

Le Réchauffement Global au XXI^e Siècle

André BERGER

*Université catholique de Louvain, Institut d'Astronomie et de Géophysique G. Lemaître
Chemin du Cyclotron, 2 ; 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique*

Tél. 010/47 33 03 ; Fax 010/47 47 22 ; Email : berger@astr.ucl.ac.be

Résumé

L'accumulation de gaz carbonique dans l'atmosphère due à l'utilisation des combustibles fossiles pour la production d'énergie, le rejet d'autres gaz en traces qui sont susceptibles de modifier le bilan radiatif du système climatique, la modification artificielle du sol requise par une production alimentaire toujours accrue liée à l'explosion démographique et le déboisement intensif des forêts sont autant de facteurs qui font que l'Homme devient un élément important agissant progressivement, mais sûrement, sur l'évolution du climat des prochaines décennies.

Les études effectuées par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat montrent que, selon les scénarios, le réchauffement global d'ici la fin du XXI^e siècle serait compris entre 1,4 et 5,8°C. En Europe on s'attend à ce que la température augmente d'environ 3 à 4°C au cours des 100 prochaines années. Ce réchauffement serait accompagné d'une hausse du niveau des mers compris entre 9 à 88 cm et d'une intensification du cycle hydrologique. Dans le nord de l'Europe, les précipitations augmenteraient de 1 à 2% par décennie tandis que dans le sud, les étés deviendraient plus secs et les hivers plus humides.

Ces changements entraîneraient une modification profonde des zones climatiques actuelles et par voie de conséquences des climats régionaux et de l'infra-structure agricole, économique et sociale qui leur est associée.

En Belgique, les émissions de gaz à effet de serre sont déjà bien au-dessus de l'objectif de Kyoto (16 millions de tonnes de CO₂ équivalent) et les prévisions montrent que d'ici 2010 nous dépasserons notre objectif de quelque 20 à 25 millions de tonnes. Si les pénalités prévues à l'heure actuelle pour les années après 2010 pour non-respect des quotas alloués se matérialisent (par exemple à 10 € la tonne de CO₂ excédentaire), cela coûtera à la Belgique 250 millions d'Euros par an. De quoi s'interroger sur la politique actuelle d'abandon du nucléaire.

L'explosion démographique est déjà en soi une cause suffisante pour que l'on s'interroge réellement sur le développement et la production énergétique future. L'évolution du système climatique et l'interaction des actions humaines avec le système climatique imposent une condition supplémentaire qui est celle de réfléchir aux technologies qui devront être utilisées de manière à ne pas perturber davantage le système climatique. Ce problème peut être abordé en trois phases. La première est de montrer où nous en sommes dans l'évolution du système climatique ; la seconde est de placer en perspective les concentrations actuelles en CO₂ ; ensuite viennent les scénarios du futur et les impacts sur la température et le niveau moyen

des mers, pour enfin tirer des conclusions sur la politique qui devrait être mise en place face à l'évolution future du climat.

Les quatre diagrammes de la Figure 1 ont tous la même forme montrant l'évolution de quatre paramètres. Le premier donne l'évolution de la population, le second celle des émissions de CO₂, le troisième celle de la concentration en CO₂ dans l'air, et le dernier celle de la température moyenne globale sur Terre. L'augmentation de la population reflète l'explosion démographique et au cours de la seconde moitié du XXI^{ème} siècle on prévoit entre 8 et 10 milliards d'habitants. Le problème fondamental posé à la science est de voir s'il existe une relation de cause à effet entre ces différents paramètres.

L'ensemble des mesures climatiques recueillies à l'heure actuelle par toutes les stations sur la Terre, mesures ensuite analysées de façon extrêmement critique quant à leur valeur, conduisent à la Figure 2 qui montre l'évolution de la température moyenne entre 1860 et l'an 2001. La température moyenne de la période de référence est de l'ordre de 15 degrés Celsius. Manifestement nous sommes sortis de ce que l'on a appelé « le petit âge glaciaire » au début de ce XXI^{ème} siècle et depuis lors, la température augmente. Il est clair que cette augmentation n'est pas monotone et que la variabilité inter-annuelle joue un rôle extrêmement important. Surimposé à la tendance générale au réchauffement il apparaît des fluctuations qui sont, en partie, liées aux interactions non linéaires entre les différentes composantes du système climatique, en particulier au phénomène « El Niño ».

1998 a été l'année la plus chaude des 100 dernières années pour lesquelles des observations météorologiques existent (0.59°C au dessus de la moyenne de la période conventionnelle 1961 – 1990 [1]. 2001 est la seconde année la plus chaude avec 0.42°C au dessus de la moyenne. La première moitié de l'année 2002 est la plus chaude des 143 dernières années. On pense dès lors que 2002 pourrait battre le record de 2001, voire même de 1998. Neuf des dix années les plus chaudes se situent après 1990, y compris 1999 et 2000 alors que ces années furent tempérées par le phénomène La Niña [2]. Au cours des 100 dernières années, la température de l'air à la surface de la Terre a augmenté au taux de 0.6°C par siècle, alors qu'au cours des 25 dernières années ce réchauffement fut trois fois plus intense (1.7°C par siècle).

XXI^{ème} siècle exclu, la tendance générale naturelle de l'évolution du climat des mille dernières années (Figure 3) est un refroidissement. Ce refroidissement qui a commencé il y a six mille années environ est estimé être de l'ordre de 1/100 de degré Celsius par siècle alors que le réchauffement du XXI^{ème} siècle est de l'ordre de 1 degré Celsius sur cent ans. Il faut noter que 1998 a battu tous les records absolus de température sur la Terre non seulement depuis que nous avons des observations, mais également au cours des mille dernières années. Vraisemblablement 1998 a approché la température de ce que l'on a appelé l'Optimum Climatique, il y a à peu près six mille ans. Les cents dernières années, c'est à dire le XXI^{ème} siècle, ont été définitivement les plus chaudes des mille dernières années.

Une des conséquences les plus spectaculaires de ce réchauffement est probablement la fonte de tous les grands glaciers sur Terre. Le glacier Chacaltaya dans les Andes boliviennes couvrait quelque 20 hectares en 1940. Il en couvre encore 6 actuellement et a perdu 93% de sa masse de glace. De tels glaciers sont appelés à disparaître dans les décennies à venir, car la déclaration du Groupe Intergouvernemental d'Etude de l'Evolution du Climat est extrêmement claire dans son dernier rapport de 2001 : le réchauffement se poursuivra et la température de la fin du XXI^{ème} siècle sera vraisemblablement 2 à 4°C plus élevée qu'actuellement. Le rapport insiste en effet sur le rôle majeur joué par les gaz à effet de serre

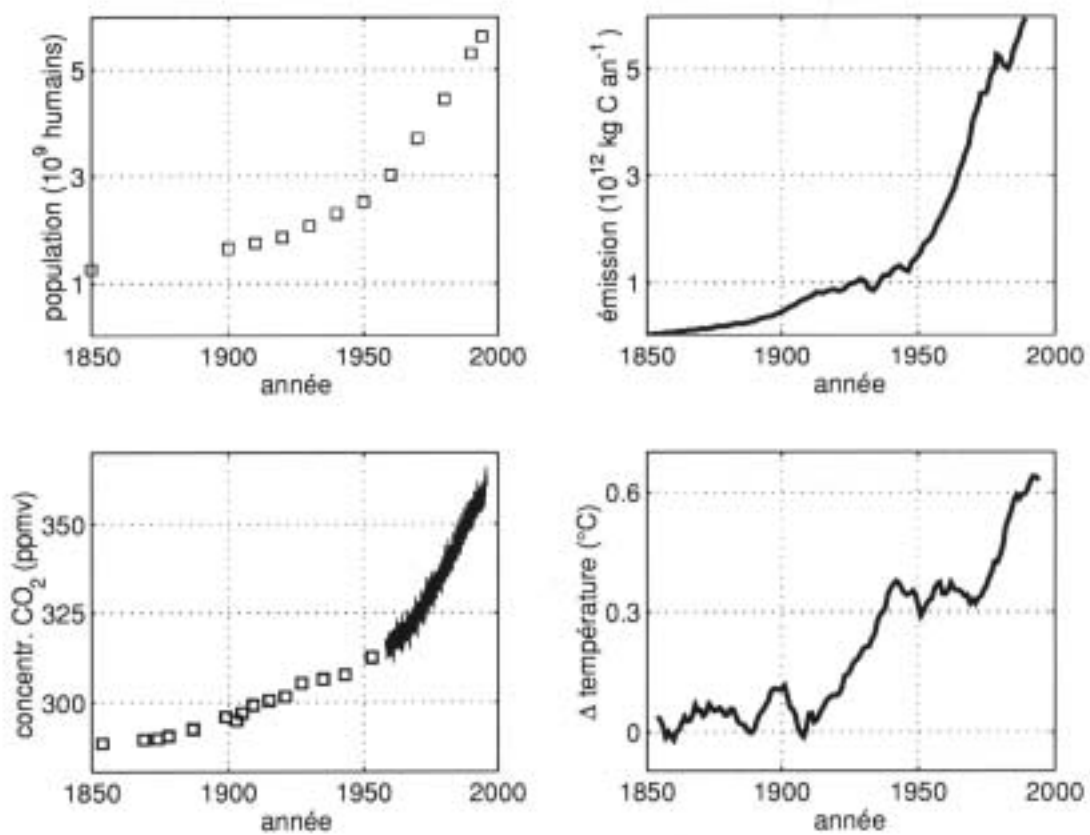


Figure 1. Evolution de la population des émissions de CO₂, de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et de la température moyenne globale de l'air en surface entre 1850 et 2000.

Graphique 1 Evolution de la température combinée de l'air à la surface des terres et de la mer en surface de 1860 à 2001, par rapport à la période de référence 1961-1990 pour l'ensemble du globe; dans les courbes en trait plein, les variations d'échelle inférieure à la décennie ont été lissées à l'aide d'un filtre binomial
(Sources: Climatic Research Unit, University of East Anglia et Hadley Centre, The Met Office)

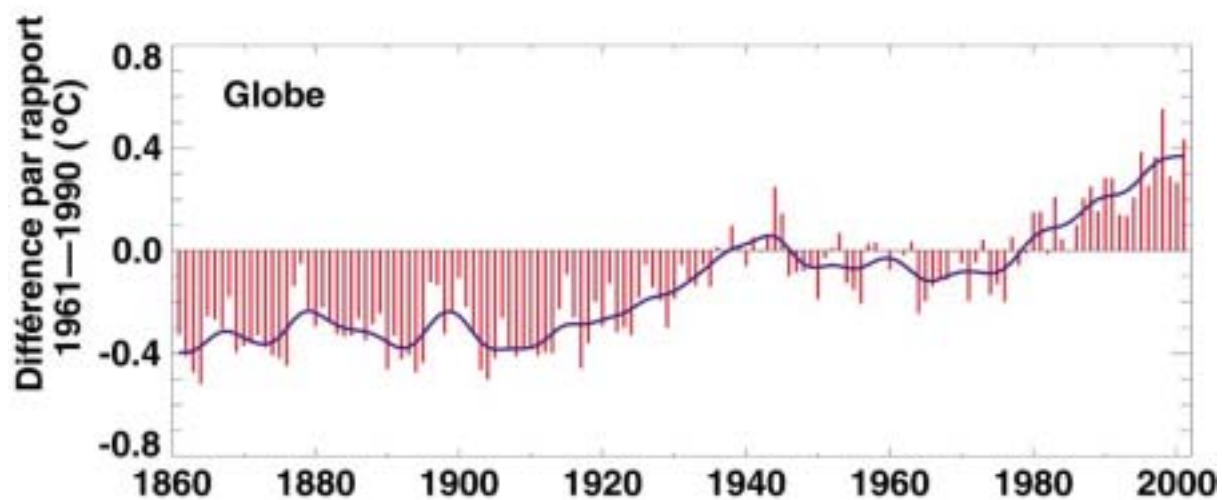


Figure 2. Evolution de la température annuelle moyenne globale de la Terre entre 1860 et 2001. [1].

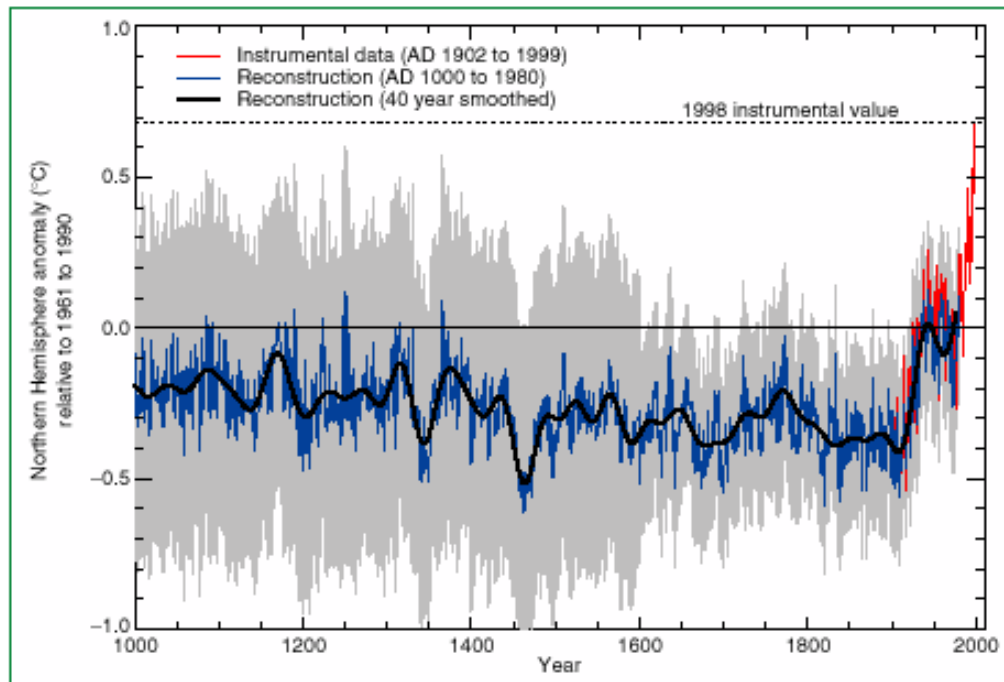


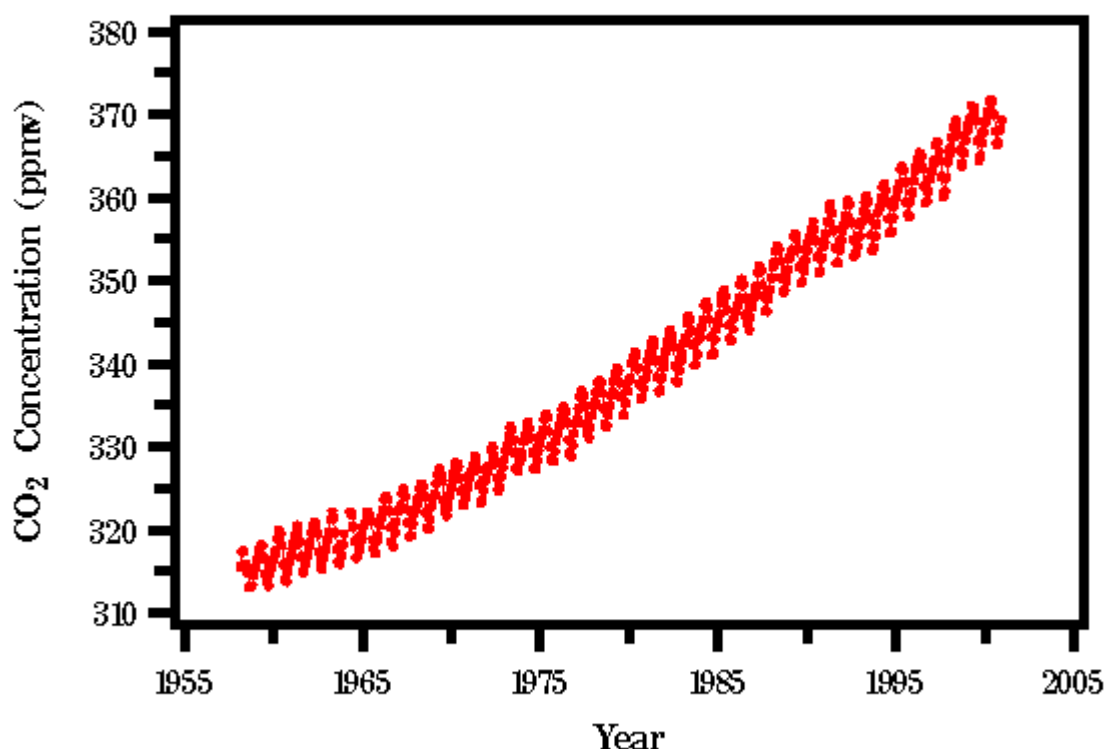
Figure 3. Evolution de la température entre 1000 et 2000 [3].

et spécifie que l'évolution de la température au cours des cents dernières années ne peut être expliquée que si on tient compte de leurs émissions liées aux activités humaines.

Il est donc important d'analyser l'évolution de leur concentration dans l'air. La Figure 4 reproduit l'augmentation de la concentration en CO₂ mesurée à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï. Elle montre que nous sommes passés de 315 parties/million (p.p.m.v) en volume en 1958 à 370 p.p.m.v en l'an 2001. Autrement dit, en 40 ans, la concentration en CO₂ dans l'air a augmenté d'un peu moins de 20 %. Il est important de replacer cela dans le contexte de l'histoire de la Terre. Il y a 20.000 ans, au moment du dernier maximum glaciaire, la concentration était de l'ordre de 200 p.p.m.v. Ensuite cette concentration a augmenté au fur et à mesure que la glace fondait, pour atteindre au moment de la révolution industrielle 280 p.p.m.v. Cette concentration est donc passée de manière naturelle de 200 à 280 p.p.m.v en à peu près 20.000 années. Cette augmentation de 80 p.p.m.v est la même que celle qu'on observe entre la révolution industrielle et l'heure actuelle, mais cette fois en 200 années, c'est à dire à une vitesse cent fois plus rapide. Cette information sur le CO₂ est à l'heure actuelle disponible pour les 400.000 dernières années grâce aux analyses chimiques des bulles d'air enchâssées dans les glaces de l'Antarctique et du Groenland. La Figure 5 montre que la concentration en CO₂ dans l'air évolue de manière naturelle avec une cyclicité d'à peu près 100.000 années. Elle oscille entre deux valeurs extrêmes : 280 p.p.m.v caractéristique des climats chauds dits interglaciaires et 200 p.p.m.v caractéristique des époques glaciaires. La valeur moyenne de la concentration naturelle en CO₂ dans l'air est donc de 240 p.p.m.v environ. Cela montre combien la valeur actuelle de 370 p.p.m.v. est déjà bien au-delà de la variation naturelle.

Le CO₂ de l'air n'est bien sûr pas le seul élément lié aux activités humaines qui influence le climat. D'autres gaz, dits « gaz à effet de serre », absorbent aussi l'énergie infrarouge émise par la surface de la Terre et son atmosphère, contribuant ainsi à réchauffer d'autant plus le système climatique. Ces autres gaz à effet de serre sont le méthane (le gaz naturel), les oxydes d'azote liés essentiellement à la production d'engrais, l'ozone et les fréons. On a beaucoup parlé de ces derniers à propos du trou d'ozone, mais il ne faut pas oublier qu'ils sont également des gaz à effet de serre puissants. En comparant l'importance relative de ces gaz à effet de serre, on voit que le CO₂ ne représente en fait que 50% de la perturbation radiative y liée. Quant à l'ozone, on le retrouve à la fois dans la troposphère et dans la stratosphère. Dans la basse troposphère, l'ozone augmente suite à la pollution liée aux voitures en particulier. Cet agent oxydant est nocif pour la santé, ce qui explique les restrictions de circulation liées aux épisodes de forte concentration en été. L'ozone stratosphérique lui, disparaît à cause de l'action des fréons dans la haute atmosphère. Etant un gaz à effet de serre, cela contribue donc à réduire le réchauffement imposé par les activités humaines. Finalement, les sulfates qui sont émis par les industries et la combustion, contribuent au refroidissement alors que le carbone imbrûlé (les suies) contribue au réchauffement planétaire. D'autres phénomènes tels que l'activité solaire et la disparition des forêts, en particulier dans les tropiques, ont un impact moindre sur le climat global.

Mauna Loa, Hawaii



Source: Dave Keeling and Tim Whorf (Scripps Institution of Oceanography)

Figure 4. Evolution de la concentration en CO₂ dans l'air entre 1958 et 2000 [4].

Devant une telle complexité, la seule manière d'essayer de comprendre le comportement du climat, est la simulation sur ordinateur. Si on représente mathématiquement le système climatique et les interactions complexes entre ses différentes composantes que sont l'atmosphère, l'océan, la glace, la Terre solide et le monde vivant, on peut résoudre ces équations et simuler l'évolution de la température observée. En plus, on peut estimer quelle est la part jouée par les différents acteurs que sont respectivement, les gaz à effet de serre, les sulfates, l'activité solaire et l'activité volcanique. L'addition des sulfates diminue le réchauffement induit par les gaz à effet de serre de quelques dixièmes de degré. L'activité solaire depuis à peu près 1850 tendrait à augmenter la température moyenne de la Terre d'à peu près un dixième de degré Celsius. Les explosions volcaniques, telles celles du Krakatoa, du El Chichon et du Pinatubo, refroidissent le climat, mais leur impact est limité à quelques années. Si on ajoute toutes ces contributions entre elles, on obtient la courbe d'évolution de la température au cours des 150 dernières années. On en conclut que l'évolution du système climatique des 150 dernières années ne peut pas être expliquée sans faire intervenir les gaz à effet de serre, puisque la tendance générale est essentiellement celle que ceux-ci imposent. Ceci est la conclusion principale du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution des Climats. Fort de ce succès à simuler l'évolution du climat passé, on peut s'intéresser à la prévision pour le futur.

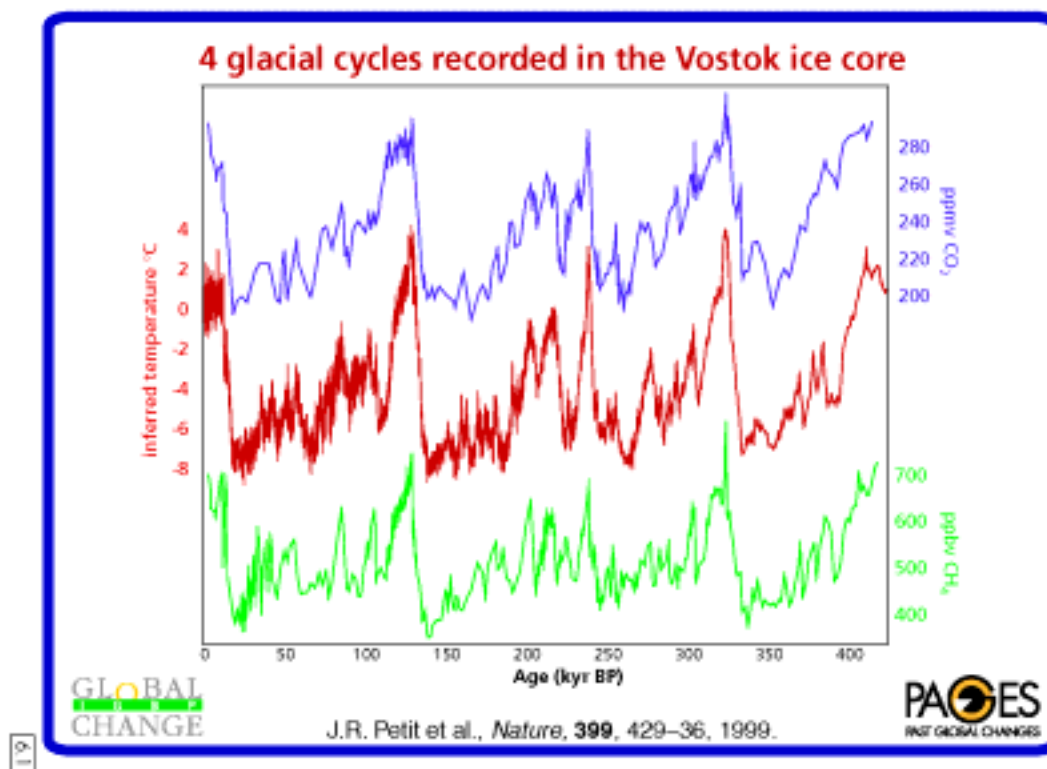


Figure 5. Variations au cours des 4 derniers cycles glaciaire-interglaciaire de la concentration en CO₂, de la température au dessus de l'Antarctique et de la concentration en CH₄ (Pages, overhead series, Global Change, 2000).

L'évolution de la concentration en CO₂ entre 1990 et la fin du XXI^{ème} siècle est reprise dans la Figure 6. Les émissions prévues par les divers scénari reflètent les incertitudes du comportement futur de la Société. A l'heure actuelle les émissions de carbone sous la forme de CO₂ sont de l'ordre de 8 milliards de tonnes par an. Pour les plus optimistes, on pourrait très bien dans les années qui viennent, diminuer ces émissions et terminer le XXI^{ème} siècle avec des émissions proches de 5 milliards de tonnes de carbone sous la forme CO₂. Par contre, le scénario pessimiste multiplie facilement par trois, voire cinq, les émissions actuelles de CO₂ qui pourraient atteindre quelque 30 milliards de tonnes de carbone d'ici la fin du XXI^{ème} siècle. Tous ces scénarios sont basés sur le comportement de la Société, l'évolution du nombre d'habitants sur Terre, la manière dont le bien-être va s'installer y compris dans les pays en voie de développement, et le type de technologies qui sera utilisé pour produire l'énergie. La conséquence de ces émissions est de conduire à des concentrations en CO₂ qui passeraient de 370 p.p.m.v en l'an 2001 à 500 p.p.m.v en 2100 pour les optimistes et à plus de 900 p.p.m.v. pour les pessimistes. Etant donné que la concentration préindustrielle était de l'ordre de 280 p.p.m.v, la concentration en fin du XXI^{ème} siècle serait donc proche d'un doublement de la concentration préindustrielle même pour les optimistes.

L'utilisation des modèles climatiques permet alors d'estimer le réchauffement qui serait dû à l'évolution future de la concentration en gaz à effet de serre et autres sulfates. L'évolution de la température entre 1990 et 2100 montre un réchauffement de 1.5 à 5.8 degrés. Cette fourchette d'incertitude représente à la fois les incertitudes sur la connaissance du fonctionnement du système climatique et les incertitudes liées au comportement futur de la Société.

La régionalisation de ce réchauffement global reste difficile. Les modèles demandent encore à être perfectionnés. Les premiers résultats montrent toutefois que pour le scénario médian, le réchauffement attendu dans nos régions d'ici 2100 est de l'ordre de 2 à 3 degrés Celsius et pour une grande partie de la Terre, de l'ordre de 1 à 2 degrés. En ce qui concerne le niveau de la mer, les résultats pour les différents scénari montrent une hausse située entre 15 cm et 80 cm d'ici la fin du XXIème siècle.

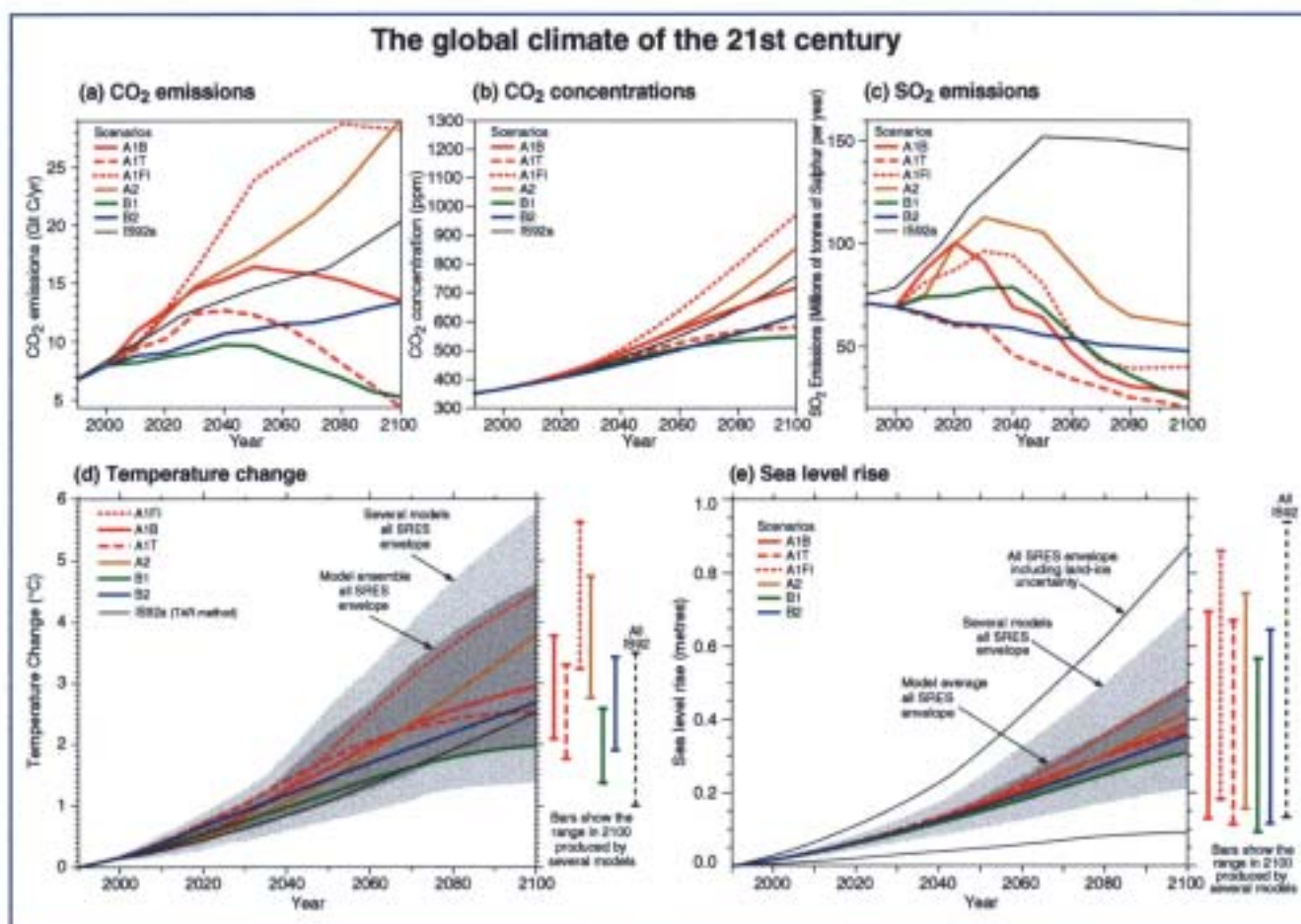


Figure 6. Scenari d'évolution au cours du 21^e siècle des émissions de CO₂ (a), de la concentration en CO₂ dans l'air (b), des émissions de SO₂ (c), de la température (d) et du niveau de la mer (e) [5].

Les pays industrialisés, l'Europe, les Etats-Unis et les pays en voie de développement éprouvent pas mal de difficultés à se mettre d'accord pour réaliser le protocole de Kyoto. Mais y a-t-il un intérêt à consacrer tant de temps et d'effort pour rencontrer l'objectif de ce protocole. Rappelons que celui-ci est de réduire d'ici 2010 les émissions de CO₂ des pays industrialisés de 5% par rapport à 1990. Si on étendait le protocole de Kyoto jusqu'à la fin du XXI^{ème} siècle, les émissions de CO₂ seraient alors 2 milliards de tonnes de carbone inférieures aux émissions du scénario « business as usual », c'est à dire une réduction à peine perceptible de 10 à 15%. L'effet de Kyoto stricto sensu, c'est à dire une réduction limitée à 5% jusque dans les années 2010 et puis plus rien, est totalement imperceptible dans tous les calculs du réchauffement effectués par les scientifiques. En terme de concentration en CO₂, le « business as usual » conduit à 717 p.p.m.v à la fin du XXI^{ème} siècle et « Kyoto prolongé » à 665, c'est-à-dire une concentration réduite aussi d'à peu près une dizaine de pour cent. Ceci montre combien une telle politique conduit à des résultats peu significatifs, une conclusion déjà tirée par les scientifiques dès les années 1990. En effet, on a montré alors que pour stabiliser les concentrations en CO₂ dans l'air à des niveaux « acceptables » (disons entre 500 et 750 ppmv), il faudrait le plus rapidement possible diminuer les émissions de plus de 50 %.

Devant la sévérité des impacts des activités humaines sur le climat, il est temps de limiter le plus rapidement possible les incertitudes de manière qu'elles ne soient plus prises comme prétexte pour ne rien faire, mais également de mettre en place des politiques d'adaptation aux changements qui de toute façon s'avèrent être inévitables. Les discussions se poursuivent sans que des actions pratiques soient prises et pendant ce temps, la pollution augmente. De plus, le temps de pénétration des nouvelles technologies dans la Société est de plusieurs décennies. Il semble donc bien exclu de croire que nous allons pouvoir éviter les impacts liés à ce réchauffement.

Bien sûr, parallèlement à ces politiques d'adaptation, il faut continuer à mettre en place des politiques d'atténuation des impacts et en particulier, il faut promouvoir les produits non polluants, sans carbone en l'occurrence, les énergies dites renouvelables, tels l'éolien, le solaire et la biomasse, mais aussi poursuivre le nucléaire. Le « know how » développé en France et en Belgique dans ce domaine est exceptionnel et pourrait certainement être rentabilisé dans le cadre du marché des "permis de polluer", en plus de l'effet bénéfique qu'il a sur l'évolution des concentrations en gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Références

- [1] Jones et al., **2002**. Global temperature. Cdiac esd.oml.gov
- [2] GERC, **2002**. 2001, one for the record books. Global Environmental Change Report, vol. XIV, n°1, 1-3.
- [3] Mann, M.E., Bradley, R.S., and M.K. Hughes. Northern Hemisphere temperature during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations. Geophysical Research Letters **1999**, 26(6), 759-762.
- [4] Keeling, C.D. and T.P. Whorf, **2001**. Atmospheric Carbon dioxide record from Mauna Loa. CDIAC-Trends. Web : <http://cdiac.esd.ornl.gov/home.html>
- [5] Houghton J.T. et al. (eds), **2001**. Climate Change 2001 : The Scientific Basis, IPCC, Cambridge Un. Press, Cambridge, 881pp.

Courte bibliographie

- Berger A., **1992**. Le Climat de la Terre, un passé pour quel avenir. De Boeck Université, Bruxelles, 479pp.
- Burroughs W. (ed.), **2003**. Climate into the 21st Century. Cambridge University Press, Cambridge, 240p.
- Duplessy J.Cl., **1996**. Quand l'Océan se fâche. Editions Odile Jacob, Paris, 277p.
- Lambert G., **2001**. La Terre chauffe-t-elle ? EDP Sciences, Les Ulis, France.
- Le Treut H., Jancovici J.M., **2001**. L'Effet de Serre. Coll. Dominos, Flammarion, 125p.
- Tissot B., **2003**. Halte au changement climatique. Odile Jacob, Paris, 295p.