



HAL
open science

Le système climatique

Marc Delmotte, Marielle Saunois, Nathalie de Noblet Ducoudré

► **To cite this version:**

Marc Delmotte, Marielle Saunois, Nathalie de Noblet Ducoudré. Le système climatique. Enjeux de la transition écologique, EDP Sciences, 24p, 2021, 978-2-7598-2662-9. hal-03482601

HAL Id: hal-03482601

<https://universite-paris-saclay.hal.science/hal-03482601>

Submitted on 16 Dec 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Chapitre 7

Le système climatique

Dans ce chapitre, nous présentons les principales composantes du [système climatique](#) et leur fonctionnement pour décrire ensuite, de façon détaillée, les mécanismes d'[effet de serre](#) dans l'[atmosphère](#). Nous verrons comment les émissions des gaz, qui en sont responsables, sont reliées aux différents secteurs de l'activité humaine et comment, pour le [dioxyde de carbone](#) en particulier, elles se répartissent suivant les principales régions du monde. Parmi les secteurs d'activité, les transports, l'industrie et la production d'[énergie](#) contribuent de façon importante aux émissions de [gaz à effet de serre](#) comme on peut s'y attendre, mais nous verrons que la gestion des [écosystèmes](#) terrestres pour l'exploitation de la [biomasse](#) et les cultures agricoles en général, peut aussi participer de manière significative au changement climatique. La dernière partie du chapitre est consacrée aux indicateurs du changement climatique que l'on suit à partir de réseaux d'observations et de mesures ou que l'on extrait de différentes archives paléoclimatiques.

7.1. Les composantes du système climatique et leurs interactions, les forçages naturels et anthropiques – M. Delmotte

7.1.1. Les composantes du système climatique

Cette partie présente le [système climatique](#) de la Terre et les composantes qui lui permettent de fonctionner.

Ces composantes sont : les océans, l'[atmosphère](#), la [cryosphère](#), c'est-à-dire les zones englacées qui comprennent les glaciers de montagne, les calottes polaires, la banquise, et enfin la [biosphère](#) qui inclut la végétation et les animaux vivants. Ce système fonctionne parce qu'il y a une source d'[énergie](#), un moteur, qui est le soleil. Il subit des perturbations qui peuvent être d'origine naturelle, tel le volcanisme, ou d'origine [anthropique](#), causées par les activités humaines. Les différentes

composantes du **système climatique** vont alors interagir entre elles pour assurer le fonctionnement de l'ensemble.

Le **système climatique** n'est ni plus ni moins qu'une machine thermique dont le fonctionnement permet de rétablir le déséquilibre thermique engendré par le rayonnement solaire (Fig. 7.1). Vous verrez plus en détail la notion de bilan radiatif lié à cette machine thermique dans la partie suivante de cet ouvrage (voir section 7.2).

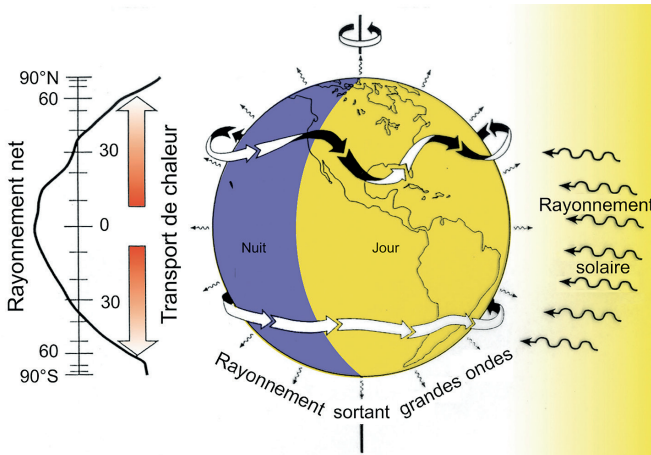


Figure 7.1: Répartition du rayonnement solaire à la surface de la Terre. Droits réservés.

Le rayonnement solaire est, en effet, loin d'être uniforme sur toute la surface de la Terre, dû à la forme sphérique de celle-ci. La quantité d'**énergie** reçue par unité de surface est plus forte à l'équateur, où l'incidence des rayons solaires est perpendiculaire à la surface du sol, qu'aux pôles où le rayonnement en incidence rasante intercepte une surface beaucoup plus grande. La Terre, comme tout système physique, cherche à tendre vers une température homogène et uniforme et donc le **système climatique** va avoir pour rôle de redistribuer l'excédent de chaleur reçu dans les zones intertropicales vers les pôles : de l'équateur vers le pôle nord dans l'hémisphère nord, et de l'équateur vers le pôle sud dans l'hémisphère sud. Pour cela, il va faire principalement appel à deux de ses composantes, qui sont l'**atmosphère** et les océans.

Les masses d'eau chauffées par le soleil dans les zones tropicales vont s'évaporer dans l'**atmosphère** et former ainsi des nuages. On parle aussi de chaleur latente. Puis ces nuages vont être transportés par les vents dominants de l'équateur vers les pôles. Au cours du transport, chaque épisode de précipitation (pluie, neige, etc.) va permettre une redistribution partielle de l'**énergie** emmagasinée initialement par le nuage. L'**atmosphère** est une composante rapide, elle réagit sur des échelles de temps de quelques heures à quelques jours, dix jours tout au plus.

De la même manière, les courants marins transportent également une partie de la chaleur, sous forme de courants chauds en surface, ou froids en profondeur. Lorsque

les courants chauds de surface arrivent dans les zones froides, au sud du Groenland en mer de Béring par exemple, la mer gèle pour former de la banquise.

Cette banquise qui se forme, est constituée d'eau douce, ce qui implique que le sel de l'eau de mer reste dans la phase liquide de l'océan et donc que la densité des masses d'eau augmente, entraînant ainsi sa plongée vers les profondeurs. On parle de **circulation thermohaline**, pilotée par la température et la **salinité** de l'océan. La composante océanique a une très forte inertie, il faut environ 1 000 ans à une masse d'eau pour effectuer une boucle complète de circulation (Fig. 7.2).

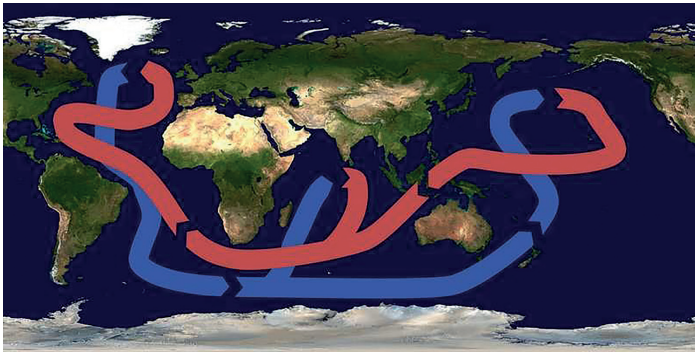


Figure 7.2: La circulation océanique thermohaline est actionnée par la différence de densité des eaux au niveau du Groenland. La plongée des eaux qui s'ensuit est le moteur du *tapis roulant* océanique. © Brisbane, Wikimedia CC-by-sa 3.0⁵⁸.

La **cryosphère** et la **biosphère** jouent aussi un rôle dans cette machine thermique. On a vu le rôle de la banquise dans la **circulation thermohaline**, mais la **cryosphère** a aussi un rôle au niveau de l'**albédo** de la planète, c'est-à-dire sa capacité de réflexion liée à sa couleur. Plus une surface est claire, plus son **albédo** est élevé, et plus elle réfléchit la lumière du soleil. La **cryosphère** (glace et neige) contribue ainsi à maintenir des températures froides aux pôles et en altitude. Elle sert aussi de régulateur du **cycle de l'eau**.

La **biosphère** a un rôle de régulateur au sein du cycle du carbone et donc de la composition du CO₂ dans l'**atmosphère**, tout comme l'océan d'ailleurs.

Sur des échelles de temps beaucoup plus longues, la **lithosphère**, c'est-à-dire la croûte terrestre superficielle, joue également un rôle. La position des continents va influencer sur la circulation océanique et atmosphérique, sur la répartition de la végétation et sur la composition chimique de l'**atmosphère** notamment par le biais de l'activité volcanique. À grande échelle, les phénomènes d'**érosion** contribuent à la formation des grands réservoirs de combustibles fossiles, le gaz, le pétrole, le charbon au niveau du cycle du carbone. Nous reviendrons sur ce point plus loin en abordant la variabilité naturelle du climat.

58. https://fr.wikipedia.org/wiki/Circulation_thermohaline

7.1.2. Les forçages climatiques et la composition de l'atmosphère

Parmi les forçages climatiques, autrement dit, les phénomènes qui tendent à modifier le **climat** (voir sections 1.1 et 1.2), on distingue les **forçages naturels** avec pour principal forçage externe, le soleil, et pour forçage interne, le noyau terrestre. À ces forçages s'ajoutent les **forçages anthropiques**, liés aux activités humaines. Nous reviendrons sur ces notions et sur les ordres de grandeur plus loin.

La Terre se distingue des autres planètes par l'existence de l'**atmosphère**, une enveloppe gazeuse autour de sa surface qui la protège et lui confère une température moyenne de l'ordre de 15 °C. La composition chimique de cette **atmosphère** est la suivante : 78 % d'azote N_2 , 21 % d'oxygène O_2 , le reste étant composé de gaz sous forme de traces, dont en particulier les **gaz à effet de serre** qui ont un rôle fondamental dans le bilan thermique de la planète *via* justement, l'**effet de serre**. Parmi ces gaz, on peut noter par ordre d'importance, la vapeur d'eau, qui s'inscrit dans le cycle naturel de l'eau, le gaz carbonique CO_2 , premier **gaz à effet de serre** produit par l'Homme, le **méthane** CH_4 , le protoxyde d'azote N_2O et les chlorofluorocarbures **CFC**.

Le cycle naturel de ces gaz est fortement impacté par les activités humaines qui, pour répondre aux besoins énergétiques de la société actuelle, utilisent essentiellement des combustibles fossiles et carbonés comme source d'**énergie** primaire : le gaz naturel, le charbon, et le pétrole, qui se produisent essentiellement par combustion du CO_2 qui est rejeté dans l'**atmosphère** de façon massive. Le **méthane** CH_4 est, lui, plutôt produit par l'agriculture, les rizicultures, les décharges, l'élevage des ovins et des bovins, mais aussi, de façon plus naturelle, par les zones humides.

Le CO_2 qui est rejeté dans l'**atmosphère** s'inscrit lui aussi dans un cycle naturel : le cycle du carbone. Sur 100 molécules de CO_2 **anthropiques** injectées dans l'**atmosphère**, dont 86 % proviennent directement des activités humaines et 14 % du changement d'usage des sols, seules 46 % vont subsister dans l'**atmosphère**, tandis que 56 % vont être réabsorbées par les **puits de carbone** naturels que sont les océans et la végétation. L'incertitude sur ces chiffres est de 0,4 %.

Le CO_2 se dissout naturellement dans l'eau de mer, d'autant mieux que l'eau est froide, puis les microorganismes, tels le **phytoplancton**, le synthétisent avant d'être eux-mêmes absorbés par d'autres organismes qui vont stocker le carbone sous forme de coquilles carbonatées, la calcite des coquillages, par exemple, ou sous d'autres formes de matière organique. Lorsque ces organismes vivants meurent, ils tombent au fond de la mer et après des dizaines, voire des centaines de millions d'années, ils vont de nouveau former des gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz).

De son côté, la végétation va capter le CO_2 atmosphérique lors de la réaction de **photosynthèse** qui met en jeu les feuilles vertes et la lumière. Elle va synthétiser le

carbone sous forme de matière organique, le bois, par exemple, qui se trouve alors stocké de façon solide.

7.1.3. La notion d'effet de serre au premier ordre

Il peut être utile de définir et d'illustrer la notion d'**effet de serre** au premier ordre. Sur la **figure 7.3**, on voit que les rayonnements issus du soleil, visible, infrarouge, ultra-violet, vont d'abord rencontrer la surface de l'**atmosphère**, laquelle va directement réfléchir environ 30% de ce rayonnement vers l'espace. Le reste du rayonnement va, pour environ 20%, être absorbé par la couche atmosphérique, et pour l'essentiel (50%), va venir impacter la surface terrestre et donc la réchauffer.

Afin de maintenir son équilibre thermique, la Terre va en retour réémettre vers l'espace un rayonnement. La Terre rayonne comme tout corps chaud, mais sa température restant relativement basse, elle ne va émettre qu'un rayonnement infrarouge.

C'est là qu'interviennent les **gaz à effet de serre**. Ces gaz ont la propriété d'absorber les rayonnements infrarouges émis par la Terre, et donc de limiter la part de ce rayonnement qui s'échappe vers l'espace. Ils vont aussi les réémettre vers la surface terrestre, contribuant ainsi à réchauffer les basses couches de l'**atmosphère**. C'est ce qu'on appelle l'**effet de serre** naturel. Ce sont ces **gaz à effet de serre** qui permettent à la Terre d'avoir une température moyenne globale de l'ordre de 15 °C. Sans eux, la Terre serait une boule de glace.

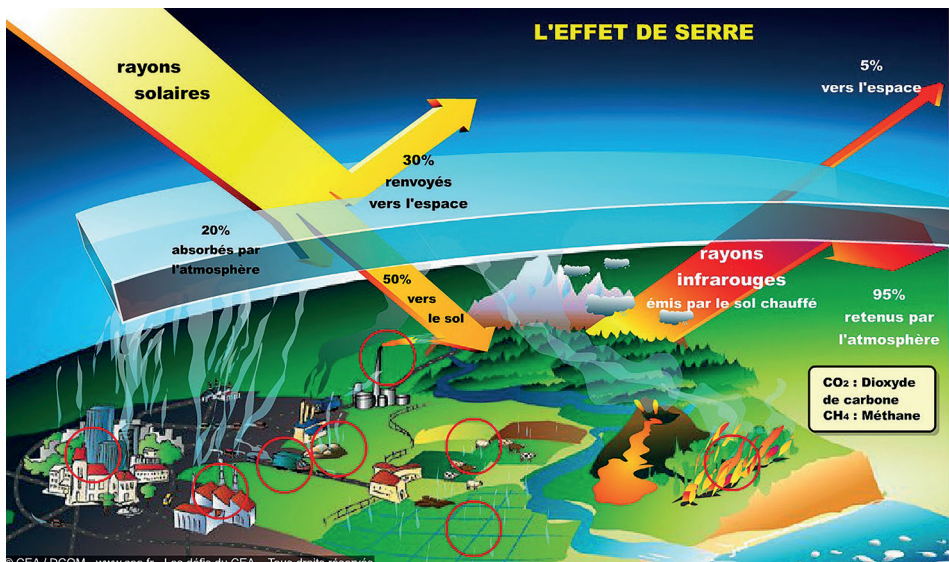


Figure 7.3 : Image illustrant la distribution de l'énergie solaire à la surface de la Terre et la réémission infrarouge de celle-ci. Source : CEA/DCOM - www.cea.fr - (Les Défis du CEA)⁵⁹.

59. <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/climat-environnement/climat.aspx?Type=Chapitre&numero=5>

Pour mieux comprendre, je vous propose une analogie. Lorsque vous vous couchez le soir en hiver par exemple, si vous vous allongez nu sur votre lit, vous avez une sensation de froid. La raison en est que votre corps, qui est à la température de 37 °C, rayonne constamment, il perd donc de la chaleur et émet lui aussi un rayonnement infrarouge, et ce faisant, vous « chauffez » tout l'espace de votre chambre dont la température est plus proche de 18-20 °C. Pour dormir confortablement, vous allez donc vous couvrir avec une couverture. Cette dernière va piéger la chaleur émise par votre corps et la redistribuer dans l'espace restreint entre vous et la couverture, vous n'aurez plus froid. Les **gaz à effet de serre** dans la couche atmosphérique ont le même rôle que la couverture sur votre lit.

De même que si vous ajoutez d'autres couvertures sur votre lit, vous aurez de plus en plus chaud. Si on augmente la concentration des **gaz à effet de serre** dans l'**atmosphère**, on augmentera la température de la surface de la Terre. On parle alors d'**effet de serre** additionnel, c'est celui qui découle directement des activités humaines qui modifient la composition de l'**atmosphère** en émettant massivement des **gaz à effet de serre**, en particulier du CO₂.

En conclusion de cette partie, nous avons donc posé les bases du **système climatique**. Il s'agit d'une machine thermique complexe qui fonctionne grâce à l'**énergie** fournie par le soleil et grâce aux interactions et aux rétroactions entre ses différentes composantes. L'**atmosphère** joue un rôle important au niveau du bilan radiatif terrestre, en particulier à travers l'**effet de serre**.

7.2. Bilan radiatif, effet de serre et gaz à effet de serre – F. Raffin et M. Saunois

7.2.1. Le bilan radiatif de la Terre⁶⁰

Revenons sur le **bilan radiatif de la Terre**, son équilibre thermique, comme évoqué précédemment par Marc Delmotte, en donnant quelques bases scientifiques pour comprendre le dérèglement climatique.

Il faut d'abord se rappeler qu'en fonction de sa température, tout corps émet un rayonnement électromagnétique et que la longueur d'onde de ce rayonnement diminue lorsque la température augmente. C'est la loi établie par le physicien Wilhelm Wien⁶¹. Nous nous en rendons compte en observant le rayonnement visible. Plus c'est chaud, plus c'est bleu : un fer « porté au rouge » approche une température d'environ 800 °C alors que la flamme jaune/bleue d'un chalumeau dépasse la température de 3000 °C. Si l'on considère maintenant le spectre du rayonnement électromagnétique sur une plus grande étendue, un corps qui émet des infrarouges sera forcément bien moins chaud qu'un corps qui émet des rayonnements visibles ou ultraviolets.

60. <https://www.youtube.com/watch?v=J5yCXjppgE4>

61. https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Wien

Ainsi, le soleil qui a une température de surface élevée, aux alentours de 6 000 °C, va émettre un rayonnement principalement dans le visible. La Terre qui, elle, a une température moyenne de 15 °C, émet principalement un rayonnement dans l'infrarouge (Fig. 7.4, courbes du haut). Par ailleurs, n'oublions pas que ces rayonnements transportent aussi de l'énergie, et cela vous le savez, quand vous vous mettez au soleil, vous vous réchauffez très vite.

L'atmosphère terrestre n'agit pas de la même façon sur les rayonnements qui arrivent sur la Terre et sur les rayonnements qu'émet la Terre en raison de leur différence de nature, visible ou infrarouge. Considérons le graphique au bas de la figure 7.4, qui nous donne l'absorption des rayonnements par l'atmosphère en fonction de leur longueur d'onde. Nous voyons que le rayonnement visible est, en grande partie, transmis par l'atmosphère (absorption quasi nulle). Heureusement, sans quoi, nous serions dans le noir. L'infrarouge, lui, est en grande partie absorbé (absorption proche de l'unité). Des bandes d'absorption apparaissent, où chacune des bandes correspond à un ou plusieurs gaz présent(s) dans l'atmosphère. Sous le spectre d'émission de la Terre, vous pouvez voir des bandes d'absorption liées à la vapeur d'eau, au CO₂, au méthane CH₄, au protoxyde d'azote N₂O, à l'ozone O₃, ...

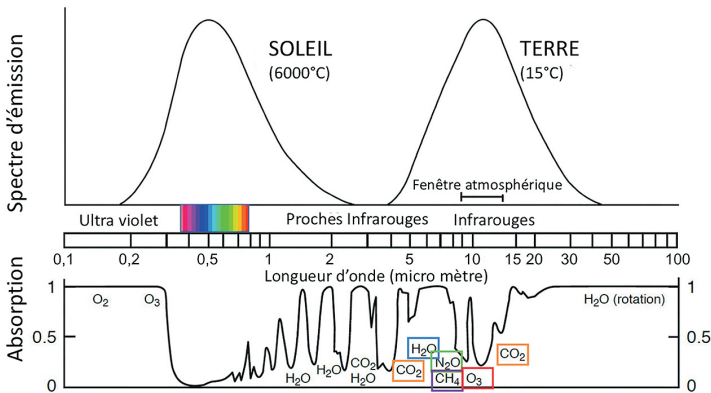


Figure 7.4 : En haut : spectres d'émission du soleil et de la Terre. En bas : absorption de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde. Sont indiqués les principaux gaz à effet de serre et leur correspondance avec les bandes d'absorption en infrarouge. Source : Marielle Saunois.

L'énergie, qui arrive essentiellement sur Terre par le rayonnement visible du soleil, est soumise à un premier effet que l'on appelle l'effet parasol. En effet, en raison de la présence des nuages, d'aérosols réfléchissants et des surfaces brillantes (neige, glace), 30 % du rayonnement solaire est réfléchi par l'atmosphère et la surface de la Terre. L'énergie émise par la Terre, sous la forme d'un rayonnement infrarouge, est, elle, soumise au fameux effet de serre. En effet, l'atmosphère ne laisse que très peu passer les infrarouges. Ceux-ci sont, en très grande partie, absorbés par les gaz à effet de serre, puis réémis par eux vers la Terre, dont la surface va se réchauffer en conséquence. On parle souvent péjorativement de cet effet de serre, mais sans lui,

la température moyenne à la surface de la Terre serait de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ et non pas de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. C'est lui qui nous réchauffe, un peu comme une couverture ou une couette dans notre lit pour reprendre la description de Marc Delmotte (voir section 7.1.3).

Le **bilan radiatif de la Terre** est la différence entre l'énergie solaire arrivant sur Terre et l'énergie émise par la Terre et repartant vers l'espace. C'est l'équilibre entre cette énergie reçue et l'énergie renvoyée qui maintient un climat viable sur la planète avec une température moyenne de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Alors on comprend facilement qu'un déséquilibre entre les rayonnements entrant et sortant de l'atmosphère, par un changement d'albédo ou une modification des gaz à effet de serre, va modifier ce bilan radiatif et va avoir pour conséquence un dérèglement climatique.

7.2.2. L'effet de serre additionnel lié aux activités humaines

Il nous faut maintenant distinguer l'effet de serre naturel, en l'absence d'activités humaines, de l'effet de serre additionnel, causé par ces mêmes activités humaines.

Les graphiques de la figure 7.5 représentent la contribution des différents gaz, respectivement à l'effet de serre naturel (à gauche) et à l'effet de serre additionnel (à droite). Le premier gaz à effet de serre naturel est la vapeur d'eau ! Elle contribue en effet à environ 60% de cet effet de serre, suivie par le dioxyde de carbone CO_2 pour 26%, puis l'ozone O_3 , le méthane CH_4 et le protoxyde d'azote N_2O . Les nuages participent aussi, de façon naturelle, à l'équilibre thermique de la Terre et au climat. Ils ont un pouvoir refroidissant, puisqu'ils réfléchissent le rayonnement solaire et donc contribuent à l'effet parasol. Mais, ils ont aussi un pouvoir réchauffant, car nous avons tous expérimenté qu'une nuit claire sans nuage est plus fraîche qu'une nuit nuageuse, ce qui montre bien l'effet de serre des nuages. En moyenne, les nuages ont plutôt tendance à refroidir le climat, mais les nuages fins et élevés comme les cirrus ont un effet de serre dominant.

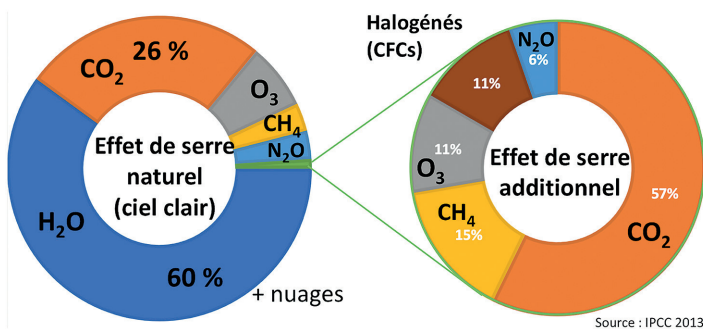


Figure 7.5 : Contributions respectives des principaux gaz de l'atmosphère à l'effet de serre naturel (à gauche) et à l'effet de serre additionnel (à droite). Source : IPCC, 2013⁶².

62. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Les scientifiques sont désormais capables de déterminer les quantités de gaz présents dans l'**atmosphère** sur des temps géologiques, c'est-à-dire bien antérieurs au début du développement de l'agriculture et des industries. En particulier, si l'on regarde l'évolution des concentrations de trois **gaz à effet de serre**, le CO_2 , le **méthane** CH_4 et le protoxyde d'azote N_2O , dans l'**atmosphère** depuis l'an zéro jusqu'en 2020. On constate que leurs concentrations sont restées quasi constantes sur les 1700 premières années, mais que depuis 1750, date prise comme référence pour la période pré-industrielle, elles ont toutes augmenté dans des proportions importantes (Fig. 7.6) :

- la concentration du CO_2 a été multipliée par 1,4;
- celle du **méthane** par 2,6;
- et celle du protoxyde d'azote par 1,2.

Les activités humaines – industries, transports, agricultures – ont donc bien contribué à augmenter les concentrations de **gaz à effet de serre** dans l'**atmosphère**. Les humains ont même introduit dans l'**atmosphère** des gaz qui n'ont aucune origine naturelle. Il s'agit en particulier de gaz composés de carbone, d'hydrogène, de fluor, et de chlore, les chlorofluorocarbones (CFC), les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) ou encore les hydrofluorocarbones (HFC). Ces gaz synthétiques sont des **gaz à effet de serre**. Ils ont été produits à partir des années 1950 pour l'industrie du froid, de l'isolation, des nettoyants et de la propulsion. Leurs concentrations, mesurées à partir des années 1980, sont en augmentation pour la plupart d'entre elles, même si certaines tendent aujourd'hui à se stabiliser, voire à diminuer suite au protocole de Montréal visant à protéger la **couche d'ozone** stratosphérique⁶³.

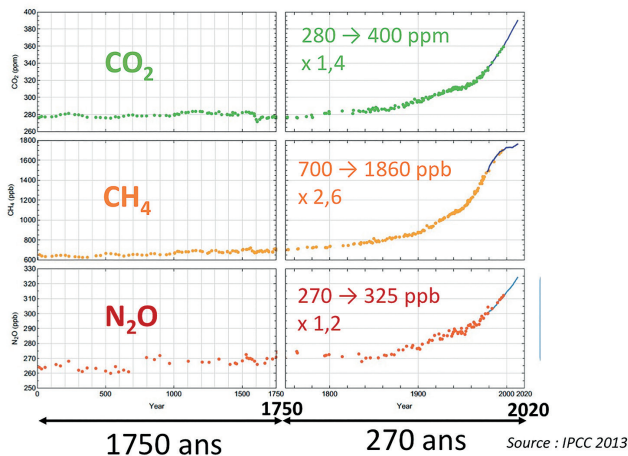


Figure 7.6 : Évolutions sur les 2000 dernières années des concentrations de gaz majeurs participant à l'**effet de serre** additionnel (CO_2 , CH_4 et N_2O). Source : IPCC, 2013⁶².

63. a) https://fr.wikipedia.org/wiki/Protocole_de_Montr%C3%A9al

b) <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2018/twentyquestions/>

C'est donc l'augmentation des concentrations de ces **gaz à effet de serre**, en lien avec les activités humaines, qui est responsable de ce qu'on appelle l'**effet de serre** additionnel. En calculant la manière dont les changements de composition depuis 1750 modifient l'**effet de serre**, les scientifiques estiment que (Fig. 7.5, à droite) :

- le CO₂ est le premier gaz à effet **anthropique**, contribuant à 57 % de l'**effet de serre** additionnel ;
- suivi par le **méthane** (15%), l'ozone (11%), et le protoxyde d'azote (6%). L'ensemble des composés halogénés (essentiellement les **CFCs**) contribue à hauteur de 11%.

Ainsi, les scientifiques estiment la puissance par unité de surface associée à l'**effet de serre** additionnel à 2,29 W/m² entre 1750 et 2011. Rappelons pour la comparaison que la puissance reçue du rayonnement solaire par unité de surface, de jour et sous ensoleillement direct, est de l'ordre de 1000 W/m². Cet **effet de serre** additionnel, même faible, a ainsi entraîné une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre de 1,1 °C pour la décennie 2010-2019 par rapport à la décennie antérieure 1850-1900.

Si les émissions de **gaz à effet de serre** produits par les humains continuent à croître au même rythme qu'aujourd'hui, les modèles climatiques prédisent qu'en 2100 la température moyenne à la surface de la Terre pourrait augmenter de 2 à 4 °C.

7.3. Les émissions de gaz à effet de serre par secteur et par région – M. Saunois

Nous allons voir ici comment se répartissent les émissions des principaux gaz responsables de l'**effet de serre** additionnel (voir section 7.1.2) selon les secteurs d'activités et selon les pays développés ou en voie de développement.

Nous nous concentrerons sur le **dioxyde de carbone**, CO₂, le **méthane**, CH₄, et le protoxyde d'azote, N₂O, en oubliant volontairement l'ozone, O₃, et les composés halogénés ou chlorofluorocarbones (**CFC**). En effet, on ne peut pas véritablement parler d'émission pour l'ozone, car il n'a pas de source directe, étant produit dans l'**atmosphère** *via* des réactions chimiques (voir section 2.3). Par ailleurs, les composés halogénés ne sont presque exclusivement émis que dans un seul secteur d'activité, celui de l'industrie.

Les secteurs d'activité émetteurs de CO₂, de CH₄ et de N₂O peuvent être classés en 8 catégories (Fig. 7.7) :

- L'extraction et la distribution des **énergies fossiles** (charbon, pétrole et gaz) qui sont ensuite elles-mêmes utilisées dans différents secteurs ;
- Les transports ;
- La production d'**énergie** ;

- Le chauffage des bâtiments pour le résidentiel et le tertiaire;
- Les industries parmi lesquelles les industries manufacturières, l'industrie du bâtiment et la production de ciment;
- L'agriculture avec l'élevage, la gestion des fumiers, la fertilisation des sols et la culture du riz;
- La gestion des déchets solides et liquides;
- L'exploitation de la **biomasse** incluant le changement d'utilisation des terres avec en particulier la déforestation et les feux de forêts.

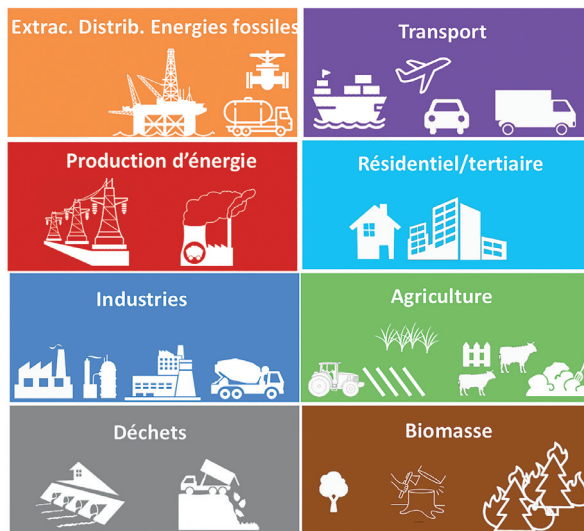


Figure 7.7 : Secteurs d'activité émetteurs de CO₂, de CH₄ et de N₂O. Source : Marielle Saunois.

Les émissions de CO₂ dans le monde sont estimées à 42 milliards de tonnes en 2018. Environ 84 % sont dus à la combustion des **énergies fossiles**. Le reste vient du changement d'utilisation des terres et des sols, entre autres, de la déforestation. Parmi les trois sources d'émission, le charbon contribue pour 40 %, suivi de près par le pétrole (34 %), puis par le gaz (20 %) (valeurs issues du bilan mondial du carbone de 2019 – mise à jour annuelle disponible⁶⁴).

La **figure 7.8** décrit l'évolution des émissions de CO₂ au cours des 60 dernières années pour les 6 premiers pays émetteurs actuels. Les émissions ont augmenté dans la plupart de ces pays, mais certains pays ou certaines régions ont vu leurs émissions diminuer comme les États-Unis ou l'Europe et ses 28 membres. En 2018, les principaux pays émetteurs étaient la Chine, largement devant les États-Unis, l'Europe, l'Inde, la Russie et le Japon. À eux 6, ces pays couvrent 67 % des émissions

64. <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>

mondiales. Si, maintenant, on considère les émissions par habitant, ce sont bien les États-Unis qui émettent le plus de CO₂ par habitant (Fig. 7.9). La Chine arrive aujourd’hui au même niveau que l’Europe. Finalement, si on répartit les émissions de CO₂ dans les 8 catégories présentées, les principaux secteurs d’émissions de CO₂ sont la production d’énergie, les industries et le transport.

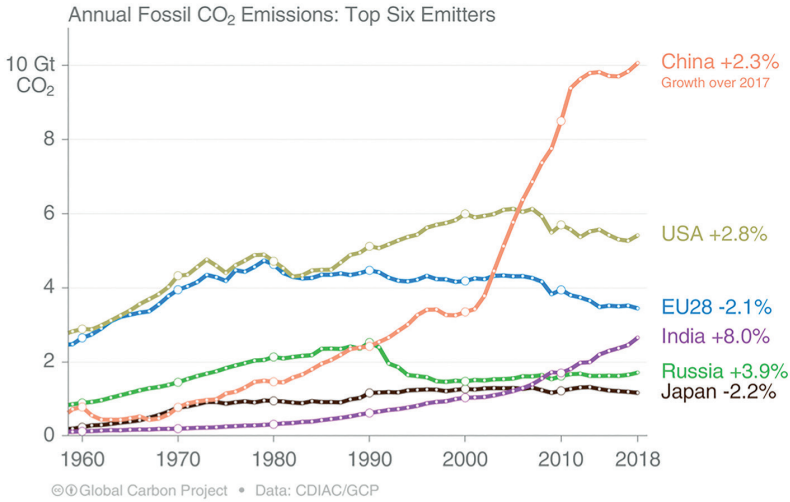


Figure 7.8 : Évolutions des émissions de CO₂ au cours des 60 dernières années pour les 6 principaux émetteurs mondiaux (Source: https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2019/GCP_CarbonBudget_2019.pdf).

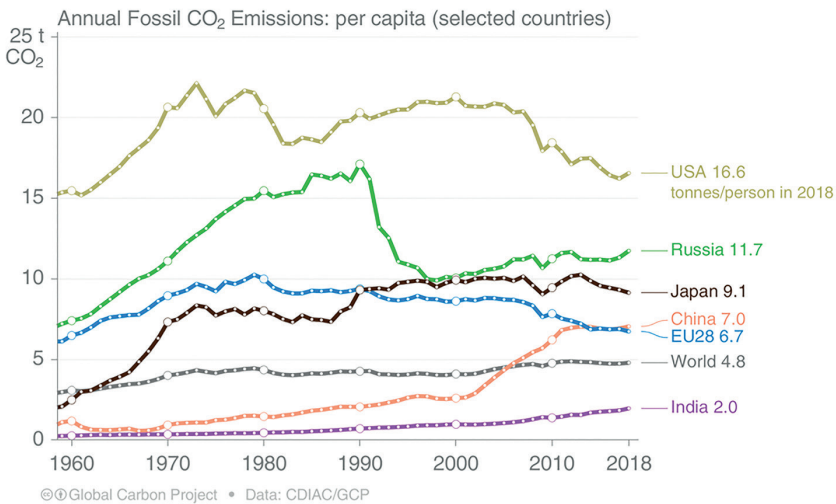


Figure 7.9 : Évolutions des émissions de CO₂ par habitant au cours des 60 dernières années pour les 6 principaux émetteurs mondiaux (Source: https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2019/GCP_CarbonBudget_2019.pdf).

La répartition par secteur d'activité est fortement différente pour le méthane CH_4 . Assez peu de méthane est émis lors de la combustion des énergies fossiles. Par contre, du méthane est relâché dans l'atmosphère lors de leur extraction et de leur distribution. La contribution de ce secteur représente 24% des émissions anthropiques. Une contribution sensiblement équivalente est obtenue pour la gestion des déchets (20%). Cela étant, le principal secteur d'émission du méthane à l'échelle mondiale est, de loin, l'agriculture qui contribue à près de la moitié (46%) des émissions anthropiques de méthane dans le monde. Les émissions anthropiques de méthane dans le monde sont estimées à environ 350 millions de tonnes en 2017 (mise à jour régulière et plus d'information disponibles sur : <https://www.globalcarbonproject.org/methanebudget/>).

La répartition par secteur pour le protoxyde d'azote témoigne, elle aussi, d'une part prépondérante de l'agriculture (55%) et d'une contribution significative des feux de biomasse (24%). La contribution du secteur industriel n'est, en revanche, que de 9%. Les émissions mondiales de N_2O sont de l'ordre de 10 millions de tonnes par an (mise à jour régulière et plus d'information disponible sur <https://www.globalcarbonproject.org/nitrousoxidebudget/>).

Finalement, si on met en regard les répartitions des secteurs émetteurs pour les principaux gaz à effet de serre, on voit que ces trois gaz ont, chacun, des secteurs dominants qui sont différents les uns des autres. Le méthane et le protoxyde d'azote sont émis par des secteurs d'activité qui n'auraient qu'une influence très réduite si on ne considérait que le CO_2 : agriculture, déchets, extraction des énergies fossiles. En termes de masse, les quantités de gaz émises dans l'atmosphère chaque année par les activités humaines s'élèvent à environ 40 milliards de tonnes de CO_2 , 350 millions de tonnes de méthane, et 10 millions de tonnes de N_2O .

Avec ces chiffres, on constate que le CO_2 est émis en quantité largement plus grande que les autres, et que les secteurs d'activités émettant du CO_2 semblent ainsi les plus importants. Cependant, les gaz à effet de serre ne sont pas équivalents en termes de réchauffement climatique. Certains gaz ont une capacité plus forte à piéger le rayonnement infrarouge et donc à réchauffer le climat.

Il est donc nécessaire de prendre en compte cet aspect pour comparer les secteurs d'activité. Pour cela, on utilise un facteur de conversion approprié, qu'on appelle Pouvoir de Réchauffement Global ou PRG en abrégé. Le PRG d'un gaz est le forçage radiatif cumulé sur une durée donnée, c'est-à-dire la puissance radiative que le gaz renvoie vers le sol pendant cette durée et dont la valeur est mesurée relativement au CO_2 sur la même durée.

Dans le tableau T1, le PRG est donné pour les principaux gaz à effet de serre sur une durée de 100 ans. Ainsi, pour le méthane, on estime un PRG de 28, ce qui signifie qu'un kilo de méthane a un impact 28 fois plus important sur l'effet de serre qu'un kilo de CO_2 . Le PRG du N_2O est de 265, celui du CFC-11 est de plus de 4 000.

Gaz	PRG à 100 ans
CO ₂	1
CH ₄	28
N ₂ O	265
CFC-11	4660
HFC-134a	1300

Tableau T1 Pouvoir de réchauffement global (PRG) des principaux gaz à effet de serre additionnel (Source : IPCC, 2013).

Ainsi en utilisant le PRG 100 pour calculer les émissions de gaz à effet de serre en équivalent CO₂, on estime que les émissions de CO₂, corrigées du PRG, contribuent effectivement à 76 % des émissions de gaz à effet de serre, celles de méthane à 16 % ; et celles de N₂O à 6 %.

De même, si on applique ce calcul aux émissions totales de gaz à effet de serre en équivalent CO₂ par secteur, la répartition fait apparaître l'ensemble des 8 secteurs considérés avec, bien sûr, une prépondérance des secteurs utilisant les énergies fossiles et émettant du CO₂, mais montre aussi une contribution significative de l'agriculture et de l'extraction des énergies fossiles (Fig. 7.10).

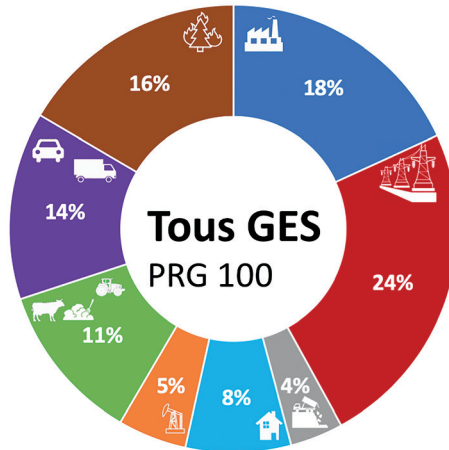


Figure 7.10 : Répartition des gaz à effet de serre additionnel (CO₂, CH₄ et N₂O) à l'échelle de la planète suivant les 8 secteurs d'activité considérés (Fig. 7.7) et tenant compte des pouvoirs de réchauffement global de chacun des gaz sur 100 ans. Source : EDGAR v4.32 – 2005⁶⁵.

65. <https://edgar.jrc.ec.europa.eu>

L'analyse de cette répartition met en évidence les secteurs d'activité sur lesquels des efforts de réduction doivent être appliqués. Quelques-unes des solutions pour réduire les émissions seront exposées et discutées dans la dernière partie de cet ouvrage.

7.4. De quelles façons notre gestion des écosystèmes terrestres contribue-t-elle au changement climatique ?

– N. de Noblet-Ducoudré

L'objectif de cette partie est de montrer comment les usages que nous faisons de nos terres, contribuent au changement climatique.

Tout d'abord, que signifient « les usages que nous faisons de nos terres » ? Depuis la sédentarisation des humains, il y a 8 000 ans environ, nous avons défriché pour mettre en place des zones agricoles, des zones de pâturage pour nourrir le bétail. Nous avons construit des villes, et des routes. Nous avons déforesté pour exploiter le bois, et pour cultiver. Nous avons drainé des marécages pour en faire des zones habitables, récréatives ou agricoles. Dans les zones agricoles, nous labourons, nous fertilisons, nous arrosons, nous répandons des **pesticides** et des fongicides. Ce sont toutes ces activités qui sont regroupées sous le vocable « d'usages des terres ». Aujourd'hui, plus de 70% de la surface terrestre libre de glace a été directement perturbée par les humains, par l'une de ces activités. C'est d'autant plus important que 50% de la population mondiale vit dans les zones urbaines, soit sur 1% des terres !

Toutes ces activités contribuent de deux façons au changement climatique.

Leur première contribution est d'émettre des **gaz à effet de serre**. Elles émettent, bien sûr, du **dioxyde de carbone** CO_2 , par exemple, lors d'une déforestation. Mais, elles émettent aussi deux autres **gaz à effet de serre** dont le pouvoir réchauffant est supérieur à celui du CO_2 . Il s'agit du **méthane**, de formule chimique CH_4 , qui est en grande partie émis par l'élevage. Le troisième gaz est le protoxyde d'azote, encore appelé oxyde nitreux, de formule chimique N_2O . Les émissions de ce gaz résultent principalement de l'épandage d'engrais dans les zones agricoles. Si on cumule ces trois **gaz à effet de serre**, les usages que nous faisons de nos terres contribuent pour 23% aux émissions mondiales de **gaz à effet de serre** (Fig. 7.11).

Mais les **écosystèmes** contribuent aussi à piéger du CO_2 par le mécanisme de la **photosynthèse**. La **photosynthèse** est le processus qui permet aux plantes, avec l'aide de la lumière, de transformer le CO_2 de l'air et l'eau du sol en matière organique (c'est-à-dire en sucres) et en oxygène. Une partie du CO_2 , qui est fixé par **photosynthèse**, est relargué par la respiration des plantes et des sols. Cependant, si l'on fait le bilan mondial de la **photosynthèse** et de la respiration, on estime aujourd'hui

qu'environ 29% des émissions totales de CO₂ **anthropique** sont captées par les terres émergées, et donc stockées dans la **biomasse** des plantes et dans le sol. C'est ce qu'on appelle le puits biosphérique de carbone.

Si on fait le bilan net des puits et des sources de CO₂ par les **écosystèmes** terrestres, on constate que 13% est émis mais 29% est capté. Les **écosystèmes** terrestres dans leur ensemble jouent donc aujourd'hui un rôle de puits de CO₂ à l'échelle mondiale et contribuent, par ce biais, à ralentir le réchauffement climatique. Mais il faut faire attention, car ceci n'est pas vrai pour les émissions de CH₄ et de N₂O. Les zones agricoles et de pâturage restent une source nette importante pour ces deux **gaz à effet de serre**.



Figure 7.11: Vingt-trois pourcent des émissions mondiales de **gaz à effet de serre** sont liées aux activités agricoles. Exploitation des forêts, élevage et agriculture. Photos: wikimedia.commons et istock.

Nous avons vu précédemment que les usages que nous faisons de nos sols contribuent de deux façons au changement climatique. En fait, l'agriculture et la forêt n'échangent pas que des **gaz à effet de serre** avec l'**atmosphère**. Elles échangent aussi de l'eau et de la chaleur, c'est-à-dire de l'**énergie**.

Lorsque l'on transforme nos paysages, par déforestation, par exemple, ou par irrigation des champs, on perturbe ces échanges. Or, ces échanges sont importants parce qu'ils modifient la température du sol et de l'air, l'humidité de la masse d'air au-dessus de la surface et donc les précipitations. Pour illustrer ces échanges, prenons l'exemple d'une déforestation. Quand on coupe une forêt pour la remplacer, par exemple, par un champ, que se passe-t-il ?

Une forêt est en général verte plus longtemps dans l'année. Plus dense, elle transpire plus aussi. En la coupant, on renvoie donc moins de vapeur d'eau vers

l'**atmosphère** (Fig. 7.12). L'**atmosphère** s'assèche, ce qui peut conduire à une diminution des précipitations. Mais cette diminution des pluies ne se produit pas forcément là où la déforestation a eu lieu. Cette masse d'air plus sèche peut, en effet, être transportée par les vents loin de son origine.

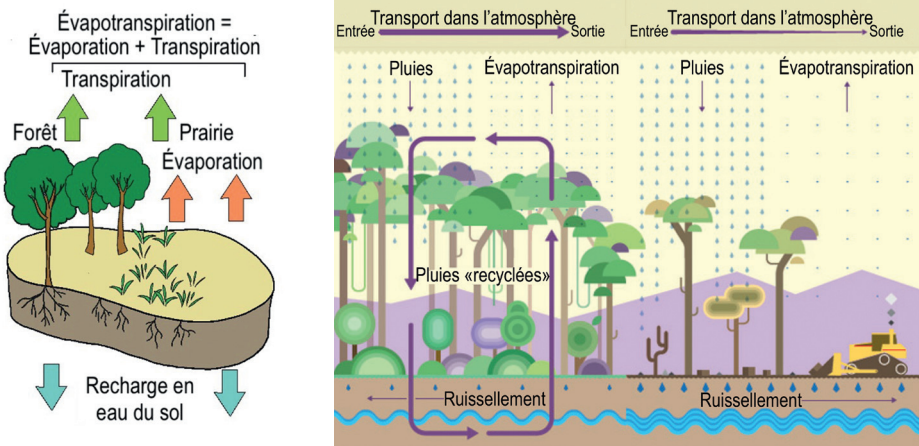


Figure 7.12 : À gauche: mécanismes d'évaporation et de transpiration conduisant à l'**évapotranspiration**. Seuls la végétation et les êtres vivants dans leur ensemble transpirent et captent l'eau d'évaporation (pluie) et de condensation (rosée). L'eau dans un sol sans végétation ne peut que s'évaporer. Source : <https://forestrypedia.com/evaporation-transpiration-and-evapotranspiration/> À droite: Illustration de l'importance de l'**évapotranspiration** des forêts, qui « pompent » l'eau de pluie infiltrée dans le sol et qui rechargent l'**atmosphère** en vapeur d'eau pour des pluies qui tomberont à d'autres endroits. En l'absence de forêts ou après déforestation, l'**évapotranspiration** est très réduite, l'eau tombée sur le sol a plus tendance à ruisseler, et les précipitations diminuent dû à l'**atmosphère** moins humide. Adapté de : Luiz E.O.C. Aragão, Environmental science: The rainforest's water pump, *Nature* **489** (7415), 217-8, September 2012 [1].

La transpiration n'est pas seulement un transfert de vapeur d'eau, c'est aussi un transfert de chaleur. Quand il y a transpiration, il y a refroidissement de la surface. On l'appréhende très bien de manière intuitive. Lors d'une randonnée, quand nous quittons un champ de blé, qui vient d'être fauché et qui est chaud, et que nous rentrons dans une forêt, nous ressentons de la fraîcheur. C'est de cela qu'il s'agit ; la forêt prélève de l'**énergie** au sol pour transpirer et la température diminue.

Parlons maintenant du moment où la vapeur d'eau se condense en altitude dans l'**atmosphère** pour former de la pluie. La chaleur qui était piégée dans la vapeur d'eau est alors relâchée dans l'**atmosphère**. Lors d'une déforestation, puisque la transpiration diminue, on réchauffe donc la surface, mais on refroidit la haute **atmosphère** puisqu'il y a moins de vapeur d'eau à condenser.

Mais ce n'est pas tout ! Lorsque nous coupons une forêt, nous augmentons l'**albédo** de la surface, c'est-à-dire sa capacité à réfléchir le rayonnement solaire incident. Une forêt est, en effet, souvent plus sombre que la zone agricole qui la remplace. Moins d'**énergie** absorbée se traduit par un refroidissement de la surface.

Ainsi, si nous coupons des arbres, nous réchauffons le sol parce que la transpiration diminue, mais nous le refroidissons parce que son **albédo** augmente! Ces effets sont contradictoires. Quel en est le résultat net? De manière générale, en période estivale, la forêt sera plus fraîche tandis qu'en période hivernale, elle sera plus chaude.

Résumons, en modifiant le couvert végétal et en usant de nos terres, nous influons à la fois sur les émissions et les absorptions de **gaz à effet de serre**, et sur les échanges d'**énergie** et de vapeur d'eau entre la surface et l'**atmosphère**.

En modifiant la concentration en **gaz à effet de serre** de l'**atmosphère**, on affecte le **climat** à l'échelle mondiale, on joue donc sur l'intensité du réchauffement climatique global.

En perturbant les échanges d'eau et de chaleur, on affecte le **climat** à l'échelle régionale, là où le couvert végétal est modifié. On affecte également les régions voisines en modifiant la circulation des vents et la composition hydrique et thermique des masses d'air.

7.5. Les indicateurs du changement climatique aux grandes échelles – M. Delmotte

7.5.1. Météorologie, climat et systèmes d'observation

Avant de s'intéresser plus en détail au changement climatique, il est important de bien définir les notions dont on parle. En premier lieu, il est important de rappeler ce qu'on entend par **météorologie** et climat.

Dans l'esprit de tout un chacun, ces deux termes sont souvent peu différenciés. On les identifie au « temps », et ils ne sont pas toujours précisément définis, même dans les dictionnaires courants. Ils ont des points communs, mais ils se rapportent à des référentiels temporels et spatiaux qui sont différents dans les deux cas.

La **météorologie** se caractérise par une très grande variabilité dans le temps et dans l'espace. C'est la prévision du temps sur des échéances courtes et à l'échelle locale, c'est le temps qu'il fait. La notion de **météorologie** s'applique surtout sur des temps courts, de quelques heures à quelques jours, et sur des zones d'espaces réduites, quelques dizaines à quelques centaines de km². Une prévision météorologique est d'autant plus fiable qu'elle porte sur une durée courte et une zone géographique réduite. Elle se caractérise par un certain nombre de paramètres physiques comme la température, les précipitations, le vent, la pression, l'humidité, etc.

Le **climat** est défini comme un état moyen de la **météorologie**, qui est calculé sur une période de référence de 30 ans. La variabilité du **climat** est peu marquée sur des périodes de temps caractéristiques de la vie humaine, de l'ordre de 50 à 100 ans. Le **climat** peut donc aussi se définir par type (tempéré, désertique, chaud et humide, continental), et caractérise de grandes zones géographiques réparties selon les

bandes de latitude. Le climat, c'est le temps qu'il devrait faire, celui auquel on fait référence quand on parle de moyennes annuelles, saisonnières ou mensuelles.

Une fois définies les notions de base, les composantes et le fonctionnement du **système climatique**, on peut alors s'intéresser à l'évolution du **climat** à grande échelle, temporelle ou spatiale et, en particulier, au changement climatique actuel.

Pour étudier l'évolution du climat, il faut être capable de suivre l'évolution temporelle d'une multitude de paramètres physiques, chimiques ou biologiques pertinents comme par exemple, la température dans l'air ou dans les océans, la pression, la composition chimique de l'**atmosphère** incluant notamment les concentrations en **gaz à effet de serre**, les vents, les courants marins, la couverture de neige et ou de glace des continents et des océans, la répartition de la végétation, etc.

Pour ce faire, on peut distinguer trois grandes approches :

- l'observation en temps réel ;
- la reconstitution ou la reconstruction des variations passées du **climat** à partir d'archives climatiques, qu'elles soient naturelles ou d'origine humaine ;
- la simulation à partir de modèles numériques du **climat** passé, présent ou futur, ce qui ne sera pas traité ici mais fera l'objet des sections 9.2 et 9.3.

Les observations se font *in situ*, à partir de capteurs ou d'instruments dédiés à un ou plusieurs types de mesures et souvent dépendants de la méthode mise en œuvre. Au départ, les sites d'observation ont été choisis en fonction d'objectifs scientifiques pour répondre à des questions précises.

Pour les études climatologiques, il faut disposer, autant que faire se peut, d'une couverture observationnelle à différentes échelles, locale, régionale, nationale et globale avec une bonne résolution spatiale et temporelle. Dans la pratique, il est évidemment plus compliqué de mettre en œuvre une telle couverture observationnelle sur les océans et dans les zones difficiles d'accès. Souvent, les scientifiques ont construit des réseaux d'observation nationaux, voire internationaux.

Ces réseaux mettent à disposition des méthodologies, qui sont validées par les scientifiques eux-mêmes et qui donnent lieu à des mesures homogènes avec une procédure garantie de contrôle de qualité, rendant alors possible la mutualisation des données. Le développement de tels réseaux d'observation, le perfectionnement des instruments et l'amélioration de leur précision permettent aujourd'hui de mieux appréhender les observations et de mieux comprendre la variabilité des systèmes naturels.

Au niveau européen, un réseau a ainsi été mis en place sous la forme d'une grande infrastructure de recherche pour suivre les concentrations des **gaz à effet de serre**. Ce réseau, appelé **ICOS**, regroupe des stations de mesure aussi bien pour l'**atmosphère** que pour l'océan et les **écosystèmes** terrestres. Les stations, qui sont

gérées par chaque pays membre de l'infrastructure, doivent toutes, pour être labellisées, respecter un cahier des charges mis au point et approuvé par l'ensemble de la communauté scientifique. La méthodologie de mesure et de traitement des données est la même pour chaque type de station, que la mesure soit faite dans l'**atmosphère**, dans l'océan ou sur les **écosystèmes** terrestres.

Cela étant, les observations régulières, qui permettent de suivre l'évolution du climat, sont encore relativement récentes. Ainsi, les premières données météorologiques sur la température ne remontent qu'à 150 ans. À titre d'exemple, la **figure 7.13** représente l'évolution de la température moyenne mesurée en France métropolitaine depuis un peu plus d'un siècle. On constate que cette température n'a cessé d'augmenter surtout à partir des années 1970.

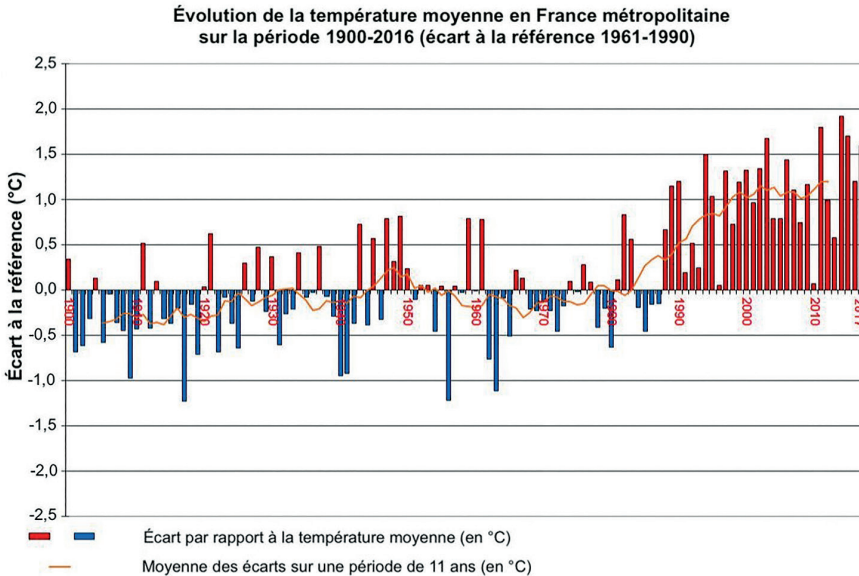


Figure 7.13: Évolution de la température moyenne mesurée en France métropolitaine sur la période 1900-2016 (écart à la référence 1961-1990). Les bâtonnets représentent les écarts à la référence pour chacune des années sur la période considérée. La courbe « lissée » en rouge est obtenue en prenant une moyenne des écarts sur une période de 11 ans. Source : Météo France⁶⁶.

7.5.2. Observation des changements en cours

Regardons un certain nombre d'observations qui montrent que les changements climatiques actuels sont détectables et illustrent cette conclusion du rapport du **GIEC** de 2013: «Le réchauffement du **système climatique** est sans équivoque,

66. <http://www.donnees.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lesessentiels/indicateurs/e13.html>

et depuis les années 1950, beaucoup des changements observés sont sans précédents depuis des décennies jusqu'à des millénaires ».

Qu'observe-t-on? Les températures augmentent non seulement de façon locale, comme nous venons de le voir avec la courbe de suivi des températures à Paris, mais elles augmentent aussi régionalement et globalement avec des disparités d'une zone géographique à l'autre. Le réchauffement global, qui est ainsi mesurable sur les continents comme dans les océans, est de plus d'un degré depuis le début de l'ère industrielle (sur les continents).

Les événements extrêmes se font de plus en plus fréquents et de plus en plus intenses. On constate une augmentation de la fréquence des canicules, des événements de pluie intense. C'est, par exemple, le cas des **épisodes cévenols** en France. Ces dernières années, l'intensité et la violence accrues des vents a été mise en évidence dans un certain nombre de cyclones. Les océans s'acidifient et la température des océans augmente y compris en profondeur avec des conséquences directes sur la vie des **écosystèmes**, et les coraux en particulier (voir sections 5.3.1 et 8.3).

On constate que le niveau de la mer monte, de plus de 20 cm depuis 1900 (Fig. 7.14).

Les zones de glace disparaissent ou reculent (Fig. 7.15). C'est le cas des glaciers de montagne et de la banquise dans l'hémisphère nord. Ainsi, les passages de Nord-Est et du Nord-Ouest sont parfois libres de glace, la calotte polaire du Groenland fond, la couverture de neige au sol est moindre et dure moins longtemps.

Les concentrations en **gaz à effet de serre** ont fortement augmenté et atteignent des niveaux qu'on n'avait pas connus au cours des 800 000 dernières années. Le niveau actuel du CO₂ atmosphérique est de 407 ppm mesuré en 2018. Pour mieux comprendre le changement climatique actuel et évaluer son impact potentiel ainsi que son intensité, il est utile de le mettre en perspective avec les variations passées du climat.

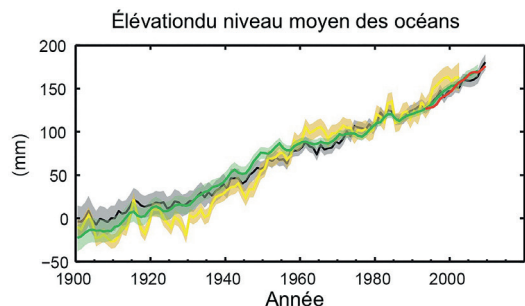


Figure 7.14: À gauche : la violence des tempêtes observées le long des côtes françaises (ici au large d'Quessant). Source : @wikimedia.commons. À droite : l'évolution du niveau moyen des océans depuis 1900. Source : « Rapport IPCC WG1 (2013) AR5 résumé à l'intention des décideurs »⁶⁷.

67. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf



Figure 7.15 : Illustration du recul du glacier des Bossons (vallée de Chamonix). À gauche : photo prise en 1864 (auteur inconnu). À droite : photo prise en 1995 (droits réservés).

7.5.3. Archives paléoclimatiques et observations d'aujourd'hui

Les reconstitutions paléoclimatiques permettent d'étendre l'étude des variations climatiques au-delà des périodes récentes, aussi loin que les archives le permettent. On peut distinguer deux types d'archives du climat, les archives historiques et les archives naturelles. Dans aucun cas évidemment, nous ne disposons d'une estimation directe d'un paramètre physique ou chimique comme par exemple la température. Nous verrons, en fait, dans la section 9.1 de cet ouvrage, comment sont exploitées ces archives climatiques.

Pour avoir une indication quantitative des températures d'été, on peut, par exemple, utiliser les dates de début des vendanges, qui sont un indicateur de la maturation du raisin et dépendent des conditions climatiques. De même, les périodes de famine ou d'épidémie sont souvent liées à des épisodes climatiques marqués, une [sécheresse](#), une inondation ou une période de froid intense. En utilisant les écrits, les gravures, les fresques correspondant à une période donnée, on peut ainsi obtenir des indications sur les conditions climatiques prévalant à cette période en une zone donnée. Il s'agit alors d'archives historiques.

Les archives naturelles gardent souvent, elles aussi, l'historique des conditions du milieu dans lequel elles se sont formées ou développées. Par exemple, la composition chimique de la neige et sa composition isotopique dépendent de la température à laquelle elle s'est formée. La croissance des arbres dépend de la température et du contenu en eau du sol, et cette dépendance se retrouve, entre autres, enregistrée par la taille des cernes de chaque arbre.

Dans ces archives naturelles, on trouve aussi trace de l'évolution du vivant qui dépend de l'environnement climatique. Les sédiments, qu'ils soient lacustres ou marins, renferment une multitude de traces du vivant, qui se sont accumulées au fond des lacs ou des océans au fur et à mesure de l'accumulation des couches sédimentaires. Il s'agit de pollen, de petits coquillages ou de crustacés d'eau douce dans

les lacs, de petits coquillages microscopiques – les foraminifères – dans les sédiments marins.

La démarche scientifique, développée ici pour les archives naturelles, est la suivante :

- selon le milieu que l'on souhaite étudier, **atmosphère**, océan, **biosphère**..., on va d'abord choisir l'archive la plus appropriée ;
- une mission de collecte de l'archive sur le terrain est ensuite souvent nécessaire, laquelle prend soin de ne pas altérer la matrice naturelle ;
- on procède à l'analyse de l'archive, souvent précédée d'une phase de préparation et/ou de traitement de l'échantillon qui passe par des analyses physiques, chimiques ou autres d'éléments conservés dans la matrice de l'archive ;
- on passe ensuite à une phase d'interprétation des données pour transcrire ces données analysées en termes de paramètres climatiques, on parle de fonction de transfert qui nécessite elle-même de pouvoir définir une chronologie ;
- on peut alors comparer les différentes séries paléo-climatologiques entre elles et avec les données récentes.

L'analyse des glaces polaires d'EPICA-DOME C en Antarctique (Fig. 7.16, à gauche) a ainsi permis de reconstruire plus de 800 000 ans de **climat** passé, incluant l'évolution des concentrations en **dioxyde de carbone** et de **méthane** sur toute la période passée et permettant la comparaison avec les mesures courantes [2].



Figure 7.16 : Reconstitutions du **climat** passé à partir d'archives naturelles. À gauche : l'analyse des glaces polaires en Antarctique (Source : CNRS Photothèque /Augustin Laurent). À droite : le carottage en mer pour l'extraction de carottes sédimentaires marines (Source : Ludovic Devaux, UMR CNRS EPOC).

Les analyses de carottes sédimentaires marines (Fig. 7.16, à droite, dans le cadre de la mission MD218 CROTALE à bord du N.O. Marion Dufresne) permettent d'obtenir des informations, entre autres, sur l'évolution de la température de l'océan à différents niveaux de profondeur, sa **salinité** sur des échelles de temps qui peuvent couvrir plusieurs millions d'années [3].

Toutes ces informations paléoclimatiques sont essentielles pour mieux comprendre les changements actuels. Elles sont également cruciales pour la validation des modèles de **climat** qui sont utilisés pour simuler le **climat** futur.

Références

[1] L.E.O.C. Aragão. 2012. Environmental science: The rainforest's water pump, *Nature* **489** (7415), 217-8. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature11485>.

Voir aussi : https://www.rtb.be/info/societe/detail_ucl-decouverte-majeure-sur-l-evapotranspiration-des-forets?id=9418633.

[2] V. Masson-Delmotte, A. Landais. 2014. Explorer l'évolution du **climat** grâce aux glaces de l'Antarctique et du Groenland. *Reflets phys.* **41**, 12-17. DOI: <https://doi.org/10.1051/refdp/201441012>.

[3] V. Scao. 2013. Détermination des paléotempératures des océans à partir du rapport Mg/Ca des foraminifères. *Sciences de l'ingénieur [physics]*. dumas-01420518. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01420518>.