



Le changement climatique dû aux activités humaines

Jean Jouzel, Michel Petit et Jean-Claude Duplessy

Les mécanismes qui régissent le climat sont-ils bien identifiés ?

Les mécanismes qui régissent le climat d'une planète sont connus depuis bientôt deux siècles, grâce aux travaux de Fourier dès 1824, puis de Tyndall quelques décennies plus tard. La puissance du flux lumineux solaire qui éclaire la Terre est de 1,3 kW par m² de surface perpendiculaire aux rayons solaires. Un tiers environ de ce rayonnement est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère et le sol ; un sixième est absorbé par l'atmosphère. Le reste, soit la moitié du rayonnement incident est absorbé par la surface du sol et de la mer. L'énergie reçue par m² dépend de l'angle des rayons solaires par rapport au sol. Elle est donc plus forte au voisinage de l'équateur qu'au voisinage des pôles. Il en résulte un mouvement des eaux océaniques et des gaz atmosphériques qui tend à réduire cet écart. Ce dernier constitue donc un moteur essentiel des courants d'ensemble qui affectent l'océan et l'atmosphère et redistribuent aux diverses latitudes l'énergie fournie par le soleil. La chaleur de l'intérieur de la Terre est due à l'énergie d'accrétion initiale mais surtout à la radioactivité de certains de ses composants et elle donne naissance à un flux de chaleur ascendant qui alimente également le sol, mais est très petite et négligeable devant l'apport du flux lumineux du soleil.

Considérée dans sa globalité, la surface de la Terre (océans et continents) absorbe jour après jour du rayonnement solaire et elle ne peut cesser de se réchauffer indéfiniment qu'en évacuant dans l'espace une quantité d'énergie égale à celle qu'elle emmagasine. Elle le fait en rayonnant elle-même des ondes de même nature que les ondes lumineuses du soleil, mais qui, compte tenu de sa température beaucoup plus faible, sont d'une longueur d'onde plus grande, correspondant à une couleur, l'infrarouge, invisible pour l'œil humain. Ce rayonnement infrarouge doit commencer par traverser l'atmosphère et plus cette dernière contient de gaz ayant la propriété de l'absorber, plus le rapport entre l'énergie qui sort de la surface terrestre et celle qui s'échappe dans l'espace est grand. La présence de tels gaz tend donc à accroître la température de la Terre. On dit ces gaz produisent un effet de serre, par analogie avec l'un des phénomènes qui surviennent dans les serres des jardiniers.

L'atmosphère de la Terre contient naturellement de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone (CO₂ communément appelé gaz carbonique) qui sont des gaz à effet de serre (GES) et sans leur présence, la température au sol serait inférieure d'une trentaine de degrés à ce qu'elle est. C'est donc l'effet de serre (Figure 1) qui a permis l'apparition de la vie. Les autres planètes sont régies par les mêmes lois physiques et c'est ainsi que l'atmosphère dense de Vénus, composée essentiellement de CO₂, provoque un effet de serre très important qui explique la température de 450 °C qui y règne.

La concentration naturelle du gaz carbonique à basse altitude est suffisante pour que le rayonnement infrarouge émis par le sol aux fréquences des bandes d'absorption du CO₂ soit totalement intercepté. Certains scientifiques dont ce n'est pas la spécialité en ont conclu que si davantage de gaz carbonique était présent dans l'atmosphère, cela ne changerait rien à l'augmentation de la température au sol parce que l'effet de serre qu'il produit serait saturé. C'est faux, car si un gaz absorbe du rayonnement, il en émet aussi.

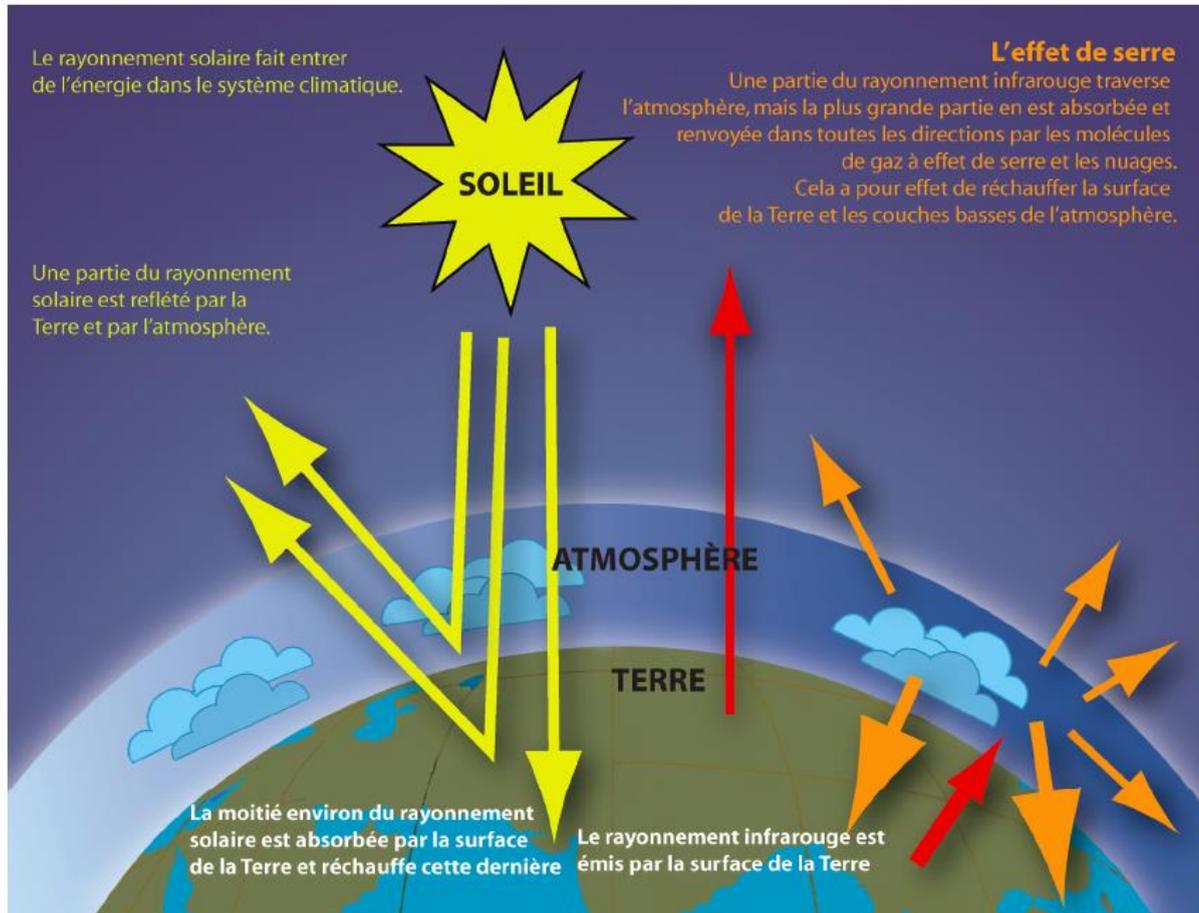


Figure 1 – Schéma du bilan énergétique de la surface du sol. L'effet de serre est le suivant : une fraction du rayonnement infrarouge traverse l'atmosphère, mais l'essentiel est absorbé et réémis dans toutes les directions par les molécules de gaz à effet de serre et les nuages. ; le résultat en est un réchauffement de la surface et des basses couches atmosphériques.

Lorsqu'une molécule absorbe un photon, elle est excitée, ce qui signifie qu'elle vibre et tourne sur elle-même plus vite ou différemment. Mais elle ne reste dans cet état qu'un temps très court et retombe dans son état initial de deux manières : soit en émettant un photon de même fréquence, soit en entrant en collision avec une autre molécule qui émettra ultérieurement un nouveau photon. Le photon infrarouge réémis par l'un de ces deux processus le sera de façon aléatoire dans n'importe quelle direction et sera de nouveau absorbé, etc. Ces absorptions-émissions prennent fin dans la haute atmosphère là où la densité devient suffisamment faible pour que la probabilité qu'un photon émis vers le haut soit absorbé devienne faible et qu'il puisse ainsi s'échapper vers l'espace. Ce sont les photons quittant cette haute atmosphère, de température inférieure à celle qui règne au sol, dont l'énergie totale doit équilibrer celle du rayonnement solaire qu'absorbe la Terre. Plus il y a de gaz à effet de serre, plus cette altitude est élevée, plus la température est basse et plus la puissance évacuée est faible ce qui déséquilibre le bilan radiatif et conduit à un réchauffement de la planète. Il n'y a pas d'effet de saturation.

Le climat évolue-t-il naturellement ?

La Terre a beaucoup évolué au cours des âges géologiques. Initialement, son atmosphère était essentiellement composée de dioxyde de carbone, avant que la photosynthèse liée à l'apparition de la vie, il y a 3,5 milliards d'années, ne la transforme pour lui donner la composition que nous connaissons actuellement. La dérive des continents a complètement modifié la géographie du globe, avec son dernier épisode, la dislocation de la Pangée il y a 200 millions d'années. Le climat de la terre a nécessairement été profondément affecté par ces changements majeurs. Plus récemment, au cours du dernier million d'années, il a évolué, de façon assez bien connue, sous l'influence d'autres causes naturelles qui ont toujours existé et continueront à jouer un rôle au cours des prochaines dizaines de millénaires.

Tout d'abord, la Terre ne tourne pas toujours de la même façon autour du Soleil, à cause de l'attraction des autres planètes et de la Lune : l'axe de rotation autour duquel la planète tourne sur elle-même en un jour est plus ou moins incliné par rapport au plan dans lequel elle accomplit sa rotation annuelle autour du soleil, l'aplatissement de l'ellipse qu'elle décrit dans ce plan est plus ou moins marqué, le mois au cours duquel la Terre est au plus près du Soleil varie régulièrement. Toutes ces variations se produisent lentement, avec des périodes qui se mesurent en dizaines de milliers d'années. Elles provoquent des changements dans la manière dont le Soleil éclaire notre planète et donc de l'insolation reçue à une latitude donnée (Figure 2). Ces variations sont à l'origine des grands cycles glaciaires interglaciaires qui ont une amplitude de l'ordre de 6 °C et une période de 100 000 ans. Y sont associées des variations du niveau de la mer qui peuvent atteindre 120 m (Figure 2) suite à l'accumulation de glace sur les régions continentales de haute latitude dans l'hémisphère nord. Depuis un peu plus de 10 000 ans, nous sommes dans une période interglaciaire.

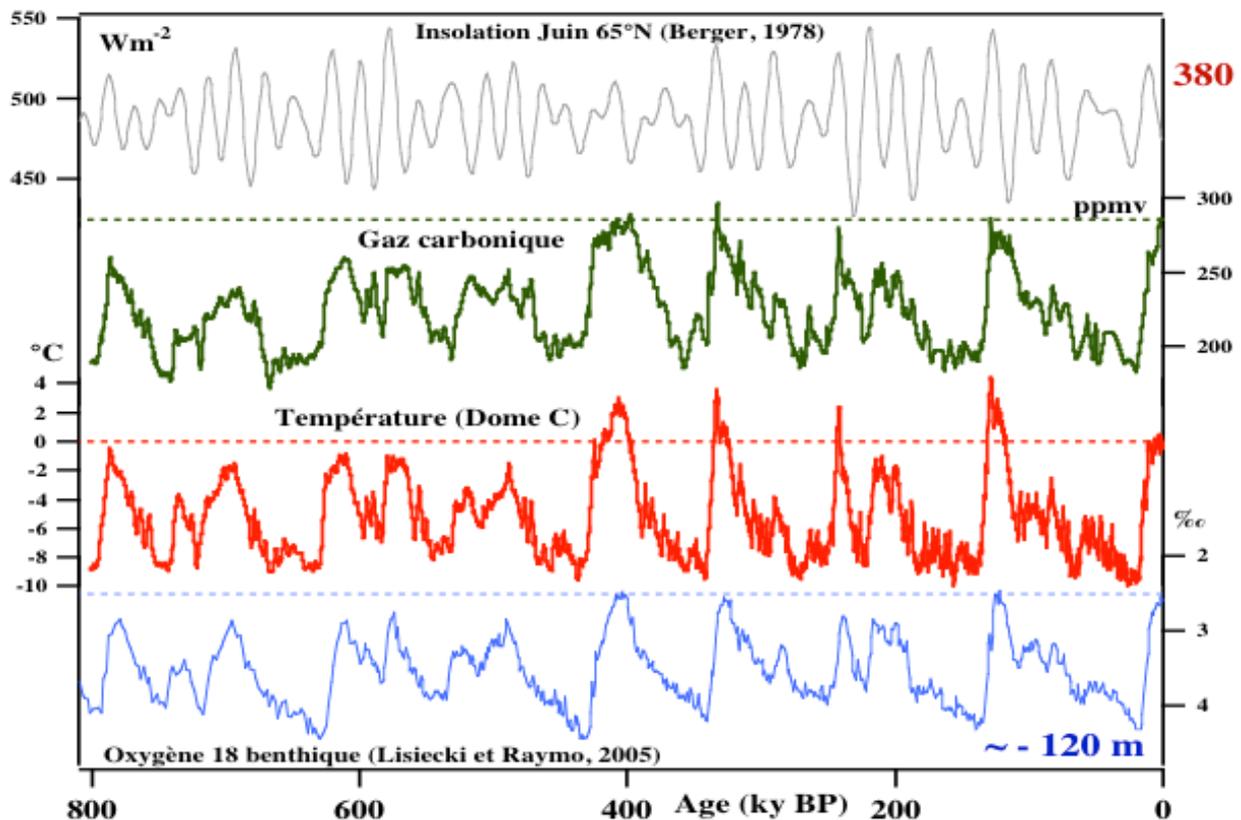


Figure 2 : Evolution au cours des 800 000 dernières années de l'insolation reçue en juin à la latitude de 65°N, de la concentration en CO₂ de l'atmosphère et de la température en Antarctique déduites de l'analyse des glaces (forages Vostok et EPICA) et du niveau de la

mer déduit de l'analyse de foraminifères benthiques.

La composition de l'atmosphère s'est modifiée de façon naturelle en particulier au niveau des gaz qui contribuent à son effet de serre et ces variations participent aussi à l'évolution du climat. Ainsi l'effet de serre était plus élevé en période interglaciaire qu'en période glaciaire, avec des concentrations supérieures d'environ 40% en CO_2 (Figure 2) et multipliées par 2 environ en méthane. Ces variations naturelles (Figure 2) remarquablement corrélées aux grands changements climatiques (température en Antarctique qui à ces échelles de temps a un caractère global et variation du niveau de la mer) n'en sont pas à l'origine mais jouent un rôle d'amplificateur par rapport aux variations d'insolation.

Le Soleil connaît lui-même une variabilité qui se manifeste en particulier par la présence de taches sur le soleil dont le nombre varie avec un cycle de 11 ans. Toutefois, ce cycle affecte le rayonnement solaire essentiellement dans la gamme de l'ultraviolet et se retrouve donc dans le comportement des parties les plus élevées de l'atmosphère terrestre qui l'absorbe : ionosphère (altitude de 100 km et au-delà) et, dans une moindre mesure, stratosphère (altitude d'environ 30 km, voir fiche ozone). Il n'affecte que peu l'énergie totale rayonnée et son influence est détectée, mais très faible dans les phénomènes climatiques. Des variations à long terme du rayonnement total, comme un accroissement depuis le minimum, dit de Maunder, observé à la fin du XVII^e siècle dans le nombre de taches solaires, sont possibles, mais d'amplitude limitée.

Un autre paramètre jouant un rôle sur la température au sol est l'activité volcanique. Lors des fortes éruptions volcaniques, des poussières atteignent la stratosphère (au-dessus de 15 km) et peuvent y rester pendant une ou deux années avant de retomber vers le sol. Ces particules constituées essentiellement d'oxydes de soufre jouent un rôle d'écran pour le flux solaire incident, ce qui a pour effet de refroidir la surface. Lors de la dernière grande éruption du mont Pinatubo en 1991, un tel refroidissement de 0,5 °C a été observé sur une grande partie de la planète. Mais ces effets ne survivent à l'éruption que pendant un à deux ans.

Les activités humaines peuvent-elles modifier le climat ?

Les activités humaines ont depuis le début de l'ère industrielle ajouté à ces causes naturelles de nouvelles causes de variation liées au changement de la composition de l'atmosphère qu'elles induisent. L'observation systématique de l'atmosphère montre de façon incontestable une augmentation, depuis un peu plus d'un siècle, de sa teneur en gaz à effet de serre : gaz carbonique (CO_2), méthane (CH_4), oxyde nitreux (N_2O).

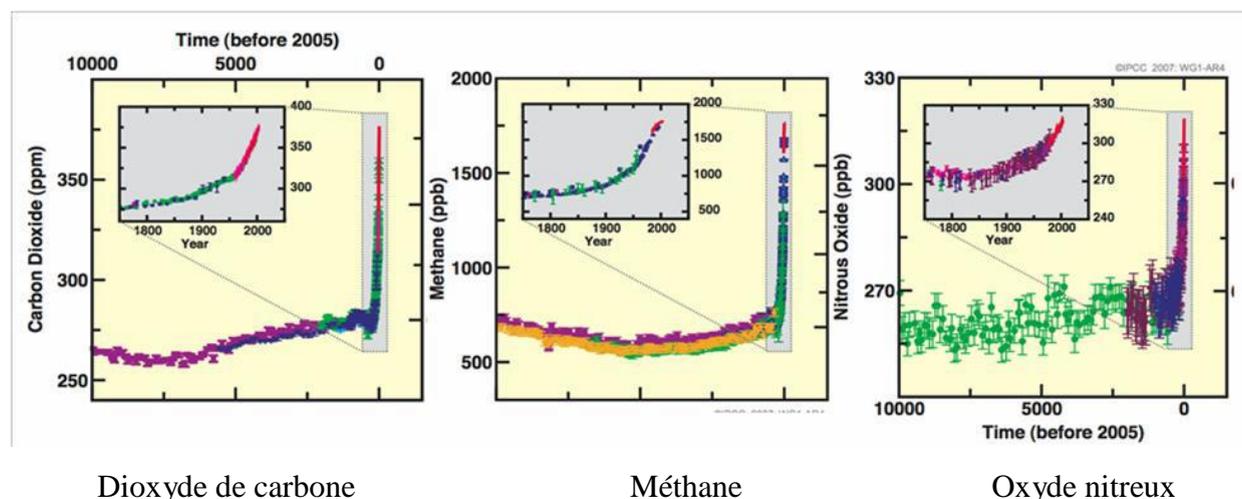


Figure 3 – Evolution des concentrations des principaux gaz à effet de serre influencés par les activités humaines au cours des 10000 dernières années (GIEC).

C'est ainsi, pour se limiter au plus important d'entre eux, que le nombre de molécules de CO₂ qu'on trouve dans un million de molécules d'air est passé de 280 en 1850, avant le début de l'ère industrielle à plus de 400 aujourd'hui (Figure 3). On dit 280 ou 400 ppm, ppm étant l'abréviation de parties par million en volume. Cette augmentation annuelle de la concentration ne représente qu'un peu moins de la moitié de ce qu'elle serait si l'atmosphère avait retenu la totalité du gaz carbonique que l'humanité a produit en brûlant du charbon, du pétrole et du gaz naturel. L'autre moitié du gaz carbonique produit est absorbée par l'océan et la biosphère (Figure 4). Il est donc certain que l'utilisation des combustibles fossiles est responsable du changement de composition atmosphérique observé. Cela est confirmé par la diminution observée, bien que très faible en valeur relative, de la concentration d'oxygène, l'oxygène nécessaire à la fabrication du CO₂ additionnel ayant été prélevé dans l'atmosphère. Enfin, des mesures de composition isotopique du carbone atmosphérique viennent compléter le faisceau de mesures qui permettent d'attribuer de façon certaine le changement de la composition atmosphérique aux activités humaines.

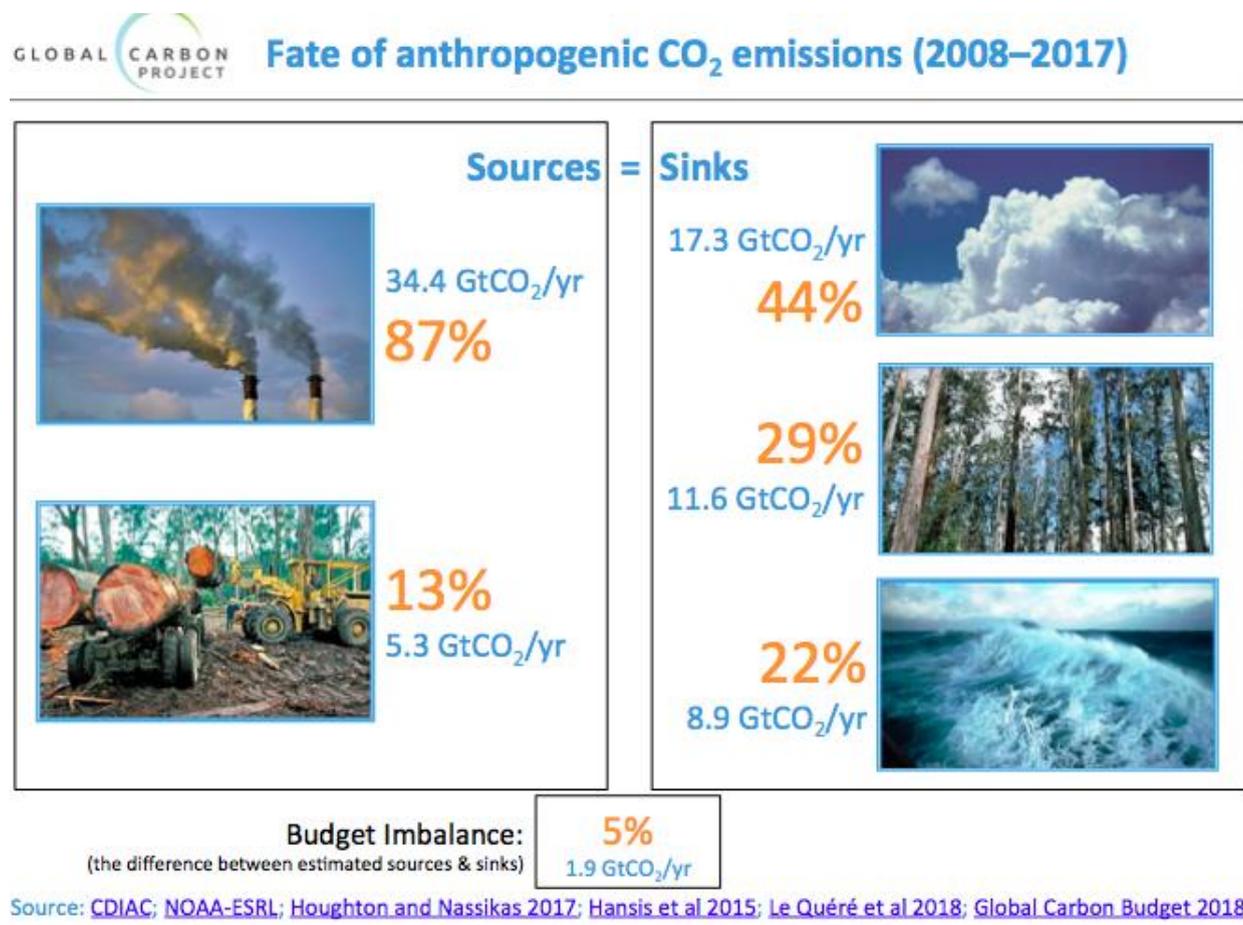


Figure 4 : Sources (combustibles fossiles et cimenteries, déforestation) et puits (végétation et océan) de CO₂ au cours des dix dernières années 44% (Global Carbon Project)

A-t-on observé récemment un changement du climat ?

Svante Arrhénius en 1896 avait prévu que les activités industrielles provoqueraient l'augmentation aujourd'hui observée de la teneur en gaz à effet de serre et que cela se traduirait par un réchauffement global de la planète. On a effectivement observé une augmentation de la température moyenne du globe estimée à $0,8^{\circ}$ (à plus ou moins $0,2^{\circ}$ près), depuis un peu plus d'un siècle. La température moyenne mondiale ne peut être obtenue qu'en composant l'ensemble des observations ponctuelles de la température locale, disponibles sur l'ensemble du globe terrestre. Elle n'est pas directement mesurable et comme toute moyenne, elle ne présente qu'un aspect de la réalité. La difficulté principale rencontrée dans sa détermination est l'absence de mesures de température dans certaines régions du maillage mondial mis en place. Les divers auteurs traitent ce problème de façon différente, ce qui explique de petites variations dans les résultats obtenus. Certains ne tiennent pas compte de ces régions, ce qui revient à leur attribuer une valeur égale à la moyenne mondiale. D'autres pensent plus représentatif de la réalité d'attribuer à ces régions la moyenne des régions adjacentes, en faisant remarquer qu'il existe généralement une corrélation forte entre les variations de régions voisines. Les résultats obtenus sont peu différents, mais peuvent conduire à des modifications de détail du classement des années par ordre de température croissante. Par contre, à condition de conserver la même méthode de traitement des observations, chacune de ces approximations d'une vraie moyenne mondiale est un paramètre dont l'évolution traduit de façon synthétique la tendance générale des variations des températures observées sur l'ensemble de la Terre.

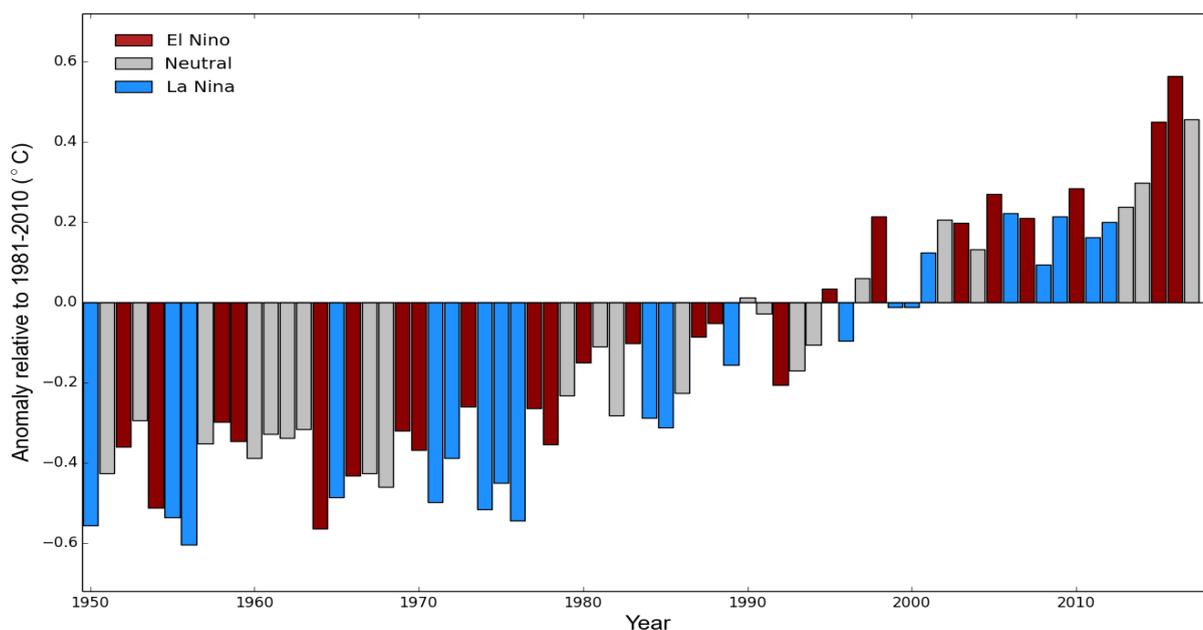


Figure 5 : Variations des températures moyennes annuelles depuis 1950 (OMM)

Le record absolu est attribué à 2016 avec $1,2^{\circ}\text{C}$ de plus qu'à l'époque préindustrielle (Figure 5). Les quatre dernières années ont été les quatre années les plus chaudes jamais enregistrées et les 22 dernières années comptent les 20 années les plus chaudes. Bien d'autres indicateurs que la température globale confirment le réchauffement mondial : mesures locales de la température, fonte des glaciers sur tous les continents et à toutes les latitudes, diminution de l'enneigement dans l'hémisphère nord, mesure de l'élévation du niveau de la mer (3 mm par an) due pour partie à la dilatation de l'eau dont la température augmente et pour partie à la fonte des glaces continentales, changements observés de systèmes physiques et biologiques cohérents avec les augmentations locales de température.

Ce réchauffement n'est pas uniformément réparti ; les océans possèdent notamment une grande capacité thermique et leur effet régulateur sur les températures est bien connu. Ils se réchauffent donc moins que les continents. Ces derniers connaissent donc une augmentation de leur température supérieure à celle de la moyenne mondiale. On observe en outre que l'accroissement de la température est particulièrement fort dans les régions les plus septentrionales d'Amérique, d'Europe et d'Asie. Ce résultat qui peut paraître surprenant est dû au fait que la turbulence de l'atmosphère diminue quand la latitude croît et que la fonte de la glace et de la neige qui sont des surfaces blanches réfléchissantes, diminue la part de l'énergie solaire réfléchi vers l'espace. Les précipitations sont également affectées par ce changement climatique, certaines régions étant plus arrosées et d'autres moins.

L'assertion que « la température a cessé de croître depuis le début du siècle » a été très fréquemment mise en avant jusqu'au début des années 2010. En effet l'année 1998, caractérisée par un événement El Nino très marqué, n'a été surpassée que de très peu par 2005 puis 2010 (Figure 5). Certes la température moyenne n'a alors que légèrement augmenté, de 0,05°C par décennie entre 1998 et 2012, mais 2 à 3 fois moins rapidement que depuis le milieu du 20^{ème} siècle. Ces fluctuations à des échelles de temps d'une décennie ou un peu plus peuvent être attribuées à diverses causes, la dynamique des masses d'eau océanique figurant au premier rang d'entre elles. En effet, lorsqu'on accroît la quantité de GES dans l'atmosphère, la Terre reçoit plus d'énergie qu'elle n'en envoie dans l'espace et sa température augmente jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint. L'océan, à cause de sa grande capacité thermique, a ainsi absorbé plus de 90 % de cet excès d'énergie et il suffit que des mouvements verticaux fassent pénétrer plus ou moins profondément ce réchauffement pour que sa température de surface en soit affectée. En fait le réchauffement a repris de façon très marquée depuis 2013. Le record de 2016 est également associé à un phénomène El Nino, mais 2017 est l'année la plus chaude de celles auxquelles ce phénomène n'a pas contribué.

En quoi consiste la modélisation numérique du climat ?

Les modèles climatiques simulent numériquement les processus physiques bien connus qui régissent la dynamique et la thermodynamique des fluides (océan et atmosphère) et les échanges d'énergie entre le rayonnement infrarouge et les molécules de certains gaz (des expériences en laboratoire et la mécanique quantique ont permis de déterminer avec précision les spectres d'absorption correspondants). Les ordinateurs sont des auxiliaires indispensables pour décrire ces phénomènes complexes obéissant à des équations non-linéaires dans un milieu stratifié verticalement et variable horizontalement. L'utilisation d'ordinateurs est parfois considérée comme introduisant un doute sous l'argument fallacieux que certaines modélisations numériques, dans d'autres domaines, ont conduit à des résultats démentis par l'expérience. Or dans tous les cas, ce n'est pas l'ordinateur qui est responsable des succès et des échecs. Ce qui importe, c'est la bonne connaissance des phénomènes qu'on se propose de reproduire numériquement. Les résultats des modélisations du climat sont cependant affectés d'incertitudes, liées pour l'essentiel à l'impossibilité pratique de simuler, dans des temps de calcul réalistes, les phénomènes de faible échelle spatiale (inférieure à 100 km). On est donc conduit à introduire des paramètres les décrivant de façon empirique. L'incertitude sur les résultats est évaluée en comparant la sortie des modèles pour les diverses paramétrisations envisageables. C'est ainsi que l'augmentation de la température moyenne mondiale provoquée par un doublement de la concentration des gaz à effet de serre est estimée comme étant dans la fourchette 2 à 4,5°C. La validation des modèles climatiques repose sur leur capacité à reproduire les phénomènes climatologiques observés et les évolutions passées du climat.

Il est parfois reproché aux modèles de « négliger le rôle de la vapeur d'eau alors qu'il est essentiel ». Ce reproche est totalement infondé. Il est vrai que la vapeur d'eau est le plus efficace des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère. Son action est responsable de 60% de « l'effet de

serre » naturel sans lequel la Terre connaîtrait une température d'une trentaine de degrés inférieure à ce qu'elle est. Par contre, l'injection de vapeur d'eau dans l'atmosphère est sans effet durable sur la concentration de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, dans la mesure où sa durée de résidence dans l'atmosphère n'est que de une à deux semaines. Cette injection ne modifie donc pas le climat. Par contre, la durée de vie atmosphérique du CO₂ est supérieure à un siècle et sa concentration dans l'atmosphère est modifiée durablement par les rejets humains qui peuvent donc induire une évolution du climat. Si la vapeur d'eau n'est pas directement responsable du changement climatique, elle y joue cependant un rôle : l'augmentation de la température provoque un accroissement de sa concentration dans l'atmosphère qui provoque un réchauffement complémentaire et crée une boucle de réaction amplificatrice que les modèles prennent en compte. Cette augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique a été effectivement observée au cours des vingt dernières années.

Les modèles numériques reproduisent-ils les observations récentes ?

L'observation d'une augmentation de la température moyenne mondiale est qualitativement en accord avec le changement de composition observé de l'atmosphère. Grâce aux modèles numériques de simulation du climat, il est possible d'examiner si les réchauffements observés sont quantitativement cohérents avec les résultats des modèles. Lorsque ces derniers prennent en compte la totalité des phénomènes connus d'origine naturelle ou humaine, leurs résultats sont en accord satisfaisant avec les observations qu'il s'agisse de la température moyenne mondiale, de la température moyenne des continents, et du contenu thermique des océans. Bien que les sources d'erreur croissent lorsqu'on s'intéresse à des régions plus localisées, l'accord reste significatif pour chacun des continents pris individuellement. Si on ne veut pas prendre en compte l'accroissement de l'effet de serre dû aux activités humaines, le désaccord est flagrant entre les observations et les résultats de ces modélisations dans lesquelles on a délibérément ignoré les changements de transfert d'énergie induits par la présence accrue de gaz à effet de serre entre les molécules de ces gaz et le rayonnement infrarouge (Figure 6). Autrement dit, les phénomènes naturels n'expliquent pas les observations récentes.

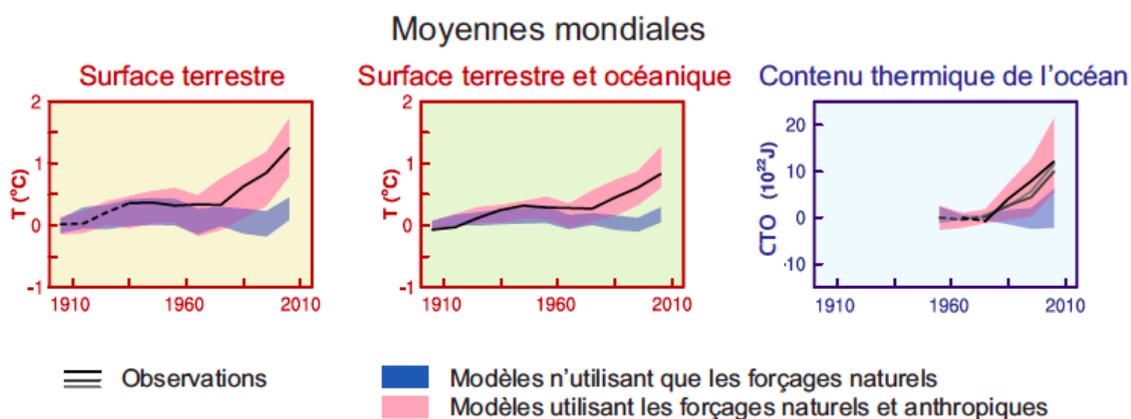


Figure 6 – Changements, par rapport à la période 1880-1919, de la température de l'air à la surface de la Terre, à l'échelle mondiale et continentale et du contenu thermique de l'océan par rapport à la période 1960-1980. Les bandes bleues correspondent à des simulations ne prenant en compte que les phénomènes naturels et les bandes rouges à la fois l'effet des phénomènes naturels et des activités humaines (GIEC).

En particulier, les variations du rayonnement solaire total, observées par satellite, sont insuffisantes pour expliquer le réchauffement observé et ceux qui soutiennent que les variations du rayonnement solaire jouent un rôle plus important que celui de la composition atmosphérique sont contraints de postuler des phénomènes d'amplification qui restent à évaluer.

Pour l'instant, les objections à cette thèse sont triples. Premièrement, l'effet de serre lié au changement de la composition de l'atmosphère suffit à expliquer quantitativement les observations climatiques et un effet plus important du soleil devrait conduire à un réchauffement plus important que celui qui prévaut. Deuxièmement, le cycle de 11 ans du soleil est beaucoup plus important que ses variations à l'échelle de quelques décennies et devrait donc se traduire par une périodicité marquée de 11 ans dans les variations du climat. On ne l'observe pas. Enfin, l'accroissement de la température observé diminue avec l'altitude et fait même place à une diminution au niveau de la stratosphère. Cette variation avec l'altitude ne peut être expliquée par une variation du rayonnement solaire, alors qu'elle est prédite par les modèles qui simulent la modification du transfert de rayonnement provoquée par l'augmentation de la concentration des gaz absorbant le rayonnement infrarouge. En particulier, dans la basse stratosphère, la température croît avec l'altitude à cause de l'absorption par l'ozone du rayonnement ultraviolet du soleil et le rayonnement du CO₂ devient essentiellement une perte locale d'énergie dont l'importance accrue explique le refroidissement observé.

Peut-on estimer la part du réchauffement liée à des causes naturelles et celle résultant des activités humaines ?

Les contributions liées aux activités humaines, et celles résultant de forçages naturels, ont été évaluées sur la période 1951-2010 (Figure 7).

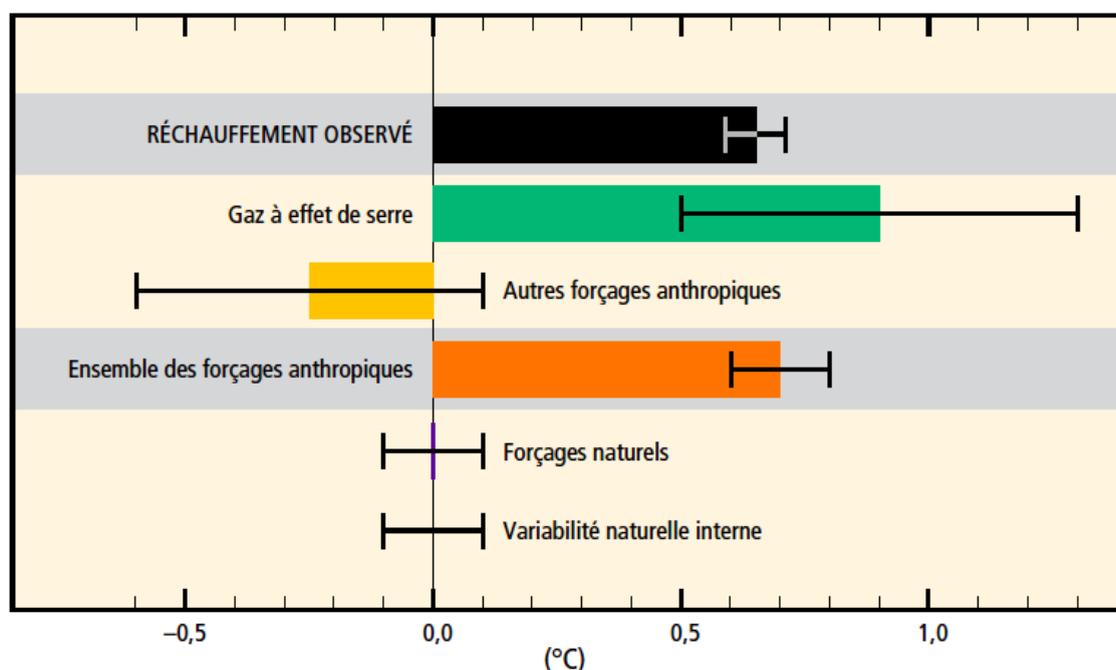


Figure 7 : Contributions liées aux activités humaines (gaz à effet de serre et autres forçages anthropiques) et celles résultant de forçages naturels, sur la période 1951-2010 (GIEC)

Sur cette période la contribution des GES a été comprise entre 0,5 et 1,3°C et celle des autres forçages anthropiques liée essentiellement aux aérosols de pollution, entre - 0,6 et 0,1°C, si bien que l'ensemble des forçages anthropiques est susceptible d'expliquer le réchauffement de 0,6°C observé durant cette période (Figure 7). A l'inverse la contribution des forçages naturels – activité solaire et volcanique – et celle de la variabilité naturelle, n'excèdent pas 0,1°C. Il est donc extrêmement probable que l'influence de l'homme est la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du 20^{ème} siècle.

Ajoutons que l'existence de changements climatiques au cours des âges géologiques n'est en rien

incompatible avec celle d'un réchauffement actuel provoqué par les activités humaines et susceptible d'affecter sérieusement l'humanité du 21^{ème} siècle. Certes, la planète Terre a connu des climats plus chauds et son existence n'est pas menacée par le changement climatique anthropique. En revanche, les 7 à 9 milliards d'individus qui l'habitent en verront leur existence perturbée d'autant plus que le réchauffement sera important.

Peut-on estimer les changements climatiques qui se produiront au cours du 21^{ème} siècle ?

Seuls les modèles numériques simulant les phénomènes réels permettent d'estimer les modifications que les émissions anthropiques pourraient faire subir au climat mondial au cours des décennies à venir. Encore faut-il pour cela les alimenter par une évolution de ces émissions. Les émissions de gaz à effet de serre dépendent de facteurs humains, par essence imprévisibles, tels que démographie, vitesse de développement économique, nature des échanges, comportements... On est donc conduit à développer des scénarios qui pavent le domaine du possible. Pour le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, la communauté scientifique a défini un ensemble de quatre scénarios, appelés « Évolutions représentatives des concentrations » (Representative Concentration Pathways ou RCP en anglais). Ces RCP permettent, en particulier, de faire appel à des scénarios correspondant à des politiques volontaristes de réduction des émissions qui sont maintenant sérieusement envisagées. Ils sont identifiés par leur forçage radiatif total approximatif pour l'année 2100 par rapport à l'an 1750, contiennent un scénario d'atténuation conduisant à un niveau de forçage très bas (RCP2.6), deux scénarios de stabilisation (RCP4.5 et RCP6.0) et un scénario aux émissions de gaz à effet de serre très élevées (RCP8.5). Ces quatre scénarios ont été choisis parmi ceux qui intègrent, de façon cohérente, les évolutions du monde socio-économique, des émissions, des concentrations, du climat et de leurs conséquences. L'évolution la plus modérée des concentrations de GES et donc le forçage le plus faible correspond aux politiques les plus volontaristes des réductions d'émission. L'autre extrême correspond au maximum des émissions envisagées dans la littérature. Les deux autres RCP correspondent à des hypothèses intermédiaires. Les quatre RCP correspondent pour 2100 à des concentrations en CO₂ respectivement de 478, 630, 800 et 1300 ppm. Elles ne sont ni des prévisions ni des recommandations politiques. Leur seule ambition est d'être un outil de travail pour les scientifiques leur permettant d'explorer la gamme des évolutions possibles du climat et de ses conséquences, ainsi que la possibilité de respecter les évolutions des concentrations qu'elles supposent. Chaque RCP est utilisé en parallèle comme une hypothèse de départ pour les modélisations du climat et comme un objectif pour les mesures conduisant à une telle évolution des concentrations.

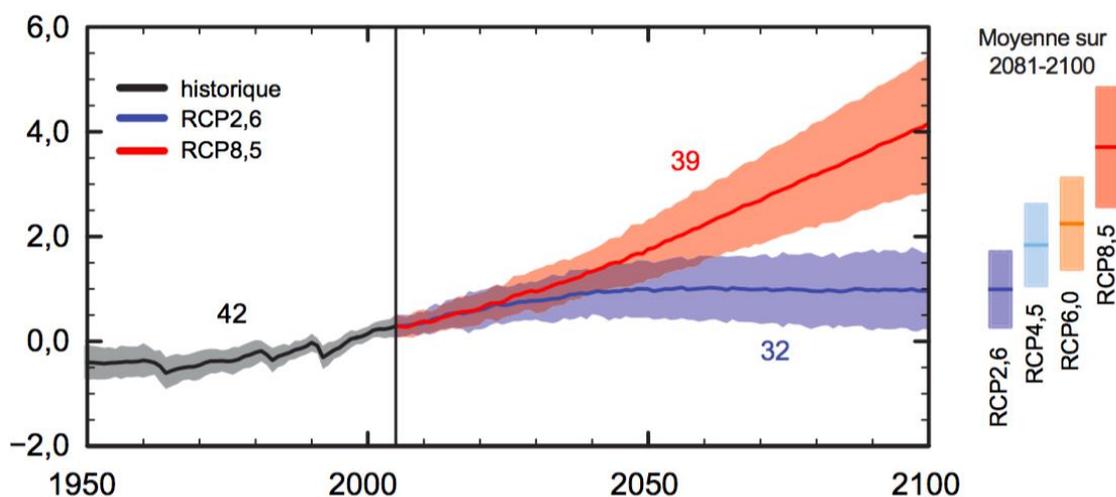


Figure 8 : Evolution de la température annuelle moyenne du globe par rapport à la période 1986-2005 pour les scénarios RCP2.6 (en bleu) et RCP8.5 (en rouge), avec (en noir) les

températures observées entre 1950 et 2005 et, à droite, une indication des incertitudes (GIEC).

Le rythme de réchauffement dépend avant tout du scénario mais pour un scénario donné il y a des incertitudes dans les projections (Figure 8). Le résultat est une augmentation de la température mondiale en 2100 autour de 1°C (RCP2.6) et de 4°C (RCP8.5). Ces valeurs numériques peuvent apparaître faibles si on les compare aux variations vécues au quotidien. Pour en mesurer l'ampleur, il convient de rappeler qu'il s'agit de moyennes mondiales et qu'une Terre au dernier maximum glaciaire il y a 20000 ans avec 3 km de glace d'épaisseur sur le nord de l'Europe ne diffère de l'actuelle que par 5 à 6°C de température moyenne. Le réchauffement vers lequel nous conduirait un scénario émetteur d'ici la fin du siècle est du même ordre mais à un rythme plus de 50 fois plus rapide et un réchauffement qui se poursuivrait au siècle prochain et au-delà.

La température moyenne ne suffit évidemment pas à caractériser le climat et des variations géographiques importantes sont simulées. Pour des raisons déjà exposées, l'augmentation de température est plus importante sur les continents et de l'ordre du double de la moyenne dans celle des régions septentrionales (Figure 9). En outre, les précipitations sont affectées, les modèles simulant tous leur augmentation sur l'Europe du nord surtout en été et leur diminution sur le pourtour méditerranéen surtout en été (Figure 9).

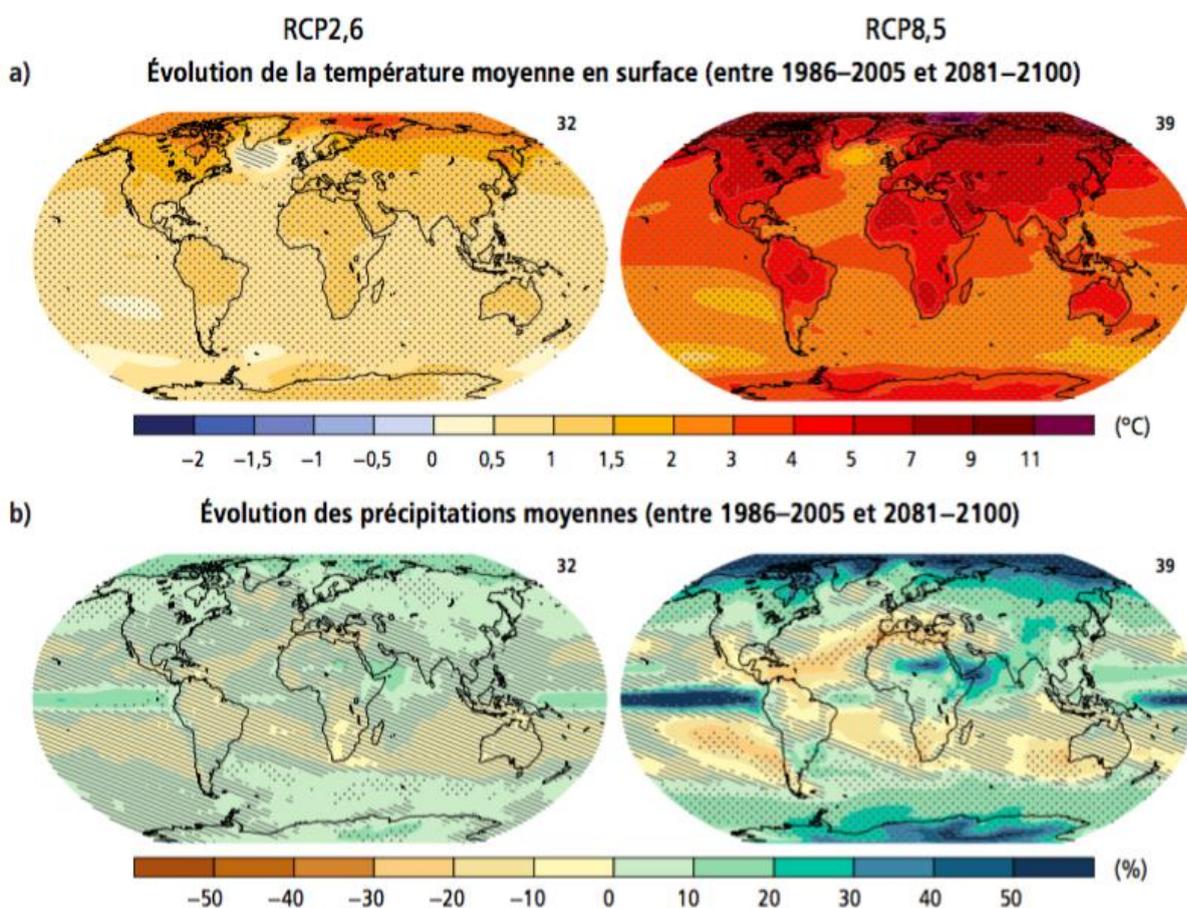


Figure 9 – Répartition mondiale de l'augmentation de température (a) et des variations de précipitation (b) pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 (GIEC)

Les conséquences du changement climatiques peuvent-elles être graves ?

Les changements climatiques affectent déjà des systèmes physiques et biologiques sur tous les continents : retrait des glaciers de montagne, risque de chutes de rochers et de glaces, glissements de terrain, réduction de l'étendue et de l'épaisseur de la glace de mer arctique en été, floraisons précoces et périodes plus longues de croissance des plantes et de reproduction des animaux, vendanges plus précoces, migration en latitude et en altitude des plantes, des poissons, des oiseaux, des insectes, etc. Il est quasi-impossible que la cohérence entre les changements observés et le changement climatique actuel soit due au hasard.

Les conséquences du réchauffement climatique seront d'autant plus importantes que celui-ci sera élevé comme l'illustrent celles envisagées dans le cas du scénario émetteur (RCP8.5). L'Océan Arctique deviendrait presque libre de glace en septembre au moment où l'extension de la banquise est minimale et les récifs coralliens soumis au réchauffement des eaux océaniques et à leur acidification seraient considérablement affectés. Tous les extrêmes climatiques, ou presque, deviendraient – avec un degré de confiance dépendant de l'événement considéré – plus fréquents ou/et plus intenses. C'est le cas des vagues de chaleur et, dans certaines régions, des sécheresses. Les événements de très fortes précipitations deviendraient probablement plus intenses et plus fréquents sur la plupart des régions continentales aux moyennes latitudes et dans les régions tropicales humides et une intensification des cyclones les plus violents est envisagée.

Ce réchauffement devrait provoquer une augmentation des déplacements de population et pourrait accroître indirectement les risques de conflits violents – guerres civiles, violences interethniques – en exacerbant les sources connues de conflits que sont la pauvreté et les chocs économiques. Une grande partie des espèces ferait face à un risque accru d'extinction. Dans les zones urbaines, le changement climatique devrait accroître les risques sur les personnes, les biens, les économies et les écosystèmes. Le changement climatique devrait aggraver les risques liés à la sécurité alimentaire aussi bien au niveau de la productivité de la pêche que de celle des principales cultures des régions tropicales et tempérées, blé, maïs, riz et soja. Un réchauffement supérieur à 4°C d'ici la fin du siècle, combinée à un accroissement de la demande alimentaire, présenterait des risques pour la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale. Jusqu'au milieu du siècle, le changement climatique exacerbera les problèmes de santé existants et devrait provoquer, sur l'ensemble du siècle, une détérioration de l'état de santé dans de nombreuses régions, en particulier dans les pays en développement à faible revenu. Il serait très difficile, voire impossible, aux populations mais aussi à la flore, à la faune, aux écosystèmes de s'y adapter.

De nombreux aspects du réchauffement climatique et de ses impacts continueront pendant des siècles, même si les émissions de gaz à effet de serre sont stoppées. Une grande partie du réchauffement lié au CO₂ est irréversible sur des périodes de plusieurs siècles à plusieurs millénaires. L'acidité de l'océan augmentera pendant des siècles si les émissions de CO₂ continuent et affectera fortement les écosystèmes marins. Il est pratiquement certain que l'étendue du pergélisol sera réduite dans les hautes latitudes du Nord. De façon claire, les risques de ces changements abrupts et/ou irréversibles augmentent avec le réchauffement. Ainsi, l'élévation du niveau de la mer pourrait atteindre près de un mètre en 2100. A plus longue échéance, la calotte du Groenland pourrait disparaître (en un millénaire ou plus si la température est maintenue au-dessus d'un certain seuil de réchauffement) ce qui correspond à 7 m d'élévation du niveau de la mer. Une contribution soudaine et irréversible des parties marines de la calotte Antarctique est possible mais ce risque est difficile à évaluer.

En résumé, les conséquences d'un scénario émetteur sont élevées ou très élevées quel que soit le

type d'impact considéré et il sera difficile, voire impossible, d'y faire face à la fin du siècle. En fait, le rapport spécial du GIEC sur « un réchauffement à 1,5°C » publié en octobre 2018 montre que chaque demi-degré compte : par rapport à 1,5°C, un climat à + 2°C ce sont des événements extrêmes plus intenses, une montée du niveau de la mer plus importante, une perte de biodiversité et des risques d'extinctions multipliés par deux, la disparition annoncée des récifs de coraux tropicaux et une chute plus importante du tonnage des pêcheries. Limiter le réchauffement à 1,5°C par rapport à 2°C pourrait réduire de plusieurs centaines de millions les personnes exposées aux risques climatiques et susceptibles de basculer dans la pauvreté.

Cette analyse de l'évolution des risques climatiques, justifie pleinement l'objectif de l'accord de Paris qui vise à « contenir le réchauffement nettement en-dessous de 2°C par rapport aux niveaux pré-industriels en poursuivant l'action pour le limiter à 1,5°C » notant que le climat des années 2010 est déjà environ 1°C plus chaud que celui de la période préindustrielle. Le climat sera différent de celui dans lequel nous vivons mais, dans un monde que nous espérons solidaire, il devrait être possible de s'y adapter au moins pour l'essentiel. Cette adaptation sera indispensable car ce climat sera significativement différent de celui dans lequel nous vivons aujourd'hui. Et en tout état de cause, le niveau de la mer continuera à s'élever au moins de 30 à 40 cm d'ici la fin du siècle, et plus par la suite.

A quelles conditions est-il possible de réduire l'ampleur du changement climatique ?

Réduire les émissions pour plafonner la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et limiter l'ampleur du changement climatique est un objectif explicitement mentionné dans l'article 2 de la convention sur le changement climatique, signée lors du sommet des chefs d'État à Rio en 1992, mais aucune valeur numérique n'y est donnée. La déclaration dont a pris acte la conférence des parties de Copenhague en 2009 a proposé un objectif chiffré - repris et précisé en 2015 dans l'accord de Paris - en fixant un plafonnement de l'augmentation de température moyenne à 2°, voire 1,5°, par rapport à l'ère préindustrielle.

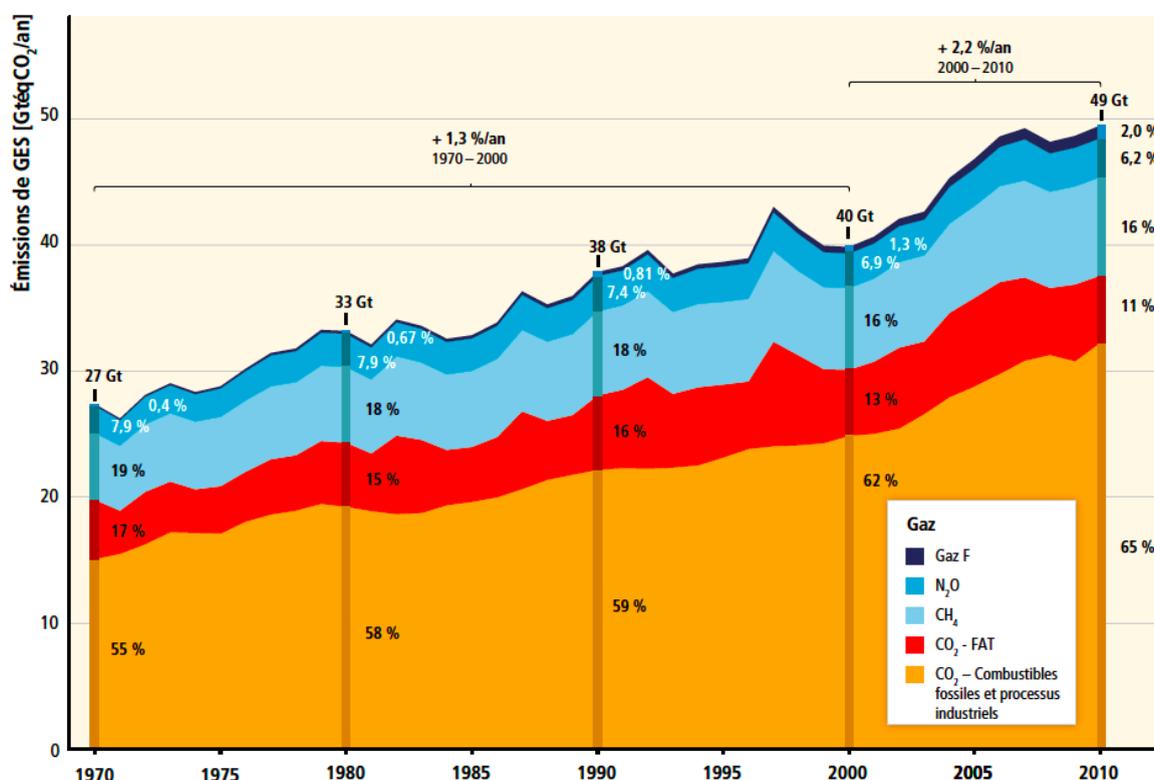


Figure 10 : Evolution des émissions de gaz à effet de serre de 1970 à 2010. Les émissions des composés autres que le CO₂, produit par les combustibles fossiles, les processus industriels

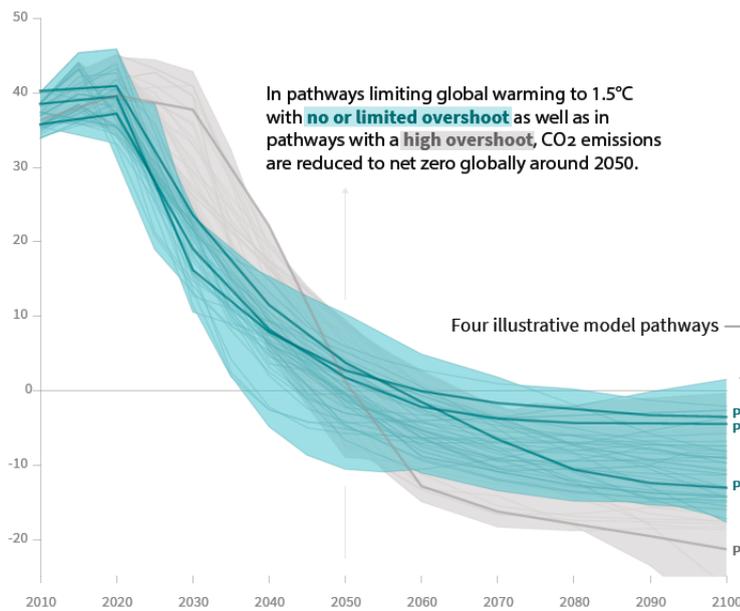
(fabrication du ciment) et la déforestation, sont exprimés en équivalent CO₂ (GIEC). La contribution CO₂-FAT correspond à la déforestation et autres utilisations des terres.

Limiter le réchauffement implique de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et ce de façon d'autant plus importante que la température à ne pas dépasser sera proche de celle que nous connaissons aujourd'hui. Ces émissions sont exprimées en équivalent CO₂ notion qui consiste à exprimer la moyenne au cours des années à venir du pouvoir de réchauffement de l'ensemble des gaz à effet de serre par la concentration du changement du seul CO₂ (le principal gaz à effet de serre) qui aurait conduit à la même valeur. Il est nécessaire de préciser le nombre d'années considérées, car tous les gaz n'ont pas la même durée de vie. Conventionnellement, en l'absence d'indication contraire, on se fixe 100 ans. Entre 1970 et 2010 (Figure 10) ces émissions ont augmenté de 27 à 49 milliards de tonnes d'équivalent CO₂ (GtCO_{2eq}) pour atteindre 53 GtCO_{2eq} en 2018 dont environ 80% de CO₂.

Le scénario émetteur correspond à l'émission d'environ 6100 milliards de tonnes de CO₂ (GtCO₂) d'ici à la fin du siècle, chiffre du même ordre que celui correspondant à l'utilisation des réserves de combustibles fossiles - conventionnels et non-conventionnels - qui peuvent être exploitées aux conditions techniques et économiques d'aujourd'hui (~ 5400 GtCO₂). Pour ce qui concerne les scénarios de stabilisation, c'est la quantité cumulée de CO₂ émis qui détermine largement le réchauffement lorsque cette stabilisation est atteinte, si bien qu'à un objectif donné correspond une quantité de CO₂ restant à émettre. Le cumul des émissions de CO₂ détermine dans une large mesure la moyenne mondiale du réchauffement en surface vers la fin du 21^{ème} siècle et au-delà. Ainsi, pour avoir de bonnes chances de rester en-dessous de 2 °C, l'ensemble des émissions de CO₂ liées aux activités humaines ne devrait pas dépasser 2900 GtCO₂. Environ 2200 GtCO₂ ont déjà été émises depuis la révolution industrielle si bien qu'au rythme actuel (42 GtCO₂/an), il reste moins de 20 ans d'émissions. Cela signifie qu'il faudrait ne pas extraire plus de 20 % des réserves aisément accessibles de pétrole, de gaz et de charbon. Dans l'hypothèse 1,5°C, ces chiffres sont de 10 à 15 ans pour les émissions et d'environ 10% pour la part des réserves qui pourrait être extraite.

Global total net CO₂ emissions

Billion tonnes of CO₂/yr



In pathways limiting global warming to 1.5°C with **no or limited overshoot** as well as in pathways with a **high overshoot**, CO₂ emissions are reduced to net zero globally around 2050.

Four illustrative model pathways

P1
P2
P3
P4

Timing of net zero CO₂

Line widths depict the 5-95th percentile and the 25-75th percentile of scenarios

Pathways limiting global warming to 1.5°C with no or low overshoot

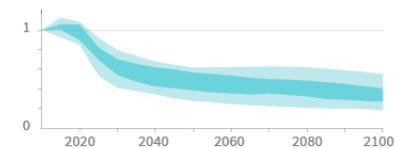
Pathways with high overshoot

Pathways limiting global warming below 2°C (Not shown above)

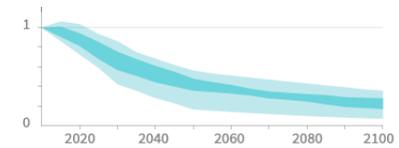
Non-CO₂ emissions relative to 2010

Emissions of non-CO₂ forcers are also reduced or limited in pathways limiting global warming to 1.5°C with **no or limited overshoot**, but they do not reach zero globally.

Methane emissions



Black carbon emissions



Nitrous oxide emissions

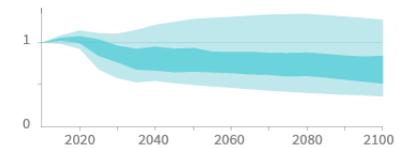


Figure 11 : Scénarios d'émission permettant de respecter l'objectif 1,5°C (GIEC)

Réduire dans de telles proportions les émissions est un défi redoutable. En particulier, 80 % de l'énergie commercialisée dans le monde sont produits à partir de combustibles fossiles. Les approches pour réduire les émissions correspondantes consistent tout d'abord à diminuer la quantité d'énergie nécessaire pour produire un service donné, comme une meilleure isolation thermique des bâtiments ou une amélioration des rendements de moteurs ou de processus. Une seconde piste consiste à produire l'énergie sans ou avec peu d'émissions de gaz à effet de serre, énergies renouvelables et énergie nucléaire. Une approche complémentaire, connue sous le nom de captage et stockage du CO₂, consiste - lorsque la taille de l'installation le justifie - à récupérer les gaz émis par la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz et d'éviter de les relâcher dans l'atmosphère en les stockant dans des structures souterraines adaptées. Il n'en reste pas moins que d'ici un petit nombre de siècles, tous les combustibles fossiles auront été épuisés et ne pourront plus nous alimenter en énergie à faible coût. Il nous faudra bien alors apprendre à nous en passer dans un contexte de tension. Le faire dès aujourd'hui progressivement permettra d'éviter une crise de l'énergie.

S'ils sont tenus, les engagements pris dans le cadre de l'accord de Paris devraient permettre d'éviter un scénario conduisant à la fin du siècle vers des réchauffements moyens de 4 à 5°C mais ils impliquent un réchauffement supérieur à 3°C à cette échéance. Il faut remonter très sérieusement l'ambition de cet accord pour avoir des chances d'en respecter les objectifs. Ainsi pour limiter le réchauffement à 1,5°C ce qui présente des avantages par rapport à 2°C, il faudrait de réduire les émissions mondiales de CO₂ de 45% en 2030 par rapport au niveau de 2010, et atteindre la neutralité carbone en 2050, tout en extrayant du CO₂ de l'atmosphère tout au long du 21^{ème} siècle (Figure 11) ; il faut également agir sur le méthane et l'oxyde nitreux. Dans le cas d'une stabilisation à 2°C, ces chiffres passent à 20% pour la réduction des émissions de CO₂ à horizon 2030 et vers 2075 pour la neutralité carbone. Ce n'est pas impossible mais demanderait des transitions sans précédent dans tous les aspects de la société.

