

# Le « développement durable », l'atmosphère et le climat

ROBERT KANDEL

*Les chercheurs qui travaillent sur le changement climatique ne se contentent plus d'améliorer leurs modèles. Se fondant sur les connaissances acquises, ils se risquent sinon à la prédiction, tout au moins à l'identification, voire à la hiérarchisation, des risques potentiels. Cet exercice peut conduire à découvrir qu'un risque souvent mis en avant peut en cacher un autre, voire plusieurs autres, eux ignorés ou sous-estimés. Son intérêt réside peut-être moins dans sa qualité prédictive que dans le renouvellement des problématiques de recherche auquel il invite et, peut-être surtout, dans les possibilités qu'il ouvre d'instaurer un dialogue entre chercheurs en sciences de la terre et chercheurs en sciences sociales et, plus largement même, entre recherche et société. C'est ce à quoi ce texte de synthèse invite.*

ROBERT KANDEL

Laboratoire de météorologie  
dynamique du CNRS  
École polytechnique,  
91128 Palaiseau,  
France

Ce que l'on appelle couramment le développement<sup>1</sup> s'accompagne depuis un siècle d'une modification sensible de la composition de l'atmosphère (IPCC 1990, Vitousek et al., 1997), ce qui ne peut manquer d'entraîner un changement climatique pendant le siècle à venir (IPCC, 1996). Les climats des différentes régions de notre planète déterminent dans une large mesure les possibilités de la vie dans ces régions. Tout changement climatique important ne peut manquer d'avoir des « impacts » écologiques et économiques, et certains de ces impacts peuvent grever sérieusement la « durabilité » du développement. Il est donc urgent de mieux estimer l'ampleur et le caractère des changements climatiques qui seraient entraînés par telle ou telle politique de développement, et d'en déduire les impacts dans différentes régions du globe. Ces estimations ne peuvent qu'être plus ou moins incertaines, compte tenu de la complexité du système atmosphère-hydrosphère-cryosphère-lithosphère-biosphère qui gouverne les climats. Malgré ces incertitudes multiples, on estime que les connaissances déjà acquises, et celles que l'on cherche à approfondir, nous permettent de mieux choisir notre cap parmi les politiques de développement concevables, afin justement de nous assurer les meilleures chances d'une « durabilité » du développement.

La discussion autour de ces thèmes se limite généralement au siècle à venir. Faire de la prévision politico-socio-économique pour un siècle constitue déjà une gageure, mais si l'on tient à la « durabilité », il faut l'oser. Pour le climat, il s'agit en revanche d'une période *courte*. En effet, les climatologues statisticiens *définissent* un climat sur une période de trente ans, et hésitent (ou hésitaient) à parler d'une tendance d'évolution sur moins d'un siècle. D'où une polémique, qui n'est pas uniquement politique, autour de l'annonce par le Groupe intergouvernemental sur l'évolution

Climatique (IPCC, 1996) de la détection de l'influence humaine sur le climat (Santer et al., 1996). Les différences entre les échelles de temps du « développement » et celle du climat apparaissent dans les calendriers du *tableau 1*.

## Abstract – « Sustainable development », the atmosphere and climate

The question of sustainable development cannot be dealt without considering the problem of climate change. It is well established that certain economic activities modify the composition of the atmosphere, significantly increasing atmospheric concentrations of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and other 'greenhouse' gases. These gases affect the transfer of infrared radiation in the atmosphere and so play a role in the energetics of climate. Although the major greenhouse gas is water vapor (H<sub>2</sub>O), it is believed that warming due to anthropogenic additions of CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases will be further amplified by increases in atmospheric humidity, a positive water-vapor greenhouse feedback. Indeed, significant warming can only occur if such feedback operates. It is well established that climate has changed in the past and is at present changing, for a variety of reasons which are far from being well understood. Precise projections of future climate are difficult to obtain because of a number of factors requiring further study, in particular effects of anthropogenic aerosols, multiple feedbacks linked to changes in atmospheric humidity and clouds, as well as possible dramatic changes in ocean circulation. Moreover, it must be noted that the principal consequences of climate change, both for society and for the biosphere, arise from redistribution of water resources rather than from warming proper. We must focus our attention on these consequences of climate change, without being side-tracked by problems that are at best of secondary importance. Despite the many uncertainties, truly sustainable development requires consideration of the risk of climate change.

<sup>1</sup> Ce texte correspond à mon intervention de décembre 1997 dans la session : Changement climatique global, pollutions atmosphériques et durabilité des Journées 1997 de *Natures Sciences Sociétés*. Je me suis cependant permis de citer ici quelques publications parues depuis cette date, et d'inclure dans la liste de références deux ouvrages récents destinés aux non-spécialistes (Kandel 1998a, b) où je développe mon point de vue sur ces questions.

**Tableau 1.** Les périodes du développement économique et du changement climatique

Calendrier civil ordinaire	2 000 – 2 100
Calendrier de la décolonisation politique, de la généralisation des antibiotiques et de la technologie nucléaire	50 – 150
Depuis la Révolution industrielle	200 – 300
Depuis les débuts de l'expansion européenne et de la diffusion mondiale des végétaux des Amériques	500 – 600
Depuis les débuts de l'agriculture	8.000 – 8.100
Depuis le dernier maximum glaciaire	18.000 – 18.100
Depuis la fin de l'interglaciaire précédent	125.000 – 125.100

Le développement qui a suivi « l'invention » de l'agriculture s'est poursuivi sur une durée comparable à celle de l'évolution du climat (Diamond, 1997 ; Kandel, 1998b). Ne faudrait-il pas plutôt dire que le développement fondé sur l'exploitation croissante de la biosphère ne devint possible qu'avec la stabilisation relative du climat qui suivit la sortie du dernier âge glaciaire ? Ce qui ne veut pas dire qu'il n'y ait point eu de fluctuations climatiques depuis 8000 ans, avec sans doute des conséquences douloureuses pour ceux qui devaient les vivre (Burroughs, 1997). Le développement de l'élevage et de l'agriculture s'est fait par modification du couvert végétal, avec parfois des interventions dans le cycle de l'eau (l'irrigation...), donc avec des modifications importantes, au moins à l'échelle locale, des échanges d'énergie et d'eau entre la surface et l'atmosphère. Ce développement a également contribué à la modification des cycles « biogéochimiques », en particulier du cycle de carbone. On peut ainsi attribuer à la déforestation une partie de l'augmentation, depuis le 18<sup>e</sup> siècle, de la concentration atmosphérique du gaz carbonique.

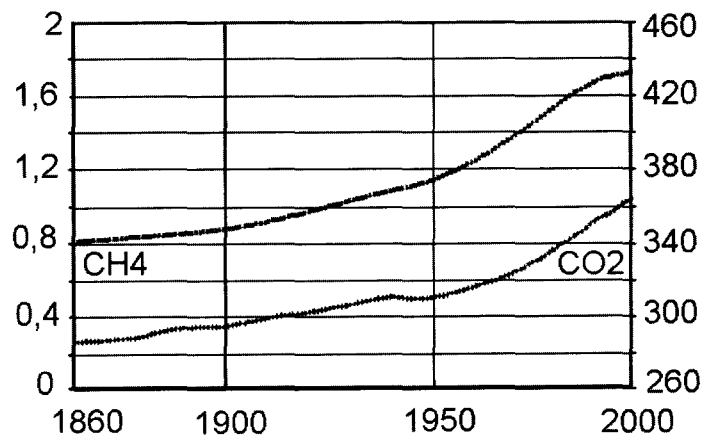
Depuis plusieurs décennies, les émissions dues à la combustion de carburants fossiles dominent l'augmentation de la concentration du CO<sub>2</sub>. La modification climatique entraînée par la poursuite de ces émissions compromettra-t-elle la durabilité du développement ? Faut-il par conséquent limiter l'utilisation des carburants fossiles, bien avant de les épuiser ? Il y a là des sujets de recherche pour ceux qui étudient les cycles biogéochimiques, pour ceux qui cherchent à comprendre et même à prévoir les variations du climat comme pour ceux qui cherchent à évaluer les « impacts » d'un changement climatique dans les sphères de l'écologie et de l'économie, dans le domaine de la sécurité et de la santé publiques... Il faut aussi examiner dans quelle mesure le développement peut être entravé – ou au contraire accéléré – par la limitation de l'utilisation de carburants fossiles.

## Faits établis

### L'homme augmente le CO<sub>2</sub>

La quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère augmente (figure 1), et depuis un demi-siècle cette augmentation résulte incontestablement de l'émission croissante de CO<sub>2</sub> par la combustion du charbon et du pétrole. La concentration atmosphérique suit assez bien la courbe

du cumul des émissions, compte tenu d'une fraction de l'ordre de la moitié qui ne reste pas dans l'atmosphère. On comprend assez bien les oscillations de la courbe autour de la tendance générale, oscillations liées aux échanges entre l'atmosphère et la biosphère continentale (surtout les forêts de l'Hémisphère Nord), modulées en outre par la perturbation par les événements ENSO (El Niño Oscillation Australe) des échanges entre l'atmosphère et les océans. De plus, la variation de la composition isotopique confirme le rôle prépondérant du CO<sub>2</sub> provenant de la combustion de carbone fossile, puisque (à part les pics très récents dus aux expérimentations de bombes nucléaires dans l'atmosphère) la proportion du <sup>14</sup>C diminue. Que le CO<sub>2</sub> atmosphérique ait augmenté bien avant que l'homme n'ait eu une influence significative sur l'atmosphère ne change rien à l'argument, et renforce même les craintes que l'on peut avoir devant l'évolution récente. En effet, puisque le CO<sub>2</sub> a augmenté par suite du réchauffement qui a accompagné la déglaciation, on peut penser qu'il existe une rétroaction positive : si le climat se réchauffe en réponse au CO<sub>2</sub> ajouté par l'homme à l'atmosphère, des sources naturelles du CO<sub>2</sub> peuvent alors enrichir encore plus l'atmosphère, amplifiant le réchauffement.



**Figure 1.** Variation de la concentration atmosphérique du gaz carbonique (à droite) et du méthane (à gauche), en parties par million par unité de volume. Depuis 1957, les données pour le CO<sub>2</sub> proviennent de l'Observatoire du Mauna Loa ; les données antérieures provenant notamment des carottes glaciaires.

## Le CO<sub>2</sub> intervient dans le climat

Le climat dépend des échanges d'eau et d'énergie dans le système Terre-atmosphère, échanges activés par le flux d'énergie solaire (cf. e.g. Kandel et Fouquart 1992). Deux processus physiques se trouvent étroitement liés dans la machine climatique. Le premier correspond à la dégradation en chaleur de près de 70 % du flux énergétique solaire qui baigne notre planète, et à sa réémission vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge (figure 2). Le second correspond au cycle de l'eau : évaporation, transport, condensation, précipitation (cf. e.g. Chahine, 1992 ; Kandel, 1998b), sans échanges significatifs d'eau entre la planète Terre et son environnement cosmique.

La quasi-totalité du flux d'énergie solaire (342 watts par mètre carré en moyenne) arrive sous forme de rayonnement aux longueurs d'onde assez courtes (de 0,3 à 3  $\mu\text{m}$  : du proche ultraviolet, et de la lumière visible au proche infrarouge) pour lesquelles l'atmo-

sphère (y compris l'atmosphère nuageuse) est relativement peu absorbante. Même si la valeur exacte de l'absorption atmosphérique du rayonnement solaire reste incertaine et controversée, on peut affirmer que le flux solaire incident est absorbé et donc transformé en chaleur, en grande partie (45 % ?) à la surface de la Terre. Sans d'autres apports énergétiques, ces 150  $\text{Wm}^{-2}$  absorbés à la surface ne suffiraient guère pour la maintenir à une température moyenne de 15 °C (288 K), car à cette température l'émission de rayonnement infrarouge vers le haut avoisine les 390  $\text{Wm}^{-2}$ .

L'explication réside dans ce que l'on appelle couramment « l'effet de serre ». L'atmosphère, relativement transparente au rayonnement solaire, absorbe assez fortement une grande partie du spectre infrarouge moyen, aux longueurs d'onde (typiquement de 4 à 40  $\mu\text{m}$ ) où émettent les surfaces et l'atmosphère terrestres dont les températures vont typiquement de -60 à +50 °C. De plus, les nuages, couvrant en moyenne plus de 60 % de la surface du globe, sont pratiquement opaques dans tout le spectre infrarouge. L'absorption et la réémission par l'atmosphère du rayonnement infrarouge permettent le maintien d'un gradient de température assez fort (en moyenne 6 °C par km) entre la surface et la tropopause (de 8 à 18 km d'altitude selon la date et la latitude), ce qui rend compte de la différence moyenne de 150  $\text{Wm}^{-2}$  entre le flux infrarouge émis vers le haut depuis la surface, et le flux moyen de 240  $\text{Wm}^{-2}$  qui s'échappe vers l'espace. Cet effet de serre qui au total se chiffre à 150  $\text{Wm}^{-2}$  de flux infrarouge piégé, peut également être décrit par la différence de 33 °C entre la température effective de la planète (celle à laquelle un corps noir rayonnerait 240  $\text{Wm}^{-2}$  vers l'espace, soit -18 °C), et la température moyenne à la surface (+15 °C).

Or, l'absorption infrarouge, donc l'effet de serre, dépend en premier lieu de la vapeur d'eau (pour environ 90  $\text{Wm}^{-2}$ ) et du gaz carbonique (30-40  $\text{Wm}^{-2}$ ). Les gaz à effet de serre (GES) sont des constituants mineurs de l'atmosphère, mais ils correspondent à des molécules polyatomiques - H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, et aussi ozone (O<sub>3</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>), protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), les chlorofluorocarbures (CFC)... qui interagissent bien plus efficacement avec le rayonnement infrarouge que ne le font les gaz majoritaires (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar), de structure trop simple. Puisque le gaz carbonique présent dans l'atmosphère (de même que d'autres GES) augmente du fait des activités humaines, on doit s'attendre à une intensification de l'effet de serre, et donc du gradient vertical de la température. Mais de combien ? Le problème se complique parce que les concentrations atmosphériques de vapeur d'eau dépendent justement des températures et de la circulation atmosphérique ; la vapeur d'eau étant, rappelons-le, le premier gaz à effet de serre.

Le fonctionnement de la branche atmosphérique du cycle de l'eau dépend en particulier des processus d'évaporation à la surface, très sensibles aux températures et aux vents dans les basses couches de l'atmosphère, et des processus de condensation qui donnent lieu à la formation des nuages. Le bilan énergétique à la surface ne s'annule d'ailleurs que parce qu'il y a un

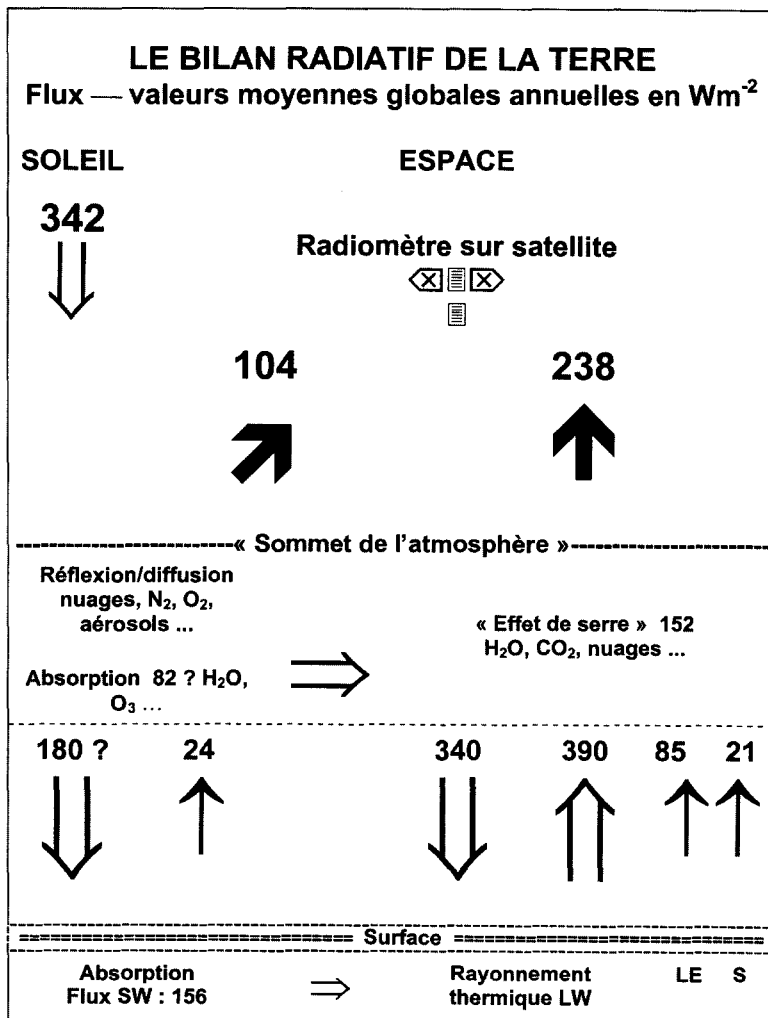


Figure 2. Bilan énergétique de la Terre, valeurs moyennes annuelles sur le globe, flux en watts par mètre carré. Les flèches horizontales correspondent à l'absorption de rayonnement solaire, c'est-à-dire à sa conversion en chaleur. On remarque le rôle essentiel des transports non-radiatifs de chaleur sensible (S) et de chaleur latente (LE) de la surface vers l'atmosphère ; le dernier terme correspond à l'évaporation de l'eau à la surface (et à sa condensation dans l'atmosphère).

terme important de flux de chaleur latente d'évaporation. L'évaporation ne peut se maintenir que parce que le bilan des flux radiatifs est positif, en particulier à cause de l'effet de serre : l'atmosphère absorbe une grande partie du flux infrarouge montant, comme elle émet un important flux de rayonnement infrarouge (plus de  $300 \text{ Wm}^{-2}$ ) vers le bas. Mais cet effet de serre dépend en premier lieu de l'existence d'assez de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Compte tenu des processus de précipitation, cette quantité de vapeur d'eau (aussi minime soit-elle par rapport à la masse totale de l'atmosphère) ne peut être maintenue que par l'évaporation, ce qui implique un bilan radiatif positif à la surface de la Terre.

La théorie du transfert de rayonnement dans l'atmosphère est une discipline mure, même s'il reste des lacunes dans nos connaissances des propriétés des nuages et des aérosols et de leur répartition. On sait qu'à certaines longueurs d'onde de l'infrarouge, les bandes d'absorption du  $\text{CO}_2$  dominent de loin les autres constituants atmosphériques, et on les identifie facilement dans le spectre du rayonnement terrestre observé depuis l'espace, comme dans celui du rayonnement atmosphérique observé au sol. Si rien d'autre ne change, augmenter la quantité de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère conduit directement à une augmentation (faible, il est vrai) du flux de rayonnement infrarouge de l'atmosphère vers la surface, et à une augmentation du piégeage du flux infrarouge montant dans la troposphère. Les émissions de  $\text{CO}_2$  dues aux activités humaines constituent sans aucun doute une intervention dans les processus physiques qui déterminent le climat, perturbant les transports verticaux de l'énergie sous forme du rayonnement infrarouge. Il en est de même pour les augmentations anthropiques des concentrations de  $\text{CH}_4$ , des CFC et d'autres gaz, souvent en interaction complexe avec la chimie de l'ozone, lui-même un gaz à effet de serre. Si l'on suppose connue (mais comment la calculer ?) l'évolution de la composition atmosphérique, on peut calculer la perturbation directe du bilan radiatif de l'atmosphère (le « forçage radiatif »). Mais quelle est la sensibilité du climat à ces perturbations ?

Cette question se trouve compliquée par le fait que les émissions de  $\text{CO}_2$  dues à la combustion de carburants fossiles sont souvent accompagnées d'émissions de dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), gaz qui se transforme en aérosols. Dans certaines régions du globe, ces aérosols anthropiques tendent à augmenter, directement ou indirectement, la réflexion du rayonnement solaire vers l'espace (Mitchell et al., 1995, Boucher et Lohmann, 1995). Ce renforcement de ce que j'appelle « l'effet parasol » compense en partie, et dans certaines régions seulement, le renforcement de l'effet de serre.

## Le climat a changé, change, changera

On raconte souvent que la nature possède nécessairement des mécanismes stabilisateurs, résistant aux perturbations, et que sa capacité « d'auto-guérison »

nous protège de tout changement catastrophique. Certes, il est vrai que l'eau existe sous forme liquide à la surface de la Terre depuis au moins trois milliards d'années, malgré l'évolution du Soleil et l'augmentation sensible de son éclat. Cependant, même si les océans ont évité le gel complet aussi bien que l'évaporation totale, le climat a maintes fois changé dans le passé. Si nous limitons notre regard aux derniers deux millions d'années, ce qui nous permet de négliger l'évolution lente de la brillance du Soleil ainsi que la dérive des continents et les processus de soulèvement de chaînes montagneuses, nous constatons des variations semi-régulières du climat sur tout le globe, avec une extension plus ou moins forte des glaces. Ces glaciations et déglaciations partielles ont été chaque fois accompagnées par des variations importantes du niveau de la mer, de l'étendue des déserts, et de la composition de l'atmosphère. Quasi cycliques en caractère, ces variations ont des périodicités de l'ordre de 21 000, 40 000, 100 000 et 400 000 ans. Ces mêmes périodes se trouvent dans les paramètres de la rotation et de l'orbite de la Terre, qui affectent la répartition de l'ensoleillement avec la latitude et les saisons. Les mécanismes de ces variations dites de Milankovitch sont aujourd'hui en partie compris (Joussaume, 1993).

Depuis le dernier maximum glaciaire (il y a 18 000 ans), la Terre a connu une période de réchauffement et de recul des glaces s'étendant sur plusieurs millénaires ; et superposée à cette tendance, une fluctuation rapide – le Dryas récent, il y a environ 11 000 ans – coup de froid s'installant très rapidement (en moins d'un siècle) et se maintenant pendant mille ans. Depuis environ 8 000 ans, en revanche, nous bénéficions d'un climat relativement stable, ce qui n'est certainement pas étranger au succès des sociétés s'organisant autour de l'élevage et de l'agriculture plutôt que de la chasse et la cueillette. Ce qui ne veut pas dire que les faibles fluctuations survenues au cours des millénaires (Burroughs, 1997 ; Dahl-Jensen *et al.*, 1998 ; Mann et al., 1998) n'aient pas eu de graves incidences sur ces sociétés. On est loin de pouvoir identifier avec certitude les causes (solaire, terrestres... de ces multiples fluctuations (Optimum Médiéval, Petit Âge Glaciaire...). Il est d'ailleurs possible qu'il n'y ait pas de causes à trouver, que ces fluctuations trahissent la variabilité interne, non forcée, du système climatique.

Depuis environ 150 ans, nous subissons un réchauffement hésitant et encore assez faible quoique plus fort que les variations des 4 siècles précédents (figure 3). Ce réchauffement récent a notamment mis fin au Petit Âge Glaciaire qui s'était installé au cours du 17<sup>e</sup> siècle. Comme pour les fluctuations des siècles précédents, nous n'en connaissons pas les causes. On peut faire des hypothèses autour de fluctuations solaires éventuelles, mais il n'existe pas de mesures anciennes suffisamment précises permettant de vérifier ou d'infirmer ces hypothèses, qu'il s'agisse de l'irradiance solaire ou d'effets indirects de l'activité solaire sur l'atmosphère de la Terre. L'intensification récente de l'effet de serre, intervenant surtout depuis les années 1970, n'explique pas le réchauffement

assez rapide et fort qui s'est produit entre 1910 et 1940. Nous sommes peut-être en présence de deux changements ou fluctuations de nature distincte, se suivant avec un répit assez court.

Aujourd'hui, les chercheurs spécialistes du climat croient en grande majorité qu'il existe un risque de réchauffement significatif au cours du siècle à venir, à cause du renforcement important prévisible de l'effet de serre. Cependant, l'incertitude reste quant à l'ampleur des changements attendus, rendant difficile l'estimation des impacts qu'ils pourraient avoir sur la durabilité du développement. En même temps, de vifs débats se poursuivent autour de l'annonce (dans le résumé destiné aux décideurs du dernier rapport du Groupement intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 1996) de la détection d'un réchauffement anthropique dans les variations climatiques des deux dernières décennies. Il me semble qu'il s'agit là d'un faux débat. Les séries de mesures spatiales relativement homogènes et à couverture globale n'existent que depuis une vingtaine d'années, période trop courte pour établir ou nier fermement la réalité d'une accélération du changement climatique. La variabilité interannuelle du climat (le « bruit » climatique) peut encore masquer, simuler ou exagérer une tendance (signal) de réchauffement due à l'intensification de l'effet de serre, modérée (et compliquée géographiquement) par le renforcement de l'effet parasol des aérosols anthropiques. Il en est de même pour les variations interdécennales, encore très mal connues. Le réchauffement récent de 0,4 °C intervient *après* le réchauffement inexplicé de 0,4 °C de la première moitié du siècle. La question de l'acuité du risque pour l'avenir reste ouverte.

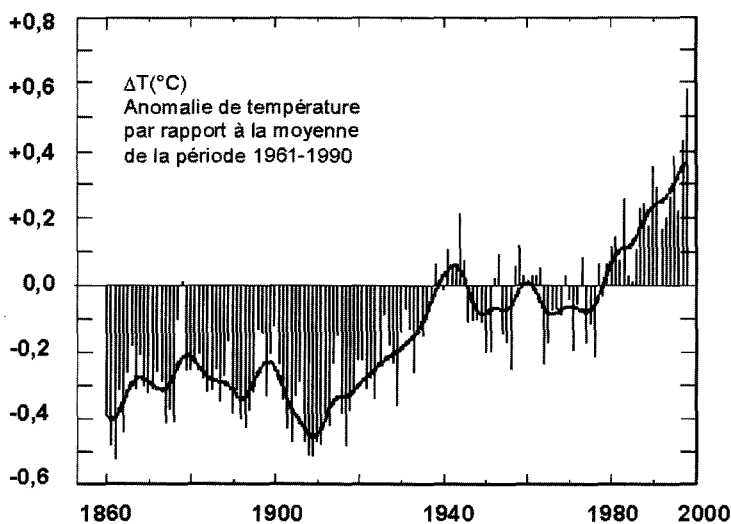


Figure 3. Variation de la température moyenne à la surface du globe depuis 1860, exprimée en °C par rapport à la moyenne des années 1961-1990 (d'après le Hadley Centre for Climate Prediction and Research, UKMO).

## Un avenir prévisible ?

### Les paramètres d'entrée du problème

Si, pour fixer les idées, on raisonne en termes de valeurs moyennes globales annuelles, et si on suppose que ces valeurs correspondent à un état d'équilibre (bilan radiatif planétaire nul), on peut exprimer le problème par l'équation :

$$\text{Rayonnement solaire absorbé} = \text{rayonnement thermique terrestre émis}$$

soit, en détaillant quelque peu,

$$\text{Rayonnement solaire incident} \times (1 - \text{albédo}) = \text{Rayonnement thermique de la surface terrestre} \times (1 - \text{effet de serre normalisé}).$$

Le rayonnement solaire incident au « sommet » de l'atmosphère vaut près de 342 watts par mètre carré en valeur moyenne (sur toutes les latitudes, jour et nuit, toute l'année). On connaît bien ses fluctuations avec le cycle des taches solaires ( $\pm 0,1\%$ ) depuis une vingtaine d'années, et pour l'avenir proche on ne peut que supposer que cette quasi constance se maintiendra. L'albédo de notre planète (0,30 en valeur moyenne globale) correspond à la réflexion du rayonnement solaire vers l'espace, et dépend notamment de la couverture nuageuse et de la diffusion par les gaz et les aérosols atmosphériques, de l'étendue des glaces et des neiges, des déserts... Le rayonnement thermique (infrarouge) de la surface terrestre dépend surtout de la température de cette surface (288 K ou +15 °C en moyenne globale annuelle). Le paramètre « effet de serre normalisé » exprime le degré de piégeage de rayonnement infrarouge par l'atmosphère, et vaut 0,385. Il dépend en premier lieu de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, en second lieu de celle du  $\text{CO}_2$  ; mais il dépend également d'autres gaz à effet de serre, de la couverture nuageuse et de la structure verticale de l'atmosphère.

Le bilan radiatif planétaire ne s'équilibre pas chaque mois, mais suit plutôt un cycle annuel d'amplitude  $\pm 10 \text{ Wm}^{-2}$  (cf. Kandel et Fouquart, 1992). Rien ne démontre qu'il serait parfaitement équilibré en moyennant sur une année, ou une décennie, quoiqu'il ne puisse pas s'écarter indéfiniment de l'équilibre. En supposant néanmoins que le bilan radiatif planétaire reste équilibré en moyenne annuelle, une perturbation d'un terme de l'équation d'équilibre ci-dessus (ce que l'on appelle un forçage) doit être compensée par une modification de l'état du système, une ou plusieurs rétroactions qui affectent à leur tour un ou plusieurs termes de l'équation. Dans ce modèle caricatural du système climatique, on représente l'état physique du système par la température moyenne à la surface du globe. Une variation solaire hypothétique peut jouer le rôle de perturbation (forçage) purement externe, puisque nous n'imaginons pas que les changements de l'état du système Terre puissent affecter le Soleil. À une augmentation (diminution) du rayonnement solaire doit répondre un réchauffement (refroidissement).

dissement) à la surface de la Terre, augmentant (diminuant) le rayonnement thermique émis par la surface.

Cette rétroaction du rayonnement thermique constitue une rétroaction négative essentielle à la stabilité du système climatique, permettant le rétablissement de l'équilibre. Elle intervient dans toute perturbation de l'équilibre, que ce soit par le Soleil, par l'albédo ou par l'effet de serre. Cette rétroaction, si elle était seule à intervenir, impliquerait une sensibilité relativement faible du climat : pour 2 % d'augmentation de la luminosité solaire, soit un forçage radiatif de  $6,8 \text{ Wm}^{-2}$ , le réchauffement à la surface de la Terre ne serait que  $1,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pour le doublement du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, le forçage radiatif correspondant ne vaut que  $4 \text{ Wm}^{-2}$ , ce qui donnerait seulement  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ . D'autres rétroactions, positives, peuvent amplifier la sensibilité du climat, mais elles ne rendent pas le climat instable pour autant, tant que la rétroaction nette reste négative. Il faut se rappeler l'existence de la rétroaction radiative négative de base, qui est présente implicitement dans tous les calculs de sensibilité, même ceux parfois décrits comme étant des calculs de sensibilité « sans rétroactions ».

## Forçages, rétroactions et incertitudes

Le climat change, et le système physique qui gouverne le climat n'est généralement pas dans un état d'équilibre strict. On ne peut donc supposer que les fluctuations du climat représentent un ajustement instantané aux perturbations de l'équilibre, avec une équation du type :

$$\text{Changement climatique} = \text{sensibilité climatique} \times \text{forçage du changement}$$

qui permettrait en principe de déduire la sensibilité du climat à partir des forçages et des changements observés. Pour représenter l'évolution climatique observée sur une période de quelques décennies seulement, il faut plutôt écrire une équation d'évolution en fonction de forçages eux-mêmes en évolution, avec un ou plusieurs termes de variabilité interne ou de « bruit » non forcé. Évaluer empiriquement la sensibilité climatique dans ces conditions constitue une gageure. Au contraire, on s'efforce de déduire cette sensibilité à partir d'une modélisation du système climatique qui fait intervenir non seulement la rétroaction radiative de base, mais également des rétroactions liées aux autres processus physiques et chimiques qui se déroulent au sein du système climatique. Dans le cadre du modèle caricatural déjà décrit, la température moyenne à la surface du globe,  $T$ , devient le paramètre du climat, et l'équation d'équilibre peut s'écrire :

$$([S + \Delta S]/4) (1 - \alpha[X, T]) = (1 - g[X, T]) \sigma T^4$$

où  $\Delta S$  et  $X$  représentent les forçages solaires et terrestres (c'est-à-dire les variations imposées de la luminosité du Soleil, et celles par exemple des aérosols ou des gaz à effet de serre dans l'atmosphère

terrestre), et où tout changement de  $T$  en réponse au forçage entraîne des modifications supplémentaires de l'albédo  $\alpha$  et de l'effet de serre (normalisé)  $g$ , les rétroactions, positives ou négatives. Remarquons que le concept de rétroaction s'interprète généralement de façon phénoménologique (faire fondre des glaces fortement réfléchissantes diminue l'albédo, augmenter la température augmente la capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau, gaz à effet de serre). Dans le cadre du modèle très simple donné ci-dessus, on peut écrire les termes de rétroaction sous la forme de dérivées partielles de  $\alpha$  et de  $g$  par rapport à  $T$  (ch.1, Académie des Sciences, 1990). Cependant les rétroactions ne paraissent pas de manière aussi explicite avec un modèle réaliste, et elles ne sont généralement pas additives.

Une fois prise en compte la rétroaction du rayonnement thermique, les rétroactions les plus importantes viennent des modifications du cycle de l'eau entraînées par un réchauffement des basses couches atmosphériques et de la surface. Il est certain qu'à plus forte température, l'air peut contenir davantage d'humidité avant que n'intervienne la saturation. Mais l'humidité absolue augmentera-t-elle réellement ? Cela dépendra des modifications des processus d'évaporation et de condensation. Dans certains modèles très simples (à une dimension), on suppose que l'humidité relative ne change pas, donc que l'humidité absolue augmente, renforçant l'effet de serre. Cette rétroaction « vapeur d'eau », est alors positive ; elle double la sensibilité du système, donnant donc un réchauffement significatif de  $2,7 \text{ }^\circ\text{C}$  à la surface pour le cas  $2 \times \text{CO}_2$ . On obtient des résultats similaires avec les modèles de circulation générale (les « GCM ») où l'on cherche à imiter la complexité du système climatique (trois dimensions spatiales + le temps), mais là encore il faut employer des représentations simplifiées (les « paramétrisations ») des processus d'évaporation et de condensation (Le Treut et Kandel, 1992 ; IPCC, 1990, 1995). Quelques spécialistes contestent la validité de ces résultats et ne croient pas que la rétroaction vapeur d'eau soit positive (Lindzen, 1990).

La sensibilité du climat n'est grande que si la rétroaction « vapeur d'eau » est positive, ce qui implique une perturbation significative de la branche atmosphérique du cycle de l'eau. La condensation, et donc généralement la formation des nuages, doivent limiter l'augmentation de l'humidité atmosphérique. Les plus grandes incertitudes surgissent lorsqu'on cherche à évaluer les rétroactions entraînées par une modification de la nébulosité, de sa couverture, de ses propriétés physiques. En effet, les nuages contribuent à la fois à la réflexion de l'énergie solaire et au blocage du rayonnement infrarouge terrestre vers l'espace. Dans notre climat actuel, le premier (l'effet parasol) est plus fort à l'échelle du globe : on dit que le « forçage radiatif de la nébulosité » est négatif ( $-50+30 = -20 \text{ Wm}^{-2}$ ). Toutefois, l'effet de serre agit seul la nuit et en hiver polaire. Cet effet de serre des nuages compense plus ou moins l'effet parasol lorsqu'il s'agit de nuages élevés aux sommets très froids. Pour le changement climatique, la question est de savoir comment changera l'effet net des nuages. Même si l'effet parasol de la nébulosité continue d'être

plus fort que son effet de serre, sa rétroaction radiative peut être positive si le deuxième effet augmente plus que le premier. Les résultats obtenus avec les différents GCM sont en désaccord flagrant (Cess et al., 1989), ce qui explique l'éventail des réchauffements calculés pour un scénario 2 ~ CO<sub>2</sub>. En outre, ces résultats dépendent fortement des hypothèses plus ou moins arbitraires qui rentrent dans les paramétrisations des processus microphysiques de formation et de dissipation des nuages, sur la taille des gouttelettes et les transformations entre eau liquide et glace.

Finalement, il ne faut pas oublier que si la température moyenne à la surface du globe constitue un paramètre commode pour résumer l'état physique d'un modèle simple voire caricatural, de tels modèles restent trop schématiques pour être d'une utilité autre que publicitaire ou médiatique. Pour la vie des gens, ou des plantes, il faut étudier les changements climatiques à l'échelle des régions, en particulier les changements dans les taux d'évaporation et de précipitation, qui ont généralement au moins autant d'importance pour l'agriculture que les changements de température. Le « réchauffement global » ne sera important que si le cycle de l'eau est perturbé, et les perturbations du cycle de l'eau, localement, aux échelles régionales et à celles des grands bassins versants, modifieront les conditions d'épanouissement de la vie végétale et animale sur notre planète.

## Le problème des aérosols

Beaucoup des calculs faits au cours des années 1980 ont employé des scénarios de doublement du CO<sub>2</sub> (ou l'équivalent pour un cocktail de gaz à effet de serre), sans considérer d'autres perturbations anthropiques du système climatique. Cependant, la combustion de carburants fossiles s'accompagne souvent d'émissions de SO<sub>2</sub> et de particules carbonées.

Les émissions de SO<sub>2</sub> alimentent la formation d'aérosols sulfatés au-dessus de certaines régions du globe. Ces aérosols anthropiques, renforçant la réflexion du rayonnement solaire, tendent à contre-carrer le réchauffement dû au renforcement de l'effet de serre. Cet effet direct reste assez faible, mais les aérosols peuvent aussi modifier les propriétés optiques des nuages, puisqu'ils favorisent la condensation et la congélation et modifient ainsi le nombre et la taille des gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace qui constituent les nuages.

La modélisation de ces effets reste imparfaite, mais il semble que cet effet « indirect » des aérosols anthropiques peut compenser partiellement ou totalement, sur certaines régions, le renforcement de l'effet de serre par les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la combustion de carburants fossiles (Mitchell et al., 1995 ; Boucher et Lohmann, 1995). Remarquons que si les émissions de CO<sub>2</sub> et des CFC affectent la composition de toute l'atmosphère de la planète, on ne trouve les aérosols sulfatés anthropiques en quantité que sous le vent des régions émettrices, puisque leur temps de résidence dans l'atmosphère, avant lessivage par les précipitations, dépasse rarement la semaine.

On a cru identifier la « signature » de ces effets contradictoires dans les changements climatiques observés au cours des dernières décennies (Santer et al., 1996). Cependant la question reste controversée, les modélisations restent discutables, et il est possible que le signal ne soit pas encore sorti du bruit de la variabilité naturelle.

Il faut noter que la plus forte croissance des émissions de CO<sub>2</sub> est attendue dans les pays en fort développement où l'on n'a pas encore limité sensiblement les émissions de SO<sub>2</sub>. Ceci soulève un problème difficile. Les émissions de SO<sub>2</sub> sont perçues incorrectement comme des pollutions, produits désagréables et dangereux à respirer. Au contraire, le CO<sub>2</sub> n'est pas un polluant au sens usuel : sauf aux niveaux de quelques dizaines de milliers de ppm (quelques pour mille), parfois atteints dans les cabines d'avions de ligne, il est facilement respirable, il ne nuit pas à la santé. En outre, le CO<sub>2</sub> favorise la croissance des plantes. La menace, s'il y en a une, vient de son effet sur les climats.

Or, si le développement se poursuit sur la base d'une consommation croissante de carburants fossiles, et si en même temps on renforce la lutte contre la pollution par les particules et les aérosols sulfatés, ne risque-t-on pas de voir apparaître rapidement une forte intensification de l'effet de serre, jusqu'ici masquée par la chape de poussières ?

On ne va tout de même pas faire un plaidoyer pour la continuation de la pollution de l'air en Chine, ni pour l'arrêt de son développement économique. On peut regarder la question autrement. À terme (c'est-à-dire à l'échelle d'un siècle), les aérosols sulfatés anthropiques auront relativement peu d'influence sur le changement climatique si les émissions de gaz à effet de serre se poursuivent, parce qu'il y aura saturation des effets de ces aérosols bien avant que le CO<sub>2</sub> atmosphérique ne soit enrichi d'un facteur 2 ou 3. Si une réduction, d'ici 30 ans, de la pollution par le SO<sub>2</sub> devait conduire rapidement à un réchauffement notable, facile à distinguer de la variabilité naturelle, ce serait un signe de la gravité du risque climatique pour les décennies à suivre, ce qui devrait alors conduire à un effort plus vigoureux et soutenu que les efforts actuels (Bolin, 1998) pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

## Une (mauvaise) surprise possible

Le CO<sub>2</sub> émis se mélange dans toute l'atmosphère de la planète, et renforce partout l'effet de serre. Cependant, les effets de ce renforcement, agissant dans le système climatique planétaire, ne sont pas partout les mêmes. On peut même imaginer un scénario de réchauffement « global » accompagné par un refroidissement radical en Europe. Si le changement climatique devait comporter une augmentation des précipitations sur la mer de Norvège, cela conduirait à une diminution de la salinité des eaux de surface, stabilisant alors ces couches et arrêtant la formation des eaux profondes (Duplessy, 1996 ; Broecker, 1997). Or, cette convection thermohaline est nécessaire à la

circulation océanique profonde en « tapis roulant convoyeur de chaleur », et si celle-ci devait être stoppée, cela entraînerait le refroidissement de l'Europe. Risque réel ou fantasme catastrophiste ? Le problème mérite des recherches plus poussées.

## Changement climatique et durabilité

### Conséquences attendues du changement climatique

Répetons-le : la plus importante conséquence du changement climatique, pour le développement (durable ou non) des sociétés humaines, comme pour l'évolution de la biosphère en général, réside dans la modification du cycle hydrologique. Les changements attendus dans la répartition géographique et saisonnière de l'évaporation et des précipitations, perturberont inévitablement l'adéquation entre la biosphère (aussi bien naturelle que celle gérée par l'homme) et le climat.

Quelle sera la rapidité de ces changements ? Les modifications de la branche atmosphérique du cycle de l'eau suivent rapidement toute modification de l'état physique de l'atmosphère, car le temps de résidence de l'eau dans l'atmosphère est très court (de 8 à 10 j). On peut, il est vrai, invoquer « l'inertie thermique » pour les températures de la mer, et celles-ci contrôlent en partie l'importante rétroaction vapeur d'eau. Cette inertie thermique intervient beaucoup moins pour les températures des terres, bien que les grandes masses d'eau liquides et surtout solides sur les continents peuvent y contribuer. Les changements, qui ne se résument point à un simple réchauffement global, modifieront progressivement les bilans des accumulations et des fontes de neige et de glace sur les terres, d'où une modification du niveau de la mer. Une augmentation des températures à la surface de la mer et la dilatation thermique des eaux proches de la surface devraient contribuer à une montée relativement rapide (plusieurs décimètres par siècle) du niveau de la mer. A plus long terme (quelques siècles ou millénaires), des transferts éventuels d'eau de ou vers les continents peuvent soit amplifier soit limiter cette montée. Si les quantités d'eau accumulées sous forme solide (neige, glace) sur les continents augmentent, le niveau de la mer baissera. Rappelons, toutefois, que si le temps de résidence de l'eau dans la mer se compte en siècles lorsqu'on considère la masse totale des océans, la circulation profonde passe par quelques points sensibles, et qu'un arrêt brusque (en moins d'un siècle) de la convection thermohaline pourrait avoir des conséquences dramatiques dans certaines régions, notamment en Europe.

### Problèmes moins urgents ?

Le problème du maintien d'un développement réellement durable n'est pas simple, même dans un monde sans changements climatiques. Si le développement économique se fait surtout sur la base d'une consom-

mation croissante de carburants fossiles, et s'il entraîne par conséquent, en moins d'un siècle, une transformation de la carte des climats et tout particulièrement du cycle hydrologique, le problème de la durabilité du développement devient encore plus complexe, nécessitant des compromis difficiles à doser. Dans ces conditions, il ne faut pas laisser détourner notre attention des vrais problèmes. Mon point de vue personnel est que l'on porte beaucoup trop d'attention à des problèmes dont l'existence n'est même pas démontrée, problèmes non immédiats, voire des problèmes inhérents à l'état de sous-développement qu'il y ait ou non des changements climatiques.

Dans la première catégorie, je citerai la croyance qu'un réchauffement global serait nécessairement accompagné par une augmentation généralisée de la fréquence d'événements météorologiques extrêmes. Premièrement, cela n'est pas démontré par l'analyse des variations climatiques du dernier siècle (Landsea et al., 1996 ; Henderson-Sellers et al., 1998 ; WASA Group, 1998). Il ne faut pas confondre l'augmentation des pertes exprimées en unités monétaires (ou même en vies humaines, compte tenu de la croissance des populations exposées) avec une intensification des violences du ciel. Selon la région du globe, selon la période considérée, on constate des variations dans un sens ou l'autre.

Deuxièmement, si certaines simulations du changement climatique donnent effectivement davantage d'événements extrêmes – tempêtes violentes, pluies excessives ou périodes de sécheresse – dans certaines régions, tous les modèles ne donnent pas les mêmes résultats, et il est trop tôt pour conclure quoi que ce soit (Lighthill et al., 1994). Des arguments simplistes peuvent rendre plausible une augmentation de la fréquence et de la violence des cyclones tropicaux, mais d'autres arguments plausibles conduisent à la conclusion opposée. Si, comme certains l'ont suggéré, le réchauffement global se manifeste par une augmentation de la fréquence des événements El Niño, cela entraîne davantage de sécheresses en Indonésie, et de pluies diluviennes en Équateur ; mais en même temps cela diminue le nombre de cyclones tropicaux du secteur Atlantique-Caraïbes.

Faut-il craindre la disparition de quelques îles, l'inondation des plaines côtières ? Ce n'est ni le plus immédiat ni le plus important des problèmes. La montée du niveau de la mer due à la dilatation thermique des eaux restera inférieure à quelques dizaines de cm au cours du siècle à venir (Gregory, Oerlemans, 1998). Pour le Bangladesh, le problème existe déjà. On parvient aujourd'hui, bien mieux qu'il y a 30 ans, à alerter et à protéger les populations contre les inondations lors des passages de cyclones. Cependant, pour protéger les terres et les habitations, il faut dès aujourd'hui une infrastructure comparable, mais d'une dimension bien supérieure, à celle mise en place aux Pays-Bas. Si l'on parvient à résoudre ce problème, on trouvera les moyens de couvrir le coût supplémentaire entraîné par une montée de la mer d'un mètre. Quant aux quelques États insulaires qui se trouveraient à terme menacés, on comprend qu'ils cherchent à défendre leur existence. Cependant, si dans 50 ans les



pays riches ou peuplés (ou les deux) estiment que les avantages des carburants fossiles pèsent plus que les inconvénients d'une mer plus haute, les États-îles n'auront, face à l'inéluctable, qu'à se résigner à l'inévitable (Parry et al., 1998), à négocier des compensations devant la Cour internationale. Recours qui n'est pas disponible aux habitants chassés récemment de l'île de Montserrat par l'éruption de sa Soufrière, car ils ne peuvent pas attaquer en justice la déesse Pele des volcans.

À plus long terme, le bilan des glaces (Antarctique, Groenland) peut effectivement changer le niveau de la mer de plusieurs mètres voire dizaines de mètres. Mais dans quel sens, et à quelle échéance ? Le plus grand risque à échéance inférieure au millénaire paraît dans l'instabilité potentielle des glaces de l'Antarctique « Occidentale », qui pourrait faire monter la mer de six mètres (Bentley, 1997 ; Oppenheimer, 1998). Certes, il faut poursuivre les recherches et surveiller les glaces. Toutefois, avec une échéance presque certainement plus longue qu'un siècle, ce risque ne semble pas atteindre le niveau auquel on puisse espérer convaincre les « décideurs » d'invoquer le « principe de précaution ».

Finalement, on a beaucoup écrit sur les impacts du réchauffement sur la santé (NAS, 1996). S'il y a menace pour la santé des populations dans ce que l'on appelle en raccourci le réchauffement global, elle provient essentiellement des modifications du cycle hydrologique, là où ces modifications nuisent au ravitaillement en eau et à la production alimentaire. Dans certaines régions, les changements peuvent être bénéfiques, à condition que la société sache en tirer partie, ce qui n'est pas certain dans l'état de sous-développement. Dans d'autres régions du Tiers-Monde, les changements hydrologiques seront franchement défavorables, alors que l'approvisionnement en eau potable est déjà très mal assuré. Voilà la véritable menace pour la santé, mais ce problème existe déjà et deviendra encore plus critique avec la croissance démographique, surtout celle des villes du Tiers-Monde, même si le climat ne change point. Le problème le plus urgent du Bangladesh n'est pas d'ordre climatique ; il est celui d'approvisionner la population en eau potable non contaminée par l'arsenic naturel (Nickson et al., 1998). Si l'on parvient à vaincre le sous-développement, on saura protéger la santé. On écrit souvent que le réchauffement global conduira nécessairement à une extension des maladies « tropicales ». Et il est vrai que le cycle de vie du *Vibrio cholerae* se trouve lié à des planctons sensibles à la température de la mer (Colwell, 1996). Cependant la vulnérabilité aux maladies dépend surtout des mesures de santé publique et notamment de purification de l'eau (Taubes, 1997). Le choléra, le paludisme et d'autres maladies « tropicales », courantes en Europe et en Amérique du Nord au cours du 19<sup>e</sup> siècle, ont fortement reculé au cours de ce 20<sup>e</sup> siècle malgré le réchauffement.

## Conclusions

Le risque du changement climatique constitue-t-il une contrainte majeure pour la recherche d'une stratégie

### Résumé – Le « développement durable », l'atmosphère et le climat

La question du « développement durable » soulève celle du changement climatique. Il est bien établi que les activités économiques modifient la composition de l'atmosphère, que les gaz à effet de serre affectent le climat, et que le climat peut changer. Cependant, de nombreux facteurs rendent difficiles une projection précise du devenir des climats : effets des aérosols anthropiques, rétroactions multiples liées aux modifications de l'humidité atmosphérique et de la nébulosité, changements éventuels de la circulation océanique. Il faut en outre noter que les conséquences majeures d'un changement climatique, pour les sociétés humaines comme pour la biosphère, viendront du nouveau partage de l'eau plutôt que du réchauffement proprement dit. Ce sont ces conséquences qu'il faut peser en priorité, sans se laisser dérouter par des problèmes secondaires. Malgré toutes les incertitudes, pour un développement véritablement durable, il faut tenir compte du risque du changement climatique.

« optimale » de développement durable ? On ne peut nier l'existence d'incertitudes à chaque niveau de causalité. Ces incertitudes portent sur :

- la vitesse du développement économique, dans le Tiers-Monde et ailleurs ;
- les taux d'émission de CO<sub>2</sub>, d'autres gaz à effet de serre, du SO<sub>2</sub> ... qui dépendent à la fois du développement économique, des mutations technologiques, et des contraintes politiques acceptées ;
- l'ampleur et la vitesse des changements climatiques anthropiques (et naturels), en particulier les changements dans le bilan hydrique, et leur répartition géographique ;
- les « impacts » négatifs ou positifs de ces changements dans les domaines écologiques et socio-économiques, et leur répartition géographique ;
- les capacités d'adaptation de la biosphère et des différentes sociétés humaines ;
- la capacité des décideurs à changer de cap quand la prospective est défavorable.

Dans ces conditions, on comprend la difficulté de faire appliquer un « principe de précaution », d'autant plus que d'importants intérêts économiques sont en jeu. Cependant, malgré toutes les incertitudes, on doit admettre que l'emploi croissant de carburants fossiles conduit inéluctablement à une transformation de plus en plus rapide de l'atmosphère de la planète, avec des conséquences climatiques qui peuvent compromettre la notion même de « développement durable ».

## RÉFÉRENCES

- Académie des Sciences. 1990. L'effet de serre et ses conséquences climatiques, évaluation scientifique. *Rapport* N° 25.
- Bentley C.R. 1997. Rapid sea-level rise soon from West Antarctic ice sheet collapse? *Science* 275, 1077–1078.
- Bolin B. 1998. The Kyoto negotiations on climate change: A science perspective. *Nature* 279, 330–331.

- Boucher O., Lohmann U. 1995. The sulphate-CCN-cloud albedo effect: A sensitivity study with two general circulation models. *Tellus* 47B, 281–300.
- Broecker W.S. 1997. Thermohaline circulation, the Achilles' heel of our climate system: Will man-made CO<sub>2</sub> upset the balance? *Science* 278, 1582–1588.
- Burroughs W.J. 1997. *Does the weather really matter? The social implications of climate change*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 225 pp.
- Cess R.D., Potter G.L., Blanchet J.P., Boer G.J., Ghan S.J., Kiehl J.T., Le Treut H., Li Z.-X., Liang X.-Z., Morcrette J.-J., Randall D.A., Riches M.R., Roeckner E., Schlese U., Slingo A., Taylor K.E., Washington W.M., Wetherald R.T., Yanai I. 1989. Interpretation of cloud climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models. *Science* 245, 513–516.
- Chahine M. 1992. The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature* 359, 373–380.
- Colwell R.R. 1996. Global climate and infectious disease: The cholera paradigm. *Science* 274, 2025–2031.
- Dahl-Jensen D., Mosegaard K., Gundestrup N., Clow G. D., Johnsen S. J., Hansen A. W., Balling N. 1998. Past temperatures directly from the Greenland ice sheet. *Science* 282, 268–271.
- Diamond J.M. 1997. *Guns, germs and steel: The fates of human societies*, Norton, New York.
- Duplessy J.-C. 1996. *Quand l'océan se fâche. Histoire naturelle du climat*. Odile Jacob, Paris.
- Gregory J.M., Oerlemans J. 1998. Simulated future sea-level rise due to glacier melt based on regionally and seasonally resolved temperature changes. *Nature* 391, 474–474.
- Henderson-Sellers A. H., Zhang G., Berz K., Emanuel W., Gray C., Landsea G., Holland J., Lighthill S.-L., Shieh P., Webster, McGuffie K. 1998. Tropical cyclones and global climate change: a post-IPCC assessment. *Bull. Amer. Met. Soc.* 79, 19–38.
- Hulme M. 1996. Recent climatic change in the world's drylands. *Geophys. Res. Lett.* 23, 61–64.
- IPCC. 1990. *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*, (J.T. Houghton et al., eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 365 pp.
- IPCC. 1996. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, J.T. Houghton (ed.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 572 pp.
- Joussaume S. 1993. *Climat d'hier à demain*, CNRS-éditions, Paris, 141 pp.
- Kandel R. 1998a. *L'incertitude des climats*. Hachette Littératures, Paris, Pluriel, 206 pp.
- Kandel R. 1998b. *Les Eaux du Ciel*, Hachette Littératures, Paris, Sciences, 320 pp.
- Kandel R., Fouquart Y. 1992. Le bilan radiatif de la Terre. *La Recherche* 23, 316–324.
- Landsea C.W., Nicholls N., Gray W.M., Avila L.A. 1996. Downward trends in the frequency of Intense Atlantic hurricanes during the past five decades. *Geophys. Res. Lett.* 23, 1697–1700.
- Le Treut H., Kandel R. 1992. Que nous apprennent les modèles du climat ? *La Recherche* n° spécial 243, *L'Effet de Serre*, 572–583.
- Lighthill J., Holland G., Gray W., Landsea C., Craig G., Evans J., Kurihara Y., Guard C. 1994. Global climate change and tropical cyclones. *Bull. Amer. Met. Soc.* 75, 2147–2157.
- Lindzen R.S. 1990. Some coolness regarding global warming. *Bull. Amer. Met. Soc.* 71, 288–299.
- Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 92, 779–787.
- Mitchell J.F.B., Johns T.C., Gregory J.M., Tett S.F.B. 1995. Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. *Nature* 376, 501–504.
- NAS. 1996. *Conference on Human Health and Global Climate Change*, Nat. Sci. et Technol. Council, Inst. of Medicine, Nat'l. Acad. Sci., Washington, National Academy Press.
- Nickson R., McArthur J., Burgess W., Ahmed K.M., Ravenscroft P., Rahman M. 1998. Arsenic poisoning of Bangladesh groundwater. *Nature* 395, 338.
- Oppenheimer M. 1998. Global warming and the stability of the West Antarctic Ice Sheet. *Nature* 393, 325–329.
- Parry M., Arnell N., Hulme M., Nicholls R., Livermore M. 1998. Adapting to the inevitable. *Nature* 395, 741.
- Santer B.D., Taylor K.E., Wigley T.M.L., Johns T.C., Jones P.D., Karoly D.J., Mitchell J.F.B., Oort A.H., Penner J.E., Ramaswamy V., Schwarzkopf M.D., Stouffer R.J., Tett S. 1996. A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere. *Nature* 382, 39–46.
- Taubes G. 1997. Apocalypse not. *Science* 278, 1004–1006.
- Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenko J., Melillo J.M. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277, 494–499.
- WASA Group. 1998. Changing waves and storms in the northeast Atlantic? *Bull. Amer. Met. Soc.* 79, 741–760.