



Le changement climatique dû aux activités humaines

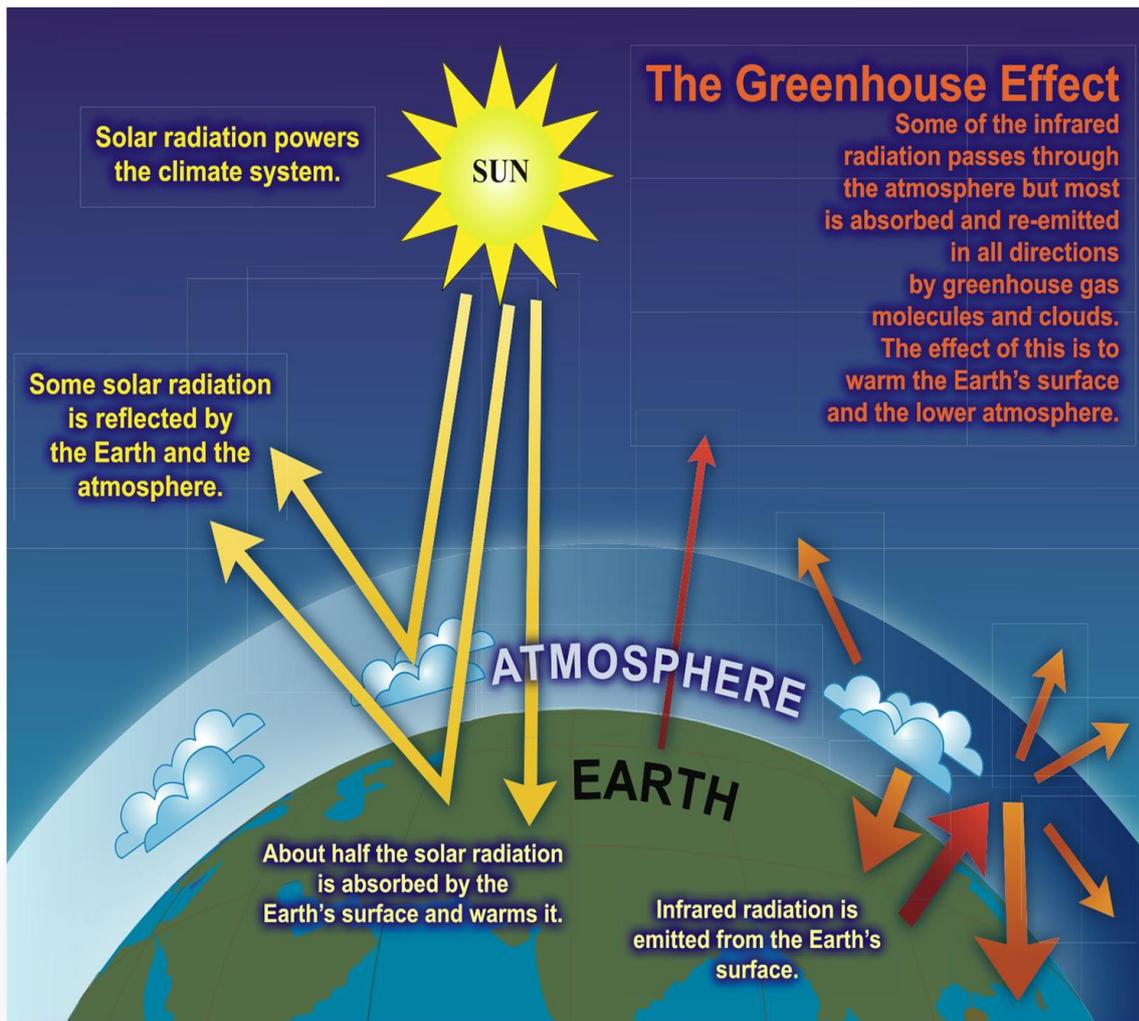
Michel Petit

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 et 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 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 gaz carbonique (CO₂) 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 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.



L'effet de serre

Figure 1 – Schéma du bilan énergétique de la surface du sol. L'effet de serre (en haut et à gauche de la figure) 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.

Y a-t-il une saturation de l'effet de serre ?

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 CO_2 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.

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 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 de l'angle et 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. Nous sommes depuis 10 000 ans dans une période interglaciaire, donc chaude.
- 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.

Les activités humaines peuvent-elles changer la composition de l'atmosphère ?

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 (CO₂), méthane, protoxyde d'azote.

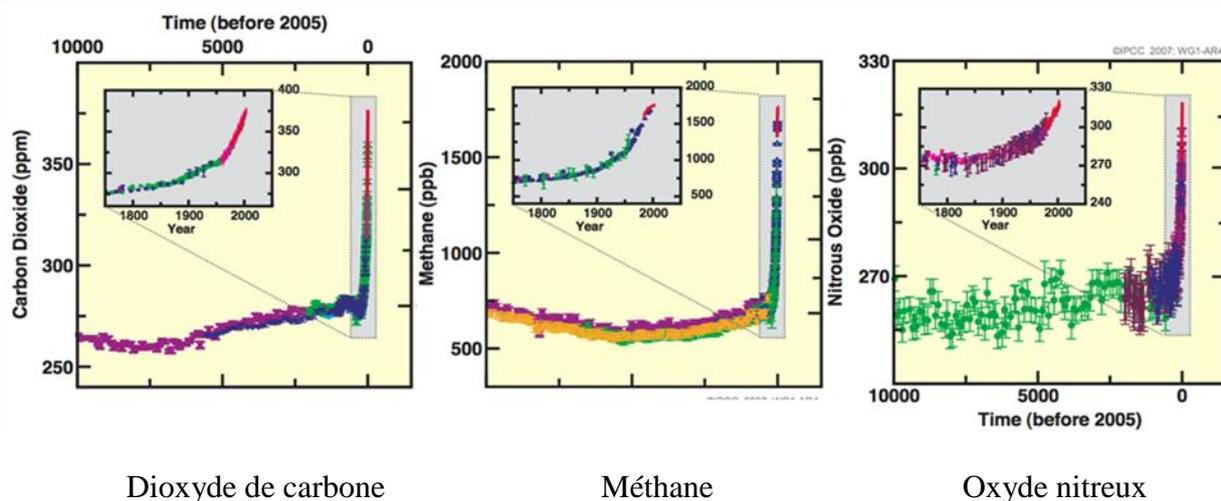


Figure 2 – Les concentrations actuelles des principaux gaz à effet de serre et leur taux de croissance sont sans précédent.

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 400 aujourd'hui. On dit 280 ou 400 ppm, ppm étant l'abréviation de parties par million en volume. Cette augmentation annuelle de la concentration ne représente à peu près que 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. Il est donc vraisemblable que l'utilisation des combustibles fossiles soit 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 d'arguments qui permettent d'attribuer de façon certaine le changement de la composition atmosphérique aux activités humaines.

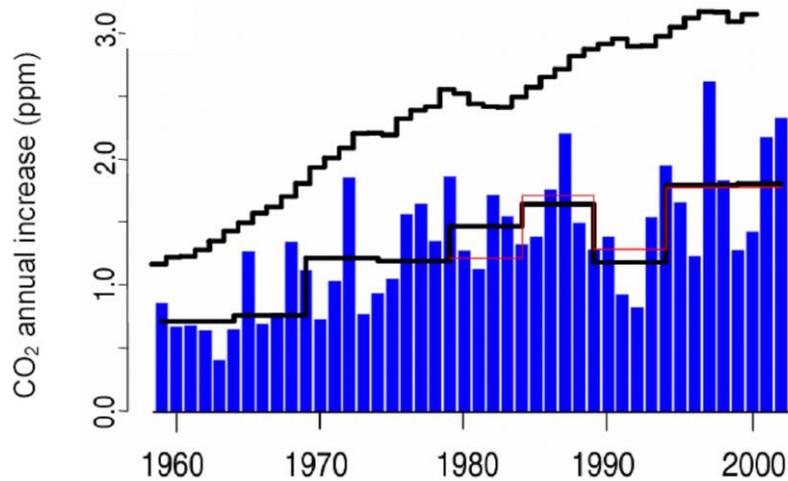


Figure 3 – Utilisation des combustibles fossiles et augmentation du gaz carbonique présent dans l’atmosphère, de 1959 à 2002. La courbe noire supérieure en marches d’escalier indique l’accroissement de la concentration du gaz carbonique atmosphérique qui aurait eu lieu si la totalité du gaz carbonique résultant de la combustion des combustibles fossiles était restée dans l’atmosphère où elle a été relâchée. Les colonnes bleues verticales indiquent l’augmentation annuelle effectivement observée de cette concentration. La moyenne sur 5 ans est fournie par les courbes noire et rouge qui traduisent les incertitudes sur cette moyenne.

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. Le record absolu peut ainsi être attribué soit à 1998 soit à 2005. 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. 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.

On lit parfois l'assertion que « la température a cessé de croître depuis le début du siècle » : Comme on vient de le voir, certains classements indiquent que le record absolu a été atteint en 1998, et que les températures moyennes annuelles ont été moins élevées depuis lors. Outre le fait que d'autres méthodes de calcul de la température moyenne attribuent le record à 2005, les variations aléatoires d'une année à la suivante interdisent toute conclusion basée sur une année seulement et seules les moyennes sur plusieurs années ont un sens. L'étude de l'évolution de la température la plus récente, publiée en janvier 2010 par la NASA, conclut que la dernière décennie a été la plus chaude jamais enregistrée, la dernière année 2009 se classant au 3^e rang après 2005 et 1998. 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 figure 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. Or, c'est elle qui compte pour la dynamique du climat en général.

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 100km) 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 1,5° à 4,5°. La validation des modèles climatiques repose sur leur capacité à reproduire les phénomènes climatiques 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, de la température moyenne 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.

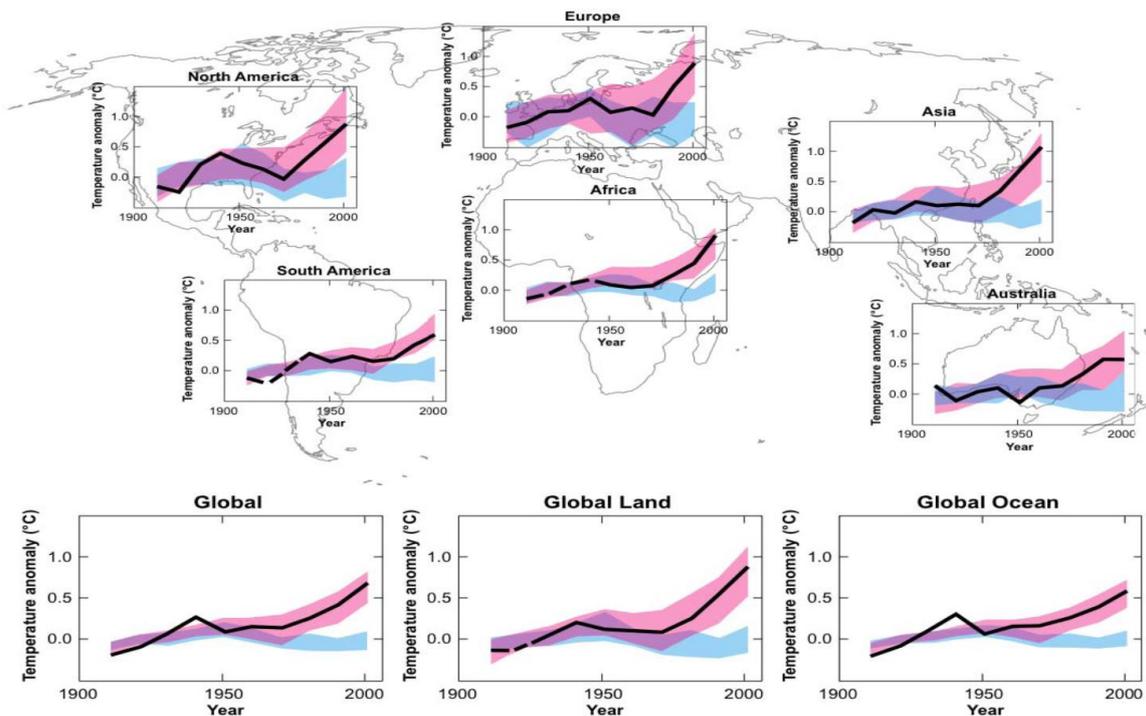


Figure 4 – Changements de la température de l’air à la surface de la Terre, à l’échelle mondiale et continentale de 1906 à 2005, par rapport à sa valeur moyenne pour la période 1901-1950, comparés avec les simulations des modèles numériques. Les lignes noires indiquent les changements observés et sont pointillées lorsque les données disponibles couvrent moins de 50 % de la surface concernée. Les bandes bleues correspondent à des simulations ne prenant en compte que les phénomènes naturels et les bandes rouges à des simulations prenant en compte à la fois l’effet des phénomènes naturels et celui des phénomènes résultant des activités humaines. Les trois panneaux du bas correspondent de gauche à droite à la moyenne mondiale, à la moyenne des terres émergées et à la moyenne des océans.

Par contre, le désaccord est flagrant entre les observations et les résultats des 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. Autrement dit, les phénomènes naturels n’expliquent pas les observations récentes.

En particulier, les variations observées par satellite du rayonnement solaire total 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. 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 les changements climatiques qui se produiront au cours du XXI^e 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.

Quelle sera l'évolution du climat en l'absence d'actions volontaristes ?

La première famille de scénarios qui a été utilisée repose sur l'absence d'actions volontaristes visant à réduire l'ampleur du changement climatique. La tendance actuelle est une croissance rapide des émissions, en particulier de celles de CO₂, 80 % de l'énergie commercialisée étant produite grâce aux combustibles fossiles. On est donc conduit à envisager en 2100 des concentrations de CO₂ pouvant atteindre 1000 ppm, soit plus de 3,5 fois la concentration préindustrielle.

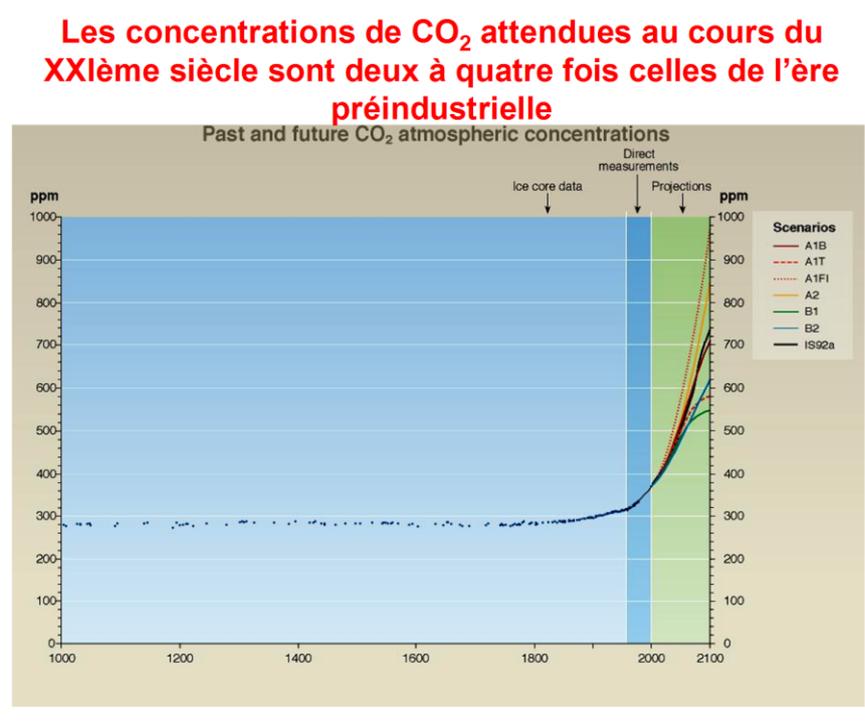


Figure 5 – Scénarios d'évolution de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère, en l'absence de toute action volontariste pour réduire les émissions.

L'incertitude propre aux modèles, évoquée ci-dessus, s'ajoute à la difficulté de choisir le bon scénario d'évolution des émissions. Le résultat est une augmentation de la température mondiale en 2100 allant de 1 à 6 °. 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 en période glaciaire avec 3 km de

glace d'épaisseur sur le nord de l'Europe ne diffère de l'actuelle que par 6° de la température moyenne.

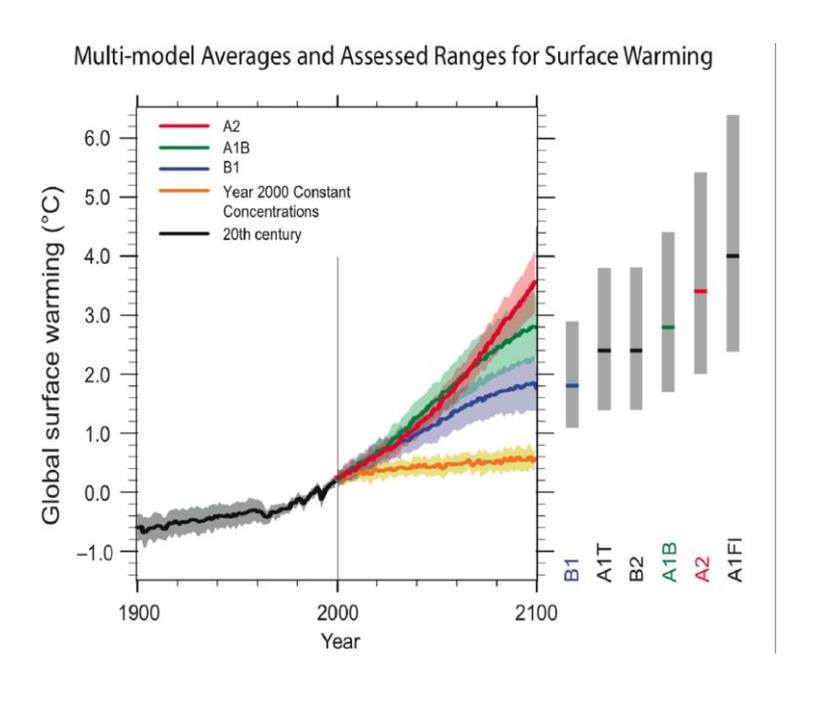


Figure 6 – Augmentation de la température moyenne de surface par rapport à la période 1980-99. Les courbes colorées montrent, en continuité avec les simulations relatives au XX^e siècle les variations pour les scénarios A2, A1B et B1, ainsi que pour un scénario irréaliste où les concentrations seraient restées constantes à leur valeur de 2000 et qui présente l'intérêt de montrer le réchauffement auquel nous condamnons les émissions passées. Les zones colorées donnent une indication de la dispersion des simulations. Dans les barres de droite, le trait horizontal indique la valeur la plus probable pour le scénario d'émissions considéré et l'étendue des barres indique la gamme des valeurs vraisemblables.

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 des continents est de l'ordre du double de la moyenne et celle des régions septentrionales le triple.

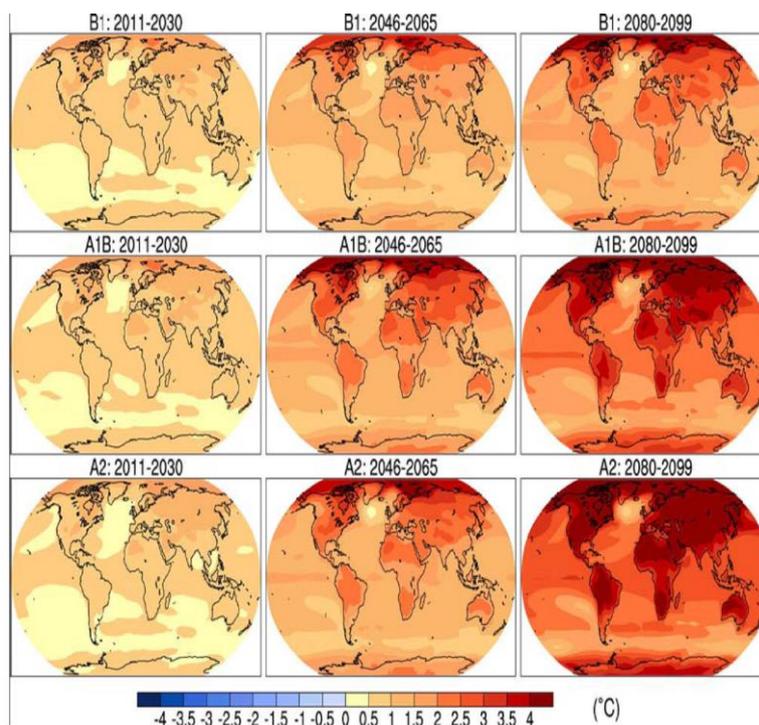


Figure 7 – Répartition mondiale de l'augmentation de température pour 3 scénarios (en lignes) et trois périodes (en colonnes).

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.

Projected Patterns of Precipitation Changes

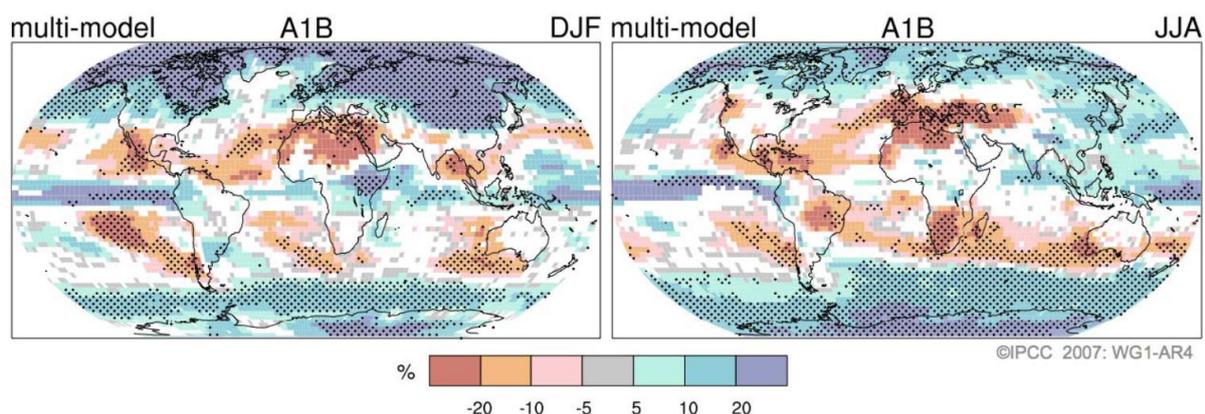


Figure 8 – Changements des précipitations en pourcentage pour la période 2090-2099, par rapport à 1980-1999. Ces valeurs correspondent à la moyenne des modélisations pour le scénario moyen d'émissions A1B pour les mois de décembre à février (à gauche) aux mois de juin à août (à droite). Les zones blanches sont celles où moins des deux tiers des modèles donnent un changement de même signe et les zones pointillées sont celles où plus de 90 % des modèles donnent des changements de même signe.

Peut-on envisager de limiter les émissions pour 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, préparée par 28 chefs d'État, dont a pris acte la conférence des parties de Copenhague en décembre 2009, a précisé cet objectif en donnant une valeur de 2° à l'augmentation admissible de la température moyenne mondiale. Elle ne comporte pas pour autant d'engagements concrets sur les limitations des émissions permettant d'atteindre ce résultat. La 21^e Conférence annuelle des parties à la Convention de Rio sur le climat, dite COP21 (d'après les initiales de son nom en anglais, Conference of Parties) doit se tenir en France début décembre 2015 ; elle s'est donné comme mission de traduire cet objectif des 2° en engagements concrets quant aux émissions de GES relâchées dans l'atmosphère.

Le quatrième rapport du Giec a fourni la gamme des températures mondiales moyennes que risque d'atteindre notre planète pour une valeur plafond de la concentration en CO₂ équivalent allant de 450 à 1 000 ppm. Cette notion de concentration en CO₂ équivalent 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.

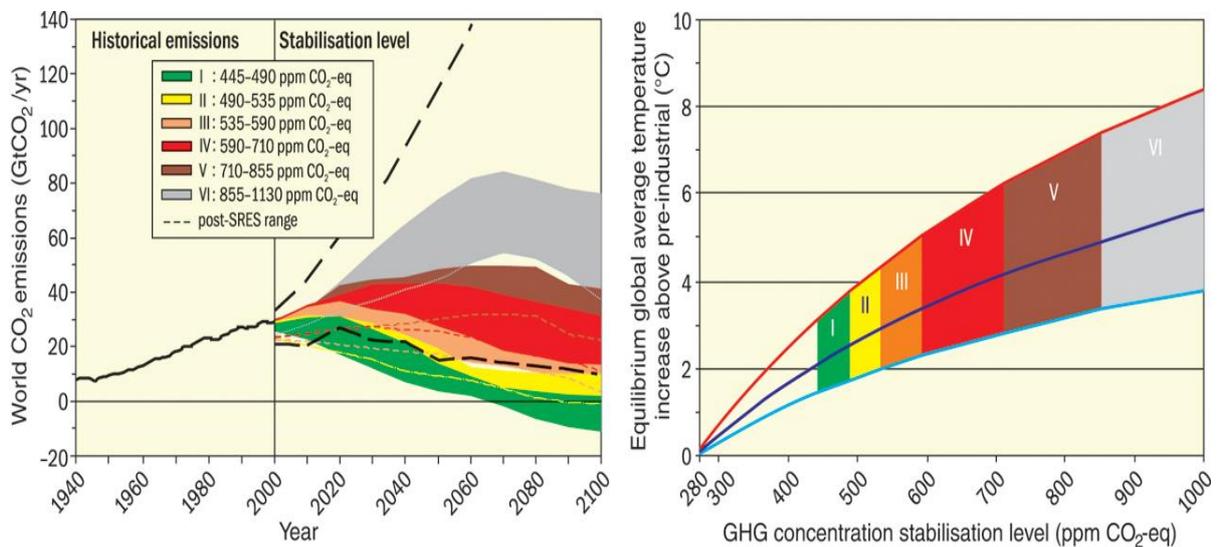


Figure 9 – Émissions mondiales de CO₂ entre 1940 et 2000 et fourchettes d'émissions correspondant aux diverses catégories de scénarios de stabilisation, pour la période 2000-2100 (à gauche). Écart probable entre la température moyenne du globe à l'équilibre et la température préindustrielle (à droite) en fonction du niveau de stabilisation de la concentration ; la hauteur de la bande correspond à l'incertitude des modèles quant à la sensibilité de la température à un changement de concentration.

Pour une concentration de 450 ppm équivalent (proche de la valeur actuelle avec une concentration du CO₂ seul de plus de 380 ppm), l'augmentation de température serait de 1,5 à 3° et pour 1 000 ppm de 4 à 8°. Pour limiter cette concentration au voisinage de 500 ppm équivalents, il faudrait que les émissions totales mondiales soient divisées par 2 d'ici à 2050. Les émissions françaises étant par habitant le double de la moyenne mondiale, il faudrait donc

que ces émissions soient divisées par un facteur 4, si on admet que chaque habitant de la planète a le droit d'émettre la même quantité de CO₂ équivalent.

En dépit de l'inconvénient que présente un changement des hypothèses pour la comparaison entre rapports successifs, il a été décidé, pour les modélisations récentes dont rend compte le cinquième rapport, de faire appel à de nouveaux scénarios appelés « Évolutions représentatives des concentrations » de GES (Representative Concentration Pathways ou RCP en anglais). En effet, il était nécessaire de remettre à jour des scénarios d'émission élaborés il y a plus de dix ans, et en particulier de faire appel à des scénarios correspondant à des politiques volontaristes de réduction des émissions qui sont maintenant sérieusement envisagées. Pour éviter de consacrer un grand nombre d'années à étudier la faisabilité de ces nouveaux scénarios avant que les climatologues puissent les utiliser, il a été décidé de choisir *a priori* un nombre limité de variations des concentrations au cours du XXI^e siècle, considérées comme représentatives des futurs possibles. Un travail important de chercheurs de toutes les disciplines concernées a permis de retenir quatre évolutions représentatives des concentrations de gaz à effet de serre ou RCP.

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 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 « Évolutions représentatives des concentrations » incluent tous les facteurs susceptibles d'influencer le climat. Elles correspondent pour 2100 à des concentrations en CO₂ équivalent de, respectivement, 478, 630, 800 et 1 300 ppm. Elles ne sont ni des prévisions ni des recommandations politiques. Leur seule ambition est d'être un outil de travail 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.

L'utilisation de modèles de climat prenant en compte le cycle du carbone permet de calculer la quantité de CO₂ qu'il faudrait émettre chaque année pour correspondre à un scénario donné. Dans le cas du scénario le moins émissif, qui est le seul permettant de limiter le réchauffement à 2 °C par rapport à la période préindustrielle avec une probabilité élevée, la moyenne des modèles indique que le cumul sur 2012-2100 des émissions de CO₂ liées à l'ensemble des activités humaines doit être proche de 990 Gt. Or, en supposant que les émissions mondiales futures se stabilisent au niveau de 2014¹, ce cumul pourrait dépasser 1000 Gt dès 2040. Ce résultat montre que les émissions actuelles de CO₂ ne sont pas compatibles avec le scénario le moins émissif. Les modèles précisent qu'elles doivent devenir pratiquement nulles à partir de 2050. En réalité, cela implique probablement de compenser les émissions de CO₂ de la première moitié du siècle, en ayant recours en fin de siècle à des solutions technologiques telles que le captage du CO₂ atmosphérique.

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

¹ Cette hypothèse est optimiste : les émissions mondiales de CO₂ ont augmenté en moyenne de 2 % par an depuis 1990. En 2014 elles s'établissaient à environ 37 Gt.

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. Une première manière d'atteindre cet objectif est, lorsque la taille de l'installation le justifie, de 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. Cette approche est connue sous le nom de captage et stockage du CO₂. Une deuxième manière est de faire appel à des procédés de production de l'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre : énergie hydraulique, énergie nucléaire (fission et fusion), énergies renouvelables.

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 changements climatiques redoutés à l'avenir vont être lourds de conséquences plus sérieuses sur les ressources en eau, certains écosystèmes naturels, la santé, l'agriculture, la sylviculture, les systèmes côtiers et les zones de basse altitude qui seront affectées par la montée du niveau de la mer sous le double effet de la dilatation d'une couche océanique superficielle d'épaisseur croissante et de l'apport d'eau résultant de la fonte des glaces de terre. Ce dernier phénomène pourrait entraîner des conséquences catastrophiques pour de nombreuses populations : la fonte de la calotte glaciaire du Groenland, possible d'ici quelques siècles ou peut-être moins encore, provoquerait une augmentation du niveau de la mer de plus de 5 mètres.

Un certain nombre de mesures d'adaptation sont envisageables pour atténuer les effets du changement climatique. Il semble évident que les pays développés auront des possibilités d'adaptation supérieures à celles des pays qui le sont moins. Il faut donc s'attendre à ce que le déséquilibre nord sud s'en trouve accentué, avec l'apparition d'émigrés climatiques et la multiplication des problèmes associés aux demandes massives de migration.

La Terre n'a-t-elle pas connu dans le passé des températures beaucoup plus élevées, sans dommages majeurs ?

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 XXI^e 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. L'analyse des cycles climatiques du dernier million d'années confirme qu'une augmentation de température provoque une augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂, notamment par suite du dégazage d'un océan plus chaud. Ce phénomène coexiste avec l'effet de serre, ce qui provoque une boucle de réaction amplificatrice et les phénomènes naturels ont tendance à amplifier le changement climatique et non à l'atténuer, comme certains optimismes infondés pourraient le laisser espérer.

L'épuisement des ressources mondiales en combustibles fossiles suffira-t-il à empêcher un bouleversement du climat ?

Il est vrai que les ressources du sous-sol sont en quantité finie et que les estimations des ressources en pétrole et en gaz naturel conduisent de façon convergente à penser que ces deux combustibles fossiles devraient commencer à se raréfier sérieusement d'ici quelques décennies. En revanche, le charbon est beaucoup plus abondant et ne sera vraisemblablement pas épuisé avant deux à trois siècles. Comme il produit plus de CO₂ par unité d'énergie que le pétrole et le gaz, l'exploitation de la totalité de ses gisements conduirait à une variation de la composition atmosphérique induisant un changement climatique plus important que celui qui sépare une ère glaciaire durant laquelle le nord de l'Europe était recouvert d'une couche de glace de 3 km d'épaisseur et le niveau de la mer inférieur de 120 m à l'actuel. Certes, le réchauffement provoqué par les émissions anthropiques nous éloignerait encore plus d'une ère glaciaire, mais cette comparaison avec les cycles climatiques naturels permet de mesurer l'ampleur des changements qui lui seraient associés. On peut en particulier redouter une montée de plusieurs mètres du niveau de la mer aux conséquences dramatiques.

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 et d'éviter à l'humanité tous les inconvénients d'un bouleversement brutal, en quelques décennies, du climat qui a permis son développement.