

L'EFFET DE SERRE EN DÉBAT

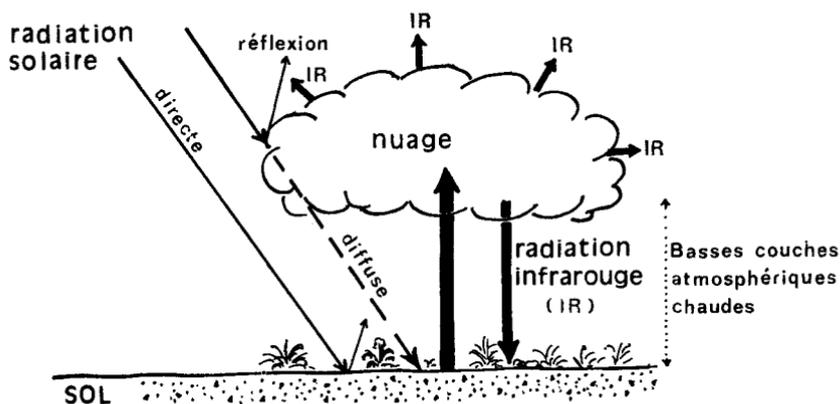
Au XX^e siècle, les activités humaines ont modifié la composition chimique de l'air. Pour l'essentiel, bien sûr, l'air qu'on respire est encore constitué d'azote et d'oxygène, mais ce qui a changé, c'est la proportion de gaz qu'on ne trouve qu'à l'état de traces et qui au total représente moins de 1 % du mélange. Il s'agit du changement dans la proportion en CO₂, NO₂, NH₄, SO₂..., de l'introduction d'autres gaz et substances chimiques toxiques fabriqués par l'homme (comme les redoutables chloro-fluorocarbones (CFC) émanés par les liquides réfrigérants des systèmes d'air conditionné et des réfrigérateurs, par les pulvérisateurs sous pression..., les bromures de méthyle dégagés par les pesticides et fongicides), de l'injection de particules de métaux lourds (plomb, mercure, cadmium...). Il est reconnu actuellement par la communauté scientifique que ces diverses formes de contamination de l'atmosphère à l'échelle du Globe ont des conséquences graves parmi lesquelles on peut citer:

- L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique;
- Le réchauffement du climat dû à un accroissement de l'effet de serre, rôle qui était jusqu'à présent essentiellement joué par la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère et par les nuages. L'encart n° 1 rappelle ce qu'est le processus de l'effet de serre.
- Le dépérissement des forêts, l'acidification des lacs, l'empoisonnement progressif de l'air des grandes villes avec l'accroissement des brumes et des brouillards photochimiques, et avec les dépôts acides.
- La contamination de la biosphère et, par ce biais, celle de la chaîne alimentaire par des substances chimiques toxiques.

Tout le monde parle de l'effet de serre mais personne pour l'instant n'a pu affirmer catégoriquement que la hausse de température vérifiée au long du XX^e siècle et son accélération dans la décennie 1980 soit une conséquence directe d'un accroissement de l'effet de serre.

Les scientifiques ont pourtant l'intime conviction que plus tôt ou plus tard l'augmentation de l'effet de serre se manifestera par une hausse de température. La température à la surface de la Terre a augmenté de 0,3° à 0,6° durant les derniers cent ans. C. K. FOLLAND (1990) cite une moyenne de $0,45 \pm 0,15$ ° C; mais cet accroissement a été très irrégulier dans le temps et dans l'espace. Les sept années les plus chaudes depuis 1880 ont été vérifiées dans les derniers onze ans. Cette dernière oscillation thermique, malgré son amplitude pourrait n'exprimer que la mesure de la variabilité naturelle du climat dont on ignore encore la plupart des caractéristiques. Par exemple, on sait maintenant que le phénomène ENSO (El Niño-Southern Oscillation) du Pacifique provoque un réchauffement temporaire de l'atmosphère comparable à celui causé par les activités humaines, et, durant la décennie 1980, deux super-ENSO ont été enregistrés (1983/84 et 1986/87), provoquant des altérations du temps à l'échelle du Globe. De plus, en accélérant la prolifération du plancton dans des eaux devenues chaudes, le phénomène de Niño provoquerait la libération soudaine d'une grande quantité de carbone. Celui

Encart n° 1 - Le principe de l'effet de serre



L'abondance de nouvelles sur l'effet de serre dans les journaux pourrait amener à faire croire de manière erronée qu'il s'agit d'un phénomène nouveau, résultant des activités humaines. En fait, il n'en est rien. L'effet de serre est un phénomène naturel, propre du comportement de l'atmosphère terrestre, et qui est nécessaire au maintien de la vie sur notre planète. Si la température moyenne actuelle de la surface du Globe est de 15° environ, sans l'effet de serre, elle tomberait à -20°.

Qu'est-ce que l'effet de serre ?

En premier lieu, la Terre est chaude parce qu'elle reçoit de la radiation solaire. Celle-ci est d'origine électromagnétique et elle est émise essentiellement entre 0,4 μ et 0,7 μ , dans le spectre visible. Les plus courtes longueurs d'ondes sont émises dans le violet, les plus longues dans le rouge, encadrant la totalité du spectre visible (l'arc-en-ciel). 46 % de l'énergie solaire correspond à ce spectre visible; 7 % est de l'énergie dans l'ultraviolet (< 0,4 μ) et le reste (47 %) est de l'énergie infrarouge (> 0,7 μ), calorifique. L'atmosphère terrestre est transparente à la plus grande partie de l'énergie solaire mais la presque totalité de l'énergie ultraviolette reste bloquée au sein de la couche d'ozone dans la stratosphère. Une partie de l'énergie infrarouge est absorbée, d'une part, par les gaz constituants de l'atmosphère (surtout par le dioxyde de carbone et par la vapeur d'eau), et d'autre part, par la couverture nébuleuse. Le restant de l'énergie infrarouge incidente parvient à la surface de la Terre avec les radiations du spectre visible. Le résultat est un échauffement de la surface terrestre et des basses couches de l'atmosphère.

A leur tour, la Terre, les nuages émettent de l'énergie radiante dont la qualité et la quantité dépendent de la température acquise, mais qui se situe toujours dans l'infrarouge.

En présence d'une atmosphère sèche et/ou sans nuages, la surface terrestre se refroidit rapidement par émission libre de radiation dans l'infrarouge en direction de l'atmosphère. Cette perte devient maximum durant la nuit puisque aucun apport énergétique solaire n'est possible.

Par contre, en présence d'une atmosphère humide et/ou nébuleuse, l'irradiation terrestre est absorbée par la vapeur d'eau et par les nuages dont une partie est postérieurement réexpédiée en direction de la surface terrestre. C'est l'effet de serre qui contribue à la formation d'une couche chaude dans la basse troposphère et qui empêche la surface terrestre de se refroidir.

Les activités humaines ont provoqué une augmentation de certains gaz dans l'atmosphère (en particulier du dioxyde de carbone) qui, eux aussi, ont la propriété de retenir la radiation infrarouge émise par la surface terrestre, et de l'émettre de nouveau en direction du Globe. Ainsi, ils contribuent à accentuer l'effet de serre naturel. C'est ce type d'effet de serre, d'origine anthropique qui provoque des inquiétudes puisqu'il pourrait être à l'origine d'un réchauffement du climat global de la Terre.

de 1982/83, particulièrement vigoureux, aurait été responsable pour l'introduction de six milliards de tonnes de carbone dans l'atmosphère (A. GAUDRY *et al.*, 1987).

L'O. M. M. (J. P. BRUCE, 1990) admet que c'est l'augmentation de l'utilisation des combustibles fossiles, sur laquelle repose l'économie mondiale, qui est le principal responsable (directement ou indirectement) de l'évolution de l'atmosphère terrestre. L'activité industrielle mondiale a été multipliée par vingt depuis le début du siècle. Les combustions rejettent une grande quantité de carbone dans l'atmosphère sous la forme de CO_2 . Au taux actuel, la quantité annuelle de combustible fossile brûlée dans le monde correspondrait à un million d'années d'effort de la nature pour ensevelir les matières carbonées!

De plus, dans les cent dernières années, on a défriché plus de terres que jusque là dans toute l'histoire de l'humanité (J. P. BRUCE, 1990, p. 6). On ne devrait donc pas s'étonner du fait que l'atmosphère n'est plus ce qu'elle était et que l'accroissement de la teneur de l'air en CO_2 soit tenu comme le responsable majeur de l'effet de serre. Sa contribution à l'effet de serre serait de 53 %. En fait, outre l'accroissement de la concentration en CO_2 , l'utilisation intensive des combustibles fossiles a également eu un effet indirect multiplicateur sur les autres pollutions de l'air en permettant la forte croissance industrielle et la création de produits toxiques nouveaux. L'accroissement des autres gaz en traces, générateurs eux aussi d'effet de serre, pourraient doubler le réchauffement dû au seul CO_2 .

Depuis les années 1970 surtout, le signal d'alarme a été tiré par la communauté scientifique. Les quelques chiffres suivants et le tableau I montrent le bien-fondé de cette alerte. De 1975 à 1985, en une seule décennie, l'augmentation globale de la pollution de l'atmosphère a été de 3,6 % pour le dioxyde d'azote (NO_2), 4,6 % pour le dioxyde de carbone (CO_2), 11 % pour le méthane (NH_4) et de 102 % pour les chlorofluorocarbones (CFC) (M. D. H. JONES, 1990). La part régionale des émissions reviendrait en premier lieu aux USA (surtout CO_2 et NH_4) suivi de l'URSS, de l'Europe de l'Est et des pays de la CEE. On note toutefois, une croissance rapide de la contribution des pays en voie de développement dans la décennie de 1980 et de la Chine.

La durée de vie de ces gaz est très variable, de quelques heures (ozone) à plus du siècle (N_2O , CFC). Pour le dioxyde de carbone, il est difficile d'avancer une durée précise car il ne se détruit pas réellement; il circule des sources aux puits dans le système climatique. En gros, en fonction du réservoir concerné (atmosphère, biosphère, sols ou océan), son temps de permanence varie de 50 à 200 ans.

Si elles n'ont pas été inconnues dans l'histoire de la Terre, les concentrations actuelles de d'air en dioxyde de carbone, en oxydes nitreux et en méthane sont toutefois les plus fortes des derniers 160 000 ans. L'étude des bulles d'air emprisonnées dans des carottes de glace prélevées dans l'Antarctique a révélé que, par le passé, les concentrations en dioxyde de carbone et en méthane de l'air ont été rythmées par la succession des périodes glaciaires et interglaciaires. Il y a une forte

TABLEAU I

Informations sur quelques gaz à effet de serre

	Dioxyde de carbone CO ₂	Méthane CH ₄	Oxyde nitreux N ₂ O	Chloro- fluo carbones CFC	Ozone O ₃
Durée de vie	années 50-200	années 7-10	années 150	années 110	jour
Contribution à l'effet de serre en %, 1950-1985	53	13	6	20	8
Concentration pré-industrielle	275 ppmv	0,7 ppmv	228 ppbv	0 ppbv	15 ppbv
Concentration 1990	354 ppmv	1,7 ppmv	310 ppbv	0,35 ppbv	35 ppbv
Taux de croissance des années 1980 en %	0,5	0,9	0,25	5	1
Principales sources					
Extraction de combustibles fossiles		X			
Utilisation des combustibles fossiles	X		X		
Deboisement et brûlis	X		X		
Modification de l'exploita- tion des sols	X		X		
Engrais			X		X
Marais; rizières		X			
Energie	X	X			
Industrie lourde	X		X		
Produits chimiques				X	
Circulation automobile			X		X

ppmv = parties par million en volume.

ppbv = parties par milliard en volume.

corrélation positive entre les concentrations et la température sans qu'on puisse toutefois affirmer si la température est cause ou conséquence des modifications observées (J. M. BARNOLA *et al.*, 1987; D. RAYNAUD *et al.*, 1988). Si le rythme d'accroissement de CO₂ dans l'atmosphère se maintient comme actuellement vers 0,5 % par an (ce qui correspond à une introduction annuelle de 720 gigatonnes de carbone dans l'atmosphère), on considère que les niveaux vérifiés dans l'ère pré-industrielle (début XIX^e siècle) auront été multipliés par 2 avant la fin du XXI^e siècle (entre 2050 et 2080). Quand bien même on observerait dès maintenant une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre, la stabilisation des concentrations actuelles ne devrait pas se vérifier avant le milieu du XXI^e siècle étant donnée la durée de vie de ces gaz. C'est pourquoi le débat est-il largement ouvert actuellement sur les changements climatiques à attendre, associés à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

L'effet de serre est un processus qu'on connaît depuis longtemps déjà et qui a été intensément étudié depuis plus d'un siècle (M. D. H. JONES *et al.*, 1990). La littérature scientifique sur ce phénomène climatique majeur a considérablement augmenté dans les années 1980 et une profusion d'informations sur ce sujet est livrée pêle-mêle quasi-journallement par la communication sociale. Pour le grand public, les preuves ne sont plus à fournir; en contaminant l'atmosphère, l'Homme a décliné une expérience lourde de conséquences et qu'il ne contrôle plus.

L'augmentation vérifiée des gaz à effet de serre provoque-t-elle déjà une hausse de température à l'échelle de la Planète?

Quelle sera le signe et l'amplitude du changement climatique que connaîtront les générations futures, au cours du XXI^e siècle?

Quelles seront les incidences de ce changement climatique dans les transformations physiques de l'environnement et dans les transformations socio-économiques?

Quelles sont les possibilités d'action des sociétés humaines pour amortir la hausse attendue de la température?

C'est une réponse à ces questions qu'on a cherchée dans l'abondante littérature sur le sujet. On a choisi les informations parmi les travaux les plus récents dont on trouvera un choix forcément limité en fin d'étude.

L'ESTIMATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Deux voies de recherches sont actuellement pratiquées pour estimer le changement climatique. C'est l'utilisation de l'ordinateur pour simuler le climat à l'aide d'un modèle prédéterminé et le raisonnement par analogie entre la situation dressée à partir des données des archives historiques du climat ou des données paléoclimatiques, et le futur.

L'approche «historique» a encore ses défenseurs. Il s'agit de reconstituer le champ thermique du Globe à partir des observations du réseau de mesure qui remonte rarement au-delà du milieu du XIX^e siècle. Deux groupements de recherches autour de J. WILLIAMS au National Center of Atmospheric Research (NCAR, USA) et de T. Wigley à l'Université

de East Anglia (UK) ont été les pionniers de cette approche historique. L'idée de base est d'utiliser les registres météorologiques pour construire la situation vécue dans le cadre d'une «Terre chaude» et d'une «Terre froide». Pour cela, il suffit d'utiliser les données climatiques des années les plus chaudes et les plus froides de la période de registre. La comparaison des deux situations obtenues devrait fournir une bonne image des variations climatiques à attendre au passage d'une «Terre froide» à une «Terre chaude». Toutefois, l'écart thermique vérifié entre les périodes chaudes et froides du XX^e siècle a été estimé être dix fois plus petit que celui qu'on doit attendre au XXI^e siècle. Toutes les rectifications effectuées sur les données historiques pour minimiser l'hétérogénéité des séries, l'effet de l'évolution technique des thermomètres et l'effet d'îlot de chaleur urbain permettent de fixer cet écart à 0,5° alors qu'un de 3° est à attendre jusque vers 2080. C'est que la concentration actuelle en gaz à effet de serre de l'atmosphère, calculée à 0,035 %, dépasse de loin tout ce qui a pu être observé par le passé (maximum de 0,028 %) et elle continue à monter. A l'échelle globale tout au moins, l'exploitation des données historiques perd actuellement du terrain face à la modélisation.

Par analogie, la paléoclimatologie pourrait permettre de prédire les situations climatiques futures en se référant aux situations passées de l'histoire de la Terre durant lesquelles la température était différente de l'actuelle. Une question se pose: la variabilité climatique trouvée dans ces conditions peut-elle être transposée à la prédiction du comportement futur de l'atmosphère au XXI^e siècle en présence d'un accroissement d'effet de serre? De là, les principales critiques avancées à cette méthodologie. Les détracteurs argumentent qu'on ne sait pas quelle est la cause de l'échauffement des épisodes passés du climat de la Terre et qu'un échauffement par effet de serre accru pourrait aboutir à des schémas très différents de ceux observés, par exemple, durant les périodes de plus forte radiation solaire déterminée par un changement des paramètres orbitaux (effet Milankovitch). En fait, cette dernière critique a été en partie battue en brèche par les résultats de l'étude des carottes de glace prélevées en Antarctique, puisque durant les derniers 160 000 ans les concentrations en CO₂ (principal gaz à effet de serre) et la température de l'air ont évolué en phase. Cependant, les recherches effectuées sur le climat de l'Holocène et de l'interglaciaire Eémin attribuent la cause majeure de l'échauffement du climat à l'effet Milankovitch (J. E. KUTZBACH *et al.*, 1986). Comme les conséquences climatiques du changement des paramètres orbitaux et de l'accroissement de l'effet de serre ne sont certainement pas les mêmes, pour pouvoir raisonner par analogie en utilisant ces climats passés, il faudrait pouvoir retrancher l'effet Milankovitch. Ce qui n'est possible que dans des simulations.

Il est donc probable que les raisonnements par analogie sur les périodes chaudes du passé de la Terre ne permettent pas d'estimer correctement l'évolution future du climat. Néanmoins, le recueil des informations interprétées de manière adéquate sur les climats passés constituent d'utiles jeux de données et de situations pour tester les simulations à partir des conditions climatiques actuelles.

Des modèles de simulation climatique, complexes, analogues aux modèles numériques utilisés pour la prévision journalière du temps ont été créés dans une vingtaine de laboratoires dans le monde. Ces modèles de circulation atmosphérique générale (MCG) sont conçus pour donner une bonne simulation du climat actuel à l'échelle planétaire. Ils intègrent les lois physiques de la conservation d'énergie et de masse qui décrivent, par des équations mathématiques, les redistributions du moment, celles de la chaleur et de la vapeur d'eau par la circulation atmosphérique. Ces modèles ont en général une faible résolution spatiale (maille de plus de 1000 km) et comportent sur la verticale un nombre variable de niveaux d'information (de deux à la vingtaine) à l'altitude croissante dans la troposphère et dans la stratosphère. Une fois simulées les conditions climatiques de départ à l'aide des principaux paramètres physiques régissant le climat actuel, on introduit des modifications pour faire intervenir (de manière soudaine ou progressive) une concentration de CO_2 deux fois plus importante que celle de l'époque pré-industrielle (année 1765 avec une concentration en CO_2 estimée à 279 ppmv) ⁽¹⁾. Le programme tourne jusqu'à obtenir un nouvel équilibre de l'atmosphère. Dans certains modèles, la base de concentration en CO_2 est 1959 puisque, en fait, l'accélération de l'accroissement de la teneur en CO_2 s'est surtout vérifiée à partir de la décennie 1960. Dans le modèle GISS (Goddard Institute of Space Studies de la NASA), par exemple, le niveau de CO_2 de 1958 sera devenu double vers l'année 2060.

Les progrès les plus importants dans la modélisation de l'estimation du changement de température en multipliant par deux la concentration en CO_2 se doivent aux travaux de S. Manabe dans la décennie de 1970. A l'origine, et en accord avec la limite de puissance des ordinateurs de l'époque, le modèle utilisé était très simple avec des conditions de surface très théoriques, une nébulosité fixe, un transport de chaleur par l'océan inexistant... Malgré ces insuffisances, S. Manabe et ses collaborateurs ont pu montrer comment une hausse en CO_2 pouvait affecter la température non seulement au sein de la troposphère mais aussi dans la stratosphère. Les modèles se sont rapidement perfectionnés par la suite en introduisant beaucoup d'autres paramètres que ceux utilisés pour caractériser la circulation atmosphérique. Les progrès se sont faits en fonction de l'augmentation de la capacité des ordinateurs et de leur rapidité de calcul, et aussi avec l'introduction progressive de connaissances nouvelles sur le fonctionnement du système climatique. Actuellement, sont introduits dans les modèles les plus sophistiqués le cycle hydrologique complet et ses corollaires. Le GISS déjà cité travaille avec les interactions existant entre les nuages, la vapeur d'eau atmosphérique et le bilan radiatif, toujours dans un scénario de multiplication par deux de la teneur en CO_2 . Sa conclusion est que, avant la fin de ce siècle la hausse de température sera sensiblement supérieure au bruit de fond résultant de la seule variabilité climatique naturelle. De ce fait, on peut espérer pouvoir confirmer sans ambiguïtés au cours des années à venir

(1) ppmv = parties par million en volume.

la validité d'une hausse de température mondiale due à l'accroissement de l'effet de serre. C'est aussi dans les interactions entre le transfert de vapeur d'eau, le type de nuages, son taux de couverture dans le ciel, et le bilan radiatif qu'ont travaillé les chercheurs du NCAR, du GFLD (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory de la NOAA à l'Université de Princeton), de l'OSU (Oregon State University), de l'UKMO (United Kingdom Meteorological Office). Ces cinq modèles considérés parmi les plus perfectionnés tiennent compte non seulement de l'intervention du cycle hydrologique mais aussi de ses interactions avec la dynamique des couches supérieures de l'océan au-dessus de la thermocline, avec la cryosphère, avec la biosphère. La distribution réelle des continents et des bassins océaniques, les conditions topographiques et bioclimatiques de surface sont de mieux en mieux pris en compte. Pourtant de nombreuses inconnues subsistent encore et les simulations climatiques faites à partir des modèles MCG n'aboutissent pas aux mêmes résultats.

C'est que le système climatique est d'une grande complexité et ne se laisse pas facilement mettre en équation. Son fonctionnement global est encore inconnu. De nombreuses rétroactions interviennent entre les différents sous-systèmes couplés, soit positives qui amplifient le changement climatique, soit négatives qui tendent à atténuer ou même à annuler l'effet climatique des différentes formes de contamination de l'atmosphère. De plus, ces interactions ont un rythme propre qui joue dans le sens de différer plus ou moins la réaction du climat. Le temps de réaction à tout changement introduit dans le système climatique a été évalué de quelques heures à l'année pour l'atmosphère, à la dizaine d'années pour la biosphère, au millier d'années pour l'océan et à la dizaine de milliers d'années pour la cryosphère. Par là même, on voit d'emblée la difficulté de faire tourner un programme informatique prenant en compte tous ces pas de temps. A cause de ces difficultés techniques, encore très peu de modèles tiennent compte du couplage océan-atmosphère dans l'évaluation du changement climatique. Dans ce cas, il s'agit non seulement de la prise en compte du couplage thermique vertical, mais encore des effets de transport dûs à la circulation océanique. On pressent également que l'océan est capable de dissoudre de grandes quantités de carbone atmosphérique sans qu'on sache quantifier les limites de cette absorption. Les forêts jouent un rôle semblable mais, quant aux interactions CO₂-biosphère-climat, leur modélisation en est encore aux balbutiements. De ce fait, en considérant que l'on puisse évaluer convenablement l'évolution future des gaz à effet de serre (et ce point est encore loin d'être réglé), on en est réduit à évoquer une série de scénarios possibles sur ce que sera le climat dans l'avenir. En dépit de l'utilisation d'ordinateurs de plus en plus puissants, et comme les évaluations et le nombre des rétroactions diffèrent de modèle à modèle, ainsi que les techniques de computation mathématique et d'équations physiques des problèmes, les résultats obtenus divergent. Ce qui amène évidemment à leur manipulation par les groupes de pression dans le sens de minimiser les conséquences climatiques d'une augmentation de l'effet de serre (les

économistes) ou, au contraire, d'allonger des prévisions alarmistes (les écologistes).

Bien que les modèles soient encore incapables de décrire avec précision la complexité des phénomènes mis en jeu, ils sont unanimes à prévoir un réchauffement de la troposphère pour le siècle prochain (J. F. B. MITCHELL *et al.*, 1990). La fourchette fournie actuellement par les différents modèles est sensiblement plus refermée qu'il y a quelques années et varie de $+1.5^{\circ}$ à $+5^{\circ}$ en moyenne pour l'hémisphère nord. Ce sont les hautes latitudes boréales qui connaîtraient les plus forts réchauffements (les 10° sont dépassés dans certains modèles) avec des maxima sur l'Alaska, la Scandinavie, la Sibérie. Ces hausses maximales résulteraient de l'effet d'un sol plus sec et, par conséquent, d'une réduction de l'évaporation à l'intérieur des masses continentales aux moyennes et hautes latitudes ainsi que de l'effet d'une réduction de l'albédo régional par migration vers le nord des neiges et de la banquise. A l'échelle annuelle, le fuseau euro-africain connaîtrait un réchauffement variant, en fonction de la région, de $+2^{\circ}$ à $+4^{\circ}$.

La comparaison des résultats fournis par les différents modèles de prévision de l'évolution du climat dans l'hémisphère nord et la confrontation à la tendance du climat réellement observée, entre la période de référence 1947-1956 et celle de 1977-1988, sont riches d'enseignements (W. L. GATES *et al.*, 1990; C. K. FOLLAND *et al.*, 1990; voir également *Sciences et Avenir*, 1990, n° 517, p. 36).

Les anomalies thermiques observées dans l'hémisphère nord entre les deux périodes donnent un panorama plus rassurant que celui des simulations. Il a eu effectivement un fort réchauffement d'une part, sur l'Alaska ($+6^{\circ}$) et sur le Pacifique oriental et, d'autre part, sur l'Asie centrale aux latitudes moyennes ($+3^{\circ}$) en accord avec les modèles. La Péninsule Ibérique, l'Afrique occidentale et l'Atlantique adjacent auraient connu entre les deux périodes un léger réchauffement de $+1^{\circ}$, soit une hausse bien inférieure à celle prévue par les simulations ($+4^{\circ}$). Partout ailleurs, l'évolution est au refroidissement, parfois même très accentué. C'est le cas d'une grande partie des USA dans une vaste écharpe de territoires orientaux, du Texas aux grands Lacs, où la température de la période 1977-1988 a fraîchi de 3° à 4° . La Scandinavie a également été plus froide pendant la période 1977-1988 avec un maximum de refroidissement sur la Finlande (-4°). Le fuseau euro-africain, de l'Allemagne au Maghreb, avec un diverticule sur le Moyen Orient, a aussi connu des températures plus fraîches de 1° .

Il est évident que, d'après ces résultats de l'exploitation des données observées, il sera très difficile de faire admettre un échauffement planétaire, en cette fin de siècle, aux habitants et décideurs des régions où le climat s'est rafraîchi.

Les divergences entre les modèles et les faits observés condamnent-ils la simulation ou la méthodologie d'exploitations des données thermiques historiques? Jamais des modèles MCG comme ceux utilisés actuellement ne pourraient donner une répartition spatiale du changement climatique avec la précision du réseau d'observation. La prévision possible est

d'échelle planétaire, à la rigueur continentale, en utilisant une grille dont le maillage le plus fin est de 500 km. Inutile donc de chercher à savoir ce qui va nous arriver au Portugal à l'aide de ces modèles MCG. L'incorporation des conditions de surface est de même trop schématique pour permettre une évaluation de quelque utilité.

Pourtant, c'est bien à ces échelles inférieures, régionales et locales, que les effets d'un changement climatique sur l'environnement et sur les transformations socio-économiques auront lieu et qu'il faudra prendre des décisions et implanter des mesures. Quelques-uns de ces modèles essaient déjà de travailler à haute résolution dans le cadre régional, en incorporant le plus d'informations possibles sur les conditions géographiques de surface; mais les résultats obtenus sont encore très préliminaires. Il faudra sans doute attendre les prochaines générations d'ordinateurs avec une mémoire accrue et plus rapides pour s'affranchir des temps de calculs d'un coût inacceptable requis par la prise en compte d'un plus grand nombre de rétroactions entre les phénomènes et par l'adoption d'une haute résolution. En attendant, et malgré ses limitations, l'approche historique du problème des changements climatiques, peut rendre de précieux services puisque des informations intéressantes peuvent être retirées à l'échelle régionale.

Tous les modèles essaient de simuler en priorité le changement thermique. Il est beaucoup plus difficile de trouver des informations sur le changement dans le régime des pluies, du vent, des tempêtes. Après une vingtaine d'années de modélisation, et d'études sur l'évolution thermique au cours du XX^e siècle, il est assez frustrant de reconnaître que la température n'est pas un paramètre très utilisable pour capter le signal de l'effet de serre. De plus en plus, la communauté scientifique pense que c'est une étude globale du climat qui révélerait les symptômes les plus probants de l'influence de l'effet de serre. C'est dans ce sens que, sur la période 1988-1992, la NASA pensait investir 200 millions de dollars et occuper 50 chercheurs sous la direction de I. RASOOL à un programme de recherche de ces symptômes durant les vingt dernières années, non seulement dans les faits climatiques (couverture nuageuse; température des océans et des continents, de la troposphère et de la stratosphère; la couche d'ozone; étendue des glaces marines, ampleur des ENSO, pluies...) mais aussi dans la dynamique des écosystèmes en ayant largement recours à la télédétection satellitaire. Le premier rapport est attendu avec impatience pour 1992, malgré de sérieuses coupures de crédits. La succession d'hivers froids qu'a connue dernièrement l'Amérique du Nord et les incertitudes des scientifiques ne sont effectivement pas dans l'immédiat des atouts pour convaincre l'Administration américaine de l'imminence d'un changement climatique dû à une augmentation de l'effet de serre. A l'origine du revirement, il y a également eu la prise de position de quelques chercheurs imminents comme R. LINDZEN (1990, 1991) du MIT (Massachusetts Institute of Technology), mettant en doute l'accroissement de l'effet de serre dans les années à venir.

Dans tous les modèles, le cycle de l'eau est générateur d'une rétroaction positive qui sert à amplifier l'effet de serre. Or, R. LINDZEN part du constat que les propriétés thermodynamiques de l'eau agissent comme un thermostat. La teneur en vapeur d'eau est fonction de la température de l'air. Plus l'air est chaud, plus sa capacité de rétention de la vapeur d'eau augmente. Un échauffement planétaire aurait donc un effet amplificateur sur la teneur de l'air en vapeur d'eau et, intervenant avec la circulation générale de l'atmosphère, il y aurait une plus grande probabilité de vérifier un accroissement du couvert nuageux. Outre une plus grande quantité de radiation infrarouge retenue dans les basses couches de l'air, cet accroissement conduirait aussi inévitablement à une limitation de la quantité de radiation solaire incidente parvenant au sol. La question qui se pose est donc de savoir si le bilan radiatif net d'une atmosphère nébuleuse (radiation solaire incidente diminuée de la radiation infrarouge), dans ces conditions et à l'échelle globale, est positif ou négatif. Le problème est encore à l'étude. Tout dépend des caractéristiques de la couverture nuageuse, de son albédo, de son altitude, de son taux de couverture, de la zone géographique où elle apparaît... Les calculs effectués, il y a quelques années, à partir de l'examen de l'évolution de l'enneigement sur les images de satellite ont abouti à la conclusion que la Terre se refroidissait quand on vérifiait un accroissement de la couverture nuageuse (M. D. CHOU *et al.*, 1982). En 1987, un article de R. D. CESS et G. L. POLTER concluait, qu'actuellement, on ne saurait dire si la couverture nuageuse présente une rétroaction positive ou négative sur les températures de surface. Cette étude reconnaissait que la modélisation de l'effet du couvert nuageux est encore un énorme facteur d'incertitude dans les simulations.

Les plus récents modèles s'accordent à prévoir des précipitations globalement plus importantes par suite d'une accélération de l'évaporation liée à un accroissement de la température. La chaleur latente ainsi injectée dans l'atmosphère aurait également pour effet d'intensifier les cyclones tropicaux d'autant plus que les océans tropicaux risquent d'offrir des eaux plus chaudes (J. F. B. MITCHELL *et al.*, 1990). A l'échelle de l'Europe, le réchauffement hivernal maximum aux hautes latitudes amènerait une modification sensible du régime des précipitations. Dans l'ensemble, l'Europe du Nord deviendrait plus humide tout au long de l'année (accroissement des volumes de 3 % à 15 %), tandis que l'Europe du Sud s'assècherait. Peu de changements seraient à attendre aux latitudes subtropicales arides et semi-arides de l'Afrique.

Ces résultats, obtenus en faisant la synthèse des simulations, restent très incertains. Ils pourraient même être remis en cause par l'introduction de données nouvelles en ce qui concerne le rôle de la vapeur d'eau et des nuages. La sensibilité des résultats aux hypothèses de départ montre les limites de la modélisation et explique en partie la tendance actuelle à minimiser l'amplitude du changement climatique. La confiance accordée aux modèles mathématiques est de ce fait encore assez limitée. Donc, en ce qui concerne les chiffres (variations de température, répartition des précipitations, cadre temporel probable du changement climatique,

les latitudes les plus touchées) les chercheurs parlent, comme on vient de le faire, au conditionnel, retranchés derrière un épais rideau d'incertitudes. Les prédictions des modèles, l'interprétation des données climatiques passées, les projections climatiques pour le XXI^e siècle sont autant de pièces à jeter dans le dossier «effet de serre» et ne peuvent constituer qu'un faisceau de présomptions. Malgré le flou incommode qui l'entoure, peut-on l'ignorer?

Le Groupe Intergouvernemental pour le Changement Climatique (IPCC), fondé en 1988 par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement et par l'Organisation Météorologique Mondiale, a été chargé d'explorer le réchauffement climatique et, en fin de compte, d'après ce qui vient d'être présenté, de GÉRER L'INCERTITUDE pour le XXI^e siècle. Vu que les causes de cette incertitude sont multiples à l'égard des émissions de gaz en traces, de la réaction globale du climat et des répercussions climatiques régionales, l'IPCC a opté pour travailler au sein de quatre scénarios théoriques dans la présomption d'un changement de climat inévitable (J. T. HOUGHTON *et al.*, 1990).

Scénario A — Dans ce scénario, qualifié de «business as usual», est prévu le maintien ou même une légère hausse des émissions de gaz à effet de serre malgré une moralisation des sociétés et un début de contrôle, car ces gaz ont une durée de vie parfois longue. Ce scénario prévoit un réchauffement moyen du Globe entre 0,3° et 0,5° par décennie dans le siècle prochain. Ce qui revient à dire que l'augmentation de température de la surface du Globe entre 1989 et 2025 serait de 1°, et de 3° jusqu'à la fin du XXI^e siècle.

Scénario B — Une action internationale concertée est entreprise de manière à permettre le remplacement du charbon par le gaz naturel comme source d'énergie (celui-ci n'émet que 60 % du CO₂ émis par le charbon) et un arrêt du déboisement dans les régions tropicales. Dans ces conditions, l'échauffement devrait s'élever encore à 0,2° par décennie dans le siècle prochain.

Scénario C — Une contrôle encore plus effectif devient possible avec un accroissement de plus en plus sensible des sources d'énergie renouvelables, de manière à ce que celles-ci deviennent majoritaires dans la seconde moitié du XXI^e siècle, et un reboisement massif de la planète. La hausse de température deviendrait alors tout juste supérieure à 0,1° par décennie.

Scénario D — On considère possible l'adoption généralisée des énergies renouvelables dès la première moitié du XXI^e siècle. Cette mesure suffirait à stopper l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et à annuler toute hausse de température.

Dans ces quatre scénarios, les hausses thermiques présentées concernent les températures moyennes du Globe. Il serait évidemment plus utile de connaître les scénarios régionaux de manière à évaluer les incidences du changement climatique. En fait, l'IPCC a surtout tenu compte des simulations climatiques dans l'hémisphère nord où se trouve la grande majorité des pays industrialisés. Pour le scénario A qui est le plus probable, vu la lenteur et même le refus de certains états à

prendre d'ores et déjà des mesures de restriction d'émission de gaz à effet de serre (c'est le cas des USA en ce qui concerne le CO₂, dont ils sont responsables pour 25 % des émissions), et en accord avec les principaux modèles de simulation climatique, il a été supposé que la température de l'Europe méditerranéenne et des grandes plaines centrales des USA connaîtraient une hausse de température supérieure à la moyenne mondiale. Entre 1989 et 2030, la hausse de température hivernale atteindrait 2° dans ces régions et celle des températures estivales pourrait être encore plus forte (3°). De ce fait, le bilan hydrique des sols deviendrait plus déficitaire au cours de l'année et la sécheresse estivale serait plus accentuée que l'actuelle aux latitudes moyennes. L'Asie des Moussons connaîtrait un réchauffement de 1° à 3° tout au long de l'année et les pluies d'été augmenteraient de 5 % à 15 %. Au Sahel, continuerait l'échauffement commencé dans les années 1970. Jusqu'en 2030, l'augmentation de température serait de 1° à 3°. Quant aux pluies, la prévision est difficile. La moyenne zonale sahélienne devrait augmenter, mais il serait intéressant de savoir quelles sont les régions qui seraient bénéficiées. Les fourchettes de variations thermiques moyennes présentées dans le rapport de l'IPCC ont été obtenues par simulation dans un modèle à haute résolution pour quelques régions-testes. L'incertitude reste grande. Les chiffres les plus bas cités pourraient connaître une diminution de 30 % tandis que les plus élevés pourraient être accrus de 50 %!

QUELQUES INCIDENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique, si bénin soit-il, aura des répercussions sur l'environnement qui, à leur tour, auront des retombées socio-économiques.

La hausse du niveau marin

De tous les effets sur l'environnement, la hausse du niveau marin est le phénomène qui a été le plus étudié jusqu'à présent. La grande inertie thermique des océans fait que, même si on arrivait à stabiliser brusquement l'émission de gaz à effet de serre, il faudrait s'attendre à voir monter le niveau marin jusque vers l'année 2030. Le temps de réponse des cent premiers mètres de l'océan, à l'échauffement atmosphérique, a été estimé à 25-30 ans, et la diffusion de la chaleur vers le fond mettrait un demi-siècle environ pour atteindre les 800 m de profondeur. C'est sur ces prémisses, et en comptant sur une hausse de température de l'air de 1,5° jusqu'en 2030, qu'ont été calés les modèles de prévision. La montée des eaux au XXI^e siècle serait la somme des contributions individuelles de l'expansion thermique de l'eau, de la fonte des glaciers alpins et des inlandsis (Groenland et Antarctique). Cette montée pourrait être accrue en cas d'instabilité de l'inlandsis de la partie occidentale de l'Antarctique.

Les estimations de la montée probable du niveau marin sont très diverses. L'erreur commise vient non seulement de la valeur attribuée

à l'accroissement thermique de l'air durant le XXI^e siècle, mais aussi de la quantification de la part qui revient à l'expansion thermique de l'eau et à la fusion des glaces dans la hausse globale. Le niveau marin a augmenté tout au long du XX^e siècle de 10-12 cm et il a surtout été interprété comme la conséquence d'effets tectoniques et isostatiques sur le réseau de marégraphes concentrés essentiellement dans l'Atlantique Nord et en Mer du Japon. A la fin de la dernière glaciation (14 000 BP-6000 BP), la fonte des glaces continentales a provoqué une hausse du niveau marin qui a été évaluée à un mètre par siècle. La hausse moyenne avancée par bon nombre d'auteurs pour le XXI^e siècle serait du même ordre de grandeur. Si toutefois, l'inlandsis de l'Antarctique occidental fondait entièrement, la hausse serait portée à 6 m, mais cette hypothèse est exclue pour le XXI^e siècle. Aux dernières conclusions du rapport de l'IPCC, la hausse moyenne ne serait pas supérieure à 18 cm d'ici l'année 2030 et la variation globale jusqu'à la fin du XXI^e siècle ne serait pas supérieure à 65 cm (R. WARRICK *et al.*, 1990). Ces chiffres ont été avancés dans le cadre du scénario A. Ce qui divise par trois les valeurs fournies par la plupart des modèles. Les fourchettes d'incertitude pour ce même scénario A ne sont pas négligeables. Les hypothèses hautes et basses sont respectivement de 8 et 29 cm pour 2030; 31 cm et 110 cm pour la fin du XXI^e siècle. D'après les derniers calculs publiés, on peut se demander si cette hypothèse haute n'est pas exagérée. L'étude de P. HUYBRECHTS *et al.* (1990) suggère que les inlandsis contribueront très peu à la hausse du niveau marin durant le XXI^e siècle. L'Antarctique est actuellement si froide et si sèche que toute hausse de température conduira à un accroissement des précipitations et, par conséquent, à celui de l'accumulation des neiges et des glaces à la surface de l'inlandsis. Cette capitalisation de l'eau sous forme de glace conduirait théoriquement à une baisse du niveau marin qui contrebalancerait à peu près la hausse attendue par ablation des glaces du Groenland et des glaciers alpins. Dans l'immédiat, au XXI^e siècle, seule l'expansion thermique des eaux paraît donc fournir la principale cause de la hausse du niveau marin.

La prévision, ici comme pour le changement thermique, est actuellement beaucoup moins alarmante qu'il y a quelques années et révèle une fois de plus l'ignorance qu'on a des phénomènes globaux d'interactions entre la cryosphère et l'atmosphère. Aujourd'hui, on compte sur les satellites altimétriques pour s'affranchir de la grande difficulté de mesurer le niveau d'une surface en mouvement perpétuel. Le satellite franco-américain TOPEX-POSEIDON dont le lancement est prévu en début de 1992 devrait permettre d'atteindre des précisions de mesure de l'ordre du centimètre. Il faudra certainement attendre encore une dizaine d'années avant de pouvoir confirmer l'existence ou non d'une tendance à la hausse accrue du niveau marin.

Enfin, et pour rassurer tout le monde, avec un accroissement de la température deux fois plus fort que l'hypothèse haute de tous les modèles de prévision, l'inlandsis groenlandais mettrait quelques 5000 ans à fondre (P. HUYBRECHTS *et al.*, 1991).

On pourrait penser que les quelques 18 cm de hausse jusqu'à l'année 2030 (ce qui est peut-être même une prévision exagérée) est un changement bien bénin. Toutefois, il convient de faire la différence entre cette évaluation globale et l'évaluation de la cote d'eau sur le littoral. En fait, ce n'est pas tant l'élévation en elle-même qui est importante à connaître, mais sa combinaison avec d'autres phénomènes comme l'amplitude des marées, des ondes de tempêtes et la morphologie des fonds sous-marins à proximité du littoral. Quelques chiffres aideront à comprendre cet effet combiné. Dans l'estuaire de la Loire à Nantes, les ondes de tempêtes sont responsables d'une surcote de fréquence centenaire évaluée à 1,4 m. Il suffirait d'une élévation du niveau marin de 30 cm (valeur de l'hypothèse optimiste de l'horizon 2100) pour abaisser la fréquence d'occurrence de cette surcote de 1,4 m à une fois tous les dix ans. Voyons encore un exemple cité comme le précédent dans *Sciences et Avenir* (1990, n° 525). Au Pays Bas, avant la fermeture des passes de la Zélande par des digues, les tempêtes de février 1953 avaient provoqué une véritable catastrophe en surélevant le niveau marin de trois mètres. La période de retour d'un tel évènement avait été évaluée à 500 ans. Avec 50 cm de hausse du niveau marin (moyenne acceptée par l'IPCC pour l'horizon 2100), la période de retour d'une telle catastrophe tomberait à 80 ans.

Les retombées socio-économiques de l'inondation (permanente ou épisodique) commencent à être perçues et comptabilisées (F. RIJSBERMAN, 1991). C'est que cette incidence particulière du changement climatique dans l'hypothèse d'une hausse du niveau marin de un mètre menacerait directement quelques 300 000 000 d'habitants. Aux dernières estimations, 80 % de la population mondiale vit à moins de 50 km des côtes.

Dans certains pays, comme les Pays Bas, une hausse de 18 cm est déjà prise très au sérieux puisqu'un tiers du territoire se situe au-dessous du niveau de la mer et deux tiers à moins d'un mètre d'altitude. Le Delf Hydraulics Laboratory a engagé des études très poussées sur les impacts physiques et socio-économiques de la montée des eaux non seulement aux Pays Bas mais aussi dans le monde (H. M. A. JANSSEN *et al.*, 1991). La notion de vulnérabilité qui apparaît dans l'étude du Delf Hydraulics Laboratory repose sur deux aspects. C'est, d'une part, la probabilité et l'ampleur des effets d'une surélévation du niveau marin et, d'autre part, la capacité de la société à prévenir et à atténuer ces effets. Les Pays Bas, déjà dotés de l'infrastructure hydraulique de base, auraient la capacité de faire face à une augmentation du niveau marin de 50 cm. Pour des hausses plus importantes, il faudrait revoir entièrement les infrastructures.

En prenant comme référence cette définition de la vulnérabilité, certains pays moins développés apparaissent particulièrement touchés par l'élévation du niveau marin. C'est le Bangladesh et l'Égypte où les effets conjoints de la hausse des eaux et de l'affaissement du sol menacent les biens et les moyens d'existence de plus de 46 000 000 de personnes. Ce sont aussi la Gambie, le Sénégal, la République de Mozambique, le Pakistan, l'Indonésie, le Suriname, tous les atolls. Par exemple, les

Maldives, constituées par une vingtaine d'atolls dans l'Océan Indien, ne s'élèvent pas au-dessus des deux mètres d'altitude. La densité de population y est considérable (660 hab./km²) et l'exploitation des coraux comme matériaux de construction provoque un affaissement des principales îles de un centimètre par an. Dans ces conditions aussi extrêmes, il est difficile de prévoir les conséquences socio-économiques d'une hausse du niveau marin. Que faut-il faire? Déplacer la population? Où? Construire des digues tout autour des principaux atolls?

L'érosion accélérée des côtes sous l'effet d'une hausse du niveau marin a été moins étudiée et les retombées socio-économiques restent vagues. Pourtant, il ne s'agit pas que d'un phénomène d'inondation. Avec une montée des eaux de un millimètre par an, plus de 70% des plages sableuses existant actuellement dans le monde seraient obligées à reculer, avec de graves conséquences pour la protection des côtes, des ports, des villes côtières, et pour le tourisme. Toutefois, beaucoup d'autres facteurs viennent accentuer les effets de hausse du niveau marin. Pour l'instant, l'érosion vérifiée sur les côtes a une origine anthropique et non climatique (exploitation du sable, colonisation des dunes, désorganisation des dérives côtières par la construction d'éperons et de brise-vagues...).

L'article de V. GORNITZ (1991) donne une synthèse commode sur l'évolution des côtes à attendre en cas de hausse du niveau marin. Les modèles mathématiques utilisés pour la prévision de l'évolution des plages sableuses utilise la loi de Bruun. Celle-ci stipule que l'érosion s'accélère à la base du profil concave de l'arrière-plage plus souvent léchée par les vagues. Le sable ainsi arraché fait reculer la ligne de côte et se dépose au large. De cette manière, l'épaisseur d'eau est maintenue constante au long du littoral. Cette loi ne tient pas compte d'un éventuel transport du sable par des dérives côtières et ne trouve une application pratique, semble-t-il, qu'en présence d'une vitesse réduite de hausse du niveau marin. Elle a été appliquée dans ces conditions avec un certain succès pour prédire l'évolution des côtes caractérisées par des cordons dunaires et des îles-barrières. Dans ces cas, on observe un recul des lagunes et bras de mer, côté baie, avec une sédimentation à l'arrière des cordons, concomitante d'une forte érosion du côté de l'océan. En Louisiane, où ce type de côté domine, et où la montée des eaux est forte (10 mm/an à cause d'une subsidence progressive de la côte), les îles-barrières ont vu leur aire diminuer de 37% entre 1890 et 1979 (d'après A. H. SALLENGER *et al.*, 1987, in V. GORNITZ, 1991).

Les modèles d'évolution sont en fait construits pour répondre à des problèmes particuliers d'aménagement. Il ne sont guère applicables à l'échelle planétaire. La réponse de la côte à une hausse du niveau marin dépend d'une multitude de facteurs locaux comme les formes géomorphologiques, l'exposition à la houle, aux vagues, aux courants, la lithologie, la tectonique...

Une approche plus synthétique, «historique» a été tentée. Elle consiste à étudier les changements survenus à la côte après la dernière transgression marine (16 000-6000 BP) et à utiliser les résultats obtenus

pour prédire l'évolution future. Ces études ont montré le comportement suivant:

— Avec une vitesse élevée de montée des eaux et une faible fourniture de sédiments, l'érosion était forte et le recul de la côte important.

— Avec une faible montée des eaux et une fourniture suffisante de sédiments, il existait une progradation des plages.

Peut-on appliquer ces résultats à la prévision du comportement futur de la côte? Durant les dernières centaines d'années, en beaucoup d'endroits dans le monde, les sources de sédiments ont diminué par l'action de l'intervention humaine, avec l'aménagement des côtes, l'installation de villes et de ports, la construction de barrages sur les principaux fleuves et rivières, l'utilisation du sable. Il devient donc douteux que les sédiments soient maintenant, dans n'importe quels cas, disponibles en quantité suffisante pour engraisser de futures plages.

Enfin, les intrusions salées plus loin vers l'amont dans les estuaires et dans les nappes phréatiques littorales risquent d'augmenter. La qualité de l'eau potable et d'irrigation sera en conséquence inférieure. Des pertes de rendements agricoles sont donc à attendre surtout si les aquifères sont déjà surexploités actuellement.

L'EFFET SUR LES ECOSYSTEMES ET SUR L'AGRICULTURE

L'augmentation de l'effet de serre pourrait modifier notablement les paysages actuels. Il est difficile d'évaluer jusqu'à quel point l'effet de serre pourrait être préjudiciable aux écosystèmes végétaux et à l'agriculture dans un futur proche. Toutes les prévisions présentées dépendent de la manière d'envisager non seulement la vitesse d'élévation de la température comme la quantification des effets du nouveau régime des pluies.

La vision optimiste souligne que l'enrichissement en CO_2 de l'air peut être déterminant pour l'accélération de la croissance des plantes, car le carbone alimente la photosynthèse. Son action fertilisante est d'ailleurs une technique depuis longtemps connue des horticulteurs qui insufflent artificiellement du dioxyde de carbone dans les serres. La production de tomates augmente alors de 50 %, les salades, les concombres et les melons gagnent facilement un quart de leur poids habituel. Les cultures de grand rendement, comme les céréales, ont toutes les chances d'être les principales bénéficiaires. En laboratoire, on s'est aperçu que les rendements de blé et de maïs augmentent de 30 % quand il y a deux fois plus de CO_2 dans l'air. De plus, avec la hausse de température, la longueur de la saison de croissance des plantes augmente. L'aire de culture des espèces agricoles limitée par des températures hivernales trop basses pourrait ainsi augmenter en poussant sa limite septentrionale en direction du Nord. L'*AIR Group* de l'Université de Birmingham (Atmospheric Impact Research Group) a envisagé cette possibilité pour le maïs. Sachant que l'accroissement de température prévue pour les hautes latitudes est importante ($> 5^\circ$), la limite septentrionale de la culture du maïs en Europe doit progresser rapidement en direction du nord et

dépasser le cercle polaire arctique, surtout si les conditions hydriques de la culture sont satisfaites. Reste à savoir si l'agriculture est possible sur permafrost fondant! Pour le blé dont les espèces sont plus versatiles que celles du maïs, cette possibilité est encore accrue. L'Europe du Nord verrait sa récolte céréalière augmenter de 15 %. Par contre, les régions céréalières des USA et de l'Europe occidentale dont le climat deviendrait respectivement plus froid et plus sec, connaîtraient une baisse sensible de leur production. Les régions les plus touchées par cette baisse de rendement seraient sans aucun doute l'Europe méridionale et l'Amérique centrale, sans parler des actuelles régions semi-arides, dans l'hypothèse d'un assèchement.

C'est justement autour du problème de l'eau que se cristallisent la plupart des arguments des pessimistes. Des pluies plus éparées concomitantes d'une hausse de la température accélère l'évapotranspiration de la plante et serait contrebalancée par la plus grande fermeture des stomates sous l'effet du CO_2 . Dans ces conditions, certains pensent que la plante deviendrait plus efficace dans l'utilisation de l'eau disponible et que sa production augmenterait. Toutefois, ce processus a des limites et un déséquilibre hydrique est à attendre quand la sécheresse devient trop drastique. Ces processus pourraient également avoir des conséquences d'échelle planétaire sur le cycle de l'eau. Une réduction d'ETP et la fermeture des stomates des feuilles de la forêt amazonienne sous double CO_2 aurait pour conséquence une division par deux du volume des pluies tombant sur cette partie du monde. Au côté des océans, les forêts équatoriales sont effectivement les grandes pourvoyeuses de l'atmosphère en vapeur d'eau. Les pluies des aires forestières trop éloignées de l'océan sont en grande partie alimentées par l'apport local de vapeur d'eau cédée par la végétation.

Il faut reconnaître que les études globales des écosystèmes manquent. Leur fonctionnement est complexe et encore très difficile à modéliser. Comme pour la prévision de la hausse du niveau marin, ces modèles sont dépendants des résultats obtenus par les modèles climatiques CGM. Il serait important de savoir quelle est la vitesse de l'échauffement donc la vitesse de l'évolution climatique. Avec une hausse de 3° par siècle (hypothèse du scénario A de l'IPCC), les isothermes de certaines latitudes pourraient se déplacer de trois à six kilomètres par an, en laissant de plus en plus loin derrière eux les écosystèmes forestiers puisque les arbres n'ont pas une possibilité de migrer à plus de 400 mètres par an, d'autant plus qu'il existe maintenant une multitude d'obstacles au déplacement libre des espèces (R. L. PETERS, 1991). La déstabilisation risque donc d'être importante, en donnant lieu à une farouche sélection des espèces et à une désertification dans les régions où la diversité est devenue faible. On rejoint par là les problèmes liés à l'introduction de systèmes agricoles de grand rendement fondés sur la sélection des espèces.

Les scénarios pessimistes argumentent aussi que le système agricole mondial est trop bien adapté aux régions climatiques actuelles. La sélection des semences met à profit toutes les potentialités climatiques régionales et le moindre changement thermique ou du régime des pluies

devient un danger. J. GRIBBIN (1988) cite quelques exemples à l'appui. Dans la ceinture du maïs, aux USA, il suffirait d'une réduction des pluies de juillet (mois de plus grande exigence en eau du maïs) de 25 mm pour réduire les rendements de 7 %. Une augmentation de la température de 1° pourrait à elle seule une perte de rendement de 11 %. L'échelle du problème est indiquée par l'extension qu'ont pris certaines cultures de grand rendement aux USA. A la fin des années 1970, seulement six variétés de maïs couvraient 71 % du «corn belt»; deux variétés de petits pois occupaient 96 % de l'aire occupée par cette culture. 72 % des cultures de pommes de terre comportaient une des quatre variétés principales. Plus de la moitié des 29 000 000 d'hectares de blé étaient ensemencée avec dix variétés seulement. Un échauffement global produisant la même réponse climatique que durant la période de dégel entre 8000 BP et 4000 BP provoquerait une chute des rendements en céréales tels en Amérique du Nord, Europe et ex-URSS que la sécurité alimentaire du Globe serait à court terme menacée (J. GRIBBIN, 1988). Les USA sont le principal fournisseur de céréales du Tiers Monde et de l'ancienne URSS. L'excédent en céréales des USA, du Canada et de la CEE sont actuellement l'assurance du Monde contre la faim. En 1990, 46 % des exportations mondiales de céréales étaient d'origine américaines et 14 % d'origine européenne. Des famines pourraient sévir dans le temps de réajustement, même si, à long terme, plus de céréales pourraient être cultivées aux hautes latitudes devenues plus chaudes.

Dans ce panorama de fiction où l'incertitude règne, la survie du tiers de l'humanité dépendant du riz serait peut-être mieux assurée (sauf sous croissance démographique explosive) car les modèles s'accordent à prévoir des changements thermiques aux latitudes tropicales plus modérés qu'aux autres latitudes. L'instabilité des rendements résulterait d'une plus grande variabilité des pluies et de l'inondation des rizières d'estuaires et de deltas par l'eau salée. Toutefois, le riz est une plante très versatile qui se cultive actuellement du niveau de la mer à plus de 3000 mètres d'altitude et de l'équateur à la zone tempérée. Pour une hausse de température de 1°, la production de riz augmenterait, même si les volumes des pluies diminuaient de 15 %.

CONCLUSION: QUE FAIRE?

Les recherches consacrées au changement climatique ont surtout porté sur l'impact environnemental qui pourrait en résulter. Pourtant, de plus en plus, ceux qui croient à l'imminence d'une hausse de température se rendent compte qu'il faut également se pencher sur les conséquences socio-économiques à attendre. Comment le changement climatique se répercutera-t-il sur l'économie mondiale et sur la société en général? Quelques bribes du problème ont déjà été abordées ici. Les travaux spécifiques concernant l'évaluation des conséquences socio-économiques du changement climatique et les diverses possibilités d'action pour y faire face sont récentes. La manière la plus commode qu'on a trouvée pour présenter la question est de résumer la position assumée

par l'équipe de chercheurs de l'IPCC publiée dans le livre de J. T. HOUGHTON *et al.* (1990) et dans deux rapports de l'OCDE (1991a, 1991b).

Trois positions sont présentées, reflétant les trois tendances de la gestion économique de l'effet de serre.

Première option: *Ne rien faire*

L'incertitude qui règne encore actuellement sur l'amplitude et la vitesse du changement climatique n'incite guère à prendre des mesures qui seront évidemment onéreuses et qui grèveront lourdement les finances et l'économie des générations à venir. Cet argument justifie une position d'attente, jusqu'à ce que la communauté scientifique présente des preuves irréfutables de l'évolution future du climat. Quant bien même il existerait un réchauffement imminent, les sociétés présenteraient automatiquement des solutions d'adaptation sans qu'il soit nécessaire d'implanter des mesures de fond. C'est ce que révèlent les leçons de l'Histoire, peuplée de périodes de crises. En cette fin de XX^e siècle pourtant, rien ne laisse prévoir que la réaction des sociétés soit la même que par le passé.

Les détracteurs de cette position pensent que cette manière de voir est dangereuse. Plus la période d'expectative est longue, plus il sera difficile de prendre des mesures de correction contre l'accroissement de l'effet de serre et plus le coût de l'opération se répercutera sur les générations à venir. Toute action entreprise maintenant non seulement coûterait moins chère comme elle aurait des effets secondaires positifs rapides sur l'environnement. Cette position implique une réponse urgente aux problèmes de pollution atmosphérique. C'est ce que défendent les adeptes de la seconde option.

Deuxième option: *Investir dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre*

L'avantage serait d'attaquer le problème à sa source et ainsi d'espérer une intervention active sur le climat. Comme on ignore encore beaucoup de choses sur le fonctionnement du système climatique global, on risque d'avoir à affronter des surprises désagréables dont on méconnaît la nature exacte, la durée et l'extension régionale. Ces surprises pourraient revêtir le caractère de graves incidents climatiques comme des sécheresses sévères ou des tempêtes redoutables qui sont toujours accompagnées d'importants dommages. En diminuant les émissions de gaz à effet de serre, causes du réchauffement, par le même coup, on réduit la probabilité de ces «surprises». Les chercheurs de l'IPCC laissent entendre que l'objectif principal de l'action à entreprendre doit viser à une limitation du réchauffement mondial vers 0,1° à 0,2° par décennie durant le prochain siècle. Ce seuil se justifie par la position de l'aversion au risque que demande une réduction au minimum de la «surprise». En d'autres termes, personne n'est capable de prévoir quelles seront les conséquences socio-économiques d'une hausse de température de plus de

0,2° par décennie; si on arrive à réduire le taux d'échauffement à ce seuil, les répercussions auront un traitement possible.

Les coûts de la réduction des émissions sont lourds et certains Etats, qui gagneraient à ne rien faire, ne sont guère motivés. Il est certain aussi qu'une réduction des émissions apporte également des avantages, tels que des dépenses évitées à temps et qui devraient servir à couvrir le coût des dommages ou celui de la défense contre la hausse du niveau marin ou encore de celui d'une reconversion de l'agriculture. Ainsi, actuellement, les incitations à l'action concertée analysent-elles le binôme coûts-avantages plutôt que celui des coûts-bénéfices. Reprenant les conclusions d'une étude de W. NORDHAUS (1990, Université de Yale) sur l'économie de l'effet de serre, D. PEARCE (1991) avance quelques résultats de ce calcul des coûts-avantages. Avec la première option, le monde aurait à payer au cours du prochain siècle une facture variant entre 0,2 et 2,4 % du revenu général de la planète pour couvrir les dommages produit par l'échauffement et correspondant essentiellement à ceux produits par la hausse du niveau marin; ce qui correspondrait à un coût de 3,3 à 36,9 dollars par tonne de CO₂-équivalent. Les écarts entre les chiffres cités proviennent de l'incertitude des estimations de ces dommages. Pour pallier à ces dépenses (avantages), il faudrait renoncer complètement aux CFC et abaisser de 10-30 % le CO₂ par rapport aux niveaux qu'il devrait atteindre en 2050. Rien que pour les USA, le coût d'une réduction définitive de 20 % des niveaux d'émission de CO₂ enregistrés en 1990 a été évalué à 3,6 trillions ($3,6 \times 10^{12}$) de dollars (A. MANNE et R. RICHELLES, 1990, in D. PEARCE, 1991, p. 21). La modélisation des effets économiques du changement climatique pose encore de nombreux problèmes. Toutes les répercussions possibles sont difficilement inventoriées et pour certaines d'entre elles, il est impossible de fixer une évaluation monétaire crédible.

Troisième option: *La solution du coût minimum*

Une analyse même sommaire des coûts-avantages amène insensiblement à investir dans des mesures d'adaptation plutôt que dans des mesures de prévention. L'adaptation revient meilleur marché, dans l'immédiat que la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les particuliers présentent une réaction naturelle au changement climatique; ils s'adaptent presque automatiquement et bien des coûts économiques se trouvent ainsi repartis. Les pouvoirs publics seront obligés à implanter des mesures d'adaptation plus lourdes visant la protection, voire le déplacement de population, à investir dans la recherche scientifique fondamentale (Ex: fonctionnement du système climatique) et appliquée (Ex: agronomie, génie civil, chimie...). Ces coûts étalés au long du siècle serait plus supportables que ceux d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, les arguments contre l'investissement en mesures d'adaptation soulèvent le problème des charges croissantes si rien n'est fait pour réduire l'échauffement. L'adaptation lègue un

échauffement accru et irréversible aux générations à venir dont le coût économique deviendrait de plus en plus lourd.

Pour l'instant, aucune politique vraiment internationale n'a attaqué le problème de l'accroissement de l'effet de serre mais le défi est lancé. Les négociations en vue d'une convention internationale sur le réchauffement climatique se sont engagées à Washington en février 1991. Les mesures de prévention sont celles qui sont les plus difficiles à mettre en place car, pour être efficace, elles exigent un accord mondial, et une politique internationale d'environnement. La résolution du problème des CFC paraît être en bonne voie depuis la signature du protocole de Montréal. Celui du dioxyde de carbone n'a pour l'instant reçu qu'un traitement partiel, par l'acceptation d'une philosophie de contrôle de certains Etats. Pourtant, là encore, afin que les résultats puissent être efficaces, c'est à l'échelle planétaire qu'il faudrait attaquer le problème avec la signature d'un accord international, et l'adoption d'un délai relativement court pour implanter les mesures correctives. Ainsi, il est probable qu'une politique internationale sur l'environnement, visant à faire face au changement climatique adopte une combinaison des trois options présentées. Comme la cure que représente la stabilisation de la température est extrêmement onéreuse, le réchauffement climatique se produira et l'Homme devra réagir. La multiplication actuelle de conférences internationales sur l'environnement, la signature de protocoles sur la limitation de certains polluants atmosphériques, la préoccupation que la communauté internationale montre vis à vis de la coupe massive des forêts tropicales ne correspondent-elles pas déjà une réaction qui contemple la PRÉVENTION et l'ADAPTATION, en rejetant la position attentiste?

DENISE DE BRUM FERREIRA

BIBLIOGRAPHIE

- BARNOLA, J. M.; D. RAYNAUD; Y. S. KOROTKEVITCH; C. LORUS (1987) — «Vostok ice core: A 160 000 year-record of atmospheric CO₂», *Nature*, 329, p. 408-414.
- BARRETT, S. (1991) — «Analyse économique des accords internationaux sur l'environnement: enseignement pour une convention sur le réchauffement de la Planète», in *Parer au changement climatique: quelques problèmes économiques*, OCDE, Paris, p. 117-162.
- BOLDIREV, V. (1991) — «Socio-économique impact of climatic change and variability», *La Meteo.*, 37, p. 7-13.
- BRUCE, J. P. (1990) — *L'atmosphère de la Terre, planète vivante*, OMM, n° 735, Genève, 47 p.
- CESS, R. D.; G. L. POLTER (1987) — «Exploratory studies of cloud radiative forcing with a general circulation model», *Tellus*, 39A, p. 460-473.
- CESS, R. D.; G. L. POLTER... (14 collaborateurs) (1990) — «Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in ten

- atmospheric general circulation models», *Geophys. Research*, 95, p. 16 601-16 615.
- CHOU, M. D.; PENG L. ARKING A. (1982) — «Climate studies with multi-layer energy balance model. The role of feedback mechanisms in CO₂ problem», *J. Atm. Sc.*, 39, p. 2651-2666.
- COLLECTIF (1990) — Ozone. Effet de serre. Climat: les nouveaux scénarios, *Sciences et Avenir* n° 517, p. 22-38.
- CUBASCH, W. L.; R. D. CESS (1990) — «Processes and modelling», in *Climatic Change*, Cambridge Univ. Press, p. 69-91.
- FOLLAND, C. K.; T. R. KARL; K. Y. VINNIKOV (1990) — «Observed climate variations and change», in *Climatic Change*, Cambridge Univ. Press, p. 195-238.
- GATES, W. L.; P. R. ROWNTREE; J. C. ZENG (1990) — «Validation of climate models», in *Climatic Change*, Cambridge Univ. Press, p. 93-130.
- GAUDRY, A.; P. MONTFRAY; G. POLIAN; G. LAMBERT (1987) — «The 1982-83 El Niño: A 6 billion ton CO₂ release», *Telus*, 39B, p. 209-213.
- GORNITZ, V. (1991) — «Global coastal hazards from future sea level rise», *Global and Planetary Change*, 89, p. 379-398.
- GRIBBIN, J. (1988) — *O Clima no Futuro*, Biblioteca de Divulgação Científica, O Círculo de Leitores, Lisboa, 297 p.
- HANSEN, J.; I. FUNG; A. LACIS; D. RIND; S. LEBEDEFF; R. RUEDY; G. RUSSELL (1988) — «Global climate changes as forecast by Goddard Institute of Space Studies three dimensional model», *J. Geophys. Research*, 93, D8, p. 9341-9364.
- HOUGHTON, J. T.; G. J. JENKINS, J. J. EPHRAUMS (1990) — *Climate Change. The IPCC assessment*, Cambridge University Press, 368 p.
- HULME, M. (1991) — «Global warming», *Progress in Physical Geography*, 15, 3, p. 310-318.
- HUYBRECHTS, P.; A. LETREGUILLY; N. REEH (1991) — «The Greenland ice sheet and greenhouse warming», *Global and Planetary Change*, 89, p. 399-412.
- INGRAM, W. J. (1989) — «Modelling cloud feedbacks on climate change», *Weather*, p. 303-311.
- JANSEN, H. M. A.; O. J. KINK; C. K. SPIEGEL (1991) — «Des incidences d'une élévation du niveau des mers: une approche économique», in *Le changement climatique. Evaluation des retombées socio-économiques*, OCDE, Paris, p. 79-120.
- JONES, M. D. H.; A. HANDERSON-SELLERS (1990) — «History of the greenhouse effect», *Progress in Physical Geography*, 14, 1, p. 1-18.
- JONES, P. D.; T. M. L. WIGLEY, P. M. KELLY (1982) — Variation in surface air temperature. Part I: Northern Hemisphere, 1881-1980», *Mon. Wea. Rev.*, 110, p. 59-70.
- JONES, P. D.; T. M. L. WIGLEY; P. B. WRIGHT (1986) — «Global temperature variations between 1861 and 1984», *Nature*, 322, 430-434.
- JONES, R. D.; T. M. L. WIGLEY; C. K. FOLLAND; D. E. PARKER; J. K. ANGELL; S. LEBEDEFF; J. E. HANSEN (1988) — «Evidence of global warming in the past decade», *Nature*, n° 338, p. 790.

- KELLOGG, W. W. (1991) — «Response to skeptics of global warming», *Bul. Amer. Met. Soc.*, 72, p. 499-511. (Cet article déclencha une active polémique dont on trouvera des échos dans *Bul. Amer. Met. Soc.*, 1991, 72, p. 1392-1394).
- KELLY, P. M.; P. D. JONES; C. B. SEAR; B. S. G. CHERRY; R. K. TAVAKOL — «Variations in air surface temperature, Part II: Arctic Regions 1881-1980», *Mon. Wea. Rev.*, 110, p. 71-83.
- KUTZBACH, J. E.; GERETTER, P. J. (1986) — «The influence of changing orbital parameters and surface boundary conditions on climate simulations for the past 18 000 years», *J. Atm. Sc.*, 46, p. 1726-1759.
- LAMB, P. J. (1987) — «On the development of regional climatic scénario for policy-oriented climate impact assessment», *Bul. Amer. Met. Soc.*, 68, p. 1116-1123.
- LINDZEN, R. (1990) — «Some coolness concerning global warming», *Bul. Amer. Met. Soc.*, 71, p. 288-299.
- (1991) — «Response to American Meteorological Society policy statement on global climate change», *Bul. Amer. Met. Soc.*, 72, p. 515.
- LIVERMANN, D. M. (1986) — «The response to a global food model to possible climate changes: a sensitivity analysis», *Journal of Climat.*, 6, p. 355-373.
- LOCKWOOD, J. G. (1990) — «Clouds and atmospheric radiation balance», *Progress in Physical Geography*, 14, 1, p. 89-96.
- MANABE, S.; R. T. WETHERALD (1980) — «On the distribution of climate change resulting from an increase of CO₂ content of the atmosphere», *J. Atmos. Sc.*, 37, p. 99-118.
- MCBEAN, G.; J. MCCARTHY (1990) — «Narrowing the incertainties: a Scientific Action Plan for improved prediction of global change», in *Climate Change*, Cambridge Univ. Press, p. 311-339.
- MEIER, M. F. (1989) — «Reduced rise in sea level», *Nature*, 343, p. 115-116.
- MELILLO, J. M.; T. V. CALLAGHAN; F. I. WOODWARD; E. SALATI; S. K. SINHA (1990) — «Effects on ecosystems», in *Climate Change*, Cambridge Univ. Press, p. 283-310.
- MITCHELL, J. F. B.; D. A. WARRILOW (1987) — «Summer dryness in northern midlatitudes due to increased CO₂», *Nature*, 330, p. 238-240.
- MITCHELL, J. F. B.; S. MANABE; V. MELESHKO; T. TOKIOKA (1990) — «Equilibrium climate change and its implications for the future», in *Climatic Change*, Cambridge University Press, p. 131-172.
- OCDE (1991a) — *Le changement climatique. Evaluation des retombées économiques*, Paris, 120 p.
- (1991b) — *Parer au changement climatique: quelques problèmes économiques*, Paris, 162 p.
- PEARCE, D. (1991) — «Evaluation des retombées socio-économiques du changement climatique: Introduction», in *Le Changement Climatique. Evaluation des retombées socio-climatiques*, OCDE, Paris, p. 9-22.
- PETERS, R. L. (1991) — «Consequences of global warming for biological diversity», in *Global Climate Change and Life on Earth*, R. L. Wyman edit., Routledge, Chapman and Hall, New York, p. 99-118.

- PIRAZZOLI, P. A. (1989) — «Present and near-future sea-level changes», *Global and Planetary Change*, 75, p. 241-258.
- RANDALL, D. A.; S. TJEMKES (1991) — «Clouds, the earth's radiation budget and the hydrological cycle», *Global and Planetary Change*, 4, 1/3, p. 3-9.
- RAYNAUD, D. J. CHAPPELLAZ; J. M. BARNOLA; Y. S. KOROTKEVICH; C. LORIUS (1988) — «Climatic and CH₄ cycle implications of glacial-interglacial CH₄ change in the Vostok ice core», *Nature*, 333, p. 655-657.
- RIJSBERMAN, F. (1991) — «Coûts potentiels des mesures d'adaptation à l'élévation du niveau des mers» in *Parer au changement climatique: quelques problèmes économiques*, OCDE, Paris, p. 11-52.
- SCHROEDER, P.; L. LADD (1991) — «Slowing the increase of atmospheric carbone dioxide: a biological approach», *Climatic Change*, 19, 3, p. 283-290.
- SHINE, K. P.; R. G. DERWENT; D. J. WUEBBLES; J. J. MORCRETTE (1990) — «Radiative forcing of climate», in *Climatic Change*, Cambridge Univ. Press, p. 41-68.
- SIMMONS, A. J.; L. BENGTTSSON (1984) — «Atmospheric general circulation models: their design and use for climatic studies», in *The Global Climate*, J. T. Houghton edit., Cambridge University Press, p. 37-62.
- SMITH, K. A. (1990) — «Greenhouse gas fluxes between land surface and the atmosphere», *Progress in Physical Geography*, 14, 3, p. 349-372.
- THOMAS, G. (1990) — «The regional hydrologic impacts of global climatic change: the role of climate models», *Global and Planetary Change*, 82, 343-368.
- WARRICK, R.; J. OERLEMANS (1990) — «Sea level rise», in *Climatic Change*, Cambridge Univ. Press, p. 257-281.
- WIGLEY, T. M. L.; S. C. B. RAPER (1987) — «Thermal expansion of sea water associated with global warming», *Nature*, 330, p. 127-131.
- WOODWELL, G. M. (1989) — «The warming of the industrialized middle latitudes 1985-2050: causes and consequences», *Climatic Change*, 15, 30-51.