

Réchauffement climatique et effet de serre

par Michel PETIT, Conseil général des technologies de l'information
Académie des sciences

2007, l'année du quatrième rapport d'évaluation du GIEC

L'année 2007 est l'année de publication du quatrième rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec). Ce groupe, souvent cité sous son nom anglais de *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), a été fondé conjointement par l'organisation météorologique mondiale (OMM) et le programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Les trois précédents rapports datent de 1990, 1995, et 2001. Le rapport comprend trois tomes qui correspondent chacun à l'un des trois volets de la problématique du changement climatique provoqué par les activités humaines. Ce numéro des *Annales des Mines* reprend d'ailleurs la même division : le phénomène climatique lui-même, ses conséquences et ce que l'on peut faire pour s'y adapter et, enfin, comment en limiter l'ampleur. Le premier tome a été approuvé début février, le deuxième début avril et le troisième début mai. Un rapport de synthèse sera soumis à l'approbation d'une assemblée plénière à la mi-novembre. Rédigés par des scientifiques, ces rapports sont destinés à fournir aux décideurs l'état des connaissances scientifiques et techniques pertinentes, permettant d'éclairer les décisions qu'ils ont à prendre pour faire face au risque d'un changement climatique mondial. Ces décisions concernent à la fois les mesures permettant de se préparer à affronter un nouveau climat et celles visant à limiter l'amplitude du changement climatique à des valeurs « non dangereuses » pour paraphraser l'article 2 de la convention sur le changement climatique adoptée lors de la conférence des chefs d'Etat, à Rio, en 1992. La suite de cet article introductif présente les résultats du Giec et les figures citées en références sont empruntées à ses rapports.

Rappels sur la problématique de l'effet de serre provoqué par les activités humaines

Qu'est-ce qui détermine la température de la Terre ?

La Terre dispose d'un « chauffage central » dû à l'énergie émise lors de la désintégration des noyaux radioactifs qu'elle contient. Joseph Fourier, en 1826, a commencé par étudier ce transfert de chaleur, avant d'arriver à la conclusion qu'il était négligeable, par rapport à l'absorption

d'une partie de l'énergie du rayonnement solaire. A cause de cet apport de chaleur, la température de la Terre a tendance à augmenter jusqu'à ce qu'elle parvienne à évacuer une quantité d'énergie équivalente à celle qu'elle absorbe. Notre planète est isolée dans le vide interplanétaire et la seule manière dont elle puisse perdre de l'énergie est de rayonner dans l'espace, comme le fait le soleil, à ceci près que ce rayonnement est infrarouge et donc non visible. Sa température d'équilibre s'établit ainsi à une valeur qui lui permet d'émettre dans l'infrarouge une énergie égale à l'énergie solaire qu'elle absorbe.

L'effet de serre provoqué par les activités humaines

Le climat de la Terre évolue sous l'influence de causes naturelles qui ont toujours existé et continueront à jouer un rôle.

- ✓ 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 l'angle à l'intérieur duquel le Soleil éclaire notre planète 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 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). 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 et ne sauraient expliquer les variations du climat, au cours des dernières décennies.

- ✓ Un autre paramètre jouant un rôle sur la température au sol est l'activité volcanique. Lors des fortes éruptions, 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 sont de courte durée (1 à 2 ans). Ils représentent seulement une source de variabilité, mais ne peuvent expliquer la montée des températures que l'on observe de façon quasi continue au cours des 30 dernières années.

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. Une figure illustrant les variations des concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone, du méthane et du protoxyde d'azote depuis les 10 000 dernières années est consultable sur le site de l'Onerc (1), le cartouche inséré dans chaque panneau détaillant l'évolution au cours des deux derniers siècles. Ces trois gaz ont la propriété d'absorber le rayonnement infrarouge. L'augmentation observée de leur concentration a donc pour effet de diminuer le rayonnement que la Terre émet dans l'espace. Ainsi la température de la planète augmente puisqu'elle perd moins d'énergie qu'elle n'en reçoit. Un nouvel équilibre est atteint lorsque l'augmentation de température provoque un rayonnement plus intense compensant l'absorption induite par le changement de composition de l'atmosphère. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre (le phénomène se produit, en effet, dans les serres de jardinier ou d'horticulteur et explique partiellement la chaleur qui y règne).

L'origine de cette variation observée de la composition de l'atmosphère est suggérée par la coïncidence entre l'augmentation brutale observée et l'origine de l'ère industrielle. Parmi les gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone CO₂ est celui qui provoque le réchauffement le plus important. De plus, l'analyse du cycle du carbone montre que son action est celle qui dure le plus longtemps. Il est donc naturel de lui porter une attention particulière. L'énergie commercialisée dans le monde provient pour 80 % de la combustion du charbon, du pétrole et du gaz qui sont extraits du sous-sol, en quantités parfaitement connues (2).

Cette interprétation est corroborée par la mesure de la composition isotopique du carbone atmosphérique et par une diminution très faible, mais mesurée, de l'oxygène atmosphérique dont un peu a été utilisé pour fabriquer le CO₂ excédentaire. L'origine humaine de ce dernier n'est donc mise en doute par personne. Bien entendu, le phéno-

mène que nous venons de décrire se superpose aux échanges naturels équilibrés entre l'atmosphère et le sol qui sont de l'ordre de 120 milliards de tonnes de carbone et entre l'atmosphère et l'océan qui sont estimés à 90 milliards de tonnes.

Le méthane est le second contributeur au changement climatique. Au cours des cycles glaciaires des dernières centaines de milliers d'années, sa concentration dans l'atmosphère mesurée dans les carottes de glace a évolué entre 400 ppb (soit 400 molécules de méthane dans un milliard de molécules d'air) et 700 ppb durant les périodes interglaciaires. De 1700 à 1800, sa concentration est estimée à 715 (+ ou - 4) ppb. En 2005, elle était de l'ordre de 1 775 ppb. Son taux de croissance annuel a présenté des anomalies au cours des dernières décennies : variations à court terme sans doute imputables à des éruptions volcaniques mais, surtout, une réduction récente du taux de croissance qui est passé de 14 ppb par an en 1982 à pratiquement 0 sur la période 1999-2005. La raison de cette décroissance n'est pas identifiée, mais évidemment liée à l'équilibre entre les sources et les puits. Les sources principales de méthane sont d'origine biologique : zones humides, culture du riz, combustion de la biomasse et fermentation entérique des ruminants. Diverses activités industrielles produisent aussi du méthane comme la production et la distribution de combustibles fossiles. Le principal processus de destruction du méthane est la réaction avec le radical libre hydroxyle OH. Il y a d'autres puits mineurs : réaction avec le chlore libre, destruction dans la stratosphère, absorption par les sols.

Le changement climatique observé

L'augmentation observée de la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère se traduit, comme l'avait prévu Svante Arrhénius en 1896, et comme le simulent les modélisations numériques modernes, par un effet de serre additionnel entraînant une augmentation de la température moyenne du globe estimée à 0,8° (à plus ou moins 0,2° près) par rapport à l'ère préindustrielle. Les 12 dernières années sont les années les plus chaudes jamais enregistrées depuis 1850, à une exception près, 1996. Ce réchauffement n'est pas uniformément réparti, les océans dont l'effet régulateur sur les températures est bien connu se réchauffent naturellement moins que les continents. En outre, l'accroissement de la température est particulièrement fort dans les régions les plus septentrionales d'Amérique, d'Europe et d'Asie. Les précipitations sont également affectées par ce changement climatique, certaines régions étant plus arrosées et d'autres moins.

Les modèles simulant sur ordinateur la circulation des masses d'air dans l'atmosphère et des masses d'eau dans l'océan constituent la base des prévisions météorologiques actuelles. Ils peuvent être adaptés au calcul du changement du climat provoqué par une évolution donnée de la composition atmosphérique. On peut ainsi vérifier que les observations sont correctement expliquées par la prise en compte de l'effet de serre dû au changement observé de la

composition de l'atmosphère, lui-même provoqué par les activités humaines (3). L'attribution du réchauffement observé à ce dernier phénomène ne résulte donc pas de vagues corrélations statistiques, mais de la reproduction des observations par des modélisations des processus physiques qui régissent le comportement de la machine océan-atmosphère.

Ce qui pourrait nous attendre au cours de ce siècle

Le changement climatique mondial attendu

Les besoins énergétiques de l'humanité ne cessent de croître tant à cause de la croissance de la population mondiale que du développement économique de certains pays. Cette énergie est produite actuellement pour 80 % à partir de combustibles fossiles. En l'absence d'actions volontaristes, les émissions de gaz carbonique croîtront dans les prochaines décennies et il s'en suivra une augmentation de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère. Divers scénarios vraisemblables ont été construits pour de telles évolutions non-interventionnistes et ils conduisent à des concentrations allant de 550 à 1 000 ppm (4).

Les modèles numériques permettent de calculer l'évolution de la température moyenne mondiale correspondant à chaque scénario. Cependant, les modèles ne sont pas parfaits ; ils sont en particulier incapables de simuler, en des temps de calcul raisonnables, des phénomènes de taille inférieure à 300 km. Il en résulte que les températures prévues sont entachées d'incertitude (5).

La répartition géographique du réchauffement

L'augmentation de température prévue n'est pas uniforme, les continents se réchauffant plus que les océans et les parties septentrionales subissant le réchauffement le plus fort (6).

Le changement des précipitations

La moyenne mondiale des précipitations devrait croître. La figure qu'on trouvera sur le site de l'IPCC (7) montre que certaines régions, comme le nord de l'Europe, seront plus arrosées tandis que le Bassin méditerranéen sera confronté à une sécheresse accrue. On observera davantage de phénomènes pluvieux intenses, même dans les régions plus sèches.

Les conséquences du changement climatique

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, migrations 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 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 maîtrise du changement climatique

Seule une réduction des émissions humaines de gaz à effet de serre peut permettre d'empêcher le changement climatique de prendre une ampleur susceptible d'engendrer des catastrophes. La contribution du méthane ne représente que 30 % de celle du gaz carbonique et celle de l'oxyde nitreux 10 %. De plus, la durée de vie du gaz carbonique est beaucoup plus longue que celle des deux autres. On se concentrera donc sur la maîtrise des émissions de gaz carbonique qui posent le problème le plus sévère de développement durable, en raison du lien étroit avec la production énergétique déjà souligné.

Les scénarios de stabilisation

A l'opposé des scénarios non-interventionnistes évoqués ci-dessus (4), on peut décider, comme s'y sont engagés les états signataires de la convention de Rio sur le climat, mise au point lors du sommet des chefs d'état en 1992, d'adopter une politique visant à limiter le changement de la composition de l'atmosphère à des valeurs plafonds. Une figure (6) montre (panneau en haut à gauche) une évolution des émissions permettant de stabiliser la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère à diverses valeurs (450, 550, 650, 750 et 1 000 ppm), l'évolution de cette concentration (panneau en haut à droite) et celle de la température (panneau du

bas). Les barres d'erreur sur ce dernier panneau indiquent l'incertitude sur la température calculée pour 2100, tandis que les losanges marquent la température d'équilibre qui sera atteinte après des centaines d'années et se maintiendra pendant des milliers d'autres. Plus la réduction des émissions sera rapide, plus limitée sera l'augmentation de la température moyenne (8).

Les réserves en combustibles fossiles

Le développement de tous les pays est largement fondé sur la disponibilité d'énergie, essentiellement fournie par les combustibles fossiles. Toutefois, les réserves du sous-sol sont limitées et elles seront épuisées dans un petit nombre de siècles. Notre développement est donc fondamentalement non durable. Malheureusement pour le changement climatique, les ressources enfouies sont cependant trop grandes pour qu'on puisse compter sur leur épuisement pour le juguler (9).

La maîtrise du réchauffement climatique

Il convient donc de limiter nos émissions de gaz à effet de serre pour éviter un bouleversement du climat de notre planète. Une stabilisation de la concentration à 450 ppm exige que les émissions mondiales soient divisées par un facteur 2 environ, ce qui correspond en moyenne à environ une demi-tonne de carbone par habitant et par an. L'Américain du Nord en émet en moyenne 7, un Européen 3. Les émissions annuelles en France, 2 tonnes par habitant, sont inférieures à la moyenne européenne, grâce à la très faible part des combustibles fossiles dans notre production d'électricité qui est pour 80 % d'origine nucléaire et pour 15 % d'origine hydraulique. Pour réduire les émissions, on peut agir dans deux directions complémentaires : diminuer notre consommation en énergie à chaque fois que c'est possible et utiliser des sources d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre.

Conserver les bénéfices qu'apporte le progrès technique à notre confort, notre santé, notre espérance de vie sans bouleverser le climat de notre planète implique que nous mettions tout en œuvre pour économiser l'énergie qui est un bien plus précieux qu'on ne l'a longtemps cru et pour produire cette énergie par tous les moyens disponibles permettant de ne pas relâcher dans l'atmosphère des gaz à effet de serre. Cette stratégie implique que le long terme ne doit pas être sacrifié au court terme.

Notes

(1) Site de l'ONERC, <http://www.ecologie.gouv.fr/-ONERC-.html>. Sur la page d'accueil, cliquer sur groupe I, les bases scientifiques physiques.

(2) Site de l'IPCC, <http://www.ipcc.ch/>. Sur la page d'accueil, cliquer sur *Working Group I Report, Full Report*, puis sur *technical summary* dans la page qui s'affiche.

La courbe en noir du haut de la figure 2 montre ce qu'aurait été l'évolution de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère, si la tota-

lité du CO₂ produit par la combustion du carbone fossile y était restée. Les barres bleues indiquent l'augmentation observée qui n'est que la moitié environ de la précédente, le reste ayant été absorbé par l'océan et la biosphère terrestre. L'utilisation des combustibles fossiles suffit donc largement à expliquer le changement de la teneur de l'atmosphère en CO₂.

(3) Site de l'ONERC. Sur la page d'accueil, cliquer sur groupe I, les bases scientifiques physiques. On trouve également cette figure sur le site de l'IPCC. Sur la page d'accueil, cliquer sur *Working Group I Report, Summary for policy makers, figures SPM4*.

Les figures montrent les 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.

(4) Scénarios d'évolution de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère, en l'absence de toute action volontariste pour réduire les émissions. Site IPCC. Sur la page d'accueil en bas à gauche, cliquer sur *Third Assessment report*, puis sur *Synthesis Report* dans la page qui s'affiche, puis *Synthesis Report* dans la nouvelle page, puis sur *French*, puis sur *Résumé* à l'intention des décideurs, puis sur *Question 9* où, à la fin, on trouve la figure 10-A.

(5) Site de l'ONERC. Sur la page d'accueil, cliquer sur groupe I, les bases scientifiques physiques.

Les barres à droite de cette figure sont relatives à la température prévue en 2100. On voit que si on associe la concentration la plus faible à la partie basse de la barre correspondante, l'augmentation de température prévue est de 1° et que si, à l'opposé, on associe la concentration la plus forte à l'extrémité haute de la barre, on obtient 6,4°. C'est donc dans cette fourchette qu'on peut s'attendre à trouver l'augmentation de la température moyenne mondiale à la fin du siècle, en l'absence d'actions volontaristes. Les conséquences de telles variations de la température moyenne mondiale sont importantes puisque l'écart de 5° qui existe entre une ère glaciaire et un optimum interglaciaire, c'est-à-dire entre les périodes les plus froides et les périodes les plus chaudes des grands cycles climatiques naturels, a entraîné un bouleversement de la géographie du monde.

Augmentation de la température moyenne de surface par rapport à la période 1980-1999. Les courbes colorées montrent, en continuité avec les simulations relatives au XX^e siècle, les variations pour les scénarios A2, A1B and 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 marque la valeur la plus probable pour le scénario d'émissions considéré et l'étendue des barres indique la gamme des valeurs vraisemblables.

(6) Voir http://www.ipcc.ch/WG1_SPM_17Apr07.pdf, figure SPM 6, page 15.

(7) Voir http://www.ipcc.ch/WG1_SPM_17Apr07.pdf, figure SPM 7, page 16.

(8) La figure 6 permet de quantifier cette constatation. Site de l'IPCC. Sur la page d'accueil, en bas à gauche, cliquer sur *Third Assessment Report*, puis sur *Synthesis Report* dans la page qui s'affiche, puis *Synthesis Report* dans la nouvelle page, puis sur *French*, puis sur

Résumé à l'intention des décideurs, puis sur Question 5 où se trouve la figure RID 6.

(9) Site de l'IPCC. Sur la page d'accueil en bas à gauche, cliquer sur *Third Assessment Report*, puis sur *Mitigation* dans la page qui s'affiche, puis *Mitigation* dans l'intention des décideurs. La figure se trouve page 6, sous le nom SPM2.

Les trois premières barres verticales indiquent en milliards de tonnes les ressources estimées en carbone sous forme de pétrole, gaz et

charbon, la quatrième barre les consommations de 1850 à 2000, les barres de la série suivante figurent les émissions au cours du XXI^e siècle correspondant aux scénarios de la figure 4, les barres de la dernière série celles qui correspondent aux scénarios de stabilisation de la figure 8. On voit que si les ressources en pétrole et en gaz seront épuisées avant la fin du siècle, les ressources en charbon ne le seront pas. La conclusion à en tirer est que notre rapport à l'énergie est non durable à court terme en raison du bouleversement du climat et à plus long terme seulement à cause de l'épuisement des ressources.