

Augmentation et conséquences

En bref : Actuellement, on assiste à une réelle augmentation de la température de la basse atmosphère, appelée « sureffet » de serre ; elle pourrait atteindre 6 °C en 2100. Son origine est liée à des phénomènes naturels mais aussi à certaines activités humaines qui libèrent des substances telles que le dioxyde de carbone et le méthane. Vu la complexité de ce phénomène, sa connaissance n'est pas totalement maîtrisée, en particulier le rôle de l'océan. Quoi qu'il en soit, les conséquences sur le climat, le niveau des mers, mais aussi les activités et le mode de vie des populations deviennent préoccupantes.

- **Eau et augmentation de l'effet de serre**
- **Dioxyde de carbone et augmentation de l'effet de serre**
- **Augmentation des autres gaz à effet de serre**
- **Conséquences de l'augmentation de l'effet de serre**

● Rayonnement solaire et augmentation de l'effet de serre

Il faut noter que le nom climat, apparu au XII^e siècle, vient du latin *climatis* et du grec *klima* : « *inclinaison d'un point de la Terre par rapport au Soleil* ». Formulée dès la fin du XIX^e siècle, la théorie astronomique des climats qui explique leur variation par celle de l'ensoleillement, a été reprise en 1924 par le mathématicien Milutin Milankovitch. Il explique alors que l'évolution du mouvement de la Terre autour du Soleil et l'orientation de son axe de rotation, modifient la répartition de l'ensoleillement avec la latitude et les saisons et que ceci suffirait à provoquer les alternances entre climats glaciaires et interglaciaires. Cette théorie a été confirmée par l'analyse spectrale de sédiments marins de l'océan Indien : elle démontre qu'à l'expansion des calottes de glace correspond une diminution de l'effet de serre et inversement, à une diminution des calottes de glace correspond une augmentation de l'effet de serre. En effet, au cours des 500 000 dernières années, on observe des cycles de réchauffement et de refroidissement avec des périodicités de 100 000, 43 000, 24 000, et 19 000 ans. De plus les astronomes ont remarqué que l'activité solaire augmentait depuis une centaine d'années. Aussi n'est-il pas impossible que les rayons cosmiques jouent également un rôle dans le sureffet de serre.



● Eau et augmentation de l'effet de serre

Le rôle de l'eau est trop souvent oublié dans le phénomène du « *sureffet* » de serre : d'une part la vapeur d'eau représente à elle seule 70 % de l'effet de serre total, d'autre part une élévation de température liée à l'augmentation des gaz à effet de serre augmente la vaporisation de l'eau (phénomène de rétroaction) et double ainsi le réchauffement initial. De plus, les minuscules gouttelettes d'eau des nuages, en renvoyant une grande partie des rayons infrarouges émis par le sol, participe à l'effet de serre, notamment la nuit. Toutefois, une marge d'incertitude existe sur l'ampleur du rôle de l'eau émise par les activités humaines, d'autant que son temps de résidence dans l'atmosphère ne dépasse pas la dizaine de jours.



● Dioxyde de carbone et augmentation de l'effet de serre

L'augmentation de la concentration du CO₂ atmosphérique

Ce gaz, qui possède la propriété d'absorber les rayonnements infrarouges de longueur d'onde moyenne de 15 µm environ, constitue 15 % de l'énergie rayonnée par la Terre vers l'espace et représente 60 % du renforcement anthropique total de l'effet de serre. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère a beaucoup augmenté depuis le début de l'ère industrielle. Des mesures effectuées sur les bulles d'air emprisonnées dans les glaces polaires, montrent qu'elle est passée de 280 ppm avant l'ère industrielle à plus de 400 ppm actuellement, soit une augmentation de près de 30 % seulement en un siècle et demi. Au rythme actuel d'émission, cette concentration pourrait dépasser 500 ppm en 2100.

L'apport de la glaciologie



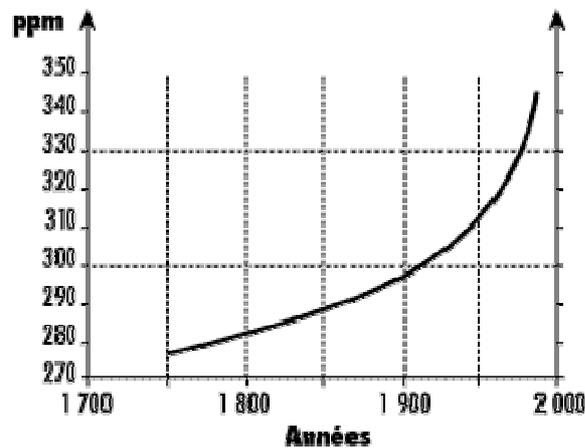
© photo R. -B. Alley

Reconstituer les variations de la composition atmosphérique a longtemps semblé impossible. Or, de 1980 à 1985, des scientifiques soviétiques ont extrait à la station de Vostock en Antarctique, à une profondeur de 2 000 mètres, des carottes de glace formée il y a environ 16 000 ans. Actuellement il est possible de remonter jusqu'à 420 000 ans. L'analyse des bulles d'air emmagasinées ont permis :

- de montrer que les concentrations en dioxyde de carbone et en méthane augmentent avec la température ;
- de reconstituer, grâce à l'étude de la composition isotopique de l'hydrogène, la succession des étés et des hivers dans le passé. En effet, plus la quantité d'hydrogène lourd ou deuterium ($2H$) piégée est importante, plus la température à laquelle la neige s'est déposée était élevée.



Évolution de la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone dans l'atmosphère



Cette augmentation est essentiellement due aux activités humaines : en particulier, la combustion des énergies fossiles et les changements d'affectation des sols dont la déforestation.

La combustion des énergies fossiles

On admet qu'entre 1971 et 1988, les émissions annuelles de carbone dans le monde sont passées de 4,8 à 6 milliards de tonnes. On parle tantôt d'émissions de carbone, tantôt d'émissions de dioxyde de carbone. Une tonne de CO_2 équivaut à 0,272 tonne de C ; une tonne de C équivaut à 3,67 tonnes de CO_2 . Actuellement les 6 milliards de tonnes (gigatonnes ou Gt) de carbone fossile (charbon, pétrole...) brûlés par an, dégagent 22 milliards de tonnes de dioxyde de carbone, ce qui représente 60 % du renforcement anthropique total de l'effet de serre. Il faut noter des augmentations importantes de CO_2 dans l'atmosphère au cours des périodes de réchauffement, mais leur évolution a duré plusieurs milliers d'années.

La déforestation

La disparition annuelle de 1 % de la forêt tropicale provoque une réduction de la photosynthèse, donc de l'utilisation du CO_2 atmosphérique. De plus, quand forêts et pâturages sont convertis en terres cultivées, l'oxydation des matières organiques (combustion des arbres, disparition de l'humus, etc.) dégage d'importantes quantités de CO_2 dans l'atmosphère. Le rejet global dans l'atmosphère du dioxyde de carbone par les activités humaines s'établit entre 26,6 et 37,6 milliards de tonnes par an. Il augmente de 1 % environ chaque année.

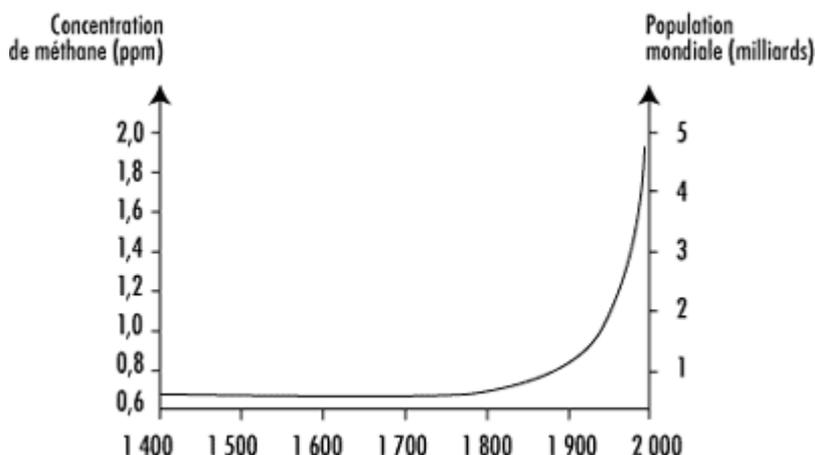


• Augmentation des autres gaz à effet de serre

Le méthane (CH₄) ou gaz des marais

Lié au phénomène de la fermentation, il provient de la décomposition de matières organiques sous l'action de microorganismes, en absence de dioxygène. Plus de la moitié des émissions de méthane qui augmentent de façon exponentielle, ont une origine anthropique, dont 60 à 70 % d'origine agricole. Le méthane se forme au niveau de marécages, termitières, sols inondés, intestins de ruminants, rizières, décharges d'ordures ménagères, exploitations de gaz naturel, mines de charbon ...

Évolution de la concentration en méthane et de la population mondiale depuis 1400



Source : CITEPA

Évolution des émissions annuelles de méthane entre 1940 et 1980, suivant les sources d'émission (millions de tonnes)

Source	1940	1980	Sa concentration atmosphérique s'accroît d'autant que, dans la troposphère, les radicaux •OH qui oxydent le méthane réagissent préférentiellement avec le monoxyde de carbone émis également en quantités croissantes, en particulier lors de la combustion de carburants.
Combustion de la biomasse	49	79	
Exploitation du gaz naturel	2	35	
Exploitation minière	19	35	
Ruminants	53	86	
Rizières	64	117	
Marais	79	47	
Autres sources biogéniques	16	25	
Total	282	424	

Source : État de l'environnement, 1988, ministère de l'Environnement.

Le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N₂O)

Lié à deux réactions bactériennes du cycle naturel de l'azote dans la biomasse terrestre, la nitrification et la dénitrification, il représente environ 6 % des gaz à effet de serre. Son augmentation est due à l'utilisation de combustibles fossiles et d'engrais azotés.



Émissions actuelles de protoxyde d'azote

Source	Émissions
Eaux	2
Production naturelle par les sols	6
Engrais	0,6 à 2,3
Augmentation des surfaces cultivées	0,2 à 0,6

Combustion d'énergie fossile	1,8
Combustion de la biomasse	1 à 1,2
Orages	0,1

Total **11,7 à 14,8**

Source : État de l'environnement, 1988, ministère de l'Environnement.

Le dioxyde d'azote (NO₂)

La concentration constante de 290 ppb (partie par billion) jusqu'en 1900, atteint actuellement 320 ppb. Les émissions anthropiques représentent entre 30 et 40 % de la production totale. Il faut noter que 11 millions de tonnes par an sont éliminés par oxydation, absorption par les sols et les océans, mais que le reste s'accumule pour plusieurs décennies.

L'ozone (O₃)

L'augmentation des concentrations locales de méthane et d'hydrocarbures, sous l'effet catalytique des oxydes d'azote, conduit à une production photochimique d'ozone troposphérique (O₃) qui contribue ainsi au « sureffet » de serre, soit directement par la capacité de l'ozone à absorber le rayonnement terrestre, soit indirectement par la neutralisation accrue des radicaux OH, incapables alors de « nettoyer » l'atmosphère de ses excédents de méthane et de monoxyde de carbone. La concentration de l'ozone au niveau du sol aurait doublé depuis le début du XX^e siècle. Sa concentration dans l'air varie fortement de 0,02 à 0,1 ppm et parfois plus.



Les dérivés halogénés (Chlorofluorocarbones ou CFC...)

Essentiellement liés aux activités humaines, ils sont par exemple utilisés comme propulseurs dans les bombes aérosols, liquides réfrigérants, agents de fabrication de mousses de polymères, solvants pour l'électronique. Ceux qui contiennent du chlore ou du brome, tenus comme responsables de la diminution de la concentration en ozone de la stratosphère, contribuent puissamment à l'effet de serre. Apparus vers 1930, leur taux de croissance, de l'ordre de 5 à 7 % par an, a été très rapide jusqu'au début des années 1990. Actuellement, suite au protocole de Montréal de 1987, ces gaz sont en lent déclin. En revanche, on constate une augmentation des concentrations de leurs substituts dont certains, même émis à faibles doses, sont de puissants gaz à effet de serre qui demeurent très longtemps dans l'atmosphère et risquent d'influer sur le climat futur.

Évolution des concentrations de certains gaz en l'absence d'une limitation des émissions

Constituant	Ère préindustrielle	1980	2030 (prévisions)
	275 000	339	450 000
CO ₂	700	000	2 340
CH ₄	280	1 550	375
NO ₂		301	1,1
CFC 11		0,17	1,8
CFC 12		0,28	

Source : État de l'environnement, 1988, ministère de l'Environnement.

Les aérosols

Il est apparu récemment que les aérosols issus des activités humaines ou d'origine naturelle (éruptions volcaniques, embruns marins ...) contribuaient aussi à l'effet de serre. Ces aérosols (sulfure de diméthyle, ammoniac, hydrocarbures réactifs, oxysulfure de carbone, dioxyde de soufre, carbone particulaire), bien que peu abondants et à faible temps de résidence dans l'atmosphère (exceptés ceux d'origine volcanique), peuvent agir de deux façons :

- rediffuser le rayonnement solaire, ce qui modifie l'albédo des nuages et contribue au refroidissement de l'atmosphère ;
- favoriser la modification des équilibres microphysiques et chimiques de l'atmosphère.

Reconnaissant leur rôle dans l'effet de serre, l'académie des sciences n'en souligne pas moins les multiples incertitudes qui persistent à leur sujet.



• Conséquences de l'augmentation de l'effet de serre

La contribution des différents gaz au sureffet de serre

Elle dépend de trois paramètres principaux :

- leur pouvoir radiatif ou capacité à échauffer l'atmosphère ;
- leur concentration dans l'atmosphère ;
- leur demi-vie c'est à dire le temps au bout duquel 50 % du gaz a disparu. La molécule de dioxyde de carbone sert de référence : on lui attribue la valeur 1.

Par exemple, le pouvoir radiatif du méthane est 58 : sa molécule est 25 fois plus absorbante que celle de CO₂ et un kg de ce gaz contient un plus grand nombre de molécules qu'un kg de CO₂. Si la concentration en équivalent-CO₂ des gaz à effet de serre devait doubler, comme on le prévoit dès le milieu du XXI^e siècle, l'excédent énergétique pour l'atmosphère, les sols et les océans, atteindrait 4 W/m². Il ne faut pas oublier de prendre en compte les boucles de rétroactions positives dont certaines sont encore méconnues.

Propriétés des différents gaz à effet de serre

Gaz	Concentration dans la basse troposphère	Accroissement annuel (%)	Pouvoir radiatif moléculaire CO ₂ = 1	Demi-vie (an)
CO ₂		0,4	1	50 à 200
CH ₄	350 ppm	1,0	1	10
N ₂ O	1,7 ppm	0,25	25 à 32	170
O ₃	0,31 ppm	croissant	150 à 250	très court
CFC 11	0,02 à 0,1 ppm	5,0	2 000	70
CFC 12	0,20 ppb	5,0	14 000 à 17 000	110
	0,32 ppb		17 000 à 20 000	

Source : Études documentaires, n° 99, CITEPA.



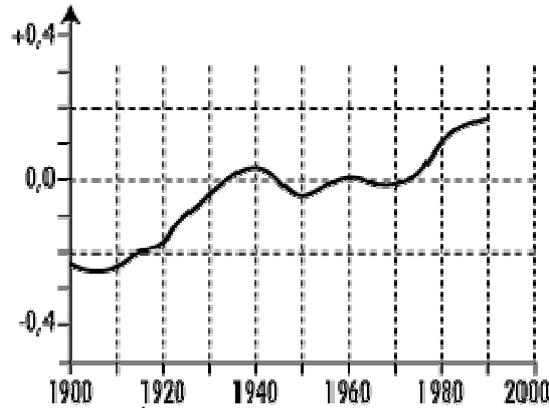
Potentiel de réchauffement global de certains gaz selon différentes périodes

Effet direct	Gaz	20 ans	100 ans
	CO ₂	1	1
	CH ₄	63	21
	N ₂ O	270	290
Effet indirect	NOx (formation O ₃)	150	40
	CO (formation O ₃ et CO ₂)	7	3
	HC non méthaniques (formation O ₃ et CO ₂)	31	11

Source : GIEC.

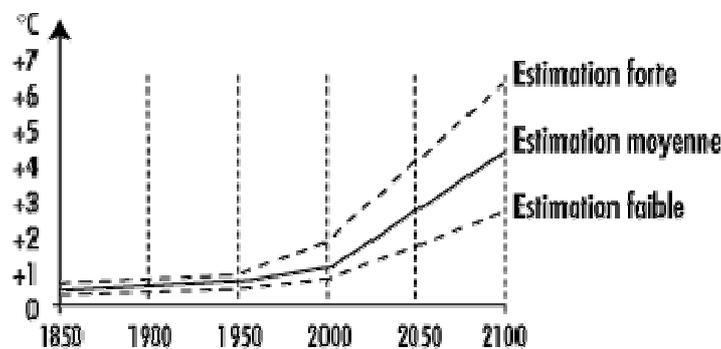
Les moyennes calculées de la température atmosphérique au sol et à la surface des océans depuis 1901 font apparaître une hausse de l'ordre de 0,3 à 0,6 °C. Toutefois, certains experts discutent la validité de ces résultats, faisant observer qu'au cours de ce siècle, les instruments et l'environnement des lieux de mesures peuvent fort bien expliquer à eux seuls cette tendance. Pour certains la relation de la hausse des températures et du « sureffet » de serre est encore à démontrer.

Évolution de la température atmosphérique mondiale au sol entre 1900 et 1988



Source : *État de l'environnement, OCDE, 1991.*

Scénarios d'évolution de la température moyenne de la surface terrestre



Ce « *sureffet* » de serre peut conduire à certaines conséquences :

- l'augmentation de l'évaporation de l'eau sous l'effet du réchauffement, entraînera un accroissement équivalent des précipitations ;
- l'accroissement de la température ne devrait pas atteindre 2 °C à l'équateur mais 6 à 8 °C dans l'arctique ;
- les augmentations de température seraient plus marquées l'hiver que l'été ;
- la stratosphère au-dessus de l'équateur, connaîtrait un net refroidissement d'environ 6 °C ;
- le recul des limites des surfaces enneigées et de la banquise diminuerait l'albédo de la planète, c'est à dire son pouvoir réfléchissant, augmentant ainsi l'absorption de l'énergie solaire et le réchauffement de l'atmosphère (rétroaction positive).

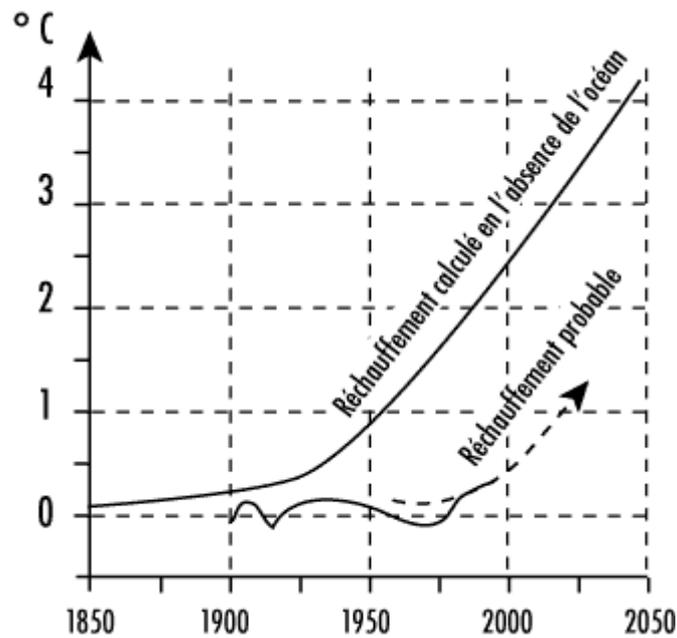
D'autres mécanismes régulateurs

L'océan, les nuages et la biosphère dont les différentes fonctions sont loin d'être parfaitement élucidées, peuvent aussi contribuer indirectement au *sureffet* de serre.

L'océan

Les multiples liens de ce « *géant* » avec les climats, rendent difficile à cerner son rôle dans leur régulation, en particulier sa participation au transport de chaleur, à la limitation de la banquise... Aujourd'hui, l'océan absorbe environ la moitié de l'excès de CO₂ produit par l'activité humaine, sous forme dissoute et de carbonates. Le réchauffement des eaux superficielles réduirait la dissolution du CO₂, limitant ainsi la quantité de plancton fixateur de carbone. L'océan risque d'être saturé peu à peu, d'autant que la baisse du gradient méridien des températures entre les pôles et l'équateur ralentirait la vitesse de circulation des eaux marines qui transportent le CO₂ jusque dans les profondeurs océaniques. De plus, la grande inertie thermique de l'océan lui permet d'absorber lentement beaucoup d'énergie et de la stocker. Le réchauffement des océans devrait donc être beaucoup plus lent que celui de l'atmosphère. Non seulement son effet serait retardé de plusieurs décennies, voire de plusieurs siècles, mais il se ferait sentir durant des siècles, voire des millénaires.

Inertie thermique de l'océan et retard sur l'effet de serre



Source : Gros temps sur la planète, Morel et Duplessy

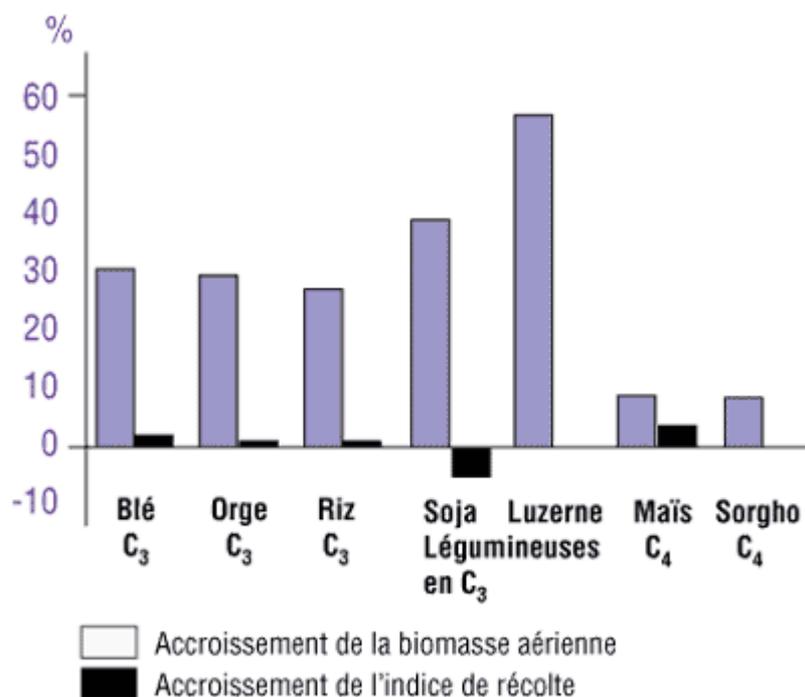
Les nuages

Le rôle des nuages dans le bilan radiatif de la Terre est ambigu et très mal connu. L'élévation de la température, en augmentant la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, accroîtrait les surfaces nuageuses provoquant à la fois un refroidissement dû à une réflexion accrue vers l'espace des rayons solaires sur le sommet des nuages et un réchauffement en raison d'un renforcement de l'effet de serre par augmentation du piégeage du rayonnement terrestre.

La biosphère

Enfin, le rôle de la biosphère, notamment de la végétation, pourrait peut-être constituer une rétroaction négative : l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone favorise le développement des plantes, donc son absorption par les végétaux chlorophylliens. Toutefois, cette augmentation serait, dans la plupart des cas, limitée par la disponibilité des oligo-éléments indispensables à leur croissance.

Augmentation de la fixation chlorophyllienne pour un doublement de la teneur de l'air en CO₂



De toute façon, le monde végétal ne peut pas être considéré comme un grand fixateur de carbone : la quantité de carbone absorbé par la photosynthèse étant, en général, presque entièrement compensée par celle rejetée par la respiration des plantes et la décomposition des débris végétaux en présence de dioxygène. La végétation peut aussi stocker une partie du carbone, soit sous forme de bois lors de sa croissance, soit sous forme fossile lorsque sa décomposition en présence de dioxygène est impossible : charbon, tourbe, etc.



Quelles conséquences pour la planète ?

Face à toutes ces incertitudes quant à l'ampleur et au rythme des modifications climatiques engendrées par l'augmentation de l'effet de serre, les conséquences sur l'environnement en général sont très difficilement appréciables ; certains auteurs nient même la probabilité de tels changements ! On peut toutefois envisager que si elles surviennent, elles auront des effets notables sur les civilisations humaines et les écosystèmes : montée du niveau des mers, changements dans la répartition des climats avec perturbation importante du régime des pluies donc des activités agricoles, modifications profondes des écosystèmes avec disparition probable de nombreuses espèces.

Élévation sensible du niveau de la mer

L'ampleur et l'accélération du phénomène suscite de nombreuses polémiques. En effet, le niveau des mers a augmenté de 15 cm entre 1880 et 1980, dont les trois quarts durant les cinquante dernières années. Deux processus liés à l'augmentation des températures peuvent concourir à cette élévation : la fonte des glaces continentales (inlandsis et glaciers) et la dilatation des océans. Par contre, il faut souligner que la fonte des glaces flottantes (banquise et icebergs) n'aurait, du fait du principe d'Archimède, aucune influence sur le niveau des mers.

Volume des glaciers situés actuellement sur les continents

Glacier	Volume en 106 Km³	Montée du niveau des mers en cas de fonte totale (m)
Antartique de l'Est		
Antartique de l'Ouest	23,00	65,0
Grønland	7,00	5,0
Autres glaciers	2,70	7,0
	0,24	0,6

Source : Gros temps sur la planète, J.-C Duplessy et P Morel.

Cette élévation de l'océan mondial est un problème très grave pour l'humanité dont la moitié vit dans des régions côtières basses. Recul des traits de côte, submersion des ports et des villes côtières sont à craindre. Sur les rivages de faible altitude, les conséquences seraient les plus graves car on y trouve généralement de fortes densités de population et des terres cultivables riches. Certains pays, comme le Bangladesh ou les Pays-Bas, seraient gravement affectés ; d'autres, comme les Maldives, seraient menacés de disparition.

Changements climatiques

Certains prévoient une augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes : sécheresses, inondations... La modification de la répartition des climats du monde, particulièrement du régime pluviométrique, le déplacement des anticyclones et donc des déserts seraient inéluctables. Plus grave encore, le réchauffement, même modeste, des eaux tropicales pourrait multiplier la fréquence des cyclones tropicaux puisque ces derniers ne prennent naissance que sur les mers chaudes à une température d'environ 27 °C.

Conséquences sur l'agriculture et la forêt

L'agriculture connaîtrait de sérieux bouleversements en raison des changements de climats et des déplacements probables des zones climatiques impossibles à prévoir aujourd'hui. Par exemple, des régions actuellement grandes productrices de denrées agricoles pourraient décliner alors que d'autres prendraient le relais. Enfin, les écosystèmes pourraient être gravement affectés avec, notamment, le dépérissement des forêts actuelles dans les zones de latitude moyenne. Il est impossible de dire aujourd'hui si la végétation sera capable de suivre un rythme aussi rapide d'évolution du climat, si les arbres pourront « migrer » assez vite. Le problème est bien la rapidité avec laquelle le phénomène devrait se réaliser. En effet, au cours des époques géologiques antérieures, les variations de

températures n'ont pas dépassé 0,01 à 0,02 °C par décennie, alors que celles que nous risquons de déclencher seraient de 20 à 40 fois plus rapides. Les sociétés humaines seront-elles capables de s'adapter ? Et si oui, à quel prix ? Ne devraient-elles pas s'y préparer dès maintenant ?

