment la répétition de pics de températures inhabituellement chaudes, et les microalgues à squelette calcaire qui composent le phytoplancton à la base de la chaîne alimentaire marine. A Villefranche-sur-Mer, où il a été observé que l'acidité de la mer a augmenté de 7% entre 2007 et 2015, ce point de bascule du pH pourrait être atteint avant 2050.

Pour aller plus loin :
https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/defis-environnementaux/limites-planetaires/les-9-limites-ecologiques-de-la-planete/article/acidification-des-oceans

6. Pourquoi la Terre se réchauffe-t-elle ?

Pour comprendre le climat terrestre et surtout prévoir son évolution, il est nécessaire d'appréhender en détails et de modéliser les processus physiques responsables. Cette partie a pour objectif d'illustrer les grands principes qui régissent la température terrestre et notamment l'effet de serre.

Un peu de physique : lumière et matière - 1

La Terre reçoit une fraction du rayonnement émis par la surface du Soleil. D'une manière très générale, lorsqu'un corps reçoit de la lumière, celle-ci peut être :

-absorbée; le corps s'échauffe alors car la lumière est une forme d'énergie.

-réfléchi, les photons sont renvoyés sans être absorbés. C'est typiquement ce qui se passe avec un miroir. Le rayonnement repart selon un angle bien précis (comme une balle qui rebondit sur une surface)

-diffusée, la lumière repart dans un grand nombre de directions. C'est ce qui se passe le plus souvent, dès que la lumière frappe une surface.

-transmise, dans le cas d'un corps partiellement transparent, ce qui n'est pas le cas de la Terre (sa transmission est nulle)

La somme des énergies absorbée et diffusée (et éventuellement transmise) est égale à l'énergie lumineuse incidente. Cette conservation de l'énergie permet de définir l'albédo d'une surface comme la fraction du rayonnement incident qui est diffusé. Le complément à 1 est nommé coefficient d'absorption. Par exemple, un miroir absorbe peu de lumière et renvoie la majorité de ce qui l'éclaire. Son albedo est proche de 1 et son coefficient d'absorption est voisin de 0. La neige fraîche a un albedo de l'ordre de 0,9 et la glace de 0,6. En revanche, la suie absorbe pratiquement tout le rayonnement qu'elle reçoit, son albedo est de 0 et son coefficient d'absorption vaut à peu près 1. L'océan profond, qui apparaît bleu très foncé vu de haut, a un albedo d'environ 0,05, légèrement variable en fonction de la présence d'écume à la surface de la mer.

Il est important de préciser que le coefficient d'absorption dépend très fortement de la longueur d'onde du rayonnement incident. Ainsi l'atmosphère qui est peu absorbante dans le domaine

du visible, mais est opaque dans l'infrarouge.

Un peu de physique : lumière et matière - 2

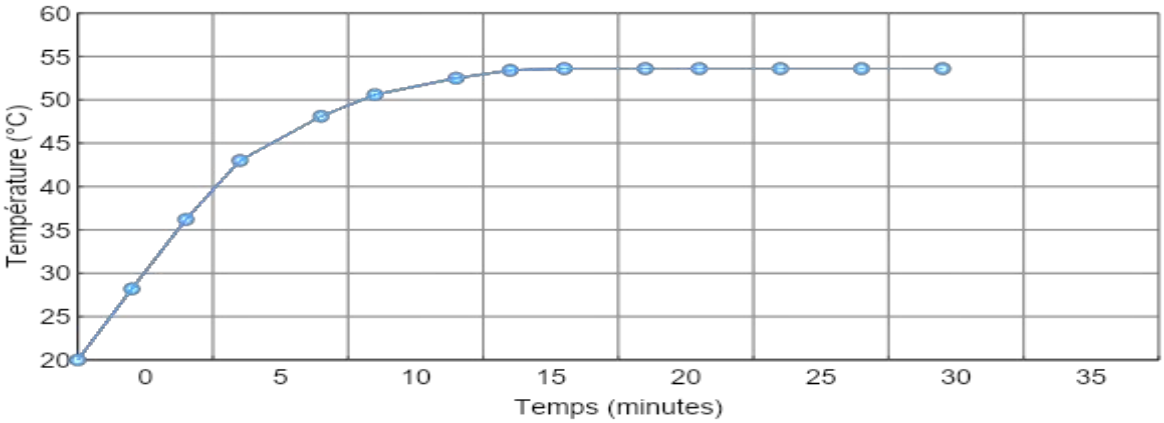
Un autre aspect fondamental est le fait que tout corps émet un rayonnement et ce quelque soit sa nature ! L'exemple le plus évident est celui du Soleil qui émet du rayonnement dans le domaine visible, c'est à dire que notre œil y est sensible. Voici d'autres exemples familiers : une plaque de chauffage électrique qui rougit lorsqu'elle devient chaude, le filament des ampoules dites à incandescence, la lave volcanique. Tous ces corps ont en commun d'être assez chauds pour émettre de la lumière visible. Néanmoins les corps plus froids émettent également mais dans un domaine d'énergie invisible par notre œil, le rayonnement infrarouge. Ainsi, la surface du corps humain, avec une température de l'ordre de 30°C émet du rayonnement infrarouge.

Pour les corps dits "noirs", c'est à dire très absorbants, le rayonnement émis suit la loi d'émission dite de Planck dont on peut dériver deux principes :
-la loi de Stefan qui stipule qu'un corps rayonne comme T^4. Plus un corps est chaud et plus il rayonne. En clair, 2 fois plus chaud implique 16 fois plus brillant.
-la loi de Wien qui stipule que la longueur d'onde typique émise par un corps est d'autant plus courte (et donc sa fréquence et son énergie d'autant plus élevées) que ce corps est chaud.

Pour aller plus loin :
https://fr.wikipedia.org/wiki/Corps_noir

Température d'équilibre : gain=perte

Dans une situation d'équilibre, qui s'établit au bout d'un certain temps si aucun changement ne vient modifier le rayonnement incident ou le corps qui le reçoit, les gains, c'est à dire le rayonnement absorbé, sont nécessairement égaux au rayonnement émis par le corps. En effet, si la quantité de rayonnement émis est inférieure à celle reçue, le corps s'échauffe. De ce fait, en vertu de la loi de Stefan, son rayonnement augmente progressivement jusqu'à ce qu'il égale le rayonnement reçu.



Ainsi la courbe illustre l'évolution d'une plaque noire exposée au Soleil. Sa température augmente car elle reçoit de l'énergie du Soleil. Un équilibre finit par s'établir.

Température d'équilibre : notion d'opacité

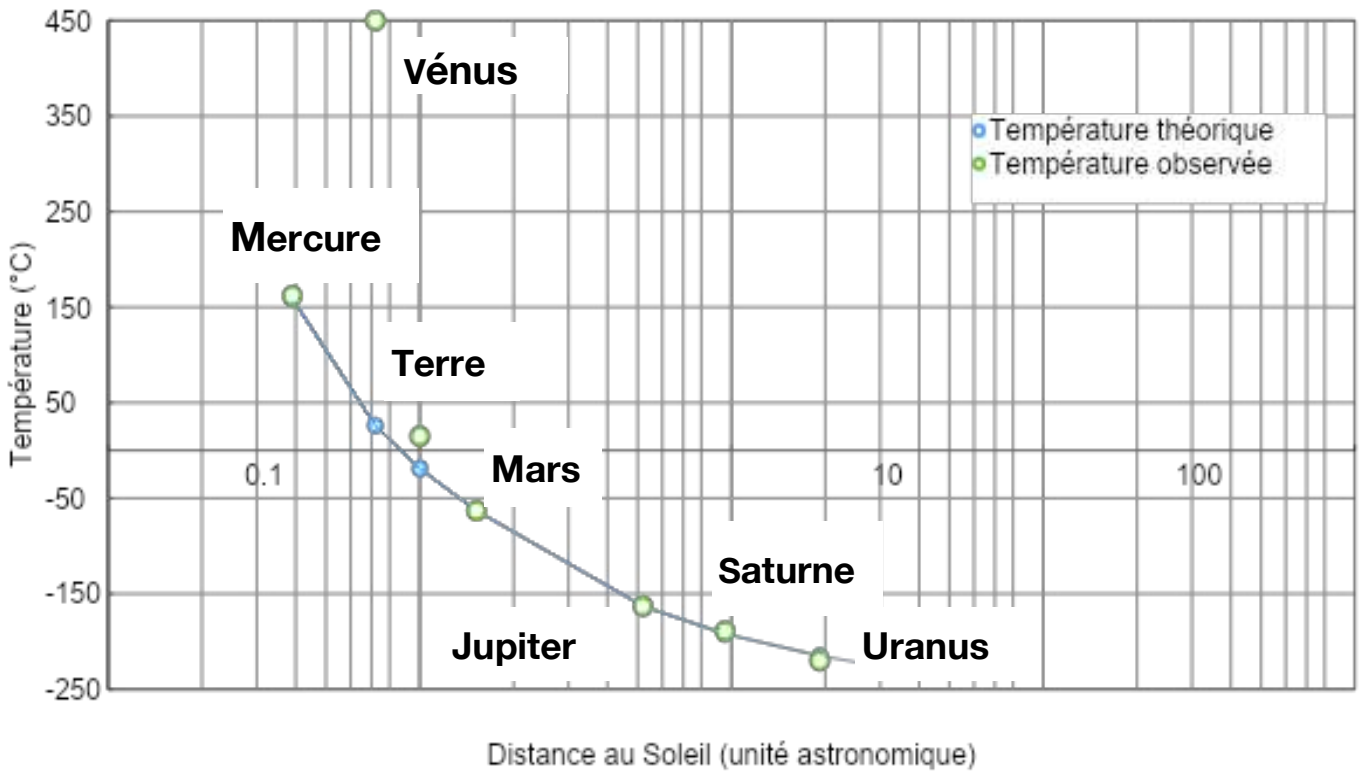
Pour tout corps soumis à un rayonnement, les gains sont égaux aux pertes dans une situation d'équilibre. L'état d'équilibre du corps dépend de sa capacité à absorber la lumière, qui est caractérisée par une quantité appelée opacité.

Par exemple, le Soleil est terriblement opaque. Au lieu de quelques secondes (ce qu'il faut à la lumière pour franchir dans le vide une distance égale à la taille du Soleil), il faut plusieurs milliers d'années à la lumière pour le traverser. Inversement l'espace est pratiquement transparent (il y a toujours un peu de matière qui peut absorber).

Pour un même flux lumineux reçu, deux milieux ayant des opacités très différentes auront donc des températures très différentes car le plus opaque sera à même de retenir plus de rayonnement et donc de se réchauffer, même si à l'équilibre la quantité de rayonnement réémis est indépendante de l'opacité.

De ce fait, si on augmente l'opacité d'un milieu, après une période de transition au cours de laquelle le milieu va s'ajuster en stockant de l'énergie (et donc pendant cette phase, le système n'est pas à l'équilibre), le milieu retrouve un état d'équilibre, plus chaud qu'avant l'augmentation d'opacité. C'est le principe de l'effet de serre et c'est ce qui se passe actuellement sur Terre. L'opacité de l'atmosphère augmentant du fait des émissions de gaz à effet de serre, la température augmente continument.

Deux planètes présentant un effet de serre : Vénus et la Terre

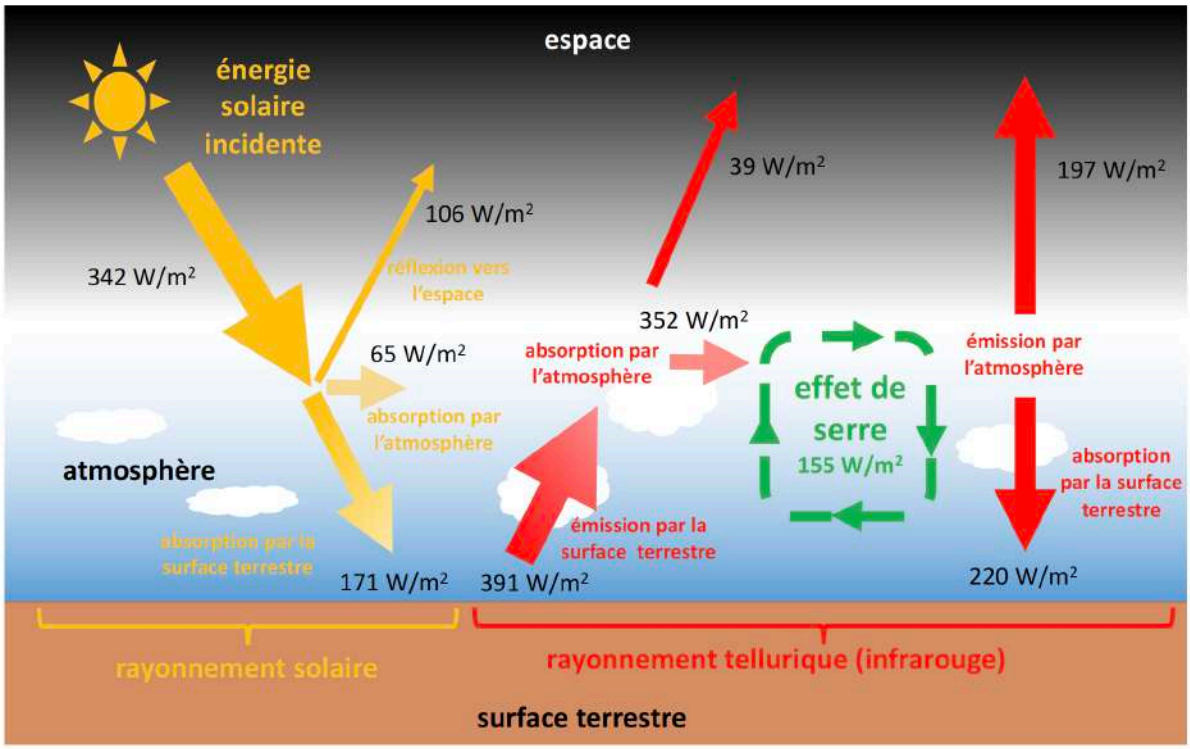


Les planètes du système solaire reçoivent le rayonnement du Soleil qui les chauffe. On s'attend alors à ce que les planètes soient d'autant plus chaudes qu'elles sont proches du Soleil.
La courbe bleue représente la température d'équilibre que l'on attendrait si les planètes étaient sans atmosphère et dotées de l'albédo que l'on mesure. Comme on peut le constater, toutes les planètes du système solaire, à part Vénus et la Terre, suivent bien cette courbe. Leurs températures sont conformes au modèle. En revanche la Terre et surtout Vénus se situent bien au-dessus. Vénus est même plus chaude que Mercure, pourtant plus proche du Soleil.

La raison de ces températures, plus élevées que ne le prévoit le modèle d'émission du corps noir, est l'effet de serre. Les atmosphères de la Terre et de Vénus sont opaques et "stockent" de l'énergie.

Notons que sur Terre en l'absence d'effet de serre, la température serait environ de -18°C (à albedo constant, mais on aurait une amplification du refroidissement par accroissement de l'albedo si la surface de la Terre était gelée) alors qu'elle est plutôt de l'ordre de quatorze degrés avec son effet de serre naturel actuel, et quinze degrés du fait de l'effet de serre additionnel dû aux activités humaines.

Principes et bilan de l'effet de serre terrestre



Le diagramme présente un bilan quantitatif de l'effet de serre terrestre. Les flèches jaunes représentent le rayonnement en provenance du Soleil, qui contient un large spectre de longueurs d'ondes, incluant la lumière visible, mais aussi de l'ultraviolet et un peu de proche infrarouge. Les flèches rouges correspondent au rayonnement infrarouge qui est émis par le sol et par l'atmosphère (l'infrarouge est le domaine de longueur d'onde du rayonnement émis par les corps dont la température est de l'ordre de la température ambiante).

D'une manière qualitative, du rayonnement provient du Soleil (grosse flèche jaune à gauche 342 W/m^2). Ce rayonnement se divise alors en trois, une partie atteint le sol (171 W/m^2), une

partie est renvoyée vers l'espace (106 W/m^2), et une partie est absorbée par l'atmosphère (65 W/m^2).
La flèche rouge qui part du sol (391 W/m^2) indique que ce dernier émet plus qu'il ne reçoit du Soleil (391 > 171). Pourquoi ? Précisément car il reçoit également du rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère (220 W/m^2). On constate que 391=171+220, le sol est à l'équilibre mais le sol est donc beaucoup plus chaud du fait de l'effet de serre.

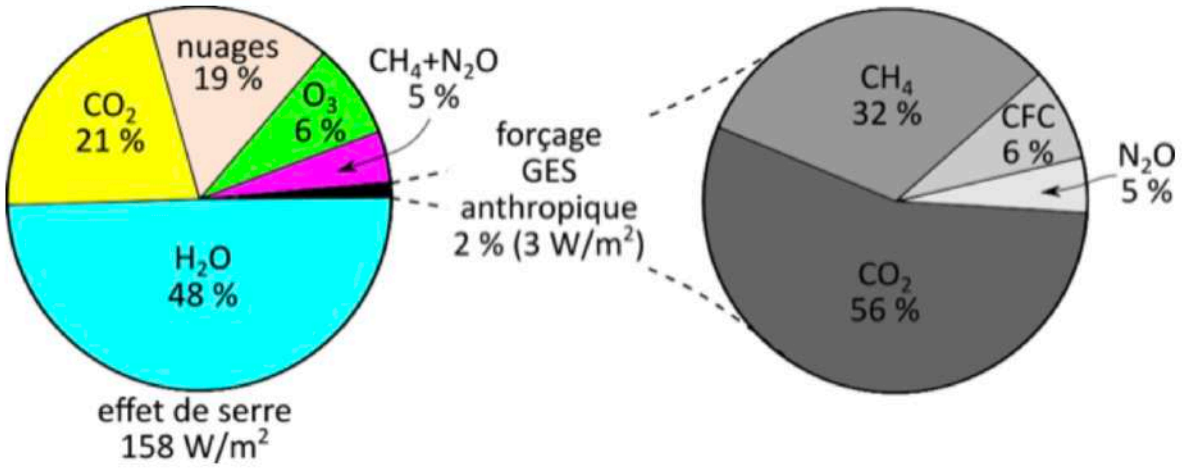
L'atmosphère pour sa part, reçoit du rayonnement du Soleil (65 W/m^2) et du sol (391-39=352 W/m^2). Elle réémet alors vers l'espace une partie (197 W/m^2) et le reste vers le sol (220 W/m^2). On constate que l'atmosphère est bien à l'équilibre lui aussi puisque 65+391=39+197+220.

Enfin, on constate que l'ensemble du système Terre est bien à l'équilibre puisque, il émet autant qu'il reçoit (342=106+39+197).

Ce dernier bilan correspond à l'effet de serre "naturel", c'est à dire tel qu'il serait en l'absence d'activité humaine. On peut quantifier l'effet de serre comme étant la différence entre le rayonnement infrarouge absorbé par l'atmosphère (352 W/m^2) et le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère vers l'espace (197 W/m^2) qui est égal à 155 W/m^2.

Ce chiffre qui correspond à l'effet de serre naturel est en fait légèrement plus élevé aujourd'hui du fait des émissions humaines qui ont rendu l'atmosphère légèrement plus opaque et absorbant. Aujourd'hui l'effet de serre est en fait de 158 W/m^2, c'est à dire que l'atmosphère laisse échapper 36 et non 39 W/m^2. Le système Terre aujourd'hui n'est pas tout à fait à l'équilibre, il est dans une phase transitoire vers un état d'équilibre plus chaud.

Le graphique ci-dessous donne la répartition des contributions à l'effet de serre (c'est à dire la fraction de rayonnement infrarouge absorbée par l'espèce chimique indiquée). L'eau gazeuse puis le CO_2 et les nuages sont les principaux responsables de l'effet de serre terrestre. La contribution anthropique (environ 2% de l'effet de serre total) est due pour une plus de la moitié aux excès d'émission de CO_2 et pour près d'un tier aux émissions de méthane.



A noter que même si 2% peut paraitre un chiffre faible, il faut bien comprendre qu'une élévation de 2% de la température terrestre (de l'ordre de 300 K) correspond à une élévation de 6 degrés, ce qui n'est pas du tout anodin.

7. Les modèles climatiques et leurs projections

Si l'effet de serre est la cause principale du changement climatique, il est nécessaire pour faire des simulations climatiques de prendre en compte une grande variété de processus simultanément et notamment des processus dynamiques telles que la turbulence et la convection atmosphérique, la circulation océanique, la formation de la glace de mer ou des processus physiques comme la formation des nuages, le cycle hydrologique, l'utilisation des terres. Ces phénomènes complexes réagissent à des échelles de temps très différentes de la seconde pour la microphysique des nuages, à la journée pour le cycle diurne, et jusqu'à plusieurs dizaines d'années pour la circulation océanique. Il est donc nécessaire d'élaborer des modèles aussi complets que possible qui prennent en compte l'ensemble de ces phénomènes simultanément.

Un peu de méthode : qu'est-ce que modéliser ?

Mais commençons par un point méthodologique. Qu'appelle-t-on exactement modéliser ?
Quelles sont les différentes étapes du processus ?

Etape 1 : la mise en équations
Lorsqu'un phénomène est bien compris, on est capable d'écrire les équations mathématiques qui régissent son état présent et son évolution temporelle. Bien souvent ces équations sont trop complexes pour être résolues simplement et il est nécessaire d'utiliser des techniques mathématiques et numériques pour les résoudre à l'aide d'un calculateur (souvent massivement parallèle).

Etape 2 : discrétisation et algorithmes
Pour résoudre ces équations, il faut dans un premier temps les discrétiser, c'est à dire choisir une représentation finie de valeurs (par exemple la vitesse de l'atmosphère tous les 100 km). Il faut ensuite choisir (ou parfois même inventer) des méthodes mathématiques qui permettront de faire évoluer dans le temps, pas à pas, les différentes quantités (par exemple d'une heure).

Etape 3 : développement d'un programme (dit "code")
Lorsque les méthodes de calcul sont établies (et abondamment testées), il faut écrire un programme qui permet de les mettre en œuvre. On parle de plusieurs centaines de milliers de lignes de code. Une étape clé est la parallélisation, c'est à dire la distribution du calcul sur un grand nombre de processeurs qui travaillent "en parallèle". Chaque processeur est responsable d'une petite partie du domaine de calcul et échange avec les autres processeurs les données aux interfaces. Plusieurs milliers, voire dizaines de milliers (certains calculs peuvent utiliser des centaines de milliers) de processeurs sont utilisés.

Etape 4 : réalisation et stockage du calcul
Les calculs sont effectués sur les ordinateurs nationaux. Selon les calculs, le temps requis peut aller du millier au million d'heures de calcul (ce qui correspond à une durée effective de quelques jours à quelques mois). Le volume de données produit peut aller de quelques gigaoctets à quelques teraoctets (soit mille gigaoctets). Les résultats sont alors stockés afin de pouvoir les analyser plusieurs fois et souvent par plusieurs équipes.

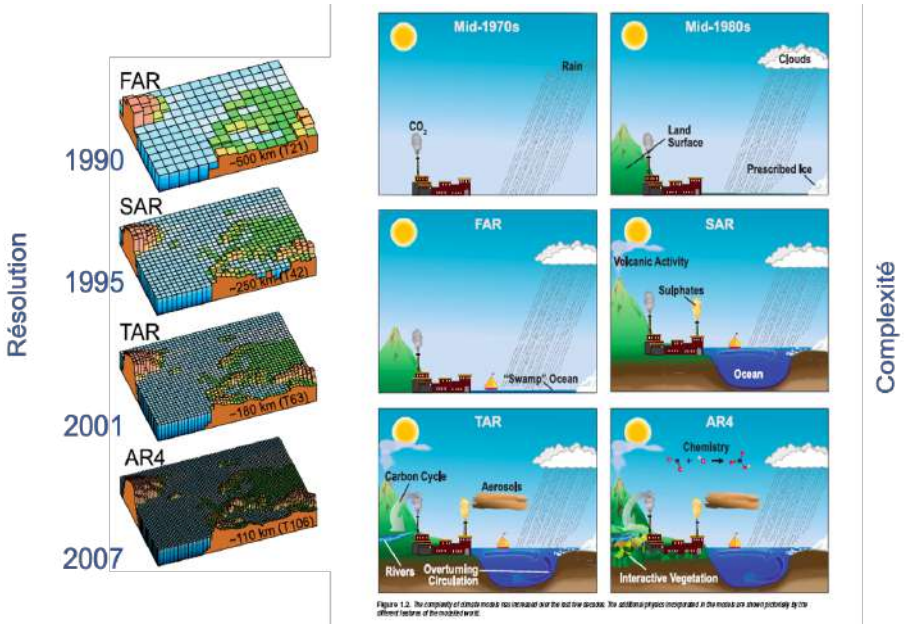
Etape 5 : simulations
Les résultats sont analysés et servent à faire des simulations des comportements physiques attendus. Il est en particulier important de bien comprendre les limites du calcul et de distinguer ce qui a un véritable sens physique et ce qui relève de la méthodologie employée.
Bien souvent, il faut réduire la complexité des données en effectuant des analyses statistiques.

On procède également à la visualisation des résultats, c'est à dire à la production, d'images, de graphes, ou de films qui permettent de bien les interpréter.

Etape 6 : validations et projections
Enfin une fois les données des modèles comprises et mises sous la forme appropriée, on peut les confronter aux observations effectuées à l'aide des différents instruments de mesures (campagnes de terrains, satellites, ...), ceci afin de valider le modèle sur la période récente. Cette étape de validation permet également de préciser quelques paramètres internes de calage. Une fois le système en place, il est possible de poursuivre la validation sur des climats passés (modification des forçages orbitaux, des concentrations des gaz à effet de serre, des positions des continents, ...) et culot extrême de se projeter dans le futur en suivant des scenarii d'évolution de nos sociétés.

Les modèles climatiques d'hier et d'aujourd'hui

Bien souvent, la comparaison avec les données met en lumière des insuffisances du modèle que l'on s'emploie alors à améliorer. Il faut alors recommencer l'ensemble du processus. De ce fait les modèles et les codes utilisés aujourd'hui sont le fruit de plusieurs dizaines d'années de développement et d'efforts.



Ce processus est bien illustré sur la figure qui montre les différentes composantes des modèles. Au début des années 70, seuls, le rayonnement incident, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre et les pluies étaient pris en compte. A présent, la circulation océanique, l'interaction avec la végétation, les nuages, les aérosols et les différents processus chimiques à l'œuvre dans l'atmosphère sont pris en compte.

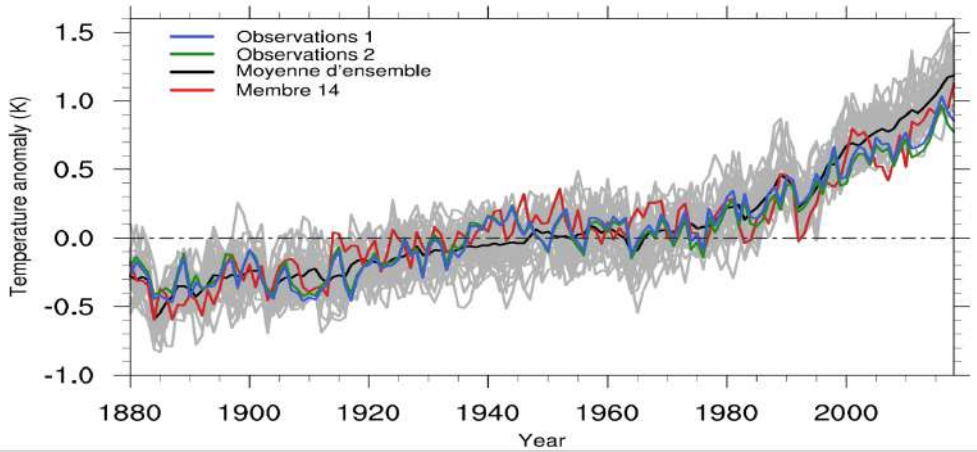
Un autre aspect essentiel est celui de la dimension du maillage qui ne cesse de s'affiner grâce à l'avènement des super-calculateurs dont la puissance et les capacités (notamment la mémoire) ne cessent de croître. Ainsi en l'espace de quelques dizaines d'années, la taille des calculs a été multipliée environ 1000 fois.

Le modèle de l'Institut Pierre Simon Laplace

A titre d'exemple, le modèle système terre de l'Institut Pierre Simon Laplace inclut une

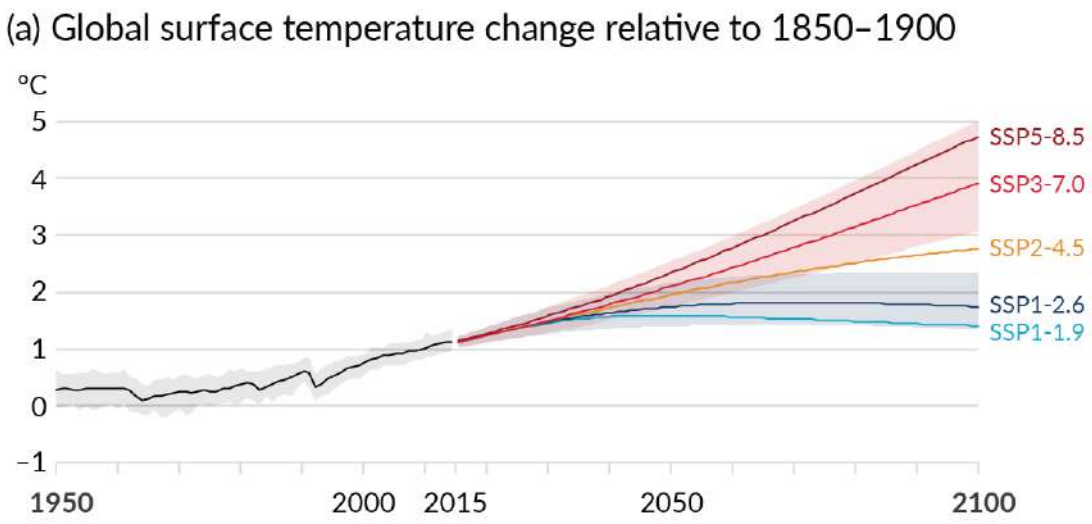
composante atmosphérique (LMDZ) associée à une composante continentale (ORCHIDEE), sans oublier la partie décrivant la chimie de l'atmosphère (INCA et REPROBUS). Cet ensemble utilise un maillage de type latitude-longitude. Il inclut également une composante océanique (NEMO) incluant dynamique de l'océan, biogéochimie océanique et glace de mer. Cet ensemble est discrétisé d'une façon différente évitant des points singuliers. Un coupleur (OASIS) permet d'échanger les champs à l'interface (température des milieux, champs de vents, proportion de glace de mer,...) entre ces 2 milieux en respectant des conventions (unité de température K ou °C, changement de maillage,...). Ce modèle a commencé à être développé dans les années 1990 en regroupant au sein de l'IPSL des spécialistes de ces différents domaines. Entre 5 et 6 années de travail sont nécessaires pour développer une nouvelle génération de ce modèle en incluant des nouveautés scientifiques (souvent issues de thèses) et des progrès techniques (ajout du parallélisme, d'un serveur d'entrées/sorties, d'un environnement de simulations ergonomique). La 5e génération a été utilisée pour les simulations référencées dans le 5e rapport du GIEC, bases scientifiques de l'accord de Paris. La 6e génération a intégré de nombreuses améliorations aussi bien physiques que techniques et a été utilisée pour les simulations référencées dans le 6e rapport du GIEC prévu cette année. L'IPSL est en train de préparer sa 7e génération.

Les tests : comment vérifie-t-on la fiabilité du modèle ?



Afin de s'assurer de la fiabilité des modèles, il est nécessaire de les tester précisément. La stratégie employée consiste à simuler les 150 dernières années pour lesquelles des mesures de températures fiables ont été réalisées. Comme les conditions de départ du calcul, encore appelées conditions initiales, ne sont pas connues (il faudrait par exemple avoir un relevé précis de la température, de la vitesse du vent, des océans en un grand nombre de points...), il est nécessaire de s'assurer que les résultats ne sont pas affectés de manière importante par les choix effectués et c'est pourquoi 32 simulations sont présentées ici. Les écarts entre ces modèles (courbes grises) permettent de se faire une idée des incertitudes du calcul liées à la méconnaissance de ces conditions initiales. On constate que les fluctuations restent limitées.
On constate par ailleurs que les différents modèles permettent de bien reproduire les températures mesurées (courbes bleue et verte). Les tendances sur des échelles de temps supérieures à 20 ans sont parfaitement reproduites, notamment par la courbe noire obtenue en moyennant les différents modèles. En particulier, mesures et modèles concordent pour trouver une élévation de la température moyenne d'environ 1°C entre les années 70 et maintenant.
Ces comparaisons permettent donc de valider la fiabilité des modèles et de quantifier leurs précisions qui sur des échelles de 150 ans sont donc de l'ordre de quelques dixièmes de degrés.

Les projections pour le futur



Le modèle étant validé, il est maintenant possible de s'en servir pour faire des projections du climat futur et en particulier de la température sur tout le globe et de sa moyenne globale. Les incertitudes principales se situent dans les émissions de gaz à effet de serre futurs et plus généralement des comportements de nos sociétés. Il est donc nécessaire d'élaborer des scénarios qui font des hypothèses telles que "*business as usual*" (pas de baisse ou même une augmentation des émissions, c'est la courbe rouge) ou au contraire qui postulent une baisse drastique des émissions (courbe jaune).
On constate que pour les 20 premières années, de 2015 à 2035, cela fait assez peu de différence.
Cette figure issue du 6e rapport du GIEC synthétise les projections futures selon plusieurs scenarios, des plus émissifs aux plus sobres.
Le 6e rapport du GIEC décrit les évènements climatiques selon des niveaux de réchauffement. Les probabilités des évènements extrêmes et leur caractérisation sont résumés dans cette nouvelle slide.

Les enjeux actuels : notre avenir dépend de nos actions

La température moyenne sur Terre s'est déjà élevée de près d'un degré Celsius durant les 50 dernières années. Si nous continuons à ce rythme, le processus va continuer et nous atteindrons sans doute plus de 4 degrés Celsius d'augmentation à la fin du siècle ce qui aura des conséquences délétères sur nos sociétés. Un bilan net des émissions égal à 0 permettrait en revanche de contenir l'augmentation à moins de 2 degrés Celsius. **Ceci implique des changements radicaux de nos sociétés dans tous les domaines consommant des énergies fossiles : production d'énergie et industrielles, habitats, transports. Associées aux objectifs du développement durable, ils nous permettront de vivre dans un monde soutenable**.

LIENS VERS D'AUTRES RESSOURCES DE REFERENCE :

Deux sites dont les textes sont rédigés par des scientifiques reconnus comme experts dans leur

domaine :
https://www.ipsl.fr/Pour-tous/Le-climat-en-questions
https://meteofrance.com/climat

Les chiffres clefs du climat - France, Europe et monde, Edition 2020, publié par le Commissariat Général au Développement Durable :
https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-climat-france-europe-et-monde-edition-2020-0

Livret d'exposition *Le Climat Change* par l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) et le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire :
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_JOURNAL_Climat%20change_DEF_Web.pdf

Ressources pédagogiques gratuites sur le climat, et accompagnement des enseignants du monde entier en partenariat avec la communauté scientifique (cible principale 9-15 ans), de l'Office for Climate Education :
https://www.oce.global/fr

Lien vers les 3 volumes du 6e rapport du GIEC :
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/ et son atlas : https://interactive-atlas.ipcc.ch/
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/ et ses fiches par régions et thèmes : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/about/factsheets/
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

Vulgarisation du 6e rapport.
Voir le site de @bonpote : https://bonpote.com/les-infographies-du-6eme-rapport-du-giec/
Voir le site pour un réveil écologique et le résumé du 3e volet affiché dans le métro : https://pour-un-reveil-ecologique.org/fr/articles/10-points-cles-giec-ar6-wg3/