

# LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Guy Jacques  
Hervé Le Treut



Organisation  
des Nations Unies  
pour l'éducation,  
la science et la culture

Éditions  
UNESCO

COI Forum Océans

## Le changement climatique

**Dans la même collection :**

*El Niño. Réalité et fiction*

*Les humeurs de l'océan. Effets sur le climat et les ressources vivantes*

**En anglais :**

*Coastal zone space: prelude to conflict?*

*El Niño. Fact and fiction*

*The changing ocean. Its effects on climate and living resources*

*Understanding the Indian Ocean*

**En espagnol :**

*El Niño. Realidad y ficción*

*Los caprichos del océanos. Efectos sobre el clima y los recursos vivos*

# Le changement climatique

GUY JACQUES  
HERVÉ LE TREUT

COI Forum Océans | Éditions UNESCO

Les idées et les opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les vues de l'UNESCO.

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Publié en 2004 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture  
7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP

Composé par Compo-Méca sarl – 64990 Mouguerre  
Imprimé par l'UNESCO

ISBN 92-3-203938-9  
© UNESCO 2004, 2014  
Tous droits réservés

*Imprimé en France*

# Préface

Il y a un siècle, le lauréat suédois du Prix Nobel, Svante Arrhenius, a été le premier à affirmer que les concentrations croissantes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère provoqueraient un réchauffement de la température à la surface de la Terre. Au cours des quelques décennies suivantes, de rares savants commencèrent à reconnaître le fait qu'une augmentation dans l'atmosphère du CO<sub>2</sub> provenant de la combustion des combustibles fossiles pourrait provoquer une tendance planétaire au réchauffement. Mais ces idées étaient largement rejetées par la plupart des scientifiques, se fiaient à une croyance largement répandue, à savoir que les océans absorberaient la plus grande part de ce CO<sub>2</sub> produit par l'industrie. Il fallut attendre les travaux plus récents de Roger Revelle, Hans Suess, Bert Bolin et Erik Eriksson, ainsi que la publication de la désormais célèbre étude de l'Observatoire de Mauna Loa à Hawaï, que nous devons à Charles David Keeling, pour que les scientifiques comprennent que la biosphère terrestre et les océans n'absorbaient qu'une fraction de ce CO<sub>2</sub>, et que les concentrations atmosphériques, ainsi que l'« effet de serre » qui les accompagnait, augmentaient rapidement. Vers 1985, les preuves scientifiques croissantes des perturbations humaines affectant le climat, placèrent ces questions sur l'agenda politique. Mais ce n'est qu'en 1997 qu'une majorité de nations adopta un protocole — le Protocole de Kyoto — afin de commencer une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre provenant des activités humaines.

Sept ans plus tard, le Protocole n'a pas encore reçu suffisamment de signatures pour être mis en œuvre.

De nombreuses raisons expliquent ce délai. D'abord, pour l'opinion publique, il existe une question cruciale : le refus de certains États, qui ont des niveaux d'émission élevés et donc une responsabilité accrue dans la création du problème, de ratifier le Protocole.

Au-delà de l'idée classique d'intérêt personnel — c'est-à-dire d'avantages socio-économiques — les auteurs étudient plusieurs raisons. Tout d'abord, il n'existe aucune preuve scientifique formelle permettant d'affirmer que les gaz à effet de serre émis par l'homme soient la seule ou la principale cause du réchauffement de la planète ; on ne dispose que de fortes suppositions. Le niveau du réchauffement observé aujourd'hui se situe encore dans les limites du passé géologique de la Terre au cours des derniers millions d'années, même si la concentration actuelle de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est sans précédent depuis plusieurs millions d'années et si le taux d'accroissement de la température moyenne enregistrée à la surface de la Terre est très alarmant. Ensuite, bien des arguments scientifiques qui relient le CO<sub>2</sub> généré par l'homme à l'augmentation de la température sont assez peu convaincants, soit qu'ils manquent de données fiables, soit qu'ils révèlent une méconnaissance de tous les facteurs positifs et négatifs qui entrent en jeu. Enfin, troisièmement, comme les savants subissent des pressions et qu'on exige d'eux des prédictions sur le comportement à venir de phénomènes encore mal compris, il est normal que ces prédictions prêtent le flanc à la critique.

En bref, la ratification du Protocole implique d'agir immédiatement en dépit de grandes incertitudes, au lieu d'attendre de mieux connaître les causes et les effets de l'action humaine sur le climat. Comme l'indique le Troisième Rapport du GIEC (Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat) dans une déclaration aux termes soigneusement pesés : « Il y a une influence perceptible de l'homme sur le climat global. », et il ajoute que, « compte tenu des nouveaux éléments de preuves obtenus et des incertitudes qui subsistent encore, l'essentiel du réchauffement observé ces cinquante dernières années est probablement dû à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Qui plus est, il est très probable que le réchauffement survenu au XX<sup>e</sup> siècle ait contribué de façon significative à l'élévation du niveau de la mer qui a été observée, du fait de la dilatation thermique de l'eau de mer et des pertes importantes de glace sur les terres émergées. En tenant compte des incertitudes actuelles, les observations comme les modèles sont cohérents avec l'ab-

sence d'accélération importante de l'élévation du niveau de la mer au cours du XX<sup>e</sup> siècle. »

Après le succès obtenu dans cette même collection par les ouvrages de Bruno Voituriez et Guy Jacques, *El Niño. Réalité et fiction*, et de Bruno Voituriez, *Les humeurs de l'océan. Effets sur le climat et les ressources vivantes*, la Commission océanique intergouvernementale (COI) est heureuse d'ajouter un nouveau titre à sa collection COI Forum Océans.

Pour cette même collection, Guy Jacques et Hervé Le Treut ont écrit un nouvel ouvrage dans lequel ils tentent de décrire la complexité des interactions entre l'atmosphère et l'océan qui régulent le climat, et d'expliquer, de façon approfondie mais avec simplicité, le débat scientifique sur le climat.

Lors de la onzième session de son Conseil exécutif (26 février-3 mars 1979, Mexico), la COI de l'UNESCO a accepté, en liaison avec le SCOR (Comité scientifique pour les recherches océaniques), d'établir le CCCO (Comité sur les changements climatiques et l'océan). Un peu plus tard, son président, le professeur Roger Revelle devait plaider pour la création de ce Comité devant les États membres de la COI lors de sa onzième assemblée (15 octobre-3 novembre 1979).

Aujourd'hui, le Programme sur les océans et le climat de la COI s'attache à réduire l'incertitude scientifique liée au rôle de l'océan dans le changement climatique et aux effets du changement climatique sur les phénomènes et les ressources océaniques. La COI est l'un des parrains du PMRC (Programme mondial de recherche sur le climat) dont les objectifs visent à déterminer dans quelle mesure il est possible de prédire le climat et de vérifier la part de l'influence humaine sur son évolution. L'étude du PMRC sur la variabilité et les prévisions climatiques (CLIVAR) contient des recherches et des observations sur les phénomènes océaniques qui ont une importance pour améliorer notre connaissance du climat et nos capacités de prédiction.

Le Comité consultatif sur le CO<sub>2</sub> des océans du SCOR-COI offre un forum international qui favorise les observations et la recherche nécessaires à la compréhension du rôle de l'océan dans le cycle planétaire du carbone. Il sert de secrétariat technique pour un certain nombre de projets de coordination internationale de recherche et d'observations de la Convention SOLAS, IMBER et CLIVAR. La COI est aussi le principal coordonnateur et secrétariat technique pour le Groupe sur les observations océaniques pour l'étude du climat (OOPC) qui fournit des conseils techniques et des orientations sur les observations océaniques nécessaires

à la compréhension du climat. L'OOPC est la principale institution de conseil sur les observations des océans qui dépend du Système mondial d'observation du climat, lequel traite directement avec la Convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique.

Dans le cadre du programme de la COI concernant le climat, nous espérons que ce nouvel ouvrage *Le changement climatique* pourra répondre aux diverses questions que se pose souvent le grand public.

Patricio A. Bernal  
Secrétaire exécutif  
Commission océanographique intergouvernementale

# Introduction

Quand l'un d'entre nous proposa à l'UNESCO *El Niño. Réalité et fiction*, il ne se doutait pas que cet ouvrage inaugurerait une collection originale. Le succès a certainement récompensé un ton nouveau, le phénomène scientifique s'insérant dans son contexte économique, social et politique. Le « coup de cœur » pour les ouvrages de Brian Fagan, archéologue américain, auteur de *Foods, famines and emperors* et de *The little ice age*, ne pouvait nous écarter de cette voie pour traiter d'un des sujets qui inquiète probablement le plus nos sociétés, avec le problème des organismes génétiquement modifiés, celui du changement climatique. Cet ouvrage n'est bien sûr pas le premier sur ce sujet : depuis *Gros temps sur la planète* de Jean-Claude Duplessy et Pierre Morel, qui jouèrent le rôle de précurseurs, plusieurs auteurs ont cherché à mettre ce dossier difficile à la portée du plus grand nombre.

Ce nouvel ouvrage souhaite poursuivre ce qui fait l'originalité de cette collection : présenter non seulement les éléments scientifiques du dossier, mais aussi la manière dont ils ont contribué à instaurer un débat de société. Nous mettrons évidemment en lumière des résultats scientifiques, mais nous indiquerons également leurs incertitudes et les hypothèses engendrées. Nous explorerons les éléments qui peuvent aider à comprendre le contexte particulier de ce débat, l'histoire de la science climatique et des relations de nos sociétés au climat, les polémiques qui entourent parfois le travail scientifique, les enjeux qui peuvent déformer la communication de ces résultats.

Nous espérons que cet ouvrage sera agréable à lire, conscients qu'un certain hermétisme nuit généralement à la littérature scientifique; la suppression des équations et des tableaux, la rareté des figures vont dans ce sens.

*Le changement climatique* s'ouvre sur les rapports entre l'homme et le climat en recherchant, dans la culture passée, les racines de son attitude face aux aléas climatiques (chapitre 1). Après avoir décrit les modifications en cours de notre environnement (chapitres 2 et 3), nous expliquerons les rouages et engrenages de la machine climatique (chapitres 4 et 5). Nous prendrons alors l'exemple de l'une des régions les plus vulnérables, le Sahara (chapitre 6), pour mettre en perspective les changements climatiques qui se sont produits, se produisent et se produiront aux différentes échelles de temps, des âges géologiques à la décennie. Ceci permettra également de mieux cerner l'enjeu des prévisions des modèles quant à l'évolution du climat au cours de ce siècle (chapitre 7).

Mais cet exposé serait incomplet si nous n'abordions le lien entre débats scientifiques et questions de société. Cette partie, en marge de nos recherches personnelles, fait appel à des synthèses, à des articles de vulgarisation et à des ouvrages des meilleurs scientifiques dans ces domaines. Les polémiques autour du changement climatique (chapitre 8) nous permettront de mieux comprendre les débats et les enjeux du protocole de Kyoto (chapitre 9) dont notre avenir dépend assez largement.

# Sommaire

—> CHAPITRE 1	<b>Civilisations et climat</b>	<b>15</b>
	Le « temps » au cours du temps	
	La perception du climat à l'époque contemporaine	
	la perception du climat chez quelques civilisations passées	
	Aléas climatiques et déclin des civilisations	
—> CHAPITRE 2	<b>Un monde qui change</b>	<b>31</b>
	Une question d'échelle	
	Le climat et le temps	
	Un changement d'atmosphère	
	Des signes avant-coureurs du changement global?	
—> CHAPITRE 3	<b>Du « bon » effet de serre</b>	<b>41</b>
	Le « chauffage » solaire	
	Les tribulations du rayonnement solaire dans l'atmosphère	
	Le devenir de l'énergie arrivant au « sol »	
	L'émission terrestre	
	Le bilan radiatif global	
—> CHAPITRE 4	<b>La machine climatique</b>	<b>55</b>
	Un système dynamique	
	L'atmosphère	
	L'océan	
	Le « système Terre »	
	Changement climatique et fluctuations climatiques	

→ CHAPITRE 5	<b>À la recherche des puits de carbone</b>	<b>67</b>
	Une donnée nouvelle, celle des puits de carbone	
	Le cycle du carbone : stocks et flux, sources et puits	
	Réaction des puits au changement climatique	
	La création de puits de carbone biosphériques : mythe ou réalité?	
→ CHAPITRE 6	<b>Le Sahara au fil du temps</b>	<b>77</b>
	Le Sahara d'avant-hier, au gré de la dérive des continents	
	Le Sahara d'hier	
	Le Sahara d'« aujourd'hui »	
	Photographie du Sahara actuel	
	Le Sahara de demain : le rôle de l'Homme	
→ CHAPITRE 7	<b>Fera-t-il beau demain ?</b>	<b>95</b>
	La modélisation numérique	
	Quelques scénarios	
	Évolutions prévisibles du climat au XXI <sup>e</sup> siècle	
→ CHAPITRE 8	<b>Polémiques et groupes de pression</b>	<b>107</b>
	Un contexte difficile et controversé	
	Changeons-nous de climat ?	
	Les fondements théoriques des prévisions	
	D'autres pistes pour expliquer le changement climatique	
→ CHAPITRE 9	<b>Autour de Kyoto</b>	<b>115</b>
	De Genève à Kyoto	
	En savoir plus sur le GIEC	
	Le protocole de Kyoto	
	Une nécessité : déterminer la « valeur du carbone »	
	Une polémique : permis d'émission ou droits à polluer ?	
	Comment diminuer les émissions ?	
	Trois exemples d'application du protocole de Kyoto	
	<b>Conclusion</b>	<b>131</b>
	<b>Glossaire</b>	<b>133</b>
	<b>Pour en savoir plus</b>	<b>159</b>

*« Des événements aussi spectaculaires pèsent particulièrement lourd sur les pauvres. Certains remettent ce fait en question, s'accrochant à la croyance que le temps est le seul élément face auquel les êtres humains sont égaux. Comme le dit le proverbe, la pluie mouille aussi bien les riches que les pauvres.*

*Mais cette image est fausse. Même en ce qui concerne le temps, les pauvres sont moins bien lotis. Beaucoup moins bien.*

*Les tempêtes font plus de dégâts sur les bords de l'eau ou les terres basses, là où les pauvres ont une plus grande probabilité d'habiter. Leurs abris sont faits de matériel léger que l'eau et les vents réduisent facilement en morceaux. Une fois la tempête passée, laissant dans son sillage la désolation et les maladies, ils n'ont pas d'assurance pour rembourser les dégâts ni pour se soigner. Leur approvisionnement en eau aura toute chance d'être contaminé et les risques pour eux d'être victimes d'épidémies sont beaucoup plus grands que pour les groupes plus aisés de la population.*

*Tout cela, nous le savons. Mais il apparaît de plus en plus clairement que ce sont les pauvres qui paient le plus lourd tribut au changement climatique à long terme qui affecte notre environnement. »*

Discours de Gro Brundtland,  
Directeur général de l'Organisation mondiale de la santé,  
à l'adresse de Godwin Olu Obasi,  
Secrétaire général de l'Organisation météorologique mondiale,  
le 23 mars 1999

# 1 Civilisations et climat

## LE « TEMPS » AU COURS DU TEMPS

Face au climat et, plus généralement, à l'environnement, les civilisations construisent leurs mythes, leurs croyances et leurs règles de vie, et l'on peut parler d'une « anthropologie du climat ». Dans chaque société, l'homme observe, calcule, explique, prévoit et accumule, de génération en génération, des connaissances sur les phénomènes climatiques. Grâce à elles, il organise ses activités et développe des stratégies d'adaptation physiologique et psychologique. Il va même jusqu'à tenter de « modifier le temps » en s'attirant les grâces d'êtres surnaturels, de génies, de divinités par des rites, des prières, des sacrifices généralement dirigés par des « spécialistes » du climat, magiciens, chamans, prêtres, moines ou détenteurs d'un pouvoir politique (figure 1.1).

Nous ne pouvons comprendre la « météomania » dont nos sociétés occidentales sont atteintes, ni la diversité des réponses apportées dans le monde à un problème environnemental majeur comme l'effet de serre, sans nous référer à quelques exemples pris dans d'autres civilisations contemporaines et dans l'histoire de l'humanité. La tradition façonne encore nos réactions et notre héritage culturel est très divers, de la Grèce antique, avec une parfaite harmonie entre ses conceptions politiques et morales et son climat, à « l'obscurantisme entretenu » du Moyen Âge en passant par le Japon et son fatalisme à l'égard des aléas naturels.

Chroniqueurs et historiens se sont d'abord contentés de noter les événements climatiques exceptionnels : le gel de la mer d'Azov au 1<sup>er</sup> siècle de notre ère, l'avancée du désert en Tunisie au milieu du v<sup>e</sup> siècle, la disparition du



© IRD (Institut de recherche pour le développement) / Esther Kats

Figure 1.1

**Le rite du *Volador* au Mexique.**

Le *Volador*, la danse rituelle la plus célèbre des Totonagues du golfe du Mexique, également pratiquée par d'autres groupes indigènes du Mexique et du Guatemala, illustre l'importance des cérémonies destinées à demander aux dieux la pluie, gage de fertilité des terres et de récoltes abondantes.

tiers de l'espèce humaine après le terrible hiver de 873, la prise en glace du Rhône durant 15 semaines en 1364, etc. En Occident, les premières annales sont dues aux moines de l'époque carolingienne signalant les faits marquants : un nuage de sauterelles, une épidémie, un séisme, une inondation, des tempêtes. Mais il faut attendre le XVII<sup>e</sup> siècle pour que naisse la météorologie grâce à la mise au point d'instruments de mesure et à l'implantation d'observatoires. Le réseau mis en place dans 11 villes d'Europe grâce au mécénat de Ferdinand II Médicis, grand-duc de Toscane, fonctionne seulement de 1657 à 1667, car le Vatican prend ombrage de ses initiatives, le contraignant à dissoudre l'Accademia del Cimento. Considérée comme une branche mineure de la physique, à tel point que le Français Auguste Comte l'exclut de sa classification des sciences, la météorologie connaît une nouvelle impulsion en 1850 avec la création de sociétés savantes et l'utilisation du télégraphe électrique Morse pour la transmission des observations.

Mais la météorologie moderne est née le 14 novembre 1854 lorsqu'une violente tempête cause la perte de 41 navires et la mort de 400 marins lors de la guerre de Crimée. Le Ministre de la guerre français charge alors l'astronome Urbain Le Verrier d'élucider ce désastre. Il s'aperçoit que la tempête soufflait déjà deux jours auparavant en mer Noire, au nord-ouest de la zone de naufrage : « Pour nous mettre en mesure de répondre aux intentions de M. le Maréchal, j'adressai une circulaire aux astronomes et aux météorologistes de tous les pays, en les priant de me transmettre les renseignements qu'ils auraient pu recueillir sur l'état de l'atmosphère pendant les journées des 12, 13, 14, 15 et 16 novembre 1854.

» Le 16 février 1855, j'eus l'honneur de soumettre à S. M. l'Empereur le projet d'un vaste réseau de météorologie destiné à avertir les marins de l'arrivée des tempêtes. Ce projet, très complet, reçut la haute approbation de Sa Majesté et dès le lendemain, le 17 février, nous fûmes, M. de Vougy, directeur général des lignes télégraphiques, et moi, autorisés à entreprendre et à poursuivre l'organisation projetée.

» Deux jours après, je présentai à l'Académie, d'accord avec M. de Vougy, une carte de l'état atmosphérique de la France, le jour même à 10 heures du matin. »

À partir de 1858, l'Observatoire de Paris publie quotidiennement un bulletin météorologique international et chaque pays met en place ses services météorologiques, l'Europe comptant 59 stations en 1865. La coopération internationale s'organise pour aboutir, en 1879, à la création du Comité international de météorologie, ancêtre de l'actuelle Organisation météorologique mondiale.

L'histoire de l'effet de serre, c'est-à-dire la compréhension de son rôle global sur le climat de la planète, débute en 1824 quand le physicien français Joseph Fourier publie ses *Remarques générales sur la température du globe et des espaces planétaires* où il développe l'idée du rôle protecteur de l'atmosphère contre la perte de chaleur du sol par rayonnement. Il y parle de « chaleur obscure » qui n'est autre que le rayonnement infrarouge. Ces idées sont reprises par le physicien français Claude Pouillet (1790-1868) puis par l'Irlandais John Tyndall, physicien, naturaliste et pédagogue (1820-1893), qui désignent la vapeur d'eau et le gaz carbonique comme responsables de l'effet de serre. Mais c'est au Suédois Svante Arrhenius (1859-1927) que l'on doit la généralisation et la diffusion de ces idées. Selon ses calculs, en l'absence de CO<sub>2</sub>, la température au sol serait de 15 °C inférieure à ce qu'elle est; cette valeur est d'un ordre de grandeur correct puisque nous avons vu que l'effet cumulé de la vapeur d'eau et du CO<sub>2</sub> provoque un réchauffement de 33 °C, compte tenu également de l'effet modérateur de la convection.

## **LA PERCEPTION DU CLIMAT À L'ÉPOQUE CONTEMPORAINE**

### **AUX CONFINS DE LA « MÉTÉOMANIA »**

Ce n'est pas uniquement en raison de leurs conséquences économiques que les prévisions météorologiques et climatiques sont l'un des sujets préférés des médias. Ce souci du « temps qu'il fait » a toujours été présent dans nos sociétés, comme en témoigne l'acquisition par des millions de foyers de baromètres avant que ne se généralise la pratique des bulletins météorologiques à la radio puis à la télévision. Les vitrines de Noël mettent maintenant en lumière les capteurs ou stations météorologiques individuelles. En quelques décennies, la météorologie et ses gourous sont devenus des vedettes médiatiques et le « temps qu'il fait » demeure le sujet roi des communications téléphoniques, des conversations et correspondances. Cette attention aux aspects immédiats de la prévision météorologique (va-t-il pleuvoir cet après-midi?) génère d'inévitables malentendus quand il s'agit d'appréhender des évolutions plus lentes, comme celles qui sont associées à la croissance de l'effet de serre.

Bien sûr, chacun n'a pas les mêmes rapports avec le climat. Tel artiste apprécie le brouillard qui estompe les formes, tel automobiliste le redoute comme un écran dangereux. Jusque vers les années 1960, les prévisions météorologiques intéressent ceux dont l'activité dépend du climat: agriculteurs, marins, pilotes. Maintenant, la « météo » est l'affaire de tous,

même si le météorologue français Martin de la Soudière distingue les météo-indifférents, les météo-sensibles, vulnérables physiquement et psychologiquement, et les « météo-manes » qui regardent dix fois par jour les bulletins météo. Ils succèdent aux « météo-graphes » qui scrutent méthodiquement le temps et consignent leurs observations. Cette lignée va d'Hérodote à madame de Sévigné et, plus près de nous, à l'écrivain portugais Fernando Pessoa, qui parle du temps comme d'une présence étonnamment proche, tantôt hostile, tantôt complice.

Parmi les réactions que suscite le débat sur l'effet de serre resurgit inévitablement une composante culturelle, souvent enfouie dans l'inconscient collectif ou personnel : le regard que nous portons sur la nature renvoie à des éléments religieux, philosophiques, géographiques, affectifs qui varient d'un peuple à un autre, d'une civilisation à une autre. L'importance d'un changement climatique ne se traduit pas simplement par les dommages qu'il faut chiffrer mais aussi par la modification d'une relation souvent intime et complexe que nous avons avec le monde qui nous entoure. Quelques exemples au fil de l'histoire et au sein du monde actuel illustreront notre propos.

#### REGARD SUR L'AUSTRALIE

L'Australie offre un exemple extrême du contraste classique dans la perception du climat entre les villes et l'intérieur. La plupart des villes australiennes, où se concentre l'essentiel de la population, de la vie institutionnelle, culturelle et économique, font face à l'océan au sud-est de cette île-continent. Pas plus que les Européens ou les Américains, leurs habitants n'acceptent l'aléa climatique !

Au-delà des Blue Mountains s'étend un continent immense de 7,5 millions de kilomètres carrés de terre rouge, aride et poussiéreuse recouverte d'une maigre végétation. Comme dans tous les pays désertiques, la chaleur est écrasante dans la journée et les nuits sont glacées. Les hommes attendent la pluie durant des mois, parfois des années. Son arrivée, imprévisible, constitue un événement vital. La terre, inondée, se détend, les premières gouttes font monter une brume rouge, la végétation, recroquevillée sur ses minces réserves d'humidité, reverdit. Les Aborigènes, qui vivent ici depuis 60 000 ans, en connaissent les signes avant-coureurs ; ils savent que le désert, apparemment stérile, est un grenier riche de semences. Ils ont en effet appris à évoluer dans ces conditions extrêmes et leur parfaite maîtrise du milieu aide les autres habitants à survivre et à travailler sous les conditions climatiques rigoureuses de l'*outback*.

## EL NIÑO, ANGE OU DÉMON ?

En un siècle, la perception du phénomène climatique El Niño s'est inversée. Micros et caméras sont tournés vers Kyoto au moment où El Niño 1997-1998 atteint son apogée, avec son cortège de catastrophes : sécheresse et incendies en Indonésie, inondations en Amérique du Sud et dans la corne de l'Afrique. Les titres de la presse durant cette période montrent que cet événement est maintenant associé à l'idée de catastrophe :

Folles pluies sous les tropiques *Le Nouvel Observateur*

Le calamiteux retour de « l'Enfant Jésus » *Le Figaro*

Comment El Niño embrase le Pacifique *Le Point*

Après El Niño, La Niña.

Les enfants terribles du climat *Sciences & Avenir*

El Niño,

le courant fou qui détraque le climat *Science & Vie*

Pourtant, il est inimaginable que les Péruviens aient baptisé ce courant chaud du nom de l'Enfant Jésus s'ils n'y avaient vu, au contraire, un événement bénéfique. Pour les pêcheurs de Paita, « *la corriente del Niño* », qui apparaît presque chaque année au moment de Noël, coïncide avec des pluies bienvenues en région aride. Les marins eux-mêmes, qui pratiquent une pêche artisanale, tirent profit de ce courant car ils capturent alors des espèces tropicales appréciées : dorades coryphènes, albacores et bonites, poulpes, crevettes, etc., qui les changent des anchois du menu quotidien.

## REGARD SUR L'EUROPE

Les sociétés bourgeoises de l'Europe occidentale connaissent depuis quelques siècles un climat stable. Pour l'écrivain anglais de science-fiction James Ballard, né il est vrai à Shangai en 1930, auteur de *Crash* (1973) et du *Monde englouti* (1962), l'idée d'un changement climatique n'atteint pas seulement notre mode de vie mais notre psychologie même. Certains risquent de chercher dans ce changement une dimension surnaturelle ou spirituelle qui peut rappeler la grande peur de l'an 1 000 avec une attitude moralisatrice un peu trouble : le changement est une punition pour nos sociétés car elles ont pêché. Un retour à une sorte de Moyen Âge, un temps de superstition, de peur, d'incertitude peut caractériser certaines réactions sans exclure, bien au contraire, l'émergence d'un sentiment de solidarité comme en temps de guerre.

Par ailleurs, à côté d'une conscience grandissante des menaces climatiques, subsiste une certaine indifférence. Il n'est pas certain que l'homme limite ses déplacements automobiles...

## LA PERCEPTION DU CLIMAT CHEZ QUELQUES CIVILISATIONS PASSÉES

### LA GRÈCE ANTIQUE

La pensée hellène est dominée par l'idéal d'un accord parfait entre ses conceptions politiques et morales et son climat. La supériorité de la Grèce dans les trois parties du monde tient à ce qu'il s'agit du pays du « juste milieu » qui ne souffre ni des défauts de l'Asie ni de ceux de l'Europe, mais qui cumule leurs qualités, en harmonie avec le climat méditerranéen. Platon disait : « Il y a en Grèce un climat entre tous favorable à la vertu ; il faut dire son mérite, qui serait d'être intermédiaire entre les frimas et les chaleurs torrides. » Les philosophes grecs assimilent ainsi les peuples du Nord et de l'Ouest à des guerriers, ce qui se relie au climat froid et brumeux et à Borée, le violent vent du nord. Les peuples de l'Est sont, au contraire, lascifs, aimant plaisirs et richesses, ce qui tient à la chaleur du climat subtropical et à l'amollissement qui en résulte.

Pour Hippocrate, contemporain de Socrate, connaître le climat est un outil pratique. Son *Traité des airs, des eaux et des lieux* recherche les causes externes, notamment climatiques, des maladies. Les Grecs contribuent à l'approfondissement du savoir. Ils définissent les « climats » comme l'ensemble des régions où le Soleil est quasiment à la même hauteur, donc à la même latitude. Le climat est « l'ensemble des qualités de l'atmosphère d'un lieu sur la longue durée » avec des contrastes saisonniers, ce qui va au-delà des conceptions d'Aristote, « la » référence dans l'histoire des sciences grecques.

Né en 384 avant J.-C. sur les bords de la mer Égée, Aristote est attiré par Athènes où les plus illustres savants et philosophes enseignent. Il devient l'élève de Platon dont il se détache peu à peu avant d'en critiquer l'enseignement. En 350, il écrit *Meteorologia*. Révolutionnaire par certains aspects, comme la rotondité de la Terre, la différenciation latitudinale des climats, cet ouvrage n'est en rien une approche géographique et climatique au sens moderne de ces termes. Il traite en effet seulement des « météores », c'est-à-dire de phénomènes violents mais transitoires comme la pluie, le vent, la grêle, la foudre, le tonnerre. Cette conception est presque à l'opposé du concept du climat qui représente les tendances moyennes à long terme. Si cet ouvrage déculpabilise l'homme par rapport à la nature, il maintient le concept de la Terre comme centre de l'univers, idée qui interdira longtemps une approche scientifique du climat. D'autre part, au centre de la théorie aristotélicienne siège le principe des deux « exhalaisons », l'une sèche, l'autre liquide, qui seraient la cause de la

majorité des phénomènes météorologiques et géologiques comme le volcanisme et les tremblements de terre. Mais certains passages de *Meteorologia* constituent de magnifiques descriptions des sciences de l'univers : « Il est donc évident, puisque le temps ne s'épuise pas et que l'univers est éternel, que le Tanais [le Don] et le Nil n'ont pas toujours coulé, et que la région d'où ils s'écoulent était autrefois sèche.

» Dans ces conditions, la partie la plus légère et la plus douce de l'eau est aspirée chaque jour et transportée, une fois divisée et vaporisée, dans la haute atmosphère. Puis, arrivée là, elle est condensée de nouveau par le froid et elle redescend vers la Terre. Même si ce n'est pas la même quantité d'eau qui se trouve restituée chaque année et dans chaque région, du moins tout ce qui a été pris est-il rendu au bout de périodes déterminées.

» Dans la zone intermédiaire entre les tropiques, la comète n'attire pas l'eau parce que cette région est desséchée par la translation du Soleil. Quand, par contre, elle se porte vers le sud, elle y trouve en abondance une humidité de ce genre. »

Aristote démontre, par opposition aux théologiens dont la science s'exprime par l'intermédiaire du mythe. Si l'on peut trouver juste que le géographe français Jean-François Staszak, dans *La géographie d'avant la géographie. Le climat chez Aristote et Hippocrate* (1995), « reproche » à Aristote de s'intéresser seulement aux phénomènes passagers, on n'est pas tenu de le suivre quand il considère qu'il renie la géographie, ne maniant aucun des concepts de cette discipline et utilisant le terme *klima* dans son seul sens restreint : espace caractérisé par l'inclinaison du Soleil par rapport à l'horizon.

On notera que si Hélios, fils d'Hypérion et de Théia, est la représentation divine du Soleil, de la chaleur et de la lumière solaire, de tout ce qui détermine donc le climat, il ne figure pas au panthéon des dieux grecs. Il est avant tout le serviteur de Zeus et accomplit chaque jour, sur son char d'or, une course à travers les cieux. Il est le seul dieu à pouvoir embrasser d'un seul regard la surface de la terre et renseigner l'Olympe sur ce qui s'y déroule. À la fin de l'Antiquité, il prend une place considérable, devenant même le dieu essentiel sinon unique du paganisme proche de sa fin.

## LA ROME IMPÉRIALE

Les Romains, dont beaucoup estiment qu'ils abandonnèrent aux Grecs la science qu'ils considéraient comme inutile, surent cependant l'utiliser pour conquérir leur empire. Durant la République (à partir de - 475), Rome

domine d'abord la Méditerranée occidentale après les guerres puniques où elle supplante Carthage, puis l'ensemble du monde méditerranéen, la Grèce devenant même une province, sous le nom d'Achaïe. Auguste, qui instaure en 27 avant J.-C. le Principat, eut, lui aussi, besoin de connaissances géographiques et climatiques pour la conquête de l'*Orbis terrarum*, retracée dans son ouvrage *Res gestae*. Sa « politique des trois fleuves » visait à donner à l'empire comme frontières naturelles l'Elbe, le Danube et l'Euphrate ! Cette domination romaine sur le monde fut renforcée non seulement par l'unicité de la monnaie et de l'architecture, mais aussi par ses approches didactiques et pédagogiques. La géographie, élément clef de ces conquêtes, est fondée sur l'astronomie et la géométrie ; la Terre est considérée comme une sphère au centre de la sphère céleste, sur laquelle se projettent des cercles et points remarquables : pôles, équateur, tropiques.

Lucrèce (98-55 avant J.-C.), qui vécut à une époque troublée de l'histoire romaine — effondrement de la République, massacre de milliers d'esclaves crucifiés —, introduit à Rome la philosophie de son maître Épicure qui connut également une situation de crise en Grèce. Lucrèce trouve dans la sagesse d'Épicure, « se vaincre soi-même, combattre la superstition », un secours contre l'angoisse en même temps qu'une arme contre la religion et les hommes politiques utilisant les prétendues puissances célestes pour préparer les citoyens au joug. Parfois, sa description de phénomènes climatiques est fulgurante, magnifiée par la dimension poétique : « En outre, le soleil par sa chaleur l'allège d'une forte part. Nous voyons en effet les étoffes mouillées sécher à ses rayons ardents : or les océans sont nombreux et étendent leurs vastes plaines à perte de vue. Dès lors le soleil a beau n'aspirer en chaque point de leur surface qu'une minime quantité d'eau, néanmoins sur l'étendue totale, le prélèvement sera considérable. » Mais l'essentiel du *De rerum natura* tient à la démystification de la providence : « J'ai montré que l'édifice du monde est mortel, que le ciel a été soumis aux lois de la naissance et, de tout ce qui s'accomplit et s'accomplira sous sa voûte, j'ai expliqué la plus grande partie [...]. Tous les autres phénomènes que les mortels voient s'accomplir sur terre et dans le ciel tiennent leurs esprits suspendus d'effroi, les livrent humiliés à la terreur des dieux, les courbent, les écrasent contre terre. C'est que l'ignorance des causes les oblige à abandonner toutes choses à l'autorité divine, reine du monde ; tout ce qui leur dérobe ces causes, ils les mettent au compte d'une présence surnaturelle [...]. Si tu ne rejettes pas loin de ton esprit de tels préjugés [...]. »

Mais pour beaucoup, c'est Strabon (64 avant J.-C.-24 après J.-C.), Grec d'Asie vivant à Rome durant le règne d'Auguste, qui fut le

premier géographe. Sa *Géographie* en dix-sept volumes est une authentique géographie descriptive qui tient compte des différentes populations en relation avec leur milieu naturel.

Enfin, on ne saurait oublier la météorologie pratique mise en avant par Virgile (70-19 avant J.-C.) dans les *Géorgiques*, englobant nombre d'observations empiriques souvent fort justes sur des phénomènes annonciateurs d'événements météorologiques, comme les hérons volant au-dessus des flots vers la haute mer présageant le beau temps.

## L'OCCIDENT DU MOYEN ÂGE

Quand, en 1222, un torrent envahit la ville d'Eisleben, en Prusse, noyant hommes et bêtes, le moine cistercien Césaire de Heisterbach conclut : « À considérer cette plaie, nous sommes frappés non par le hasard, mais par le juste jugement de Dieu. » Dans la Bible, Dieu n'a-t-il pas châtié les hommes par le Déluge ? La grêle et les ténèbres ne frappent-elles pas l'Égypte pour punir Pharaon ?

L'Occident médiéval, qui voit le monde à travers le prisme de la Sainte Écriture, ne peut qu'associer cataclysmes et pouvoir divin. L'histoire est un éternel recommencement et la pensée épicurienne s'estompe. La faute ainsi punie peut être collective (glissement de terrain à Chambéry en 1248 punissant les Savoyards, usuriers et brigands) ou le péché d'un seul (la Frise envahie par la mer du Nord en 1218 à cause d'un lutteur ivre qui bat sa femme).

L'Église lutte contre les pratiques magiques pour conjurer ces fléaux ou, du moins, tente-t-elle de les canaliser en les christianisant, chaque saint ayant sa « spécialité » : saint Barnabé contre la grêle, saint Blaise contre le cyclone et sainte Barbe contre la foudre. Il est vrai que la vie de cette dernière, née en Turquie au XIII<sup>e</sup> siècle, la prédisposait à jouer ce rôle. En effet, pour l'empêcher de devenir chrétienne, son père l'enferme dans une tour. Mais un prêtre, déguisé en médecin, s'introduit dans la tour et la baptise. Le père de la sainte, furieux, la décapite. Il est aussitôt frappé par la foudre. Quand la prière ne suffit pas, on invoque les reliques des saints, comme celles de sainte Geneviève pour protéger Paris de la crue de 1206. Cette référence à la vengeance divine tient à ce que nos sources d'information sont, pour l'essentiel, d'origine ecclésiastique, les prédicateurs utilisant ces calamités pour pousser leurs ouailles à la pénitence.

Le Moyen Âge semble régresser, comparé à l'Antiquité. Il faut en effet attendre les traductions par des juifs et des chrétiens de l'œuvre d'Abu al-Walid ibn Ruchd, dit Averroès, philosophe, astronome et juriste

arabe du XII<sup>e</sup> siècle, notamment de ses *Commentaires sur l'œuvre d'Aristote*, pour que la pensée de ce philosophe soit connue en Occident. Ce fut alors la révolution... À Paris, en 1215, les programmes de l'Université sont bouleversés. Des chroniqueurs expliquent alors les catastrophes par des causes naturelles. Cette vision aristotélicienne du monde, cette « cosmophysique », s'amplifie au XIII<sup>e</sup> siècle grâce au développement de l'encyclopédisme puis, à la fin du Moyen Âge, à l'invention de l'imprimerie. La météorologie médiévo-antique est alors relancée; en 1474, la première traduction latine de *Meteorologia* d'Aristote est imprimée et 125 rééditions suivent jusqu'en 1601. La météorologie est, au Moyen Âge, une des sciences les plus vastes puisqu'elle inclut, comme chez les Grecs, les phénomènes atmosphériques mais aussi les activités telluriques, l'apparition de gisements de métaux ainsi que tous les phénomènes astronomiques qu'Aristote attribuait à la sphère de feu terrestre.

Cette conception aristotélicienne règne sur l'Europe jusqu'au XVII<sup>e</sup>, voire au XVIII<sup>e</sup> siècle car elle ne succombe pas immédiatement aux attaques du Polonais Nicolas Copernic, de l'Italien Galilei (Galilée) et de l'Allemand Johannes Kepler.

#### DU JAPON À L'INDE

Ne disposant ni d'espace, ni de population, ni de ressources minières, énergétiques et agricoles, le Japon fait appel à d'autres armes : l'observation, l'éducation et le travail. Ce ne sont pas là ses seules vertus. Le pays du Soleil-Levant, situé sur le cercle de feu du Pacifique, doit sans cesse faire face à l'adversité naturelle : séismes (150 000 morts à Kanto en 1923), éruptions volcaniques, glissements de terrain, typhons, crues. Ces cataclysmes, qui font presque partie du rythme normal de l'existence, la mort, omniprésente, entraînent un sentiment d'inquiétude permanent mais, en même temps, un détachement du monde proche de la philosophie zen. Conscients de la brièveté et de l'inconstance du temps qui passe (en japonais, il n'existe que deux temps : le présent et le non-présent), habitués à devoir souvent tout reconstruire, les Japonais ont logiquement une approche différente de celle des Occidentaux envers les aléas climatiques.

Cette attitude à l'égard des vicissitudes de la vie, de la fugacité de toutes choses se retrouve dans les principes du shintoïsme, la plus ancienne des religions pratiquée au Japon et influencée par les idées du bouddhisme arrivé d'Inde par la Corée au VI<sup>e</sup> siècle. Le shintoïsme, pour lequel le divin est source et lumière, vénère le vent, le soleil et le tonnerre,

à tel point que l'on dit souvent que le véritable sanctuaire shinto est la nature. Le nombre de dieux (*kami*) de cette religion polythéiste est d'ailleurs illimité, même si on voue à certains un culte national. Ce détachement à l'égard des cataclysmes est profondément ancré dans l'âme japonaise.

Comment ne pas rapprocher ce fatalisme du Japon du comportement d'autres pays d'Extrême-Orient, notamment de l'Inde. Quand, chaque jour, on lit, on sent, on vit de terribles événements, au bout de quelque temps on « s'immunise », comme le souligne Arundhati Roy, écrivain né en 1960 à Ayemenen au sud de l'Inde et auteur du *Dieu des petits riens* (1997) et du *Coût de la vie* (1998). Le peuple indien pense que le modèle de forte consommation vers lequel il est entraîné lui est imposé et que les méthodes de développement sont destructives non seulement au sens écologique, mais aussi en termes d'équité et de distribution des ressources. Quelle responsabilité les Indiens peuvent-ils assumer dans le réchauffement climatique, alors que 80 % des ménages n'ont pas l'électricité, chiffre qui atteint 90 % pour les intouchables et les indigènes ? C'est donc un esprit contestataire qui gagne une partie de l'Inde face aux contraintes qui lui sont imposées. On peut comprendre les questions que les Indiens posent aux délégués de la Banque mondiale qui, pour aider l'Inde, pèsent sur son destin : « Mais qui êtes-vous ? », « Pourquoi contrôlez-vous notre sort ? », « Pourquoi avez-vous le droit de décider de ce que deviendront nos terres et nos rivières ? »

## **ALÉAS CLIMATIQUES ET DÉCLIN DES CIVILISATIONS**

La longue histoire des relations entre l'homme et son environnement montre que les sociétés sont confrontées à des fluctuations climatiques parfois brutales. Partout, l'homme cherche à les combattre et à s'adapter à ces conditions changeantes avec un succès variable. Sans tirer de lois générales, il est cependant tentant d'opposer la réussite des Égyptiens, il y a 3 000 ans, face aux grandes sécheresses et l'échec des Mayas des basses terres d'Amérique centrale devant le même phénomène après deux millénaires d'une brillante civilisation. Ces deux exemples montrent déjà l'intérêt d'une décision politique intelligente, rapide et adaptée.

## **PHARAONS EN CRISE OU L'AMORCE D'UNE RÉUSSITE**

Dans l'ancienne Égypte, il n'est pas d'événement céleste qui ne revête de symbolique particulière. La renaissance quotidienne du dieu Soleil sous la forme d'un disque rougeoyant, son émergence des eaux du Noun, cet océan

primordial dont provient toute forme d'existence, s'apparentent à sa toute première manifestation dans le ciel d'Égypte lors de la création du monde. La première religion « organisée » de l'Égypte, vers 3600 avant J.-C., est d'ailleurs celle d'Héliopolis consacrée au Soleil. Neuf autres dieux primordiaux, qui constituent l'Ennéade, sont également nés avant ou après le Soleil. Chaque province, chaque ville a ses dieux, mais le dieu dominant reste le Soleil, sous le nom de Râ (ou Rê), puis Amon-Râ (ou Amon-Rê) avec l'assimilation du dieu de Thèbes, Amon. Il sera même « l'Unique » quand, vers 1360 avant J.-C., le pharaon Amenophis IV imposera Aton, dieu du Soleil ; il prit d'ailleurs lui-même le nom d'Akhenaton, adorateur du Soleil.

Mais c'est la faillite de l'État, du pharaon, qui sauve probablement les Égyptiens de la sécheresse qui sévit entre 2180 et 2160 avant J.-C., même si elle ne sauve pas l'Ancien Empire. La sévérité de cette sécheresse est telle que le lac Karun, au centre de la dépression du Fayoum, à une trentaine de kilomètres du Nil, s'assèche, les sédiments étant en partie enlevés par l'érosion éolienne. Il n'y a donc pas de trace de cette sécheresse dans les sédiments... ce qui constitue, paradoxalement, la meilleure preuve son existence. Ces faibles crues du Nil sont liées à un événement climatique qui touche le monde entier, avec un refroidissement intense sur le nord de l'Europe. L'importance primordiale des crues du Nil a très tôt conduit les Égyptiens à suivre l'évolution du fleuve grâce à des « nilomètres », échelles de mesure de la hauteur d'eau (figure 1.2). À cette époque en effet, aucun canal n'a encore été creusé pour faciliter le déversement du Nil puisque ces aménagements hydrauliques sont l'œuvre d'Amenemhat III (dit « Moeris », le lac ayant alors pris ce nom) qui règne quelques centaines d'années plus tard (1841-1801 avant J.-C.). Cette absence d'alluvions dans le lac Moeris, qui occupait une surface bien supérieure aux actuels 215 kilomètres carrés du Karum, indique la déficience des crues, insuffisantes pour que le Nil alimente son déversoir naturel.

Cette sécheresse exceptionnelle entraîne des famines, menant au cannibalisme, ainsi qu'un grand désordre politique avec des attaques de silos, le grain d'Égypte étant considéré comme une propriété commune. Mais il serait trop simple de suivre le raisonnement de certains archéologues égyptiens : puisque l'Égypte est un don du Nil, seule la défection du fleuve explique le déclin de l'Ancien Empire. Normalement, le pharaon ne peut faillir et l'on peut lire à propos d'Amenhotep III, pharaon le plus célèbre de la XVIII<sup>e</sup> dynastie : « Il est Rê. Il illumine la Haute et la Basse Égypte plus que le soleil. Il rend ces deux territoires plus verdoyants que le Nil. » À la fin de son règne en 2184 avant J.-C., Pepi II, qui devint pharaon à 6 ans, se détache des



© Florence Doyen. <http://www.egyptologica.be>

Figure 1.2

**Le nilomètre de l'île Éléphantine.**

Mondes clos réservés au clergé, construits en pierres à la différence du palais royal en briques de limon, les temples égyptiens classiques, dont l'entrée est dirigée vers le Nil, comprenaient la plupart du temps un « nilomètre » permettant de mesurer la hauteur des crues de ce fleuve. Celui-ci revêtait la forme d'un pilier, d'une série de marches (comme ici) ou d'un puits fournissant l'eau indispensable au culte. Celui de l'île Éléphantine revêtait, par sa position près de la première cataracte, une importance primordiale : le temple était d'ailleurs consacré à Khnoum, le dieu-bélier des inondations.

préoccupations gouvernementales. Les intrigues pour sa succession, la brièveté du règne de son fils, Merenre II, le suicide de la reine Nitocris qui lui succède conduisent à la fin de l'ancien royaume d'Égypte. Ce déclin de l'aura des monarques permet aux nomarques, administrateurs des provinces du territoire égyptien, d'accroître leur puissance et de se montrer moins respectueux des instructions de Memphis. Or, ces nomarques, aux profondes racines campagnardes, savent gérer localement la crise. Sur la sépulture de Khety, nomarque d'Assiout, on peut lire : « J'ai nourri ma ville... j'ai construit un barrage pour cette ville alors que la Haute Égypte était un désert. »

Avec leurs scribes, qui suivent l'évolution du climat et des crues, les nomarques construisent des barrages temporaires pour profiter du moindre ru, ils prennent des mesures draconiennes, rationnent, ferment les frontières de leur province quand cela s'avère nécessaire et préviennent la panique. Cette décentralisation du pouvoir sauva le peuple d'Égypte même si l'Ancien Empire n'y survécut point.

#### L'EFFONDREMENT DE LA CIVILISATION MAYA

Chacune des trois périodes qui jalonnent l'histoire de la civilisation maya, deux fois millénaire, est centrée sur trois régions différentes. La période préclassique, de 600 avant J.-C. à 300 après J.-C., s'est déroulée dans les hautes terres, l'actuelle région du Chiapas. La période classique, apogée de la civilisation maya, entre 300 et 900 après J.-C., est centrée sur les basses terres du Sud, le Tabasco et une partie du Campeche. La période de déclin post-classique, de 900 à 1500, s'est déroulée dans les basses terres du Nord, le Yucatán actuel et le nord du Campeche.

Les habitants de l'immense cité de Teotihuacán (« le lieu où les dieux sont nés »), plus grande, à son apogée au <sup>v</sup><sup>e</sup> siècle, que la Rome impériale, sont polythéistes. En plus de Quetzalcoatl, le serpent à plumes, et de nombreux autres dieux, ils vénèrent le Soleil et la Lune et tout ce qui touche au climat. Entre 100 et 200 ans après J.-C., ils érigent le plus grand monument religieux, la pyramide du Soleil, aussi large à sa base que Kheops. La population de Tikal, au Guatemala actuel, soumise à l'influence de Teotihuacán, érige à son tour un énorme monument de pierre dédié au dieu de la pluie. Durant leur âge d'or, les Mayas développent l'écriture, l'architecture, les sciences et les mathématiques. Ils élaborent un calendrier de 365 jours grâce à leurs observations astronomiques. Cette filiation avec le Soleil est d'ailleurs récurrente dans les civilisations d'Amérique centrale.

Mais la plus flamboyante et la plus durable des civilisations précolombiennes, qui règne 2 000 ans sur les basses terres d'Amérique

centrale, s'effondre en quelques décennies à l'approche de l'an 900, très probablement pour ne pas avoir su adapter sa politique agricole à sa croissance démographique. Un changement de la circulation atmosphérique loin de la terre maya (El Niño?) lui donne le « coup de grâce ». Détaillons cette histoire.

À la période classique, les Mayas cultivent la péninsule Petén-Yucatán, vaste plaine calcaire chaude et humide avec une saison des pluies de mai à octobre. Au sud, où fleurissent les plus importantes cités mayas, la forêt est dense et les Mayas y pratiquent la culture sur brûlis. À l'exception de quelques emplacements au Petén et des berges des fleuves, le sol est pauvre; patience et expérience sont indispensables pour pratiquer ce type de culture. Ce système de culture, baptisé *milpa*, encore utilisé au Yucatán, alterne des périodes de récolte durant de 1 à 2 années avec une jachère longue de 3 à 7 ans. Paysans, les Mayas transforment pourtant une partie de leurs basses terres en un paysage de grandes cités entourées de jardins inondés, proches des *chinampas* utilisés quelques siècles plus tard par les Aztèques sur les hautes terres du Mexique.

Les premiers Mayas, pratiquant la culture sur brûlis, connaissent les sols et les climats locaux, la faune et la flore. Leurs pratiques diversifiées, extensives, supportent les aléas climatiques. Mais ces « agro-écosystèmes » ne peuvent nourrir une population croissante, qui atteint 200 habitants par kilomètre carré juste avant l'effondrement de la civilisation. Une cité comme Tikal draine alors la production agricole dans un rayon d'une centaine de kilomètres alentour. Devant une longue période de sécheresse, l'exode devient impossible, mais les Mayas ne peuvent s'adapter. La fin de la grande époque maya est due à une synergie de facteurs écologiques, politiques et sociaux: des besoins alimentaires croissants, des sols appauvris, des guerres incessantes entre cités voisines, des seigneurs exigeant toujours plus de leurs sujets. La sécheresse des IX<sup>e</sup> et X<sup>e</sup> siècles (avec deux pics en 862 et 986, prouvés par l'étude de carottes du lac de Chichancanab, au sud du Yucatán, qui s'assécha) porte le coup fatal. C'est la plus grande sécheresse que connut cette région en plusieurs millénaires, cette situation accompagnant les conditions froides et humides de l'hémisphère Nord. Beaucoup d'anthropologues s'opposèrent longtemps à cette hypothèse qu'ils jugeaient simpliste: la disparition d'une brillante civilisation face à un événement climatique exceptionnel. Chacun s'accorde à reconnaître que l'effondrement fut soudain; les centres de culture du Petén furent désertés et jamais réoccupés et Tikal perdit les deux tiers de ses 25 000 habitants.

# 2 Un monde qui change

## UNE QUESTION D'ÉCHELLE

La crainte d'une modification du climat par l'augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre se fait jour dans la littérature scientifique dans les années 1970, et même bien auparavant avec le Suédois Svante Arrhenius, prix Nobel de chimie, qui en fit la prévision dès le début du <sup>xx</sup>e siècle. En 1989, le magazine *Times*, dans l'article « *The planet of the year* » rédigé après la sécheresse de l'été 1988 aux États-Unis d'Amérique, confère au thème du changement climatique un « vedettariat » qu'il a conservé. À côté de l'évolution de la perception publique du problème, l'argumentaire scientifique s'est également étoffé, montrant notamment :

- que la composition chimique de l'atmosphère a subi depuis le début de l'ère industrielle des modifications qui n'ont jamais été observées dans les archives climatiques glaciaires des derniers 400 000 ans ;
- que ces modifications ont un impact sur le climat et provoqueront, d'ici quelques décennies, un réchauffement de plusieurs degrés entraînant une montée du niveau de la mer, la fonte de certains glaciers et des dérèglements du régime des vents et des précipitations. Des signes de plus en plus nets montrent que le climat a subi, à la fin du <sup>xx</sup>e siècle, des modifications compatibles avec les conséquences prévisibles de l'émission de gaz à effet de serre.

En détaillant ce faisceau d'indices, nous serons confrontés à la complexité du système climatique et à la difficulté de choisir des

références adaptées. Aussi faut-il procéder à une mise en perspective d'autant plus nécessaire que la Terre n'a cessé d'évoluer au cours de sa longue histoire et que l'espèce humaine y est apparue relativement « récemment » : quelques millions d'années pour les hominidés, quelques dizaines de milliers d'années pour *Homo sapiens sapiens*. Il s'agit d'un intervalle de temps extraordinairement court en regard des milliards d'années d'existence de la Terre, mais en même temps remarquablement long par rapport à la période brève au cours de laquelle l'homme a commencé à modifier son environnement. Certains auteurs avancent l'idée que, dès qu'il a délaissé la cueillette et la chasse pour l'agriculture et l'élevage, l'homme, lors de cette « révolution néolithique » datant de 7 000 à 10 000 ans, a émis des gaz à effet de serre et a infléchi le climat. Cependant, c'est seulement depuis quelques centaines d'années que l'agriculture transforme le paysage, qui ne compte désormais plus qu'une minorité de flores et de faunes naturelles, et c'est seulement depuis la révolution industrielle, en fait surtout depuis quelques décennies, que les problèmes de pollution et de modification de la composition chimique de l'atmosphère se posent.

### **LE CLIMAT ET LE TEMPS**

Dans cet ouvrage, nous nous intéressons seulement à un aspect des modifications de l'équilibre de la planète : celles qui concernent le climat. Mais qu'entend-on par climat ? Le climat (du grec *klima* = inclinaison du Soleil) désigne l'état « habituel » de l'environnement décrit par quelques facteurs : l'insolation, la température, l'humidité, les précipitations, le vent.

Une première difficulté tient à la multiplicité des processus façonnant le climat : les mouvements de l'atmosphère et ceux de l'océan ainsi que les processus physiques, mais aussi chimiques ou biologiques, qui les déterminent.

Mais une autre difficulté, plus fondamentale, se cache derrière l'adjectif « habituel » qui renvoie au choix de la période de référence. On retient généralement une durée d'une trentaine d'années, période de temps suffisante pour qu'un grand nombre de statistiques soient stables, mais également intervalle séparant deux générations. On considérera comme habituelles non seulement les moyennes météorologiques pendant la durée de référence, mais aussi leurs fluctuations les mieux établies : par exemple, le fait que, sur telle région montagneuse, la précipitation d'été survient sous forme d'orages entraînant un ruissellement important ou que telle zone méditerranéenne subit des sécheresses irrégulières mais répétées qui

affectent sa végétation. La notion statistique de climat s'oppose ainsi à la notion du « temps qu'il fait », qui fluctue de jour en jour.

Décrire les changements du climat est donc une tâche difficile et il est essentiel de préciser quel en est l'horizon, le temps, au sens du « temps qui passe ». Bien des confusions trouvent leur origine dans une mauvaise perception de cette notion. Mêler des préoccupations concernant le retour d'inondations ou certaines conséquences, déjà sensibles, du réchauffement global à une crainte de l'arrêt possible du Gulf Stream ou du retour des glaciations revient à télescoper des échelles de temps saisonnières, décennales, séculaires ou millénaires, sans référence à leurs origines.

Nous présenterons donc, des échelles les plus lentes aux plus rapides, quelques-uns des mécanismes des fluctuations naturelles du climat. L'exemple du Sahara, traité au chapitre 6, permettra un examen détaillé de ces différentes échelles de temps sur un site unique.

La composition chimique de l'atmosphère est sans doute l'un des indicateurs les plus importants des modifications subies par la planète. À l'origine, elle reflétait son activité interne. Le volcanisme a joué un rôle déterminant, dotant la Terre d'une atmosphère primitive proche de celle de planètes telluriques comme Mars ou Vénus, riche en dioxyde de carbone. C'est ensuite un processus nouveau, peut-être unique dans l'Univers, la vie, qui, durant plusieurs centaines de millions d'années, a puisé dans ces réserves atmosphériques de carbone. Vers la fin de l'ère cénozoïque, il y a quelques dizaines de millions d'années, la teneur en CO<sub>2</sub> s'est stabilisée au niveau qui était encore le sien juste avant l'ère industrielle : moins de 300 parties par million en volume (ppmv), c'est-à-dire 0,3 millième du volume de l'atmosphère.

C'est à la même échelle de temps qu'il faut situer la mise en place de la géographie actuelle de la Terre. L'Antarctique se sépare de l'Australie et s'installe au pôle Sud il y a 40 à 50 millions d'années. Mais les 2 derniers millions d'années, qui constituent la période quaternaire, où l'homme apparaît, représentent une période trop courte pour que la dérive des continents y joue un rôle climatique important.

D'autres évolutions prennent place au quaternaire dont le climat oscille entre des âges glaciaires, où une grande part de l'Eurasie et de l'Amérique du Nord est couverte de glaces de plusieurs kilomètres d'épaisseur, et des âges interglaciaires, comme actuellement, où les calottes polaires se réfugient sur le Groenland et l'Antarctique et où subsistent seulement quelques glaciers de montagnes. La teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique en porte la trace puisqu'elle fluctue entre deux bornes à peu près

fixes : 180 ppmv pendant les périodes glaciaires, 280 ppmv pendant les interglaciaires. L'alternance de ces phénomènes est lente car ils dépendent surtout des modifications de la rotation de la Terre (rotation propre et/ou rotation autour du Soleil) sous l'influence des planètes géantes, comme Jupiter et Saturne. Les périodicités vont de 20 000 à 100 000 ans environ. Le système climatique présente bien sûr des fluctuations plus rapides, en particulier au nord de l'Atlantique Nord avec des variations thermiques de plusieurs degrés en quelques décennies.

Nos lointains ancêtres ont supporté la rigueur de ces fluctuations, alors que notre civilisation s'est développée au cours de périodes plus calmes. Nous sommes en effet entrés dans une période interglaciaire depuis plus de 10 000 ans. Si la première partie de cette période fut marquée par un léger refroidissement (avec des conséquences importantes pour l'Afrique), le climat demeure extraordinairement stable depuis 5 000 ans. Bien sûr, des fluctuations ont eu lieu pendant cette période : optimum médiéval, petit âge glaciaire, centré sur le XVIII<sup>e</sup> siècle, mais leurs « signatures » en termes de modification de la température de surface globale ne dépassent pas une fraction de degré, alors que l'écart entre les véritables âges glaciaires et les époques interglaciaires est de 4 à 5 degrés. Ces derniers millénaires constitueront donc la référence la plus naturelle pour évaluer les futures modifications du climat.

## UN CHANGEMENT D'ATMOSPHÈRE

La composition de l'atmosphère actuelle de la Terre est caractérisée par la dominance de l'azote et de l'oxygène dont le rôle dans la régulation climatique est faible. D'autres gaz, pourtant présents à l'état de traces, jouent un rôle dominant (chapitre 3) : il s'agit de gaz absorbants dont les molécules sont plus complexes, au moins triatomiques, comme la vapeur d'eau ( $H_2O$ ), le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), l'ozone ( $CO_3$ ) et le méthane ( $CH_4$ ). Des gaz comme le dioxyde de carbone et le méthane présentent une autre caractéristique : leur cycle de vie, c'est-à-dire le temps que mettrait leur teneur à se stabiliser si l'on cessait d'en injecter dans l'atmosphère, est lent : de l'ordre du siècle pour le  $CO_2$ , de la décennie pour le méthane, de quelques semaines pour le recyclage de la vapeur d'eau. Ceci a deux conséquences :

- injectés dans l'atmosphère, ces gaz s'y accumulent ;
- leurs concentrations sont voisines en tout point du globe car ils se dispersent rapidement. Des relevés en un point du globe sont donc suffisants pour en suivre l'évolution avec rigueur.

Les mesures de dioxyde de carbone dans l'atmosphère commencent en 1957, durant l'Année géophysique internationale, sur le plus vaste volcan de la planète, le Mauna Loa à Hawaii. Elles ont été complétées depuis par la mise en place d'un réseau de surveillance planétaire. De son côté, l'analyse des bulles d'air emprisonnées dans la glace sur le site antarctique Vostok permet de reconstituer le climat des 400 000 dernières années. Ceci montre que l'atmosphère a connu, pendant les derniers milliers d'années, une teneur en dioxyde de carbone presque constante d'environ 280 ppmv, typique des conditions interglaciaires. Depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, on assiste, au contraire, à une augmentation de plus en plus rapide de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone, qui induit des situations inédites. La teneur actuelle, supérieure à 365 ppmv, n'a jamais été atteinte au cours de ces 400 000 ans; le taux d'augmentation est sans équivalent... et il s'accélère: la valeur de 300 ppmv a été dépassée au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, et c'est au cours des dernières décennies que la croissance a été la plus forte. C'est un point important; en raison de l'inertie thermique des océans, c'est seulement maintenant que l'on peut s'attendre à une réponse climatique notable.

D'autres gaz subissent cette même évolution: le méthane, dont la concentration a triplé depuis le début de l'ère industrielle, le peroxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) ou encore les Fréons, souvent appelés CFC (ce n'est pas une notation chimique, mais une simplification du terme chlorofluorocarbones). Les Fréons sont des gaz extrêmement absorbants, connus pour leur action sur la couche d'ozone. Leur teneur a été stabilisée après les accords de Montréal de 1987 qui en interdisent l'utilisation, mais les produits de substitution utilisés ont également un effet de serre important.

Il est beaucoup plus difficile de suivre l'évolution des composantes atmosphériques rapidement recyclées: la vapeur d'eau, l'ozone, les aérosols (suspensions liquides ou solides dans l'atmosphère). Nous reviendrons ultérieurement sur le cas de la vapeur d'eau. Quant à l'ozone, il faut savoir duquel on parle:

- dans la stratosphère, entre 10 et 15 kilomètres, sa destruction par les CFC crée, en fin d'hiver austral, le « trou d'ozone ». Il naît, dans des conditions chaudes, à partir d'oxydes d'azote, au travers de réactions catalysées par le méthane. Le protocole de Montréal ayant stabilisé les CFC, l'augmentation du trou d'ozone stratosphérique aurait dû cesser. Il semble pourtant continuer à croître, ce qui résulte sans doute d'un refroidissement de la stratosphère qui pourrait être associé à la croissance des gaz à effet de serre. Cela favorise l'apparition de nuages stratosphériques

polaires, catalyseurs des réactions de destruction de l'ozone. Il existe même des indications de l'apparition d'un phénomène similaire en Arctique;

- près du sol, l'ozone troposphérique est désormais surveillé dans l'atmosphère surplombant les villes où il augmente régulièrement.

Enfin, l'évolution des aérosols est délicate à évaluer car il s'agit de multiples composés à distribution inhomogène.

### **DES SIGNES AVANT-BOUREURS DU CHANGEMENT GLOBAL ?**

Le changement de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre est donc à la fois récent et brutal, si l'on prend comme référence les quelques milliers d'années de climat très stable que nous venons de connaître — voire l'ensemble du quaternaire. Exerce-t-il déjà un impact sur le changement climatique ? C'est une question souvent évoquée en raison de l'impatience naturelle du public à laquelle fait écho la majorité des médias dont la vocation est de traiter davantage du court terme que du long terme : si le climat doit changer, examinons avant tout les faits actuels ! Cette insistance prend parfois la tonalité d'un bon sens soucieux du réel : vous, scientifiques, vous êtes plongés dans des rêveries concernant un futur lointain alors que nous cherchons à répondre aux véritables préoccupations de nos contemporains ; les inondations de la Somme ou les tempêtes de 1999 résultent-elles de ce changement climatique ? Malheureusement, la science ne saurait avoir réponse à tout et il serait hasardeux d'extrapoler sans précaution à un échelon local les tendances globales. De plus, tout ne relève pas de relations de cause à effet. Si l'on admet facilement que « rater » son métro le matin peut résulter d'un ensemble de circonstances dont certaines doivent tout au hasard, les scientifiques sont souvent sommés d'indiquer « la » cause d'un événement donné.

Ce débat s'imprègne de considérations plus politiques. Le scientifique répond avec plus ou moins de certitude à une question selon la manière dont elle est posée. En réitérant des questions difficiles, même si elles sont pertinentes, on peut semer le doute, éventuellement de manière intentionnelle. Or, savoir si le changement climatique est en cours n'est pas capital puisque les scientifiques démontrent que la poursuite des émissions de gaz à effet de serre entraînera inéluctablement un réchauffement global. Cette prévision ne se fonde pas sur l'extrapolation statistique de l'évolution des températures et des précipitations mais, bien sûr, des lois physiques. Comme nous venons de l'indiquer, l'augmentation des gaz

à effet de serre a été maximale au cours des dernières décennies et c'est seulement maintenant que nous pouvons commencer à en constater l'impact sur le climat, qui est également affecté par sa variabilité naturelle et par les probables effets contraires des aérosols.

Les signes avant-coureurs du changement se cachent derrière un indice assez peu évocateur : la température de surface moyenne de la planète. Cet indice est un peu analogue à la température du corps humain : c'est un indice d'équilibre, de « métabolisme » de la Terre. S'il se modifie, cela signifie que le climat de la planète se dérègle. Contrairement à une opinion courante, cette mesure de la température de surface moyenne de la Terre est difficile. L'analyse des températures de surface de l'océan depuis le début du  $\text{XX}^{\text{e}}$  siècle fait appel aux archives de la marine qui doivent être traitées pour les rendre comparables aux données disponibles sur les continents ou les îles, analysées de manière statistique. Un même travail a été réalisé pour les données des stations météorologiques sur les continents de manière à isoler, puis à supprimer, la part des augmentations de température liée au chauffage urbain, les discontinuités qui pourraient résulter d'un déplacement de ces stations depuis le centre des villes vers les aéroports, etc. C'est de cette manière que l'évolution de la température depuis le milieu du  $\text{XIX}^{\text{e}}$  siècle a été estimée (figure 2.1). L'augmentation plus récente a également été mesurée par des instruments satellitaires. La mesure des flux infrarouges dans la « fenêtre atmosphérique » (bande de fréquence où l'atmosphère absorbe très peu le rayonnement venu du sol) permet de compléter les données des navires et des bouées dans la surveillance des températures de surface océaniques. Les trois années les plus chaudes depuis que nous disposons de statistiques sont 1998 (+ 0,55 °C par rapport à la moyenne 1961-1990), 2002 (+ 0,48 °C) et 2003 (+ 0,45 °C).

Depuis la fin du  $\text{XIX}^{\text{e}}$  siècle, la température moyenne en surface a augmenté d'un peu moins de 1 °C : entre 0,6 et 0,9 °C suivant la référence. Cette augmentation est relativement continue dans l'hémisphère Sud alors que, dans l'hémisphère Nord, elle se produit en deux phases distinctes : un premier épisode de faible réchauffement jusqu'en 1945, séparé par une phase de refroidissement d'environ une décennie d'un réchauffement accentué depuis les années 1960. Ce réchauffement des dernières décennies accrédite la prévision par les modèles des conséquences de la croissance des gaz à effet de serre, en amplitude comme dans sa répartition géographique, ces modèles indiquant un réchauffement plus important dans l'hémisphère Nord et sur les terres.

Cette évolution de la température de surface confirme d'autres données de terrain. Les glaciers de montagne ont commencé à régresser au début du  $XX^e$  siècle sur tous les continents (figure 2.2) et le niveau moyen de la mer s'est élevé d'une dizaine de centimètres lors du dernier siècle. Par contre, l'analyse des températures de l'atmosphère par les sondeurs spatiaux donne des résultats qui coïncident plus difficilement avec les autres données. L'élévation de la teneur des gaz à effet de serre devrait superposer au réchauffement de surface un réchauffement similaire à basse altitude puis un refroidissement dans la stratosphère. Des mesures indirectes de la température atmosphérique obtenues par une méthode complexe ont pourtant d'abord indiqué un refroidissement de la basse troposphère durant les deux décennies de disponibilité des observations, d'où une vague d'articles dans la littérature grand public. En fait,

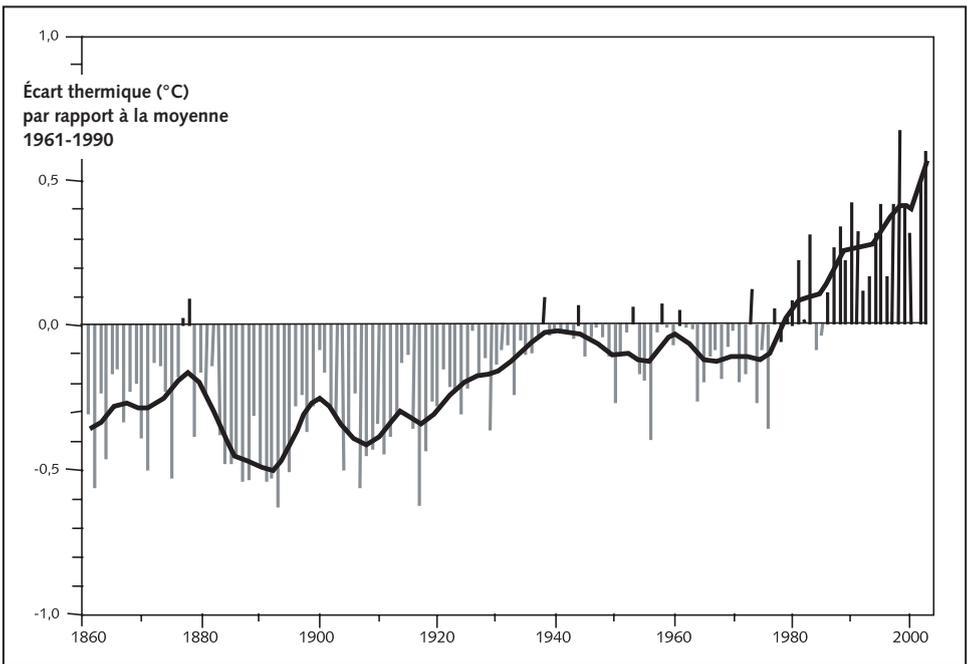


Figure 2.1

**Évolution de la température de l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle.**

L'écart à la moyenne trentenaire (entre 1961 et 1990) montre une augmentation forte de la température de l'atmosphère (au-dessus des océans et des continents) en deux étapes depuis les années 1920. Cette croissance thermique s'accélère depuis 1985 et les années récentes constituent des années records. La décennie 1990-2000 est la plus chaude de la série, 1998 et 2002 les deux années les plus chaudes, 1998 ayant dépassé la moyenne 1961-1990 de 0,58 °C.



Georges A. Vicas/UNESCO



© M.-F. André



© M.-F. André – Aquarelle de J.-R. Bühlmann



© M.-F. André

Figure 2.2

### La fonte des glaciers, premier indice d'un réchauffement ?

La fonte des glaciers, qui constituera probablement la première conséquence du réchauffement climatique et l'une des plus graves, a déjà commencé.

Les deux vues du glacier du Rhône (Alpes suisses) (photos du bas) en 1835 (aquarelle de J.-R. Bühlmann) et en 2001 (cliché M.-F. André) sont éloquentes sur le recul des glaciers tempérés depuis les années 1850. Le glacier d'Aletsch en Suisse (photo en haut à droite), le plus grand d'Europe, réagit lentement aux à-coups climatiques en raison de sa masse. Sa longueur est passée de 26,5 kilomètres en 1850 à 23,3 kilomètres en 2000. À certains emplacements, comme sur cette photo (cliché M.-F. André), la limite atteinte par la glace à la fin du petit âge glaciaire se situait une centaine de mètres au-dessus du niveau actuel. La vue de la chaîne de l'Himalaya prise dans le Parc national de Sagarmatha au Népal (cliché G.-A. Vicas, UNESCO) laisse deviner un recul des surfaces englacées. La fonte des 15 000 glaciers de l'Himalaya entraînera d'abord des inondations catastrophiques des fleuves qui y prennent leur source, comme l'Indus et le Gange qui alimentent en eau 500 millions d'hommes. Mais la disparition de ces glaciers, qui demanderait de trois à quatre décennies, menacera ensuite l'Asie du Sud-Est de sécheresse.

des analyses récentes montrent que ces données devraient être corrigées. Un consensus se dégage désormais sur le diagnostic d'un réchauffement de la basse troposphère qui reste toutefois moins important que celui de la surface. La variation de ces indicateurs confirme bien l'idée que le climat a commencé à changer sous l'effet de l'action humaine.

Pour l'instant, il n'est pas aisé de trouver une autre cause (liée par exemple aux modifications de l'insolation ou du volcanisme) que l'augmentation des gaz à effet de serre pour expliquer ce réchauffement récent dont la vitesse semble sans équivalent au cours des derniers milliers d'années. Ainsi, pour que les modifications de l'émission solaire de rayonnement ou de particules, parfois invoquées, puissent expliquer une variation aussi importante, il faudrait un mécanisme amplificateur qui n'a pas été identifié, alors que l'explication par les gaz à effet de serre est simple et directe.

Ces changements sont-ils apparents aujourd'hui? Cela semble incontestable pour la température: l'augmentation des températures en France, par exemple, avec son corollaire, le recul de l'enneigement, est significatif. Mais il semble plus difficile d'interpréter les changements de la circulation atmosphérique ou des précipitations. Prenons deux exemples :

- le premier concerne le phénomène El Niño ou, de manière plus complète, El Niño-Southern Oscillation (ENSO), processus qui se traduit par une augmentation des températures du Pacifique Est entraînant une modification profonde du régime des précipitations dans la zone intertropicale. ENSO est un phénomène apériodique, fluctuant. La fin du XX<sup>e</sup> siècle en a vu deux épisodes majeurs; or, la plupart des modèles prédisent une augmentation de l'intensité des épisodes ENSO en liaison avec le réchauffement climatique. Qu'en conclure? Fluctuations naturelles ou action de l'homme?

- le second concerne l'Indice nord atlantique (ou NOI, *North Atlantic index*) qui mesure la force relative de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande. Cet indice fluctue de manière naturelle, une partie de cette variabilité s'organisant à des échelles décennales. Mais il pourrait aussi croître en réponse à un réchauffement. Que doit-on conclure des évolutions en cours avec, par exemple, un été froid sur l'Europe en 2002? Rien de définitif encore...

L'observation de notre planète doit surtout mener à une vigilance accrue, même si les symptômes ne sont pas tous clairs.

# 3 Du « bon » effet de serre

## LE « CHAUFFAGE » SOLAIRE

Le rayonnement solaire est la seule source de chaleur agissant sur le système climatique de notre planète aux échelles de temps considérées ici, c'est-à-dire de quelques années à quelques centaines d'années. L'énergie solaire subit des transformations majeures avant d'être utilisée par le système climatique, l'atmosphère tenant une place dominante dans ces modifications. Sans le filtre atmosphérique, la température moyenne à la surface de la Terre avoisinerait  $-18\text{ °C}$  alors qu'elle est de  $15\text{ °C}$ . Ceci résulte de deux processus : l'effet de serre « naturel » qui, seul, conduirait la planète à  $30\text{ °C}$  et la convection qui empêche un réchauffement excessif. Pour comprendre ces phénomènes, nous proposons de suivre les transformations du rayonnement solaire.

## TEMPÉRATURE ET RAYONNEMENT

Le Soleil concentre 99,8 % de la masse du système solaire et présente une température de surface d'environ 5 800 kelvins (K) (température absolue  $TK = t + 273,15$ ). C'est le physicien allemand Max Planck qui établit la théorie de l'émission d'un corps chauffé parfaitement absorbant (« corps noir ») et en équilibre radiatif. Deux de ses caractéristiques sont essentielles pour comprendre le fonctionnement de la machine climatique :

- la première, la loi de Stefan, indique que ces corps rayonnent une puissance électromagnétique proportionnelle à la puissance quatrième de

leur température absolue. Elle s'applique de manière approchée à la Terre et au Soleil. Ainsi, alors que la température de surface du Soleil est seulement (!) vingt fois plus élevée que celle de la Terre, son flux d'énergie par unité de surface émissive est cent soixante mille fois supérieur ;

- la seconde, ou loi de Wien, indique que la longueur d'onde à laquelle se produit l'émission maximale est inversement proportionnelle à la température absolue. Le rayonnement d'un corps, et donc éventuellement sa couleur, trahit sa température ; c'est pourquoi un forgeron peut évaluer à l'œil nu la température du métal qu'il travaille. Le rayonnement du Soleil se situe principalement dans la partie visible du spectre (50 % de l'énergie aux longueurs d'onde allant de 0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$ ) et le proche infrarouge (40 % entre 0,8  $\mu\text{m}$  et 1 mm) ; le reste se situe dans l'ultraviolet (inférieur à 0,4  $\mu\text{m}$ ). Le maximum d'émission est placé dans le jaune, à 0,5  $\mu\text{m}$ . Par comparaison, la Terre, plus froide, présente un maximum d'émission à des longueurs d'onde de l'ordre de la dizaine de micromètres, en plein infrarouge. La différence de température entre le Soleil et la Terre est telle que le recouvrement entre les deux domaines d'émission est négligeable. On pourra donc distinguer le rayonnement solaire et le rayonnement terrestre.

## À PROPOS DU SOLEIL

L'intensité du rayonnement solaire qui parvient à la Terre dépend de l'émission solaire et elle est inversement proportionnelle au carré de la distance Terre-Soleil. La « constante solaire » (qui est tout sauf constante !) est le flux solaire au sommet de l'atmosphère au travers d'une surface de 1 mètre carré perpendiculaire à la direction Terre-Soleil. Aujourd'hui, l'intensité du flux solaire est de 1 367 watts par mètre carré ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). En fait, sur une journée et pour l'ensemble du globe, ce rayonnement atteint seulement le quart de cette valeur, soit 342  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . En effet, la Terre est inclinée par rapport au flux solaire ; près des pôles, un même rayonnement « chauffe » une surface plus grande qu'à l'équateur. D'autre part, la moitié de la planète se trouve à tout moment plongée dans la nuit.

Le rayonnement solaire varie d'abord en raison des fluctuations de l'activité solaire. Au début de l'histoire de la Terre, la puissance du Soleil était plus faible de plusieurs dizaines de pour cent. À plus courte échelle de temps, les variations du nombre de taches solaires (régions plus froides, vers 4 300 K) traduisent également des variations d'intensité de l'émission solaire. Par ailleurs, la Terre décrit autour du Soleil une ellipse, ce qui entraîne des variations saisonnières de la distance Terre-Soleil de part et

d'autre de sa moyenne de 149 600 000 kilomètres; ces variations sont elles-mêmes modulées par des mouvements plus lents.

Si le rayonnement solaire absorbé ( $240 \text{ W.m}^{-2}$ , comme nous le verrons) devait augmenter, ne serait-ce que de  $4 \text{ W.m}^{-2}$ , soit 1,5 %, cela aurait autant d'effet qu'un doublement de la teneur en dioxyde de carbone. Des fluctuations passées semblent avoir été d'une amplitude suffisante pour expliquer des conditions rigoureuses, comme le petit âge glaciaire. Seulement voilà! Les mesures récentes depuis l'espace indiquent une variation d'amplitude de l'activité solaire de 0,1 % seulement suivant un cycle de 11 ans. Elles sont trop faibles et trop rapides pour modifier le climat à l'échelle humaine, sauf si un mécanisme d'amplification intervient. Les changements de la circulation stratosphérique, l'impact du « vent solaire » (flux de particules ionisées s'échappant en permanence de la haute atmosphère du Soleil et provoquant, sur Terre, de gigantesques orages magnétiques et des aurores boréales) sur la formation des gouttes d'eau dans les nuages ont été proposés; mais il s'agit d'hypothèses, tant ces mécanismes sont complexes et indirects.

L'augmentation des gaz à effet de serre reste l'explication la plus simple et la plus directe du réchauffement climatique. S'il est nécessaire d'étudier les mécanismes de variation de l'insolation et leurs conséquences, la recherche frénétique d'une explication solaire au réchauffement climatique (tout plutôt que le  $\text{CO}_2$ !) appartient au discours des groupes de pression proches de certains producteurs de combustibles fossiles.

## **LES TRIBULATIONS DU RAYONNEMENT SOLAIRE DANS L'ATMOSPHÈRE**

Tous les échanges d'énergie entre la Terre et l'espace (figure 3.1) passent par le filtre de l'atmosphère, mince enveloppe dont la masse se concentre sur une vingtaine de kilomètres d'épaisseur alors que le rayon de la Terre est de 6 400 kilomètres. Or, l'atmosphère n'a pas la même action sur le rayonnement solaire et sur le rayonnement terrestre. Alors qu'elle laisse passer une part importante du rayonnement solaire, elle retient une grande part du rayonnement terrestre, ce qui est à l'origine de l'effet de serre sur lequel nous reviendrons.

Le rayonnement solaire qui pénètre dans l'atmosphère va, selon le cas, être réfléchi, c'est-à-dire dévié sans modification, ou bien absorbé. Dans ce cas, le rayonnement « disparaît » sous forme de chaleur; il excite atomes et molécules qui, à leur tour, émettent un rayonnement... cette

fois dans la gamme de longueur d'onde correspondant à la température terrestre, c'est-à-dire dans l'infrarouge. Finalement, ce processus d'absorption et de chauffage transforme donc une fraction du rayonnement solaire en « rayonnement terrestre » qui peut retourner vers l'espace. Par ciel clair, la partie visible du rayonnement solaire, qui contient la plus grande part de son flux énergétique, traverse la haute atmosphère avec un minimum de pertes. Par contre, dans l'ultraviolet (10 % de l'énergie solaire), la couche d'ozone est pratiquement opaque : le flux absorbé, soit  $12 \text{ W.m}^{-2}$ , chauffe une couche d'atmosphère située à une altitude supérieure à 10 à 15 kilomètres d'altitude, la stratosphère.

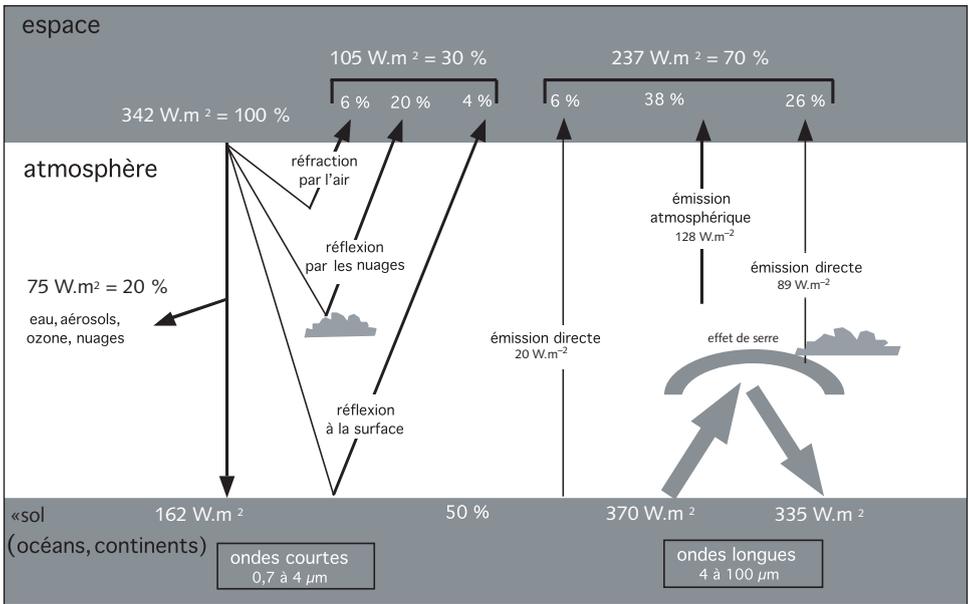


Figure 3.1

**Le bilan radiatif.**

En moyenne annuelle et pour l'ensemble du globe, le bilan radiatif est équilibré, c'est-à-dire que la Terre reçoit autant d'énergie qu'elle en réémet.

Un peu moins du tiers du rayonnement incident ( $105 \text{ W.m}^{-2}$ ) est directement renvoyé vers l'espace et le cinquième est absorbé par l'atmosphère. La moitié seulement, soit  $162 \text{ W.m}^{-2}$ , arrive donc au « sol » (continents + océans).

Mais le sol reçoit également de la chaleur par le rayonnement infrarouge descendant de l'atmosphère et des nuages (eau et gaz à effet de serre). Ce flux infrarouge descendant ( $400 \text{ W.m}^{-2}$ ) est même supérieur au flux émis ( $335 \text{ W.m}^{-2}$ ), l'excédent contribuant à évaporer l'eau ( $83 \text{ W.m}^{-2}$ ) et à réchauffer les basses couches de l'atmosphère ( $24 \text{ W.m}^{-2}$ ). Sans cet « effet de serre », la température moyenne de la Terre serait de  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  et non de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

À basse altitude, dans la troposphère, 30 % du flux solaire retourne directement vers l'espace, réfléchi par l'air, la surface terrestre et les nuages. On dit donc que l'albédo (du latin « blancheur ») de la Terre est de 30 % ou 0,3 ; il s'agit d'une valeur élevée, puisque l'albédo de la Lune, à l'atmosphère raréfiée et sans nuage, est seulement de 7 %. La réflexion par les nuages (20 %) constitue d'ailleurs l'effet essentiel. On l'appelle parfois l'effet « parasol » car il protège le sol d'une exposition directe au rayonnement solaire. C'est un effet éminemment complexe et variable, car le pouvoir réfléchissant des nuages va de 5 à 85 % en fonction de la taille des gouttes et des cristaux qui les composent ou de leur contenu en eau ! Des aérosols d'origine marine, volcanique, anthropique contribuent également à cet effet. Les nuages ne sont pas les seuls réflecteurs : une petite partie du flux solaire (6 %) est diffusée vers l'espace par les molécules d'air. Ce phénomène étant plus intense aux courtes longueurs d'onde, il confère au ciel sa couleur bleue et rend la lumière solaire directe plus jaune, puisqu'il lui manque une partie de sa composante bleue. C'est le seul mécanisme où les gaz majoritaires, azote et oxygène, interviennent de manière sensible sur les échanges d'énergie. Enfin, une partie encore plus faible (4 %) est réfléchi par le « sol », ce terme désignant l'ensemble des surfaces terrestres, lacustres et marines. L'importance climatique majeure de ce dernier phénomène tient aux différences considérables d'albédo de surfaces voisines, celui-ci variant de 5 % pour un sol basaltique (0 % pour le corps noir) à 92 % pour la neige fraîche (100 % pour un miroir parfait). Les océans ainsi que les zones de végétation équatoriale présentent un albédo faible et assez constant (de 5 à 20 % pour les océans, de 10 à 15 % pour la végétation), les déserts et les sols nus présentent un pouvoir réfléchissant moyen (de 30 à 40 %) tandis que les zones glacées ont un fort pouvoir réfléchissant (de 60 à 90 %). Bien que faible, la réflexion au sol (4 %) évoluera, lors du changement climatique, de manière nettement plus accentuée que la diffusion moléculaire (6 %).

Les 70 % restants du flux solaire ( $237 \text{ W.m}^{-2}$  environ) sont absorbés, donc transformés en chaleur ; ils assurent le fonctionnement de la machine climatique. Une fraction, environ 20 %, est absorbée par l'atmosphère qu'elle chauffe ainsi de manière directe. Les 50 % restants sont absorbés par le sol et agissent de manière indirecte. Dans les basses couches de la troposphère, le rayonnement solaire est principalement absorbé par la vapeur d'eau dans plusieurs bandes du proche infrarouge, au-delà de  $0,8 \mu\text{m}$ . Les aérosols et les nuages contribuent aussi à l'absorp-



Figure 3.2

**Nuages et climat.**

La modélisation du rôle des nuages dans l'évolution du climat demeure imparfaite. Elle est délicate en raison de leur diversité, car leur effet net sur le rayonnement peut être dominé soit par la réflexion du rayonnement solaire (« effet parasol »), soit par un « effet de serre ».

tion atmosphérique, dans une mesure difficile à quantifier car elle dépend de leur composition, de leur forme, de leur taille et de leur densité (figure 3.2).

**LE DEVENIR DE L'ÉNERGIE ARRIVANT AU « SOL »**

Un peu moins de la moitié du flux radiatif solaire incident au sommet de l'atmosphère est donc absorbée à la surface de la Terre, soit environ  $162 \text{ W.m}^{-2}$ . Cette moyenne masque les grandes disparités en fonction de la latitude et des saisons puisque la puissance solaire absorbée peut dépasser  $400 \text{ W.m}^{-2}$  dans le Hoggar (sud de l'Algérie) à midi par atmosphère exceptionnellement limpide et sèche. Ces  $162 \text{ W.m}^{-2}$  qui chauffent le sol constituent la part la plus importante de l'énergie solaire absorbée par le système climatique, très supérieure aux  $75 \text{ W.m}^{-2}$  qui chauffent directement l'atmosphère. L'équilibre de la machine climatique

impose que cette énergie retourne vers l'espace, sous forme d'infrarouge. Dans ce trajet retour, l'atmosphère s'interpose à nouveau : elle est ainsi « chauffée par le bas », donc facilement turbulente, comme l'eau dans une casserole sur le feu. Elle émet à son tour de l'énergie vers l'espace. C'est ce mécanisme complexe qui régule les climats de la planète.

## L'ÉMISSION TERRESTRE

En quelques millions d'années, la température de la Terre a seulement varié de quelques degrés, ce qui signifie qu'elle n'a pas emmagasiné de chaleur de manière notable et qu'elle émet vers l'espace l'intégralité de l'énergie solaire qu'elle absorbe, soit  $237 \text{ W.m}^{-2}$  ( $162 + 75$ ). Cet équilibre détermine de manière stricte le rayonnement planétaire émis en direction de l'espace ; la Terre doit « adopter » une température qui permette l'émission exacte de ces  $237 \text{ W.m}^{-2}$ . On peut ainsi calculer que sa température devrait être, en l'absence d'atmosphère, de  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  ; la Terre renverrait alors, sous forme d'infrarouge, la totalité de l'énergie qu'elle aurait reçue dans le visible.

Mais cette vision est trop simple. L'émission d'énergie vers l'espace n'est pas directement due au sol mais à l'atmosphère qui s'interpose. Ce n'est donc pas nécessairement le sol qui atteint cette température de  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ , mais les couches élevées de l'atmosphère qui rayonnent directement vers l'espace. Seule une toute petite fraction de l'énergie absorbée au sol, environ 6 %, est restituée directement à l'espace sous forme d'infrarouge dans la « fenêtre atmosphérique » (entre 8 et  $13 \mu\text{m}$ ). Tout le reste transite par l'atmosphère. Ainsi, c'est l'atmosphère qui doit être plus froide et le sol « garde le droit » de rester plus chaud, recevant de la chaleur à la fois par le rayonnement solaire et par le rayonnement descendant de l'atmosphère et des nuages. Grâce à ce filtre atmosphérique, la température de la Terre atteint  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , soit 288 K. Il s'agit bien d'une moyenne, puisque les conditions locales varient de  $-70$  à  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$  (de 203 à 323 K). Dans cette gamme de températures, le rayonnement émis se situe dans l'infrarouge, entre 4 et  $100 \mu\text{m}$ . Ceci est assez similaire à ce qui se passe dans une voiture. Comme l'atmosphère, un vitrage est transparent pour le rayonnement visible, mais opaque pour le rayonnement infrarouge, la chaleur s'accumule au bas de l'atmosphère un peu comme à l'intérieur de la voiture.

Un bilan simple permet d'estimer cet effet de serre. Pour assurer son équilibre à la température de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , le « sol » doit recevoir, sous une forme ou une autre, une énergie de  $390 \text{ W.m}^{-2}$  qui compense l'émission infra-

rouge moyenne d'un corps à cette température, soit une énergie supérieure aux  $162 \text{ W.m}^{-2}$  fournis par le rayonnement solaire. La contribution du rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère est donc indispensable au réchauffement du sol. Cet effet est même supérieur à ce simple diagnostic car, dans le cas des échanges entre le sol et l'atmosphère, la part électromagnétique n'est plus seule en jeu. On doit aussi comptabiliser les échanges énergétiques correspondant à deux autres mécanismes de refroidissement du sol (donc des océans sur les deux tiers de la surface terrestre) qui ne sont pas d'origine radiative :

- un flux de chaleur sensible qui refroidit le sol et réchauffe l'atmosphère par convection thermique ( $24 \text{ W.m}^{-2}$ ) ; directement chauffé, l'air s'allège, s'élève et est constamment renouvelé près du sol ;

- et, surtout, un flux de chaleur latente lié à l'évaporation de l'eau ( $83 \text{ W.m}^{-2}$ ). Cette évaporation refroidit le sol et l'énergie correspondante est regagnée ultérieurement par l'atmosphère lors de la condensation de l'eau en nuages. Ce processus représente le mécanisme de chauffage de l'atmosphère le plus important, en particulier sous les tropiques. Il explique qu'un climat plus chaud, donc plus humide puisque le niveau de saturation en vapeur d'eau est plus important, entraîne une accentuation des tempêtes et cyclones.

Si l'on dresse le bilan, le maintien de la Terre à  $15 \text{ °C}$  demande donc en réalité  $390 + 83 + 24 = 497 \text{ W.m}^{-2}$ , dont seuls  $162$  sont apportés par le flux solaire direct. La différence, soit  $335 \text{ W.m}^{-2}$ , est donc nécessairement fournie par « l'effet de serre naturel de l'atmosphère », c'est-à-dire l'émission infrarouge de l'atmosphère vers le sol.

Après avoir mis en lumière l'importance considérable du processus qui met en jeu une énergie presque égale à celle que la Terre reçoit du Soleil, nous souhaitons attirer l'attention sur une contradiction apparente. Cet effet capital résulte de l'action remarquable de gaz qui ne représentent qu'une infime fraction de la masse de l'atmosphère ainsi que de celle des nuages qui, s'ils couvrent une surface importante, représentent également une faible masse. Le rayonnement infrarouge émis par le sol et qui traverse l'atmosphère est en effet absorbé par des composants à l'état de traces : la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, l'ozone et le méthane. C'est cette dépendance à l'égard de composés minoritaires qui rend l'atmosphère si sensible aux effets de l'activité humaine. Les molécules de ces gaz à effet de serre ont la capacité d'absorber une part importante du rayonnement infrarouge émis par la surface et émettent à leur tour, dans toutes les directions, un rayonnement de longueur d'onde un peu diffé-

rente mais toujours dans l'infrarouge. Une partie de ce flux énergétique est donc dirigée vers la Terre où il s'ajoute au flux solaire direct et constitue l'« effet de serre ». L'atmosphère, grâce aux nuages et aux gaz minoritaires, sert donc de relais : le sol chauffe l'atmosphère et l'atmosphère émet du rayonnement vers l'espace.

## LE BILAN RADIATIF GLOBAL

### UN RAPPEL

Nous avons vu que le bilan énergétique de l'ensemble du globe était nul en moyenne annuelle mais qu'il présentait des excédents et des déficits selon les saisons et selon les régions. Cette distribution de l'énergie revêt parfois des aspects contraires à l'intuition. Ainsi, en région subtropicale exempte de nuages, le flux infrarouge peut dépasser  $300 \text{ W.m}^{-2}$ , soit plus que le rayonnement solaire absorbé ; c'est le cas dans les déserts où l'albédo du sol est bien plus élevé que celui des océans aux mêmes latitudes. Le bilan énergétique est alors négatif : ces régions du monde, qui sont le plus directement chauffées par le Soleil, sont, en moyenne, refroidies, le bilan radiatif complet solaire + infrarouge terrestre étant négatif !

Les deux enveloppes fluides de la planète, l'océan et l'atmosphère, redistribuent cette énergie, ce qui atténue les différences géographiques et saisonnières (comme nous le verrons dans le chapitre suivant, il s'agit là d'un des moteurs des circulations atmosphérique et océanique). La distribution dissymétrique des continents entre les deux hémisphères joue un rôle primordial car les océans s'échauffent lentement et sont donc moins aptes à renvoyer immédiatement du rayonnement infrarouge ; les océans tropicaux assurent ainsi un stockage saisonnier de chaleur. Le bilan radiatif moyen par bande de latitude permet de déterminer la chaleur qui doit être transportée par l'ensemble océan-atmosphère. On estime que chacune de ces enveloppes fluides tient un rôle équivalent pour transporter de  $5 \cdot 10^{15}$  à  $6 \cdot 10^{15}$  watts dans chaque hémisphère. Cette redistribution par les vents et les courants marins de l'énergie d'origine solaire modère les contrastes entre les pôles et l'équateur, et entre l'hiver et l'été.

En raison de ces variations, le bilan énergétique de la planète est difficile à mesurer et les valeurs au sol demeurent imprécises ; pour certaines régions, elles sont seulement connues à quelques dizaines de watts par mètre carré près. Depuis une vingtaine d'années, les mesures satellitaires permettent une estimation beaucoup plus précise des échanges d'énergie au sommet de l'atmosphère. On peut maintenant dresser les cartes de

## Synthèse sur le bilan radiatif

Le rayonnement solaire global (somme des flux direct et diffus) atteint  $176 \text{ W.m}^{-2}$  par an au sol sur l'ensemble du globe. La majeure partie, soit  $162 \text{ W.m}^{-2}$ , est absorbée à la surface (48 % du flux solaire incident au sommet de l'atmosphère). Le flux infrarouge émis par la surface ( $370 \text{ W.m}^{-2}$ ) se trouve en revanche presque compensé par le flux descendant ( $335 \text{ W.m}^{-2}$ ). Le bilan radiatif à la surface reste donc en moyenne positif, même s'il est négatif la nuit. Le bilan énergétique à la surface s'annule grâce aux flux emportant la chaleur latente ( $83 \text{ W.m}^{-2}$ ) et la chaleur sensible ( $24 \text{ W.m}^{-2}$ ) de la surface vers l'atmosphère. Les flux de chaleur latente sont particulièrement forts au-dessus des courants marins chauds, comme le Gulf Stream, et au-dessus des forêts tropicales humides, couplant le cycle de l'eau et le cycle de l'énergie. Les flux de chaleur sensible sont importants au-dessus de terres arides.

moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des composantes du bilan radiatif planétaire, et même en établir la variabilité temporelle, notamment celle qui est associée aux événements du type El Niño-Southern Oscillation.

### LA MACHINE THERMIQUE TERRESTRE

#### EST-ELLE AUTORÉGULÉE ?

Le climat a connu des fluctuations à toutes les échelles de temps bien avant que puisse être mise en avant l'action de l'homme. Le système climatique étant une machinerie complexe soumise à des sollicitations multiples, le passé nous apprend quels ont été les mécanismes qui ont stabilisé son évolution (rétroactions « négatives ») ou l'ont déstabilisée (rétroactions « positives »).

À l'échelle de milliards d'années, la température de la Terre a peu varié, alors que la constante solaire augmentait régulièrement. C'est probablement la diminution constante du dioxyde de carbone dans l'atmosphère due au développement de la vie qui, en stockant des quantités importantes de matière organique sous forme de calcaire, de charbon ou de pétrole, a ainsi régulé le climat (c'est l'hypothèse « Gaia » de l'écologiste anglais James Lovelock). Toutefois, avant d'en conclure que notre climat est nécessairement stable (une vision qui peut plaire à ceux qui ne souhaitent pas prendre de mesures de restriction des émissions de gaz à effet de serre), il convient de détailler cette position.

À l'échelle de la centaine de millions d'années, les circulations atmosphérique et océanique, le développement des calottes glaciaires et,

donc, le climat ne pouvaient être similaires quand les continents occupaient des positions différentes. Une situation extrême fut atteinte il y a 300 millions d'années, quand les continents furent rassemblés en une seule entité, la Pangée. Nous ne savons pas grand-chose de la circulation océanique d'alors. Aussi limiterons-nous nos commentaires aux variations du climat et de l'effet de serre dans un contexte géographique où la position des continents et des océans est telle que nous la connaissons, c'est-à-dire aux derniers millions d'années.

Une caractéristique majeure des deux derniers millions d'années est la présence de fortes oscillations du climat entre des conditions glaciaires et interglaciaires. Une part importante de ces fluctuations climatiques résulte des perturbations de la trajectoire elliptique de la Terre autour du Soleil par les grosses planètes (Jupiter, Saturne), ce qui modifie l'insolation. Il peut s'agir de variations de l'excentricité de l'ellipse (période dominante voisine de 100 000 ans), de modifications de l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre (40 000 ans) ou de la « précession des équinoxes », c'est-à-dire du déplacement de la phase entre le moment des équinoxes et le moment où la Terre se trouve au plus près du Soleil (20 000 ans).

Plus près de nous, les variations d'activité du Soleil constituent une explication plausible de la période froide des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles, appelée petit âge glaciaire, qui fut d'autant plus remarquable qu'elle suivit l'optimum climatique médiéval. Si ce dernier permit aux Vikings de quitter l'Islande pour établir des colonies au Groenland et à Terre-Neuve, le petit âge glaciaire les contraignit à les abandonner car la navigation devint alors trop difficile pour aborder le Groenland ; privée de ravitaillement, la population finit par s'éteindre. La diminution de la température atteint alors en moyenne 1,5 °C en Europe de l'Ouest, ce qui est infiniment moindre que lors d'une glaciation, avec pourtant des conséquences notables : la tenue de marchés sur la Tamise de 1607 à 1813, la marche épuisante des troupes napoléoniennes qui perdirent 400 000 hommes dans les étendues gelées de la Russie lors de l'hiver glacial 1812/13, l'avancée des glaciers dans les Alpes, en Alaska, dans les Andes et en Nouvelle-Zélande jalonnent cette période aux hivers longs et rigoureux et aux étés courts et pluvieux. D'autres hypothèses sont évidemment avancées pour expliquer le petit âge glaciaire comme le ralentissement du Gulf Stream et, plus étonnant, une baisse des activités humaines, ce qui démontre une fois de plus combien l'évolution du climat inspire les chercheurs. Des géographes estiment que les épidémies qui ont provoqué la

mort de près de la moitié de l'humanité entre le Bas-Empire romain et la fin du Moyen Âge auraient entraîné une baisse des émissions de gaz à effet de serre et l'augmentation de l'absorption de CO<sub>2</sub> par reforestation.

Si des fluctuations climatiques passées ont donc le Soleil pour origine, d'autres causes sont également envisageables. Si l'on considère la constante solaire comme... constante, des variations du bilan radiatif et donc de la température moyenne de la planète peuvent résulter de tous les processus naturels ou anthropiques modifiant le pouvoir réfléchissant des différentes surfaces et/ou l'effet de serre. Parmi les processus naturels, certains sont propres au système climatique (fluctuations de la circulation océanique, mouvement des calottes glaciaires, etc.), alors que d'autres sont dus à des événements extérieurs ou exceptionnels comme les éruptions volcaniques. Plutarque pensait déjà que l'éruption de l'Etna, 44 ans avant notre ère, avait provoqué le flétrissement des récoltes en obscurcissant le ciel. Le scientifique américain Benjamin Franklin suggéra que l'hiver rigoureux 1783/84 pouvait être la conséquence des poussières obscurcissant l'atmosphère après les éruptions des volcans islandais. Une des éruptions les mieux étudiées a été celle du Pinatubo philippin en 1991, avec des projections jusqu'à une altitude de 35 kilomètres. Deux mois après l'explosion, plus de 40 % de la bande intertropicale entre 30° N et 20° S était couverte par les aérosols. Les gaz et cendres de cette éruption, comme de celles des volcans indonésiens Krakatoa (1883) et Agung (1963), du mont Saint-Helens aux États-Unis d'Amérique (1980) et du volcan mexicain El Chichón (1982) entraînent, dans les mois qui suivirent, une baisse moyenne de la température de la planète comprise entre 0,1 et 1 °C.

Les éruptions volcaniques agissent sur le climat en grande partie parce que les poussières émises réfléchissent la lumière solaire et modifient l'albédo. D'autres facteurs modifient également ce dernier. Le plus important, le plus délicat à contrôler aussi, est la couverture nuageuse, dont l'albédo varie entre 5 et 85 % pour une moyenne planétaire de 20 %. Mais l'albédo du sol, mesuré par référence au flux du rayonnement qui y arrive, est également très variable : de 5 % pour un sol basaltique à 92 % pour la neige fraîche. Une telle plage de variation met en lumière le rôle capital de ce pouvoir réfléchissant, d'autant que les changements de nature de la surface peuvent être très rapides ; en un mois, une surface enneigée peut céder la place à une prairie.

Le maintien de la température de la planète dans un intervalle de quelques degrés tout au long de son histoire prouve que l'effet des rétroac-

tions négatives, c'est-à-dire des processus qui diminuent l'effet des causes initiales, domine sur les longues échelles de temps. Sinon, le climat aurait trouvé, au cours des millions d'années d'une évolution riche en incidents, toutes les occasions de basculer vers une glaciation « martienne » ou vers une fournaise « vénusienne ».

Il existe cependant des exemples d'instabilités du système climatique. Deux forages récents au Groenland ont montré des transitions climatiques à l'échelle du siècle avec des allers et retours rapides entre conditions glaciaires et interglaciaires au cœur même de la période glaciaire. Les fluctuations de l'ensoleillement ne peuvent expliquer ces changements brusques. Dans ce cas interviennent des rétroactions positives qui accélèrent les phénomènes, le meilleur exemple étant l'effet boule de neige... de la neige! Dès qu'un réchauffement entraîne la fonte des surfaces enneigées et de la glace de mer, l'albédo moyen diminue considérablement, le « sol » absorbe de plus en plus de chaleur, le départ de dioxyde de carbone de l'océan accroît l'effet de serre, d'où une élévation de la température moyenne, etc. Ces instabilités constituent l'un des mécanismes pouvant expliquer que la fonte des calottes glaciaires soit incomparablement plus rapide que leur élaboration – on peut également faire appel au glissement rapide des glaciers quand leur base commence à fondre, l'effet de l'enfoncement du sol sous ces glaciers, etc. Certains avancent même que la Terre aurait été, pendant de courtes périodes, entièrement glacée (Terre « boule de neige » ou « *snowball Earth* » en anglais). Deux autres exemples correspondant à des climats très différents peuvent également illustrer la tendance à la déstabilisation d'un système climatique sous l'effet de contraintes internes. Le désert se maintient ou s'étend car son albédo, souvent proche de 40 %, entraîne un déficit énergétique qui peut seulement être compensé par des apports atmosphériques. Ceci prend la forme d'une subsidence, c'est-à-dire d'une descente d'air sec qui se réchauffe en se comprimant, entretenant ainsi les grands déserts. Inversement, la présence d'un couvert végétal d'albédo bien inférieur (10 %) permet à l'énergie reçue d'augmenter l'évaporation sans augmentation de la température du sol ; ceci favorise la pluie, etc.

Nous nous trouvons ainsi dans une situation ambiguë où coexistent, au sein du système climatique, des mécanismes stabilisateurs peu nombreux mais puissants (notamment le lien entre la température et l'émission de rayonnement infrarouge qui permet à la Terre de corriger rapidement toute surchauffe ou tout déficit de chaleur), des mécanismes déstabilisateurs (la libération de dioxyde de carbone par les océans

chauds, l'augmentation de la vapeur d'eau, la fonte de la neige) et des mécanismes incertains, comme le rôle des nuages et celui des circulations océanique et atmosphérique.

L'étude historique du climat laissant des lacunes, il faut maintenant décrire en détail certains de ces mécanismes.

## Nuages sur les nuages

Une des causes d'incertitude des modèles climatiques est bien la paramétrisation des nuages où tout varie : leur position, leur taille, leur forme, leur altitude, leur couleur, leur pouvoir réfléchissant, etc. De plus, ils contribuent à la fois à l'effet de serre et à l'effet parasol (ou effet d'albédo). Une des grandes inconnues du changement climatique est de savoir si le renforcement (ou l'affaiblissement) de l'un sera plus fort que le renforcement (ou l'affaiblissement) de l'autre.

L'effet sur le bilan radiatif planétaire dépend surtout de la température et de l'albédo des sommets des nuages. Le flux infrarouge reçu au sol, en moyenne  $335 \text{ W.m}^{-2}$ , subit lui aussi des variations importantes : il est nettement moins fort par ciel clair et en atmosphère sèche et froide. Qui n'a pas connu les matins glacés d'hiver après une nuit claire... En revanche, en présence de nuages bas ou dans les régions tropicales humides, il compense presque la perte d'énergie au sol par le flux ascendant, d'où des nuits chaudes et moites.

Au total, la contribution des nuages à l'effet de serre contrarie leur effet d'albédo, mais ce dernier l'emporte néanmoins en moyenne de quelque  $20 \text{ W.m}^{-2}$ .

# 4 La machine climatique

## UN SYSTÈME DYNAMIQUE

Nous venons d'illustrer quelques aspects de la complexité des échanges d'énergie au sein du système climatique. Mais cette vision est encore trop simple. L'océan, l'atmosphère, les glaciers, la végétation sont, eux aussi, des systèmes en mouvement perpétuel et la variété de leurs comportements ne permet décidément pas une approche aisée de l'environnement global.

Sur une Terre purement minérale, entourée d'une atmosphère sans nuages et sans vapeur d'eau, le « sort » des gaz à effet de serre serait scellé ! Leur augmentation conduirait à un réchauffement aisé à quantifier. La réalité est cependant plus complexe. Pour comprendre le lien entre les mécanismes radiatifs et le fonctionnement de la « machine Terre », posons-nous cette simple question : pourquoi des déséquilibres régionaux des échanges d'énergie entre la Terre et l'espace apparaissent-ils alors que, pour l'ensemble de la planète, l'énergie émise équilibre l'énergie reçue ? Ces déséquilibres tiennent à ce que, dans la bande intertropicale, l'absorption d'énergie solaire surpasse l'émission terrestre, d'où un réchauffement, alors qu'aux hautes latitudes, l'inverse se produit. C'est le transport de chaleur des basses latitudes vers les pôles qui nivelle les contrastes alors que rien n'interdirait qu'en tout point de la surface terrestre l'énergie émise par la Terre égale l'absorption solaire, ce qui entraînerait un gradient thermique très marqué de l'équateur aux pôles.

L'inertie thermique considérable des océans constitue un premier obstacle à un équilibre rapide entre absorption et émission car leur

température ne peut s'ajuster instantanément au déséquilibre radiatif. L'océan est ainsi un modérateur des différences climatiques à la surface de la Terre. Mais il n'est pas le seul : la convection atmosphérique, qui redistribue en permanence la chaleur des basses vers les hautes couches de l'atmosphère, est le second facteur d'équilibre car elle limite la température de surface des régions tropicales. Ces effets illustrent le rôle des mouvements combinés de l'atmosphère et de l'océan qui transportent continuellement de l'énergie des basses latitudes vers les pôles.

Dès l'origine du débat sur les changements climatiques futurs, cette complexité de l'atmosphère et de l'océan a joué un rôle capital. Elle a donné naissance à des hypothèses jusqu'alors irréalistes ou insuffisamment argumentées indiquant, par exemple, que la Terre pourrait ne pas se réchauffer en réponse à l'augmentation des gaz à effet de serre ! Cette complexité ne facilite pas non plus la détection des changements climatiques à l'échelle régionale ni la prévision des risques associés.

Nous allons d'abord examiner le rôle respectif des deux fluides qui régissent le comportement du système climatique, l'atmosphère et l'océan. Nous nous intéresserons ensuite à la manière dont leurs mouvements combinés interfèrent avec d'autres systèmes dynamiques comme les glaciers ou la végétation.

## **L'ATMOSPHÈRE**

La couche d'air extrêmement ténue qui entoure la Terre joue un rôle climatique capital parce qu'elle filtre l'énergie reçue du Soleil, la distribuant en trois parts : l'une renvoyée vers l'espace, l'autre absorbée par l'atmosphère, la troisième chauffant directement le sol. L'atmosphère affecte également l'émission d'énergie de la Terre vers l'espace (chapitre 3). Cette absorption de chaleur est à l'origine des mouvements qui affectent l'atmosphère. Quand, naviguant dans l'océan Antarctique, vous voyez dépressions et tempêtes semblant revenir inéluctablement vers votre navire, la vitesse remarquable de la circulation atmosphérique prend tout son sens ! Ses déplacements horizontaux atteignent, en moyenne, 10 mètres par seconde, soit 1 000 kilomètres en une journée. Ce brassage permanent dû aux mouvements de l'atmosphère modifie aussi sa composition et explique que la concentration des gaz relativement inertes (la plupart des gaz à effet de serre) varie peu d'un point à l'autre de la planète. Ainsi, bien que l'essentiel des émissions se déroule dans l'hémisphère Nord, la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone atteint une valeur très proche dans l'hémisphère Sud. Ces différences infimes sont pourtant

étudiées dans le détail car ce sont autant d'indices du fonctionnement du cycle du carbone. Pour les gaz plus réactifs, que ce soit par changement de phase (vapeur d'eau) ou par réaction chimique (polluants urbains), les mouvements de l'atmosphère permettent souvent d'accélérer leur recyclage. Quelques semaines suffisent pour que la condensation et les pluies associées recyclent la vapeur d'eau issue de l'évaporation.

Étudier le comportement de l'atmosphère est donc inévitable et, comme le démontra le savant anglais Lewis Fry Richardson dans les années 1920, cette approche nécessite un recueil planétaire des données. La compréhension des principaux régimes de circulation, qui implique une investigation à grande échelle où l'unité est le millier de kilomètres, repose sur des bases différentes selon les latitudes (figure 4.1).

Dans l'atmosphère, il faut également différencier la troposphère, c'est-à-dire les basses couches de l'atmosphère (jusqu'à 12 ou 15 kilomètres suivant les latitudes), où la température diminue avec l'altitude, et la stratosphère, couche plus élevée, épaisse de plusieurs dizaines de kilomètres, où la température de l'air, de très faible densité, augmente lorsque l'on s'élève. La troposphère est une couche essentiellement chauffée par le sol, instable et mélangée par convection. La stratosphère, chauffée par l'absorption du rayonnement solaire par l'ozone, est, au contraire, une couche très stable. Tout polluant qui atteint la stratosphère y demeure piégé beaucoup plus longtemps que dans la troposphère. De même, alors que la vapeur d'eau est normalement recyclée en quelques semaines dans les basses couches de l'atmosphère, les émissions des avions de haute altitude peuvent séjourner plusieurs années dans la stratosphère. Le temps de séjour est similaire pour les poussières volcaniques qui atteignent la stratosphère, d'où leur impact sur le climat.

#### LA ZONE INTERTROPICALE

Dans la zone intertropicale, la circulation atmosphérique est organisée sous forme de grandes « cellules » (figure 4.2). L'air monte dans une zone qui devient nuageuse et pluvieuse car la vapeur d'eau se condense en rencontrant, en altitude, des températures froides. Puis cet air descend vers le sol dans une région qu'il assèche car l'atmosphère, au-delà de 10 kilomètres, est trop froide pour contenir de la vapeur d'eau. On distingue les cellules de Hadley, orientées nord-sud, et les cellules de Walker, orientées est-ouest. Les zones d'ascendance sont proches de l'équateur : les plus importantes se situent sur le Pacifique et l'Indonésie et au-dessus des forêts tropicales (Amazonie, Angola). Les zones de subsidence, quant à elles, sont sur le

désert de Gobi et la région Texas-Mexique, dans l'hémisphère Nord, et sur les hauts plateaux andins, les déserts du Kalahari et d'Australie, dans l'hémisphère Sud.

La circulation atmosphérique sous forme de cellules constitue une gigantesque installation de distillation d'eau de mer. Chaque jour, l'évaporation soustrait à l'océan environ  $1\,160\text{ Gm}^3$  d'eau, ce qui correspond à une perte calorifique de  $70\text{ W.m}^{-2}$ , soit environ le quart de ce que la Terre reçoit du Soleil. Cette énergie dite « latente » est cédée à l'atmosphère seulement lors de la condensation de l'eau dans les nuages ; elle représente le premier terme de « chauffage » de l'atmosphère.

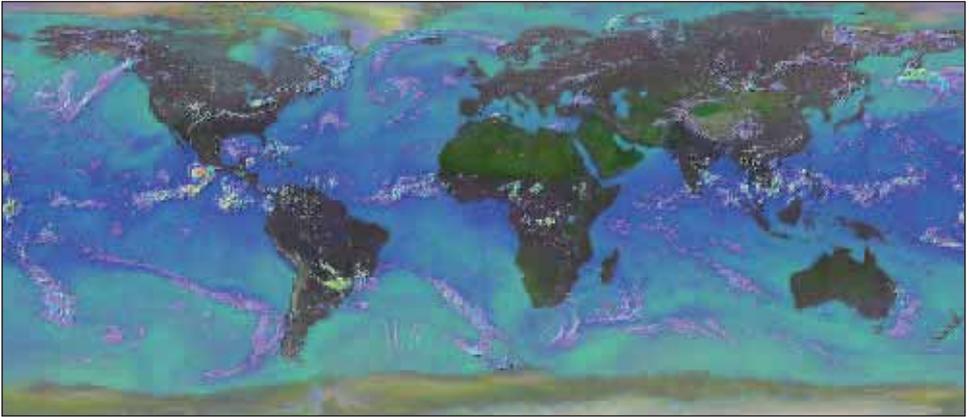


Figure 4.1

**Un exemple de la complexité des mouvements atmosphériques : la pluie depuis l'espace.**

Cette image synoptique instantanée de la circulation atmosphérique en été dans l'hémisphère Nord illustre les capacités de la mission internationale TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). Ce satellite permet d'étudier l'écho de faisceaux radar (onde radio de haute fréquence) sur la pluie ou la neige. Plus le signal retour est élevé, plus les nuages sont riches en eau ; le radar météorologique fournit donc une mesure quantitative des précipitations. Cette carte montre que les circulations de l'atmosphère et de l'océan s'organisent à des échelles très différentes.

Les mouvements ascendants de l'atmosphère, qui produisent la condensation donc les précipitations, apparaissent à la fois :

- très localisés (la convection intense des régions tropicales), ce que les modèles devront représenter de manière statistique ;
- à grande échelle, comme la convection le long de l'équateur et les structures à moyenne latitude. Les modèles pourront les représenter de manière explicite.

Ces caractéristiques déterminent donc les forces et les faiblesses des modèles numériques qui progressent en même temps que l'augmentation de la puissance de calcul des superordinateurs.

Ce vaste mouvement d'ascendance, générateur de pluie près de l'équateur, crée une zone mobile, la zone intertropicale de convergence (ZITC) ou équateur météorologique. La ZITC suit, sur les continents, la zone d'ensoleillement maximal, migrant vers le nord en été, vers le sud en hiver. L'air redescend vers 30° N et 30° S, latitudes qui marquent les limites de ce régime des cellules, typique des basses latitudes. Le transport de l'énergie depuis l'équateur vers les plus hautes latitudes par les cellules de Hadley est limité à la région intertropicale.

Ces cellules de circulation structurent les climats de la zone intertropicale. Leur existence et leur géographie permettent de comprendre la localisation des régimes de précipitations équatoriales ou l'existence d'une ceinture désertique vers 30° N ou 30° S. La modification éventuelle de ces cellules intertropicales fournit aussi un guide fiable pour appréhender les risques que les changements climatiques font peser sur cette zone.

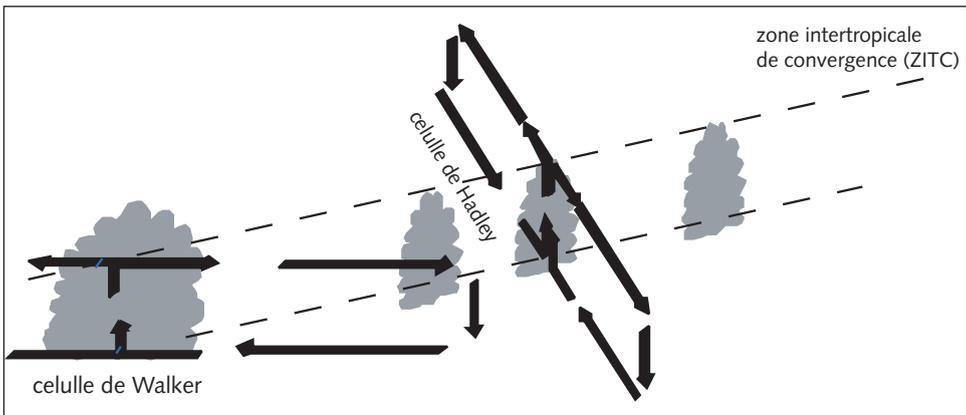


Figure 4.2

**La circulation atmosphérique intertropicale.**

Aux basses latitudes, la circulation atmosphérique à grande échelle peut être décomposée en une circulation méridienne avec deux cellules de Hadley (l'une au nord, l'autre au sud de l'équateur) et une circulation longitudinale avec, au-dessus des océans, les cellules de Walker.

Cela constitue une manière simple de présenter une seule circulation tridimensionnelle. Elle se caractérise par des zones d'ascendance, donc de pluie, près de l'équateur et à l'ouest des océans (Indonésie, Amazonie) et des zones de descente d'air sec en région tropicale à l'est des océans et sur les continents voisins. Celles-ci sont marquées par la ceinture des grands déserts : dans l'hémisphère Nord, les déserts du Mexique-Texas-Arizona, du Sahara et de Gobi et, dans l'hémisphère Sud, les déserts des hauts plateaux andins, du Kalahari et le désert australien.

Le climat des moyennes latitudes que nous aborderons au paragraphe suivant est, lui, beaucoup plus variable. Il présente un ensemble de mouvements désordonnés qui transfèrent une partie de la chaleur vers les régions polaires. Il existe cependant un élément de climatologie qui permet d'ordonner cette image et de se forger une opinion sur les changements futurs : c'est le courant-jet (la dénomination anglaise *jet-stream* est souvent utilisée). Il s'agit de vents très violents (ils peuvent atteindre des vitesses de 300, voire 400 kilomètres par heure) qui se développent sur une épaisseur de 3 à 5 kilomètres, centrés autour de 10 kilomètres d'altitude, au sommet de la troposphère et dans la stratosphère. La largeur de ces courants va de 500 à 800 kilomètres et ils sont présents dans les deux hémisphères.

L'exploration des hautes couches de l'atmosphère a été tardive et elle demeure incomplète. La découverte de la stratosphère est d'abord due aux ascensions en ballon avec une histoire riche en exploits, où les progrès se sont faits par à-coups. Dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle, les Français Louis-Joseph Gay-Lussac et Jean-Baptiste Biot se font enlever à plus de 7 000 mètres et ramènent des échantillons d'air, mais, en 1875, la tentative française de battre le record d'altitude détenu par les Britanniques James Glaisher et Henry Coxwell, avec 8 850 mètres, se finira tragiquement. Seul Gaston Tissandier parviendra à ramener à terre le *Zénith* où ses deux coéquipiers, Joseph Crocé-Spinelli et Théodore Sivel, ont trouvé la mort. La stratosphère sera découverte en 1899 par le Français Léon Teisserenc de Bort grâce à des vols sans présence humaine, mais ce n'est qu'au début des années 1930, dans l'entre-deux-guerres, que le professeur suisse Auguste Piccard en commencera l'exploration systématique. Ce sont les progrès de l'aviation, en particulier de l'aviation militaire au cours de la seconde guerre mondiale, qui vont permettre de diagnostiquer la manière dont ces hautes couches atmosphériques se mettent en mouvement. Le courant-jet est mis en lumière principalement par ses conséquences sur les déplacements transatlantiques ou transpacifiques des avions. Au premier rang des météorologues qui ont contribué à cette découverte, Carl-Gustav Rossby, savant d'origine suédoise travaillant aux États-Unis d'Amérique et formé dans les années 1920 à la prestigieuse « École de Bergen » de Wilhelm Bjerknes, mais aussi des chercheurs ayant collecté des observations sur des secteurs géographiques très différents et ayant permis de comprendre la nature hémisphérique du processus, tel le Japonais Wasaburo Ooishi.

Le courant-jet est un « enfant » des cellules de Hadley : l'air qu'elles emportent vers les pôles s'accélère en permanence vers l'ouest parce qu'il se rapproche de l'axe de rotation de la Terre. Il est aussi associé à la transition marquée de la température entre les zones tropicales (où la température est presque uniforme) et les régions polaires. Ce courant-jet est le grand organisateur des perturbations des moyennes latitudes qui sont presque toujours associées à l'un de ses méandres. La route des tempêtes sur l'Atlantique suit ainsi la position du courant-jet. Comprendre l'évolution du climat aux moyennes latitudes consiste donc largement à deviner le déplacement éventuel du courant-jet : s'il se déplace vers les pôles, il entraînera avec lui la zone des tempêtes les plus intenses.

Ce phénomène montre qu'aux moyennes latitudes aussi existent quelques éléments conceptuels permettant de comprendre et d'interpréter, au moins qualitativement et statistiquement, les résultats des modèles climatiques... et donc d'accroître la confiance que l'on peut leur porter.

#### AU-DELÀ DES TROPIQUES

Pourquoi le régime des cellules est-il limité à la région tropicale alors que, sur d'autres planètes, comme Mars, les cellules de Hadley s'étendent jusqu'aux pôles ? L'extension limitée sur la Terre résulte d'un équilibre entre deux éléments à l'origine de tous les mouvements de l'air et de l'eau. Les différences de température et de pression entre pôles et équateur « créent » les cellules de Hadley dont l'extension vers les pôles est limitée par la force de Coriolis liée à la rotation de la Terre. Apparaît ainsi un élément de stabilité du système climatique qui devrait interdire les « clichés » excessifs de certains débats sur les changements climatiques. Montrer la tour Eiffel au milieu de dunes en feignant de croire que le désert pourrait remonter jusqu'à Paris, c'est oublier le mécanisme puissant qui fixe les déserts là où ils sont. Tant que la rotation de la Terre ou sa distance au Soleil ne changera pas notablement, l'extension des déserts ne dépassera pas quelques centaines de kilomètres. Cette désertification aggravera certes la situation des pays du Sahel (chapitre 6), mais elle ne fera pas peser sur la capitale française la menace d'un changement considérable de végétation qui verrait les cactus pousser sur les Champs-Élysées !

Les cartes météorologiques de l'Atlantique Nord nous ont familiarisés avec les immenses tourbillons qui, s'enroulant autour des dépressions et se déplaçant continuellement, assurent le mélange de l'air polaire et de l'air subtropical. Le climat à ces latitudes sera toujours éminemment variable.

## L'Océan

### LA MÉMOIRE DE L'Océan

L'océan assure une part du transport de chaleur de l'équateur vers les pôles égale à celle de l'atmosphère, son inséparable partenaire. La circulation océanique se distingue cependant fortement de celle de l'atmosphère pour plusieurs raisons :

- l'eau de mer est mille fois plus dense que l'air, avec une masse volumique de  $1\,028\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ;
- elle présente une grande inertie thermique, avec une capacité calorifique par unité de masse quatre fois supérieure à celle de l'air. Compte tenu de sa densité, sa capacité calorifique par unité de volume est quatre mille fois plus grande !

Ces caractéristiques confèrent à l'océan un rôle de « mémoire » au sein du système climatique ; ainsi, 8 années sont nécessaires pour qu'une anomalie de  $1\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  parvienne à chauffer de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  une couche d'océan épaisse de 50 mètres. L'augmentation rapide des températures de surface de la planète à partir des années 1960 pourrait donc constituer la réponse différée à une anomalie radiative due aux gaz à effet de serre, estimée à  $2,5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , qui ont commencé à croître notablement 10 années auparavant. Réciproquement, l'océan retrouverait sa température d'origine seulement quelques décennies après l'arrêt de l'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre.

### LE FRAGILE « MOTEUR » DE LA CIRCULATION OcéANIQUE

Comprendre le climat et en prévoir l'évolution ne peut se faire sans une connaissance de la circulation océanique caractérisée par des courants beaucoup plus lents que les vents, atteignant quelques dizaines de centimètres par seconde (moins de 1 kilomètre par jour).

À petite échelle spatio-temporelle, l'océan est le siège de tourbillons intenses, très énergétiques, mais beaucoup plus petits que dans l'atmosphère ; ils jouent un rôle essentiel dans le transport d'énergie.

À échelle plus large, par friction, l'atmosphère transfère à l'océan une partie de sa quantité de mouvements, entraînant une mince couche d'eau superficielle (vers la droite dans l'hémisphère Nord, vers la gauche dans l'hémisphère Sud en raison de la force de Coriolis) qui, à son tour, entraîne la couche sous-jacente et ainsi de suite. Les pertes d'énergie lors de ce transfert de quantité de mouvements expliquent la diminution rapide de la vitesse des courants avec la profondeur.

Mais la force de Coriolis due à la rotation terrestre, qui diminue avec la latitude pour s'annuler à l'équateur, a bien d'autres effets sur les courants marins :

- elle permet à des vents relativement faibles d'engendrer des courants importants près de l'équateur ;
- elle est à l'origine des remontées d'eau ou *upwellings*. En effet, dans l'hémisphère Nord, lorsqu'un vent souffle presque parallèlement à une côte qu'il laisse à sa gauche (l'inverse pour l'hémisphère Sud), il chasse vers le large l'eau de surface qui est remplacée par des eaux profondes plus froides et riches en sels nutritifs. Ces remontées d'eau côtières, qui intéressent seulement un millième de la surface océanique (Benguela et Mauritanie en Atlantique, Pérou-Chili et Californie dans le Pacifique), jouent un rôle capital dans le cycle du carbone : d'abord, parce que les eaux qui affluent en surface relâchent dans l'atmosphère leur carbone inorganique et, ensuite, parce qu'elles constituent des aires de haute production biologique, donc d'absorption de CO<sub>2</sub> atmosphérique ;
- elle intensifie la vitesse des courants superficiels à la bordure ouest des bassins océaniques, comme le Gulf Stream en Atlantique Nord, le Kuroshio dans le Pacifique Nord, le courant de Somalie et le courant des Aiguilles dans l'océan Indien.

Aux grandes échelles d'espace et de temps, ce sont les fluctuations de la masse volumique de l'eau de mer qui régissent la circulation océanique en induisant des gradients horizontaux de pression qui, comme dans l'atmosphère, génèrent des courants. Sous l'effet des changements de température et de salinité, cette circulation « thermohaline » forme un grand mouvement qui touche l'océan mondial. Souvent, notamment dans les articles de vulgarisation, la circulation de l'océan mondial est assimilée à un « tapis roulant » commandé par la plongée des eaux froides qui se forment dans l'Atlantique Nord, principalement en mer de Norvège et en mer du Labrador. Cette eau profonde de l'Atlantique Nord s'écoule le long du bord ouest de cet océan, avec un flux de l'ordre de 17 millions de mètres cubes par seconde (ou sverdrups, noté Sv) : à titre de comparaison, le flux du Gulf Stream varie entre 100 et 150 Sv, tandis que l'ensemble des rivières du monde ou l'entrée d'eau à Gibraltar atteignent seulement... 1 Sv. Cette eau profonde subit ensuite de grandes transformations à l'équateur puis se répand dans l'Atlantique Sud, le traversant d'ouest en est, avant d'entamer une remontée vers la surface. Le volume d'eau ainsi « perdu » par l'Atlantique est remplacé par de l'eau de surface réchauffée par le rayonnement solaire. Une partie essentielle provient de

l'océan Indien, l'autre du Pacifique. Ce périple dure environ un millier d'années.

Cette vision est simpliste. Dans l'optique climatique, il faut considérer les aires d'échanges intenses entre océan et atmosphère. À côté de l'Atlantique Nord, l'océan Austral constitue également une aire où se forment deux eaux types :

- l'eau de fond antarctique qui naît pour 80 % en mer de Weddell et pour 10 % en mer de Ross. C'est l'eau la plus froide et la plus dense de l'océan qui va donc tapisser les abysses et alimenter, avec un débit de l'ordre de 17 Sv, tous les autres océans jusqu'à des latitudes élevées de l'hémisphère Nord ;
- l'eau antarctique intermédiaire, caractérisée par un minimum de température et un minimum de salinité. Cette eau, encore riche en nutriments, plonge au Front polaire et se dirige vers le nord avec un débit de 10 Sv. Située vers 1 000 mètres, elle sert de source aux remontées d'eau côtières intertropicales.

Ces exemples montrent que les mécanismes de plongée d'eau, à l'origine de cette circulation planétaire, constituent, en même temps, son talon d'Achille. La moindre évolution climatique qui viendrait, durant une courte période hivernale, atténuer le refroidissement ou abaisser la salinité dans ces zones de formation d'eau profonde freinerait ou arrêterait les plongées d'eau et toute la circulation océanique à grande échelle, avec de fortes répercussions sur le climat mais également sur la production biologique. Ces conséquences toucheraient également des mers relativement fermées comme la Méditerranée qui « fonctionnent » suivant le même schéma avec une circulation générale déclenchée par les plongées d'eau en hiver. Bien que le flux d'eau plongeant en Méditerranée nord-occidentale soit faible (1,6 Sv), l'altération de ce mécanisme modifierait la vie des pays riverains qui comptent près d'un demi-milliard d'habitants.

## **LE « SYSTÈME TERRE »**

S'il n'est pas possible de décrire en détail l'ensemble des processus qui interviennent dans le fonctionnement de la machine climatique, il faut cependant évoquer quelques autres composantes essentielles :

- la végétation, qui régule les échanges d'eau entre les continents et l'atmosphère, constitue un écosystème hétérogène dont l'albédo varie entre 10 % pour les forêts et 35 % pour les déserts. La végétation freine également la vitesse du vent. Il s'agit d'un système qui évolue lentement, souvent au cours des siècles ;

- les calottes glaciaires, comme le Groenland et l'Antarctique, ou certains glaciers de montagne amènent à la mer, sous forme d'icebergs, une glace plusieurs fois millénaire ;

- les nuages, remarquables par la variété des processus et des interactions qu'ils mettent en jeu. En effet, ils agissent à la fois sur le rayonnement solaire et sur le rayonnement terrestre, déterminant ainsi la quantité d'énergie disponible pour les sols continentaux ou les océans. Mais ils constituent également le site de condensation de l'eau, source de chauffage intense pour l'atmosphère et de formation des précipitations (pluie ou neige) ;

- la banquise, pellicule de glace épaisse de 1 mètre en Antarctique à 3 mètres en Arctique mais qui couvre, au minimum de son extension, 12 millions de kilomètres carrés pour les deux régions polaires. En hiver boréal, cette surface gagne 7 millions de kilomètres carrés et 16 en hiver austral. Cette banquise régule un grand nombre de processus : elle arrête les échanges entre l'océan et l'atmosphère, elle réfléchit intensément le rayonnement solaire (albédo variant entre 60 et 90 %), sa formation augmente la salinité de l'eau de mer, ce qui favorise les plongées d'eau dense. Cette glace n'est pas figée ; elle se déplace sous l'influence des vents, des courants et des contraintes internes de compression.

## **CHANGEMENT CLIMATIQUE ET FLUCTUATIONS CLIMATIQUES**

Un grand nombre de contraintes convergent pour déterminer le climat en un lieu donné de la planète. Le climat de l'Europe de l'Ouest est ainsi établi par des composantes atmosphériques, océaniques et continentales. Il doit sa douceur à la fois :

- à une onde atmosphérique de grande échelle, dite onde planétaire, dont la localisation est fixée par celle des montagnes Rocheuses ;

- à un courant marin superficiel, la dérive nord atlantique, qui remonte très au nord les eaux chaudes des régions tropicales.

Ces deux causes ne sont pas indépendantes car la formation de l'eau profonde en Atlantique, moteur de la circulation océanique, dépend des conditions de température et de salinité de l'océan, elles-mêmes tributaires des conditions atmosphériques : vent, pluie, ensoleillement.

Nous percevons déjà la difficulté de la quantification des effets d'une augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre, car il suffit de modifier un seul des rouages de ce réseau complexe pour déclencher une réaction en chaîne modifiant profondément le climat. Tous ces effets ne peuvent avoir une action équivalente. Ainsi, les principes

fondamentaux (lois de conservation de la masse, de l'énergie, de la quantité de mouvements) fixent des contraintes aux changements potentiels; nous en avons constaté un exemple avec la localisation de la ceinture des déserts. Certains effets sont presque immuables, comme les modifications de la vitesse de rotation de la Terre, alors que d'autres sont immédiatement affectés par les modifications du climat, comme le contraste des températures entre les hautes et les basses latitudes. On doit également distinguer les mécanismes qui se déroulent à l'échelle millénaire (les modifications de la rotation de la Terre autour du Soleil et, donc, la distance entre ces deux astres, la distribution des continents à la surface du globe) et ceux qui sont liés à l'augmentation des gaz à effet de serre, se situant à l'échelle décennale. Arbitrer entre ces processus, caractériser, même à grands traits, la manière dont le système évoluera, cela exige une approche mathématique et une modélisation numérique qui permettent de les ordonner. Nous y reviendrons au chapitre 7 lorsque nous tenterons de prévoir l'évolution de ce système complexe.

# 5 À la recherche des puits de carbone

## **UNE DONNÉE NOUVELLE, CELLE DES PUIITS DE CARBONE**

La conférence de La Haye, en 2000, a été marquée par une vive discussion entre l'Union européenne et les États-Unis d'Amérique dont la position était partagée par le Canada, la Fédération de Russie et une partie de l'Amérique latine. Ces pays souhaitent toujours un allègement de leur effort de réduction d'émission des gaz à effet de serre pour tenir compte de l'existence ou du développement de « puits de carbone biosphériques » stockant du CO<sub>2</sub>. En effet, limiter, comme nous l'avons fait dans les premiers chapitres, la description de l'environnement à ses aspects physiques, c'est-à-dire aux échanges d'eau et d'énergie, est insuffisant pour comprendre les débats autour de l'effet de serre qui mettent également en jeu l'aspect chimique et biochimique de l'environnement. Loin d'arriver dans un réservoir atmosphérique inerte, les gaz à effet de serre modifient l'équilibre de cycles biogéochimiques complexes.

Pour le CO<sub>2</sub> par exemple, une question se pose dans les négociations internationales: faut-il prendre ou non en compte l'utilisation des forêts et des changements d'usage des sols dans la lutte contre les émissions anthropiques? Cette polémique est à la fois scientifique et politique et il ne faudrait pas que l'arbre masque la forêt... ; autrement dit, il ne faudrait pas renoncer à diminuer les émissions de gaz à effet de serre sous le prétexte, non vérifié, que l'on créerait dans le même temps des « puits » pour absorber ces rejets, notamment par le reboisement.

Une polémique scientifique est née en 1998 lorsque Song Miao Fan, de l'Université de Princeton aux États-Unis d'Amérique, estima, dans *Science*, que le puits américain atteignait 1,7 Gt de carbone par an ( $\text{GtC.an}^{-1}$ ), autant que les émissions fossiles de ce pays. En juin 2000, la même revue publiait un article signé par vingt-trois auteurs qui abaissait ce puits à une valeur comprise entre 0,35 et 0,75  $\text{GtC.an}^{-1}$  ! Song Miao Fan s'est ralliée à cette opération « vérité sur le puits » ; elle est cosignataire de l'article !

Le débat politique s'insère dans un contexte économique qui peut aisément devenir conflictuel. Les mesures d'atténuation du changement climatique peuvent suivre deux chemins que certains estiment complémentaires, d'autres opposés : réduire les émissions de gaz à effet de serre ou les capter dans des puits. La dominance du dioxyde de carbone, qui sert d'étalon de mesure de l'importance des autres gaz à effet de serre, assure ainsi un rôle fondamental aux puits de carbone. Dans ce cadre, la « valeur du carbone » est le coût des actions visant à atténuer l'effet de serre, qu'il s'agisse de ne pas émettre dans l'atmosphère 1 tonne de carbone ou de la faire absorber par des puits.

Cette valeur du carbone (chapitre 9), qui correspond au coût de dépollution, dépend aussi du niveau retenu comme objectif, ce qui constitue un autre objet de débat. En effet, quelle concentration atmosphérique des gaz à effet de serre doit-on retenir comme dangereuse dans une perspective d'application du principe de précaution ? La convention-cadre sur le changement climatique demeure évasive, proposant seulement de stabiliser les concentrations à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) se limite à indiquer les quantités d'émission des différents gaz à effet de serre qu'il faudrait respecter pour atteindre, dans l'atmosphère, différents objectifs de concentration dans les siècles à venir. Quand un objectif global de dépollution sera fixé, se posera encore la question de la répartition de l'effort de dépollution entre les pays, avec le choix entre une répartition économiquement efficace et le souci d'équité.

## **LE CYCLE DU CARBONE : STOCKS ET FLUX, SOURCES ET PUIITS**

Nous pouvons aborder ce cycle en identifiant les réservoirs de carbone (atmosphère, océans, végétation, sédiments), puis les flux ou échanges entre ces réservoirs.

Sur Terre, le carbone circule d'un réservoir à l'autre à des vitesses et sous des formes diverses, certains « compartiments » constituant des

réserves plus ou moins importantes, plus ou moins durables, plus ou moins accessibles (figure 5.1). Schématiquement, le carbone se trouve sous forme de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et dans l'océan, sous forme de molécules organiques dans les êtres vivants (la biosphère) et, enfin, comme composant minéral de matériaux solides carbonatés dans les sols, les sédiments et les roches. Pour pouvoir comparer stocks et flux, nous parlerons en termes de « poids de carbone » comme l'on parle de « tonne équivalent pétrole » ou de « consommation d'alcool pur », c'est-à-dire en utilisant la conservation de l'élément carbone pour décrire des réactions chimiques plus complexes. Nous allons dresser ce bilan des stocks et des flux en considérant les seules composantes qui interviennent à l'échelle de temps du changement climatique anthropique : l'atmosphère, l'océan, la végétation terrestre et les sols.

#### LE CARBONE DANS LES DIFFÉRENTS RÉSERVOIRS

Avec une pression partielle de 370 ppmv, l'atmosphère renferme 800 GtC. L'océan, quant à lui, constitue le véritable réservoir de la planète avec environ 37 000 GtC, cinquante fois plus que l'atmosphère. Mais il est logique de distinguer deux réservoirs océaniques :

- le premier, constitué par les eaux de surface (quelques centaines de mètres), échange continuellement avec l'atmosphère de la chaleur, des gaz et de la matière. Le carbone s'y rencontre sous différentes formes : inorganique (1 000 GtC), organique (700 GtC) et comme biomasse pélagique, qui représente une fraction infime (3 GtC). Mais la croissance rapide du phytoplancton lui permet de constituer une « pompe biologique » à CO<sub>2</sub> efficace qui extrait en permanence du carbone de cette couche de surface. Nous y reviendrons en évoquant les puits de carbone ;

- le second réservoir, celui des eaux profondes, est bien plus important puisque la profondeur moyenne de l'océan est de 4 000 mètres. Si le carbone y est également présent sous ses trois formes, l'essentiel du stock est constitué de carbone inorganique dissous qui atteint 37 000 GtC. Le carbone de ces eaux intermédiaires et profondes demeure prisonnier à moyen terme. Seuls des mouvements épisodiques (mélange vertical) ou affectant des zones océaniques restreintes (remontées d'eau) et une circulation à l'échelle de quelques centaines d'années permettent à une fraction de ce stock d'interagir à nouveau avec l'atmosphère.

Sur les continents, la biomasse vivante aérienne et souterraine est estimée à 600 GtC et le carbone organique « mort », humus et litière, est

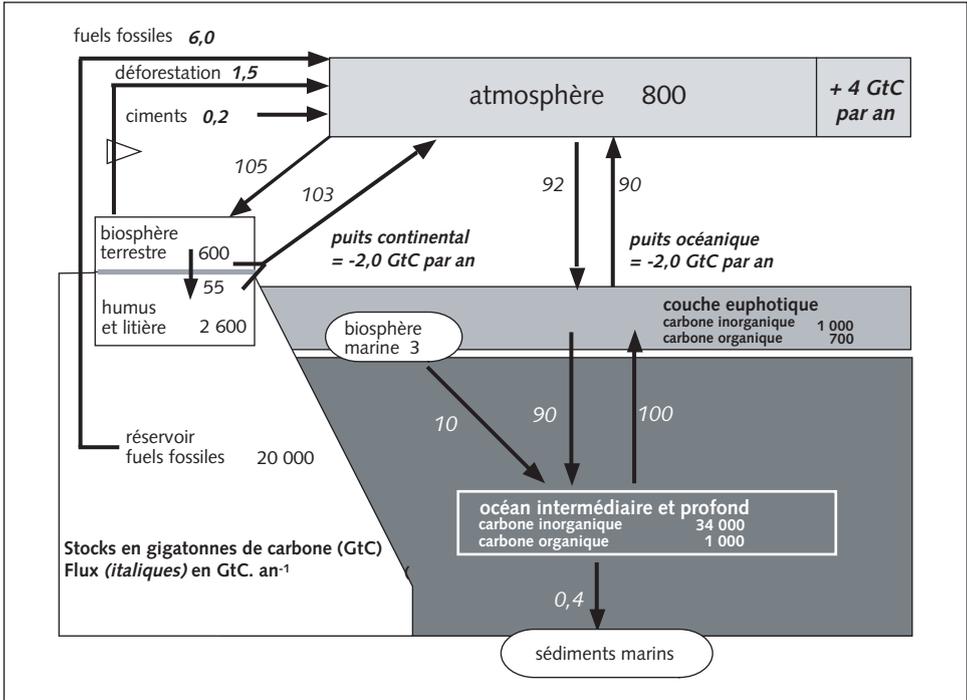


Figure 5.1

**Réservoirs et flux de carbone dans l'écosphère.**

L'océan (« pompage » physique par simple dissolution et photosynthèse) et la biosphère terrestre (photosynthèse) constituent des puits pour le CO<sub>2</sub> atmosphérique, absorbant chacun 2 GtC par an de plus qu'ils n'en rejettent. La teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère augmente donc « seulement » de 3,7 GtC par an. La réaction de ces puits à une élévation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et de la température demeure incertaine. Cependant, tout indique que l'océan verra sa capacité d'absorption diminuer. Une diminution encore plus prononcée pourrait se produire en cas de mauvaise adaptation des forêts équatoriales aux nouvelles conditions climatiques.

La réserve de carbone de la planète se situe dans les roches sédimentaires, avec un temps de résidence de quelque 200 millions d'années, puis dans l'océan profond où le carbone réside des centaines, voire des milliers d'années. La pellicule superficielle de la planète recèle, au contraire, peu de carbone, mais il est essentiel pour la vie et pour l'impact des gaz à effet de serre, notamment du CO<sub>2</sub>. Les flux y sont rapides avec des temps de résidence de 4 ans dans l'atmosphère, de 11 ans dans la biosphère et de quelques dizaines à une centaine d'années dans l'océan superficiel.

voisin de 2 600 GtC. Ces moyennes masquent des situations très diverses d'un écosystème à l'autre; ainsi, les biomasses des forêts équatoriales et des tourbières sont respectivement de 250 et de 10 GtC.

#### FLUX OCÉANIQUES ET FLUX CONTINENTAUX

La concentration en dioxyde de carbone de l'atmosphère est restée stable pendant plusieurs siècles, en dehors des changements climatiques majeurs. Les flux entre l'atmosphère, d'une part, les océans et les continents, d'autre part, soulignent un équilibre entre ces deux composantes. Cependant, dire que ces deux milieux présentent un fonctionnement similaire serait erroné.

Sur les continents, c'est la photosynthèse qui absorbe le dioxyde de carbone et la respiration conduit au retour quasi instantané vers l'atmosphère de la moitié du carbone ainsi assimilé. La matière organique du sol, issue de cette production végétale, est oxydée un peu plus tard. Le temps moyen de résidence du carbone dans ce compartiment est de 5 ans. Cette donnée, précieuse, indique que la biosphère continentale réagit très vite et pas toujours dans le sens espéré; ainsi, dans un climat plus chaud, les modèles montrent que les forêts tropicales rejetteraient du carbone.

La réponse de l'océan, essentielle sur le long terme, diffère de celle de la végétation terrestre, d'abord parce que le « pompage » du dioxyde de carbone atmosphérique est assuré à la fois par la photosynthèse dans les eaux de surface et par les échanges physico-chimiques à l'interface air-mer. La pénétration de dioxyde de carbone dans l'océan est d'autant plus intense que les eaux sont froides et les vents violents et que l'eau de mer est pauvre en  $\text{CO}_2$  comparativement aux basses couches de l'atmosphère. Le flux est en effet proportionnel à la différence de concentration de  $\text{CO}_2$  dans les deux fluides.

L'océan présente un autre aspect remarquable: la grande différence des temps de résidence du carbone dans les eaux de surface et dans les eaux profondes. Chaque année, le phytoplancton prélève dans l'eau superficielle et, par ce canal, dans l'atmosphère, dix fois sa masse de carbone et il exporte vers les profondeurs trois fois sa masse sous forme de carbone organique (tissus) et de carbone minéral (tests). Le temps de résidence du carbone dans la couche euphotique est donc nécessairement très inférieur à l'année; il avoisine deux mois. Les eaux intermédiaires et profondes sont souvent coupées des échanges avec l'atmosphère par une thermocline (permanente aux basses latitudes, estivale aux latitudes moyennes), zone de variation brusque de la température et de la densité

qui inhibe le mélange vertical. Le carbone s'y accumule, notamment sous forme inorganique, et son temps moyen de résidence est de 400 ans.

## SOURCES ET PUIITS

Le flux supplémentaire lié aux activités industrielles, un peu inférieur à  $8 \text{ GtC.an}^{-1}$ , se retrouve pour moitié dans l'atmosphère, dont la concentration augmente régulièrement depuis le début de l'ère industrielle passant de 280 ppmv en 1860 à 370 ppmv en 2003. Pour le « petit » réservoir atmosphérique, il s'agit d'une variation relative considérable, de l'ordre de 30 %. L'autre moitié est captée à peu près à parts égales par les deux puits que sont la végétation terrestre et l'océan.

Ce bilan global masque la variabilité des échanges. Une étude portant sur la période 1980-1998 montre que la variabilité des flux continentaux est deux fois supérieure à celle des échanges air-mer ; l'Amazonie est une région où les fluctuations d'une année sur l'autre sont particulièrement marquées. Pour les océans, où les fluctuations sont amorties,

## Isotopes du carbone et végétation

La « clef » d'utilisation des isotopes du carbone pour reconstruire le comportement de la végétation est la suivante: le  $\text{CO}_2$  atmosphérique contient à la fois du carbone  $-12$  et du carbone  $-13$ . Lors de la photosynthèse, les plantes utilisent préférentiellement l'isotope le plus facile à métaboliser, le  $^{12}\text{C}$  (6 protons et 6 neutrons alors que le  $^{13}\text{C}$  compte 7 neutrons).

Les végétaux contiennent donc plus de  $^{12}\text{C}$  et présentent un rapport isotopique  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  plus bas que l'atmosphère ou l'océan où ils puisent leur carbone. Plus les végétaux fixent de carbone par photosynthèse, plus le rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  augmente dans le milieu, qu'il s'agisse de l'atmosphère ou de l'océan. Si du matériel végétal marin est soustrait au recyclage de  $\text{CO}_2$  vers l'atmosphère par séquestration dans les eaux profondes ou dans le sédiment, le rapport isotopique  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  et le pompage de  $\text{CO}_2$  atmosphérique par l'océan superficiel augmentent. Les géochimistes, en mesurant ce rapport dans les sédiments, reconstituent les cycles passés du carbone à l'échelle géologique.

L'utilisation de cette approche isotopique permet même d'aborder certains aspects qualitatifs. Ainsi, un profil de  $^{13}\text{C}$  sur 150 000 ans près de Luochuan (Chine) montre la transition entre un écosystème végétal dominé par des plantes dites Cériode interglaciaire où le  $\text{CO}_2$  atmosphérique était élevé. Le charbon et le pétrole ayant une origine végétale, ils sont appauvris en  $^{13}\text{C}$ , ce qui n'est pas le cas des composés carbonés dissous dans l'océan. Or, au fur et à mesure que le dioxyde de carbone a augmenté dans l'atmosphère, il s'est appauvri en  $^{13}\text{C}$ , ce qui prouve bien qu'il provient de l'utilisation des combustibles fossiles.

l'influence du phénomène ENSO est remarquable. Durant les épisodes El Niño majeurs, le Pacifique équatorial est un puits de carbone intense alors qu'il devient une source pour l'atmosphère durant La Niña.

Cette complexité, ce passage rapide de certaines régions, de certains écosystèmes d'un rôle de source à celui de puits, et inversement, compliquent l'établissement de bilans. Ainsi, en 1992-1993, une diminution abrupte du taux de croissance du CO<sub>2</sub> apparaît aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, principalement en Amérique. Cette séquestration de carbone est de courte durée puisqu'elle est suivie d'une source du même ordre de grandeur en 1994-1995.

À l'avenir, l'étude des fluctuations du cycle du carbone, dont nous avons montré l'enjeu, fera l'objet d'un effort soutenu passant par l'amélioration des modèles de transport atmosphérique: transfert dans les basses couches, couplage avec les réservoirs océaniques et biosphériques, etc. Il faut également étendre le réseau de mesures afin d'établir des bilans du CO<sub>2</sub> sur des domaines plus réduits, en rapport avec le champ de l'activité socio-économique.

### **RÉACTION DES PUIITS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Jouons à l'apprenti sorcier en injectant virtuellement dans l'atmosphère autant de dioxyde de carbone qu'il en contient. Instantanément, la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique double, passant de 360 à 720 ppmv. Mais une partie de ce carbone supplémentaire se dissout dans l'océan, régulateur des cycles biogéochimiques, jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre s'instaure. Les simulations prévoient que l'océan absorbera les trois quarts du carbone excédentaire, la concentration de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère se fixant à 450 ppmv. Mais, pour observer cet effet salvateur (cependant limité puisqu'il correspond à un retour à un équilibre, mais pas à l'équilibre initial), il faudra attendre... un bon millier d'années. Tout le problème est là. L'océan peut absorber beaucoup de dioxyde de carbone supplémentaire, « libérant » ainsi l'atmosphère durant quelques centaines d'années, mais il réagit lentement. La biosphère terrestre, au contraire, répond rapidement, mais le stockage par les plantes est transitoire en raison du temps de résidence modeste du carbone organique dans les écosystèmes terrestres.

### **DU CÔTÉ DES ÉCOSYSTÈMES TERRESTRES**

Dans un premier temps, l'élévation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère combinée avec la fertilisation azotée des sols accentue la photosynthèse continentale. Mais toute prévision de l'évolution à moyen terme de cet

effet doit coupler un modèle climatique à celui du cycle du carbone qui dépend, lui-même, de l'évolution climatique. Les simulations montrent alors que les puits biosphériques se réduiront aux basses latitudes en Amérique et en Afrique, en raison d'une contrainte hydrique due à une accentuation de l'évaporation, et augmenteront dans les hautes latitudes, l'élévation de la température de l'air rehaussant la photosynthèse. Et encore, cette approche ne prend-elle pas en compte l'activité microbienne des sols qui s'élèvera en même temps que la température, accentuant la décomposition des détritiques organiques, d'où un accroissement des émissions de gaz carbonique. Ce sera d'ailleurs particulièrement vrai pour les zones forestières boréales (l'essentiel du stock de carbone d'une forêt est dans le sol) qui pourraient devenir des sources et non plus des puits de carbone. De toute manière, dans les années 2040-2050, la plupart des puits biosphériques continentaux seront saturés : la végétation ne pourra plus absorber de carbone supplémentaire.

#### REGARD SUR L'OcéAN

Les modèles prouvent qu'un doublement de la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère augmente le puits océanique de carbone. Mais, à plus long terme, le réchauffement du climat a toutes les raisons de freiner l'action des pompes biologique et physico-chimique de l'océan. Il entraînera, en effet, une élévation de la température des eaux superficielles, donc un ralentissement des mouvements verticaux, avec les conséquences suivantes :

- diminution du taux de dissolution des gaz dans les eaux superficielles, donc de l'absorption de  $\text{CO}_2$  atmosphérique ;
- ralentissement des plongées d'eau qui entraînent le carbone vers les horizons profonds ou les fonds océaniques où il est stocké durablement ;
- moindre activité des divergences équatoriales et des remontées côtières qui approvisionnent la couche euphotique en nitrates et en phosphates, d'où un ralentissement de la pompe biologique, avec des conséquences différentes en fonction de la latitude. La production primaire diminuera fortement en zone intertropicale tandis qu'elle augmentera dans les régions polaires riches en sels nutritifs ;
- accroissement du rôle du phytoplancton à test calcaire. Cette dominance des coccolithophoridés n'est pas une « bonne nouvelle » pour l'absorption de  $\text{CO}_2$  par l'océan. En effet, si ces organismes fixent du carbone dans leurs coccolithes, l'activation de cette « pompe à carbonate de calcium » acidifiera l'eau de mer (pH à 0,5 en cas de doublement du

dioxyde de carbone alors qu'il varie actuellement, dans les eaux de surface, entre 8,0 et 8,5), ce qui amoindrirait le rôle de puits de carbone de l'océan.

La capacité de l'océan à absorber du carbone devrait donc elle aussi diminuer dans un monde plus chaud.

## **LA CRÉATION DE PUIITS DE CARBONE BIOSPHÉRIQUES : MYTHE OU RÉALITÉ ?**

En introduction à ce chapitre, nous avons souligné que certains pays souhaitaient augmenter le contenu en carbone de leurs écosystèmes terrestres pour créer des réserves qui seraient déduites des émissions fossiles. Dans la « course contre la montre » engagée contre le changement climatique, ce stockage dans la biosphère vise à limiter la croissance du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère au cours de ce siècle avant que de nouvelles technologies « propres » prennent le relais, évitant l'épuisement des ressources fossiles. Un tel projet s'appuie sur des exemples passés, comme l'accroissement des forêts lors de la dernière glaciation, qui a entraîné une augmentation des réserves de carbone dans la biosphère que différents travaux situent entre 500 et 1 000 GtC.

Faut-il accuser les puits biosphériques de n'être qu'une diversion inventée par des acteurs ou des pays peu soucieux de réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub> ou peut-on croire que la mise en culture de la forêt est la solution pour annihiler l'effet de serre? Quelques éléments permettent de lever un coin du voile :

- la mise en culture d'un sol conduit d'abord à une libération du carbone du sol qui constitue, rappelons-le, l'essentiel du carbone des écosystèmes terrestres ;
- la création de puits par culture de la forêt implique un équilibre délicat entre croissance (en régime de croisière, les forêts absorbent en effet à peu près autant de carbone qu'elles en rejettent) et exploitation. La biomasse récoltée est en effet soit oxydée, et le carbone rejeté dans l'atmosphère en l'espace de 1 à 2 ans (aliments, papier, incendies), soit décomposée plus lentement (matériaux de construction, meubles) ;
- l'efficacité éventuelle dépend de l'écosystème occupant les terres qui seraient consacrées à ces nouvelles plantations d'arbres. Imaginons qu'il s'agisse de forêts primaires victimes d'incendies...

Peu de scientifiques soutiennent l'efficacité de changements d'usage des terres et de plantations forestières pour lutter contre l'augmentation de l'effet de serre. Plusieurs articles parus à l'automne 2001 dans *Nature* et dans *Science* suggèrent même que les forêts auraient, dans certaines condi-

tions, un effet négatif, relâchant plus de CO<sub>2</sub> qu'elles n'en absorbent. Sur ce thème, il est d'ailleurs délicat de séparer les aspects écologiques, économiques et humains. Ainsi, dans son journal *The Ecologist*, Teddy Goldsmith écrit-il: « L'attitude des États-Unis et leurs propositions de négociation sciemment inacceptables ont sans nul doute causé l'échec de La Haye. Proposant ainsi d'emblée d'exclure toute sanction financière pour les pays ne respectant pas leurs engagements et d'inclure dans les calculs l'absorption naturelle de CO<sub>2</sub> par les forêts exploitées et les plantations d'arbres intensives, ils ne souhaitent rien de moins qu'être payés en crédit CO<sub>2</sub> pour un programme d'artificialisation des forêts ce qui, *in fine*, leur aurait même permis d'émettre davantage de CO<sub>2</sub> ! »

La prise en compte des puits biosphériques temporaires permet de retarder et/ou d'amoindrir l'engagement des États à modifier leurs structures de production et de consommation. L'éventuelle constitution de puits de carbone biosphériques pourrait permettre d'augmenter le stockage du carbone dans les écosystèmes terrestres uniquement entre 2010 et 2012, période de vérification du respect des engagements du protocole de Kyoto!

La plantation d'arbres est moins onéreuse que la réduction de la consommation des énergies fossiles. Cette politique pourrait conduire un pays en développement à recevoir des fonds pour poursuivre la déforestation de forêts primaires de haute diversité pour se lancer dans la monoculture de palmiers à huile, d'eucalyptus, voire de pommiers, car il y a un amalgame entre activités forestières et agricoles. Les pays peuvent comptabiliser leurs plantations nouvelles, mais n'ont pas l'obligation de décompter toutes les émissions... comme celles qui sont liées aux incendies, considérées comme « naturelles ». En deux mots, replanter les forêts n'est pas une panacée, mais lutter contre la déforestation est un enjeu majeur.

# 6 Le Sahara au fil du temps

## LE SAHARA D'AVANT-HIER, AU GRÉ DE LA DÉRIVE DES CONTINENTS

Pour suivre l'évolution du climat au Sahara, il nous faut au préalable évoquer un phénomène très lent qui a modifié le visage et le climat de notre planète depuis ses origines : la « dérive des continents », conséquence de la tectonique des plaques. Les plaques, au nombre d'une dizaine, qui constituent la lithosphère, c'est-à-dire le plancher océanique et les continents, se déplacent sous l'effet des courants de convection de l'asthénosphère, couche plus profonde formée de roches en fusion. On peut interpréter ces mouvements des plaques à la surface de la Terre comme un « voyage » qui va les faire passer d'un climat à un autre.

Il y a 500 millions d'années (figure 6.1), au début de la période ordovicienne, le Sahara était une immense plate-forme recouverte de matériaux d'érosion laissés par de grands fleuves paresseux après le retrait de la mer ; ce matériau forme les grès rouges des Tassilis. À la fin de cette période (– 435 millions d'années, notés Ma), après une rotation du Gondwana, le Sahara s'approche du pôle Sud centré sur l'actuelle Brazzaville. Il est alors recouvert d'une calotte glaciaire couvrant 8 millions de kilomètres carrés, autant que le désert chaud actuel. Ces glaciations, les plus étendues et les plus spectaculaires, se sont maintenues durant 20 millions d'années, entre 438 Ma et 418 Ma. Le long des Tassilis du Nord, on découvre ainsi des vallées glaciaires, comme l'Ihérit. Un vaste fleuve naît en Mauritanie, au bord de la calotte glaciaire, et se jette, au nord, dans une mer alors gelée. La très longue transgression de la

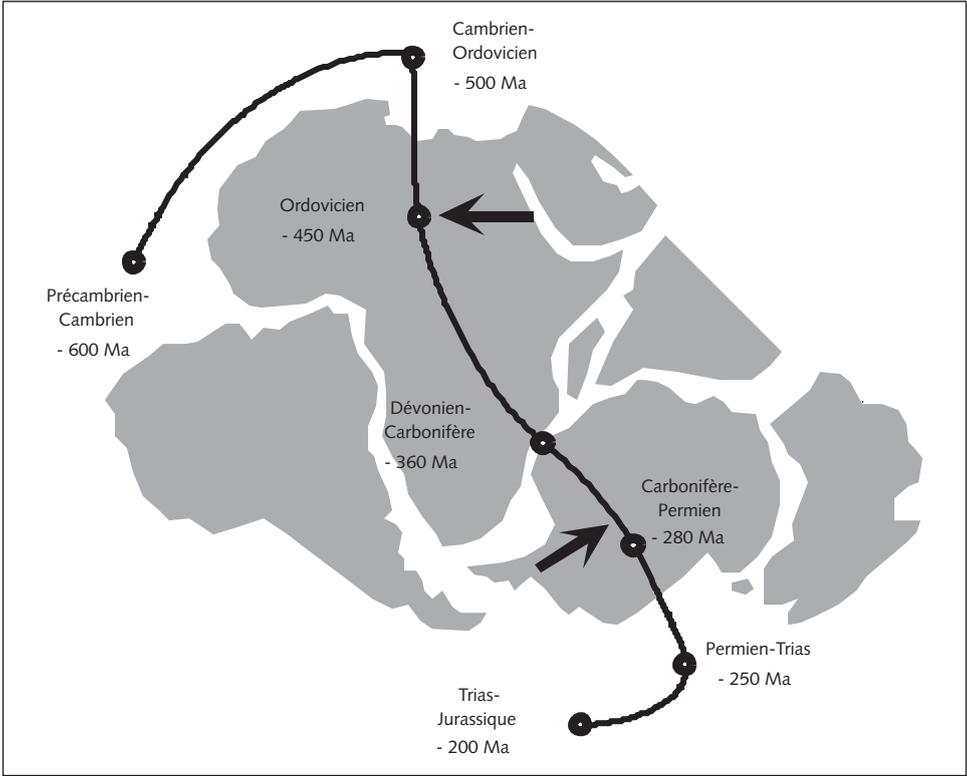


Figure 6.1

**Déplacement du pôle Sud par rapport au Gondwana.**

On notera que le Sahara fut recouvert d'une calotte glaciaire de 8 millions de kilomètres carrés il y a 435 millions d'années, avant de se replacer en zone aride il y a 100 millions d'années. Il connut alors transgressions et régressions marines avec, notamment, un dépôt de craie à la fin de la période crétacé (figure 6.2)

période silurienne permet une sédimentation du plancton formateur de kérogène, la roche constitutive des gisements d'hydrocarbures lourds, et donne naissance au dépôt de schistes du Tanezrouft, une des principales roches mères du pétrole en Afrique du Nord. Dans ces gisements, la maturation s'est généralement effectuée durant la période carbonifère, 80 % des réserves migrant dans des réservoirs triasiques.

Durant la période carbonifère (de – 360 à – 295 Ma), le Sahara bénéficie du réchauffement planétaire, puisque c'est l'époque où l'Europe de l'Ouest connaît un climat équatorial et est envahie de fougères arborescentes et d'arbres tropicaux à l'origine des gisements de charbon. De la

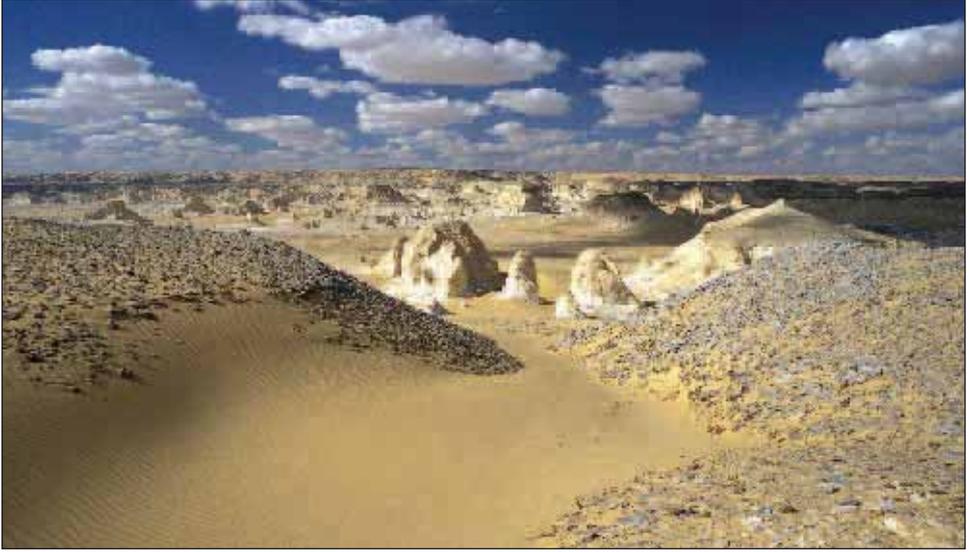
fin de cette période (– 295 Ma) jusqu'à l'époque du jurassique supérieur (– 154 Ma), l'Afrique migre de 35 degrés de latitude vers le nord, quittant définitivement les zones froides. Aux périodes du trias et du lias (entre – 250 et – 175 Ma), le Sahara se trouve en zone aride, avec de puissants dépôts d'évaporites ; l'érosion décape lentement les 1 000 mètres de grès rouges du Hoggar, laissant apparaître le granit sous-jacent.

À l'époque du jurassique moyen (autour de – 160 Ma), l'ouverture de l'Atlantique central, associée à une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre, rapproche le Sahara de l'équateur, ce qui provoque la disparition des évaporites et le retour d'apports détritiques grossiers. La fin de la période jurassique et le début de celle du crétacé voient le maintien d'un climat tropical humide, avec des reliefs couverts de conifères et des sous-bois de fougères ; de nouveaux dépôts gréseux se constituent. Cet épisode continental est très étendu, intéressant aussi bien le Hoggar que le Mali et le Niger.

À l'époque du crétacé inférieur (– 135 à – 96 Ma), l'ouverture de l'Atlantique Sud est associée à une rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre qui replace le Sahara et le Maghreb en zone aride avec les premières collisions contre l'ensemble eurasiatique. Durant l'étage cénomaniens (– 96 Ma) se déposent des argiles, puis ce milieu lagunaire fait place à un milieu franchement marin qui submerge toute la plateforme septentrionale de l'Afrique, arrivant à la boucle du Niger qui communique alors avec le golfe de Guinée. À l'époque du crétacé supérieur et à l'aube de l'ère cénozoïque se dépose, aux marges orientales du Sahara, de la craie sculptée par l'érosion éolienne qui donne son éclatante blancheur au Désert blanc (figure 6.2).

Les 25 millions d'années suivantes sont marquées par le va-et-vient de régressions et de transgressions marines puis la situation se fige au début de l'ère cénozoïque, où la mer conserve à peu près le domaine qu'elle occupait à l'étage maastrichtien (– 70 Ma), après s'être déplacée vers l'ouest pour passer à l'ouest du Hoggar. Après avoir régressé, vers – 50 Ma, la mer se retire « brusquement » de tout le domaine saharien ; à l'étage éocène moyen (– 40 Ma) subsiste seulement un système lagunaire à la frontière tunisienne, système qui régresse encore à l'oligocène.

La dernière période climatique remarquable avant l'époque actuelle se situe à l'époque miocène (de – 23 à – 7 Ma), où la légère progression vers le nord et la rotation anti-horaire amènent l'ensemble des régions sahariennes à cheval sur le tropique du Cancer, les deltas montrant de riches faunes de vertébrés liés à la savane.



© Patrick Darphin

Figure 6.2

**Le Désert blanc.**

Aux marges orientales du Sahara égyptien, le long de la frontière libyenne, le Désert blanc éclate de la blancheur de la craie qui s'enneie dans le sable roux du Sahara.

Cette craie s'est déposée lors d'une transgression marine au crétacé supérieur, époque où la mer atteint son niveau le plus élevé des temps géologiques, 250 mètres au-dessus de son niveau actuel.

**LE SAHARA D'HIER**

Les deux derniers millions d'années, l'époque pléistocène, sont marqués par deux événements importants : l'apparition de l'homme et la succession des âges glaciaires et interglaciaires, d'origine astronomique. Le Sahara est riche en indices de ces variations : niveau des lacs, type de pollens. Certaines méthodes, en particulier celle de la datation à l'aide du potassium/argon, permettent de retracer une chronologie de ces fluctuations et de la superposer aux événements majeurs qu'ont constitués les glaciations en Europe ou en Amérique du Nord.

Ainsi, le dernier maximum glaciaire, il y a un peu plus de 20 000 ans, coïncide-t-il avec une désertification touchant 2,5 millions de kilomètres carrés au sud de la limite saharienne actuelle. L'isohyète 100 mm se localise alors à 13° N et la savane à *Acacia* régresse jusque vers 10° N. Ce scénario semble logique puisqu'une part de l'eau atmosphérique est immobilisée sous forme de glace et que l'évaporation diminue quand la température

baisse. Les phases froides à l'échelle de la planète correspondent donc à une avancée du désert vers le sud de 300 à 400 kilomètres et à une intensification des vents d'hiver. Les anciennes dunes, qui apparaissent parfois sous les dunes vives actuelles, sont orientées comme elles, suivant la direction nord-est – sud-ouest. La datation par la luminescence des quartz situe leur formation entre 20 000 et 12 000 ans BP<sup>1</sup>.

Plus loin dans le passé, certaines périodes de réchauffement paraissent, réciproquement, entraîner une phase pluvieuse en Afrique, comme le montre l'exemple de l'optimum climatique du dernier interglaciaire il y a 125 000 ans. Ainsi, la dépression de Sbeitia au nord du Mali (23° N) abrite-t-elle des dépôts lacustres, des travertins grisâtres à mollusques aquatiques, situés 25 mètres au-dessus du fond actuel de la dépression. Des outils de pierre taillée de type levalloiso-moustérien retrouvés au bord de l'ancien lac confirment la validité de la datation par l'uranium de 125 000 ans et montrent que l'homme a vécu autour de cette étendue d'eau douce. De nombreux autres paléolacs ont été découverts comme dans le Fezzan libyen, par 27,30° N, où une dépression de 125 kilomètres de longueur sur environ 20 de largeur est actuellement occupée par une *sebkha* indiquant la présence sous-jacente d'une nappe salée. Une quarantaine de mètres au-dessus du fond actuel de la *sebkha*, de spectaculaires amas de coquilles de mollusques aquatiques marquent l'ancien rivage d'un lac disparu. L'alimentation de ce lac Shati était due non seulement à la remontée de l'aquifère, mais également à des pluies locales importantes. Très récemment, un paléolac de même âge a été observé aux limites de la Jordanie et de l'Arabie saoudite par 29° N; il est bordé d'industries similaires.

## **LE SAHARA D'« AUJOURD'HUI »**

La longue histoire des fluctuations climatiques a eu un impact important sur les manifestations de la vie au Sahara, et donc sur les conditions de la présence humaine. Les premiers hommes ont dû faire face à des conditions climatiques changeantes, avec des phases brèves mais intenses de réchauffement ou de refroidissement produisant des variations climatiques de quelques degrés en quelques décennies. Depuis 10 000 ou 11 000 ans, au contraire, dans cette époque climatique qui est la « nôtre »,

1. Pour la période historique, nous avons daté par rapport à la naissance du Christ, en précisant « avant J.-C. » ou « après J.-C. ». Pour les événements plus anciens dont la datation fait appel au <sup>14</sup>C, nous utiliserons la notation BP (*before present*), ce qui signifie « avant 1950 », année prise comme référence.

l'holocène, les conditions sont beaucoup plus stables à l'échelle du globe. Nous nous trouvons en effet dans un âge interglaciaire exceptionnellement long et la seule tendance notable est le léger refroidissement qui oppose les périodes les plus récentes à la première partie de l'holocène, un peu plus chaude. Mais à cette relative stabilité climatique globale des derniers millénaires correspond une évolution beaucoup plus marquée dans la zone saharienne.

#### LE DÉSERT REVERDIT À L'ÉPOQUE HOLOCÈNE

L'époque holocène débute il y a 11 000 ans, à un moment où les calottes glaciaires européenne et américaine ont presque complètement disparu. Elle évolue vers un optimum climatique atteint entre 9 000 et 6 000 ans avant aujourd'hui. C'est donc la période la plus chaude du stade interglaciaire actuel, avec une température supérieure d'environ 2 °C à celle de nos jours ; elle permet à l'homme de modifier son comportement de chasseur-cueilleur pour devenir éleveur et agriculteur et fonder les premières cités.

Cette évolution climatique est liée à la précession des équinoxes, phénomène soupçonné dès l'Antiquité par Hipparque de Nicée, astronome et mathématicien grec. L'hémisphère Nord, le plus continental, recevait en été, il y a 10 000 ans, plus de chaleur qu'aujourd'hui, car c'était le moment de l'année où la Terre se trouvait au plus près du Soleil, alors que c'est actuellement en hiver. Ceci intensifiait les moussons en Inde et en Afrique. En effet, comme la température moyenne sur ces continents était de 2 à 3 °C supérieure à celle relevée de nos jours, les basses pressions continentales étaient plus marquées, conduisant à une « aspiration » d'air océanique humide et à des pluies de mousson plus intenses qu'aujourd'hui et couvrant surtout une zone plus large. En plein cœur du désert actuel coulaient des rivières et paissaient des troupeaux.

Ce réchauffement à l'époque holocène instaure un climat humide (300 millimètres de pluie par an), paradoxalement moins chaud dans les régions humides, avec une multitude de petits lacs ouvrant sur une nappe aquifère affleurante, située à une cinquantaine de mètres au-dessus de l'actuelle. Dans la seule partie malienne du Sahara, une des zones les plus arides avec moins de 5 millimètres de pluie par an, des dépôts lacustres, des dunes fossiles, des restes d'invertébrés et de vertébrés, et même des nids d'hyménoptères et des preuves de l'existence de moustiques, ainsi qu'un grand nombre de sites préhistoriques contenant des sépultures ont été observés sur quelque 700 000 kilomètres carrés.

Cette immense nappe phréatique fossile alimente encore certaines oasis et permet, par exemple, à l'Arabie saoudite de transformer le désert en terre agricole. Conséquence moderne de cette histoire climatique plus que millénaire, les revenus pétroliers de ce pays lui permettent des pompages profonds et un système sophistiqué d'irrigation. Mais l'eau y est puisée plus rapidement qu'elle n'est remplacée, à tel point que des experts estiment, par exemple, que le réservoir de Farafra en Égypte sera épuisé d'ici à une cinquantaine d'années.

La dépression de Sbeita, au nord du Mali, abrite deux générations de dépôts lacustres : à 25 mètres au-dessus du fond actuel de la dépression, les restes du paléolac datant de 125 000 ans dont nous avons parlé et, au fond de cette dépression, des dépôts blanchâtres correspondant à la phase humide de l'étage holocène ancien (de 9 500 à 7 000 ans BP).

Toujours à l'époque holocène, le bassin versant du fleuve Niger, d'une superficie deux fois supérieure à l'actuel, bénéficie de l'apport des fleuves venant de l'Aïr et du Tibesti dont on retrouve actuellement des vallées fossiles. À cette époque, le Sahara est parsemé de lacs et ressemble à la zone soudanienne actuelle. Cet « âge d'or » est illustré par les dizaines de milliers de peintures et gravures rupestres retrouvées sur les plateaux de grès rouges (figure 6.3) aussi bien en Algérie qu'en Libye ou au Tchad, soit le long du tropique (Hoggar et Tassili des Ajjer en Algérie ; Messak Settafet en Libye), soit un peu plus au sud, dans l'Aïr, le Tibesti et l'Ennedi. Ces fresques, ainsi que les ossements mis au jour, reflètent la présence d'une faune sauvage diversifiée : girafes, éléphants, buffles antiques, félins et, pour les parties les plus au sud, silures, crocodiles, hippopotames et rhinocéros. Les accumulations d'endocarpes de fruits de micocoulier, les traces de graines de cucurbitacées, les noyaux de fruits de jujubier démontrent l'alimentation variée de ces populations néolithiques. Un peu plus tard, les néolithiques sahariens domestiquent des bovidés qui forment le grand troupeau du Tassili des Ajjer (étymologiquement « plateau des vaches » et un chien, le sloughi soudanais, qui est devenu l'un des plus étonnants chasseurs du monde.

L'étude des pollens fossiles montre des précipitations importantes à la marge nord du Sahel actuel car, entre 9 000 et 8 500 ans BP, la mousson a gagné en latitude pour atteindre les bassins actuellement hyperarides proches du tropique. Ce scénario, qui a duré entre 1 000 et 2 000 ans suivant la latitude, a touché tout le Sahara, de l'Atlantique au Nil. Marquée par une extension de la forêt semi-caduque, notamment dans les parages du lac Victoria, cette période s'est prolongée au moins jusque vers 6 000 ans BP.



Figure 6.3

**L'art rupestre, mémoire du climat ?**

Peintures et gravures rupestres trouvées tant au Sahara que dans le désert du Namib montrent la grande faune sauvage de l'« âge d'or » que connurent les déserts africains entre 9 000 et 6 000 ans, avec des pluies de l'ordre de 300 millimètres par an.

Les gravures des grès rouges de Twyfelfontein (Namibie), recouvertes d'une patine qui les a protégées de l'érosion, montrent une faune qui n'existe plus maintenant à cette latitude : éléphants, rhinocéros, girafes et lions. Elle est très voisine de la grande faune sauvage retrouvées dans le Sahara au Tassili des Ajjer, « le plus grand musée d'art préhistorique du monde à ciel ouvert ».

© Joseph Laure

**UNE DÉSERTIFICATION QUI DÉBUTE****IL Y A MOINS DE 6 000 ANS**

Des recherches récentes montrent que la désertification a débuté aux alentours de 5 500 ans BP. Le Sahara s'est asséché assez brutalement puisque quatre siècles ont suffi pour réaliser cette désertification.

Les changements astronomiques qui ont induit ce basculement climatique il y a 4 000 ans ont été graduels. Pourquoi alors cette désertification a-t-elle été si brutale ? Il s'agit là d'un effet qui conserve encore une part de mystère et qui témoigne du caractère non linéaire du système climatique : on peut franchir des seuils permettant au système d'évoluer parfois de manière importante sous l'effet de causes relativement mineures — nous avons déjà vu que cette évolution saccadée caractérisait le cycle saisonnier dans la même région. L'un des processus susceptibles d'avoir accéléré le basculement climatique est l'effet de la végétation dont le rôle crucial est confirmé par les modèles climatiques les plus récents. Une légère diminution de la végétation aurait accru le pouvoir

## Le lac Tchad, témoin du climat

Aux confins du Cameroun, du Tchad, du Nigéria et du Niger, centré sur 14° E et 13,2° N, le lac Tchad occupe le fond d'une cuvette d'origine tectonique à 250 mètres d'altitude dont les rebords s'élèvent jusqu'à 3 415 mètres dans le massif du Tibesti. Sa profondeur moyenne est de 1,50 mètre et sa superficie est voisine de 3 000 kilomètres carrés. Quatrième plan d'eau d'Afrique par sa superficie, après les lacs Victoria, Tanganyika et Nyassa, ce n'est plus qu'une « mare » comparé à ce qu'il fut. Il y a 30 ans, sa profondeur moyenne dépassait 2 mètres et il occupait quelque 25 000 kilomètres carrés. Ne parlons pas du « Méga-Tchad » d'il y a 10 000 ans avec une superficie de 400 000 kilomètres carrés et une profondeur maximale de 140 mètres ! Vers 1870, on ne parle plus de Méga-Tchad mais encore de « Grand Tchad », même si la surface est alors quinze fois inférieure ; des pirogues alourdies par le produit de la pêche naviguent alors sur le Bahr el-Ghazal qui constitue le déversoir du lac.

Le lac Tchad a vu son niveau baisser dramatiquement depuis les années 1960, notamment lors des deux terribles sécheresses de 1972-1973 et de 1982-1984. En 1984, avec les crues extrêmement faibles du Chari, le « Petit Tchad » se présente sous la forme de bassins morcelés, de mares insalubres et de marécages. En se retirant, le lac laisse encore des terres fertiles avec une nappe phréatique située à 30 mètres de profondeur, difficile d'accès. La baisse du niveau du lac suit la diminution de la pluviosité car, en 30 ans, la moyenne annuelle des pluies régionales a baissé de 410 millimètres (période 1952-1961) à 190 millimètres (1984-1993). À Bol, près du lac, la sécheresse a été encore plus sévère : de 700 millimètres en 1954 à 140 millimètres en 1989. Les deux fleuves qui alimentent le lac Tchad ont perdu de leur puissance, notamment le Chari qui prend sa source sur le plateau centrafricain et lui assure les neuf dixièmes de ses eaux. Si les pompes et l'irrigation ont accentué ce déficit, c'est leur contrôle qui expliquerait l'amélioration amorcée depuis 1993 avec une montée des eaux de 1 mètre, régulièrement suivie par le satellite Topex-Poseidon. Cette remontée est à la fois une bonne chose, pour l'écologie et les ressources en eau de la région, et un problème, du fait des installations mises peu à peu en place sur les polders libérés par la baisse des eaux.

réfléchissant du sol, diminuant ainsi la pluviosité, ce qui réduit la végétation... La chaleur serait alors devenue brutalement étouffante et le désert se serait étendu. Ce scénario explique l'évolution observée sans avoir recours à l'hypothèse des historiens selon laquelle l'agriculture s'est effondrée parce que les paysans ont épuisé le sol.

À l'heure où la vallée du Nil entre dans l'histoire grâce aux textes hiéroglyphiques, le reste du Sahara, après avoir donné naissance à une civilisation précoce et riche de promesses, doit donc s'adapter à ces conditions de vie difficiles. La désertification s'aggrave encore, produisant ainsi, au fil des siècles et des millénaires, une « civilisation du désert » qui connaît ses heures de prospérité. Ainsi, au début du

deuxième millénaire de notre ère, fuyant la sécheresse, les hommes bâtissent en pierre sèche des sites savamment fortifiés et à l'urbanisme sophistiqué que l'on rencontre entre le Dahr Tichitt et le Tibesti. Ceci accompagne leur sédentarisation et la pratique de l'élevage, bien avant que l'on puisse parler d'une agriculture au sens européen du terme. Fondées entre le IX<sup>e</sup> et le XIII<sup>e</sup> siècle apr. J.-C., les cités mauritaniennes de Chinguetti, de Ouadane, de Tichitt et de Oualata sont les derniers témoins de la prospérité de la Mauritanie médiévale, carrefour de l'Andalousie, du monde arabe et de l'Afrique sahélienne. Ces villes constituent le passage obligé des grands axes commerciaux transsahariens, à travers lesquels s'échangent les produits du Nord contre ceux du Sud (sel, tissus, or, verroterie, etc.) et d'où rayonnent une intense vie culturelle et religieuse, ainsi que de nombreuses activités scientifiques et artistiques. De longues périodes de sécheresse, des épidémies, parfois même des famines portent à ces villes d'irréparables dommages. L'avancée du désert renforce leur isolement. L'apparition des nouveaux axes économiques tournés vers l'Atlantique cause leur enclavement.

#### LE DERNIER SIÈCLE

Au cours des dernières décennies, l'évolution climatique la plus marquée ne touche pas le cœur du Sahara mais sa frange sud, le Sahel. En effet, ce « rivage » (*sahel* en arabe) de la mer de sable subit des fluctuations climatiques au gré de l'avancée estivale plus ou moins marquée, plus ou moins longue, de la zone de pluies associée à la ZITC. Celle-ci constitue une ligne de démarcation entre l'alizé de nord-est, l'harmattan, drainant chaleur et poussières sahariennes, et la mousson de sud-ouest qui se charge d'humidité au-dessus de la forêt équatoriale et, surtout, de l'Atlantique. Les habitants du Sahel savent d'ailleurs qu'ils souffriront durant leur vie de la sécheresse et de la malnutrition qui l'accompagne et dont seules leur ingéniosité ou leur fuite peuvent les sauver.

Pour la zone soudano-sahélienne, les périodes 1930-1931, 1940-1941 et 1947-1949 constituent des événements brefs mais intenses de sécheresse. Mais deux épisodes longs et rudes marquent le XX<sup>e</sup> siècle. Le premier sévit de 1898 à 1916, avec des pics en 1911 et 1914-1915. Durant cette vingtaine d'années, le lac Tchad, « climatomètre » du Sahel (encadré), perd la moitié de son eau pendant que les crues du Nil sont réduites d'un tiers. À l'arrivée de la saison humide, beaucoup n'ont plus la force de travailler la terre. Près de 5 000 Fulani décèdent ainsi au Nigéria, où le troupeau de bovidés passe de 88 000 têtes en 1913 à 26 000 l'année suivante.

La seconde grande période de sécheresse s'étend de 1968 à 1988, avec des minimums de pluviosité de 1971 à 1973, en 1981 et 1982 puis en 1987. Cette sécheresse a également touché l'Afrique humide. La baisse des précipitations au sud du quatorzième parallèle atteint 20 % avec de fortes inégalités régionales. À Niamey, il est tombé 490 millimètres de pluie en moyenne par an de 1970 à 1990, contre 690 millimètres durant les 20 années précédentes; conséquence directe, le Niger voit son débit d'étiage passer, dans cette ville, de 50 à 3 mètres cubes par seconde. Une constatation de prime abord paradoxale, la hausse de 10 centimètres par an de la nappe phréatique! Pour certains chercheurs, ce paradoxe tiendrait aux modifications du paysage. Pour répondre à l'accroissement démographique, les surfaces cultivées ou en jachère courte sont passées, autour de Niamey, de 10 à 60 %. Cette modification du couvert végétal accentue le ruissellement des eaux de pluie (imperméabilisation des surfaces, diminution des obstacles aux flux, réduction de l'activité de la faune du sol) qui se concentrent dans les bas-fonds en formant des mares temporaires qui alimentent par infiltration la nappe phréatique. Très marqué en Guinée, au Libéria, en Sierra Leone, au Mali et au Burkina Faso, cet épisode sec épargne une bonne partie de la Côte d'Ivoire, du Ghana, du Nigéria et du Cameroun jusqu'à la fin des années 1970. Par contre, au cours des années 1980, la diminution des précipitations se généralise avec un maximum d'intensité dans les régions proches du Sahel et, à l'ouest, près de l'Atlantique, en Côte d'Ivoire, au Libéria et en Guinée.

Rien ne permet de savoir si cette rupture climatique autour de 1970 correspond à l'apparition d'un climat durablement plus sec au Sahel ou d'une période de sécheresse comme cette région en a connu à plusieurs reprises auparavant. On constate un déficit pluviométrique (en moyenne – 180 mm de pluie par an) pratiquement continu de la fin des années 1960 au milieu des années 1990 (figure 6.4) ; ce déficit ne s'est pas limité au Sahel mais il s'est étendu jusqu'au golfe de Guinée. Cette sécheresse est seulement l'une des signatures de la variabilité du climat en Afrique de l'Ouest. Les déficits de débit sur les grands bassins versants sont bien plus importants que le déficit pluviométrique. Ainsi, les débits du Sénégal et du Niger ont-ils diminué de 50 à 60 % alors que les pluies annuelles sur leurs bassins versants diminueaient seulement de 20 à 30 %. Dans le Sahel, le déficit pluviométrique des années 1970-1980 correspond à une diminution du nombre d'événements pluvieux surtout en juillet-août. Le même phénomène a été constaté pour la région soudano-guinéenne où la seconde saison des pluies est plus particulièrement affectée sur la côte.

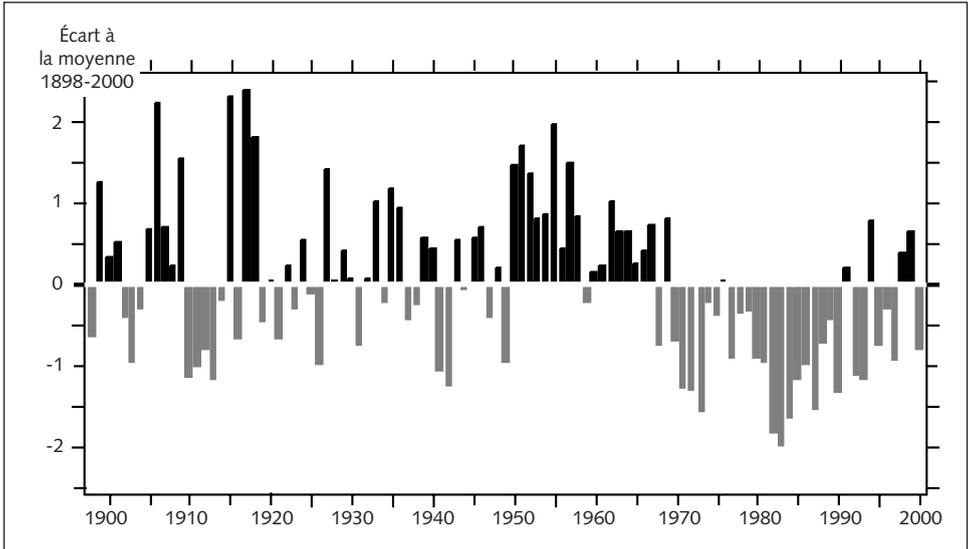


Figure 6.4

**Indice de pluviométrie dans la zone soudano-sahélienne de 1898 à 2000 (écart à la moyenne).**

Autour de 1970, on observe une rupture climatique avec deux périodes de sécheresse : de 1970 à 1974 (5 ans) et de 1976 à 1993 (18 ans). Un tel déficit s'était déjà produit de 1910 à 1916 (7 ans). En dépit de deux années relativement pluvieuses (1994 et 1999), la décennie 1990-2000 présente une moyenne très déficitaire ; elle est à peine plus humide que la décennie 1980-1990. Pour les experts, ces événements plus humides n'annoncent en rien un retour vers des conditions climatiques persistantes plus favorables.

Le météorologue américain Edward Lorenz fut le premier à souligner que les évolutions du système climatique ne relevaient pas toujours d'une simple explication causale. Son exemple célèbre est celui du battement d'ailes d'un papillon en Chine qui pourrait entraîner, quelques jours plus tard, un cyclone aux Antilles, sans que le terme « entraîner » suppose une relation de cause à effet : une infinité d'autres battements d'ailes participe aussi à la formation du cyclone. Cet « effet papillon » permet de comprendre que d'infimes perturbations des rouages et engrenages de la machine climatique modifient de manière importante la course de la zone de convergence intertropicale à la poursuite du Soleil ; ceci rend délicate l'analyse des causes à l'origine d'événements erratiques comme les sécheresses que nous venons de mentionner. De plus, la pluie sur le pourtour de la région saharienne a plusieurs origines, ce qui explique pourquoi, pendant que la sécheresse

touche le Sahel, l'Éthiopie de l'Est, située à la même latitude, est épargnée. Dans le même ordre d'idée, en 1973, à l'inverse du Sahel, le Maghreb connaît de fortes pluies. Enfin, l'influence d'événements plus lointains est, elle aussi, importante : les années les plus sèches sont généralement celles où se produit un événement El Niño (*El Niño. Réalité et fiction*, par Bruno Voituriez et Guy Jacques, UNESCO 1999) : 1972, 1982-1983 par exemple. Parfois, la sécheresse touche toute l'Afrique et, notamment, le désert du Kalahari et ses abords, le pendant du Sahara dans l'hémisphère Sud ; dans ce cas, on ne peut faire appel à la modification des migrations de l'équateur météorologique.

### **PHOTOGRAPHIE DU SAHARA ACTUEL**

En arabe, *sahra* signifie zone plate sans eau. En fait, le plus grand désert chaud du monde est une juxtaposition d'immenses régions plates sableuses ou caillouteuses, parsemées de massifs montagneux, de bombements du socle ou de reliefs volcaniques, tels que l'Emi Koussi qui culmine à 3 415 mètres et le Toussidé à 3 265 mètres au Tibesti, le Tahat, 2 918 mètres, et l'Illaman, 2 760 mètres, au Hoggar, le Greboun, 2 000 mètres, dans l'Aïr. Il comporte également des dépressions en dessous du niveau de la mer, comme le Quattara en Égypte à - 133 mètres et le chott Melhrir dans le sud des Aurès à - 31 mètres. Les 9,5 millions de kilomètres carrés du Sahara reçoivent moins de 100 millimètres de pluie par an, dont la moitié moins de 20 millimètres. En effet, les pluies d'hiver méditerranéennes franchissent rarement les reliefs de l'Atlas et les pluies de mousson ne dépassent pas 17° N (la latitude de Tombouctou et de Khartoum), ceci délimitant le Sahara actuel.

Cette sécheresse résulte de la circulation atmosphérique. Vers 30° de latitude, la rotation de la Terre oblige la branche haute de la circulation atmosphérique (cellule de Hadley) à redescendre, apportant au sol l'air sec des hautes couches de l'atmosphère. Mais un phénomène s'oppose en partie à ce mécanisme qui paraît inexorable : celui des moussons qui amènent saisonnièrement sur les continents l'eau évaporée des océans. Ni les climats passés ni les scénarios futurs ne peuvent être compris sans connaître ce régime des moussons qui est commandé par :

- l'oscillation saisonnière d'un hémisphère à l'autre de la zone inter-tropicale de convergence, zone de pluies intenses qui suit le soleil et se trouve donc en été dans l'hémisphère Nord ;
- les contrastes thermiques entre océans et continents qui favorisent l'entrée d'air humide sur les continents plus chauds, là aussi en été.

La mousson d'Afrique de l'Ouest est un mécanisme complexe et fragile en raison des interactions multiples entre l'atmosphère, l'hydrosphère marine et continentale, le sol et la biosphère. Des modélisations récentes soulignent le rôle important des océans, du couvert végétal et de la topographie sur l'établissement de la circulation de la mousson. De plus, les activités humaines modifient la pluviométrie. Ainsi, la surexploitation des sols entraîne-t-elle une augmentation de l'albédo, tant au Sahel que dans la région soudano-guinéenne, avec un impact direct sur la circulation atmosphérique.

Si le commencement de la mousson d'Afrique de l'Ouest dépend de la progression vers le nord de la ZITC pendant le printemps et l'été boréal, cette migration évolue brutalement, passant d'une position presque stationnaire à 5° N en mai-juin à une autre position d'équilibre à 10° N en juillet-août. La région sahélienne et le sud du Sahara reçoivent alors la plus grande partie de leurs précipitations (figure 6.5). Plus au sud, les cumuls annuels sont plus importants et répartis sur deux saisons des pluies, au printemps et en automne.

#### **LE SAHARA DE DEMAIN : LE RÔLE DE L'HOMME**

L'Afrique subsaharienne et, plus généralement, l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest ont subi la plus forte diminution connue de précipitations sur la planète durant les 50 dernières années et, depuis 1900, sables et dunes ont envahi environ 1 million de kilomètres carrés. Qu'advient-il avec le réchauffement global ?

On pourrait être tenté d'extrapoler l'histoire de ces derniers millénaires pour conclure, un peu hâtivement, que, dans le monde plus chaud dû à l'augmentation des gaz à effet de serre, le climat du Sahara sera proche de celui de l'époque holocène et donc plus humide. Hélas ! Les choses sont moins simples et les mêmes modèles qui rendent parfaitement compte des conditions plus humides de l'époque holocène indiquent, au contraire, des risques importants de sécheresse pour les siècles à venir. Même s'ils sont imprécis à l'échelle locale, les modèles donnent des indications fiables sur la répartition géographique du réchauffement à l'échelle du globe. Dans toutes les simulations du climat futur, le réchauffement de la surface terrestre par les gaz à effet de serre est maximal vers les pôles parce qu'il reste confiné près du sol, alors que, dans les régions tropicales ou intertropicales, il est atténué par les effets de la convection qui mélange l'air sur plus d'une dizaine de kilomètres. Pour les mêmes raisons, le réchauffement est plus marqué en hiver. Ces conditions, très

différentes de celles de l'époque holocène — on ne retrouve plus le fort réchauffement d'été des surfaces continentales aux basses latitudes, attirant les moussons vers le nord —, ne sont plus favorables à une extension des régimes des précipitations, mais plutôt à une amplification de l'intensité des régimes existants : davantage de pluies dans les régions où il pleut déjà, moins de pluies dans les régions arides. Autrement dit, si ces modèles « voient » juste, le Sahara et la zone sahélienne ne verront pas diminuer leur aridité ; les modèles prévoient au contraire une fragilisation des zones semi-arides.

Il y a donc réchauffement et réchauffement..., les conséquences régionales dépendant du mécanisme générateur de la variation climatique. L'optimum climatique de l'époque holocène a été un véritable âge d'or pour le Sahara. Par contre, le réchauffement modéré et symétrique pour les deux hémisphères associé à l'accroissement de l'effet de serre devrait provoquer un renforcement des contrastes climatiques. Notons que le dernier millénaire offre un exemple de la complexité des effets : le Sahara y a connu des pluies assez abondantes durant les périodes de refroidissement en Europe (petit âge glaciaire entre le XVI<sup>e</sup> et le XIX<sup>e</sup> siècle) et la zone saharo-sahélienne a été beaucoup plus sèche qu'actuellement entre 900 et 1270, lors de l'optimum climatique médiéval en Europe, comme le prouvent des datations récentes des niveaux du lac Tchad qui occupait alors une superficie de 350 000 kilomètres carrés. Si ces fluctuations rapides sont liées aux variations de l'activité du Soleil, comme certains indices le suggèrent, on retrouve, là aussi, une cohérence avec les résultats des modèles.

L'Afrique de l'Ouest offre l'exemple d'une région où les modifications naturelles du climat entraînent des conséquences sociales importantes. Les évolutions majeures que l'augmentation des gaz à effet de serre devrait provoquer auront certainement des conséquences encore plus graves. La gravité de la sécheresse qui toucha durant un quart de siècle le Sahel et l'Afrique de l'Ouest tint d'ailleurs à la synergie de deux facteurs : l'aléa climatique lui-même et la vulnérabilité, c'est-à-dire le degré de fragilité des infrastructures et des organisations économiques et sociales.

L'impact marqué de l'épisode de sécheresse 1968-1988 tient paradoxalement aux bonnes conditions climatiques des 20 années précédentes. La communauté internationale avait alors financé des programmes de développement et les bovidés étaient passés de 18 à 25 millions de têtes, alors que l'optimum adapté aux conditions climatiques est certainement plus proche de 15 millions. Dès que les pluies diminuèrent, le bétail ne

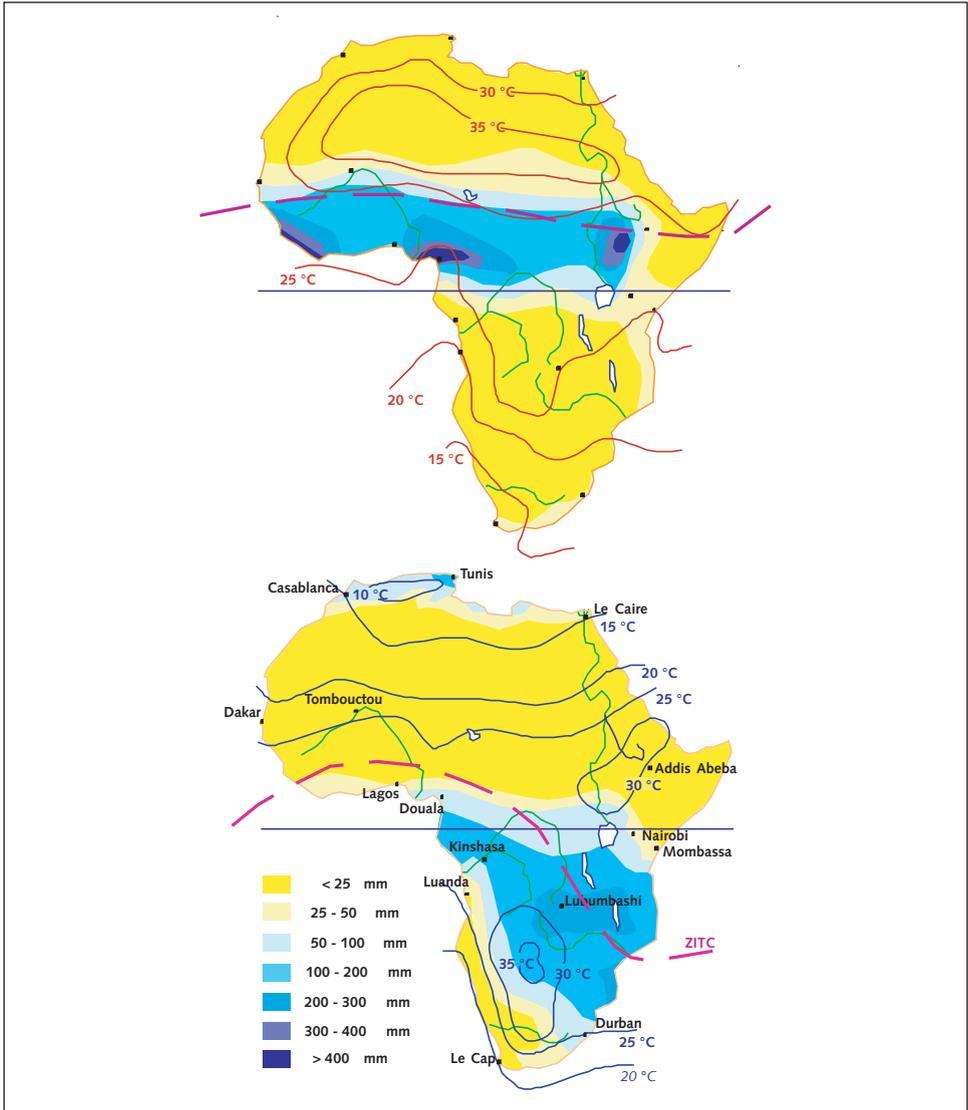


Figure 6.5

**Climat d'été et d'hiver sur le continent africain.**

Les 9,5 millions de kilomètres carrés du Sahara reçoivent moins de 100 millimètres de pluie par an, dont la moitié moins de 20 millimètres. En effet, les pluies méditerranéennes d'hiver franchissent rarement l'Atlas et les pluies de mousson ne dépassent pas la latitude de Tombouctou.

La variabilité saisonnière est forte sur l'Afrique, le cortège des pluies suivant l'oscillation saisonnière de la zone intertropicale de convergence qui suit le Soleil. La migration vers le nord de cette zone se produit brutalement, passant de 5° N en mai-juin à 10° N en juillet-août, époque où le Sahel et le sud du Sahara reçoivent l'essentiel de leurs précipitations.

trouva plus suffisamment de nourriture, la terre des pâturages retournant au désert. L'extension du désert serait donc, dans cette hypothèse, moins une conséquence directe du climat qu'un effet du surpâturage. Il est possible que le phénomène se soit auto-entretenu, la disparition de la végétation augmentant l'albédo, ce qui diminue la température du sol, limite l'évaporation et accentue les apports éoliens.

Les actions humaines peuvent donc aggraver la situation : la baisse de la pluviosité au sud de la Côte d'Ivoire coïncide avec la déforestation. La permanence pendant la crise de structures économiques héritées de périodes plus fastes peut aussi jouer un rôle aggravant : ainsi, le Sahel est resté, pendant cette période de famine, un exportateur de céréales pour nos bovidés. Les images de la famine de 1972 servirent d'électrochoc pour la communauté internationale : mieux préparées, les ONG atténuèrent les conséquences de l'épisode 1982-1983 pourtant aussi sévère sur le plan climatique. L'évaluation des conséquences d'une modification du climat fait donc appel à des considérations qui vont au-delà du strict problème environnemental : c'est la capacité d'une société à s'adapter qui est en jeu, et plus celle-ci est fragile (pauvreté, situation de guerre civile, dépendance trop étroite à des techniques trop sophistiquées), plus le risque climatique est réel.

# 7 Fera-t-il beau demain ?

## LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE

La complexité du système climatique et le caractère partiellement incontrôlable de ses modifications constituent l'une des incertitudes majeures de l'effet de la croissance des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Une fois le dérèglement climatique enclenché, les événements anormaux ou inattendus pourraient avoir des conséquences importantes sur les activités humaines. Pour cerner les impacts des modifications climatiques et donc pour instaurer une politique de prévention, la modélisation numérique constitue un élément capital.

Les modèles occupent une place essentielle dans la science moderne, particulièrement dans l'étude de l'évolution de l'environnement. L'histoire des modèles numériques accompagne d'ailleurs les débuts de la science météorologique. Les équations de la mécanique des fluides qui décrivent le mouvement de l'atmosphère ou de l'océan sont connues depuis un siècle, mais elles ne peuvent être résolues simplement avec du papier et un crayon ! Ceci tient à leur caractère « non linéaire », expression mathématique d'un phénomène dont la complexité... est simple à comprendre. Un événement localisé, comme le développement d'un cumulo-nimbus, interagit avec les systèmes d'échelle globale, par exemple la localisation et l'intensité des cellules de circulation atmosphérique ; par conséquent, il ne peut être ignoré dans un système de prévision atmosphérique.

Les premières tentatives de prévision numérique du temps sont dues à Lewis Fry Richardson au début des années 1920. Pour résoudre ce

problème, il imagine une architecture de calcul préfigurant avec une étonnante précision les performances des ordinateurs. Les champs météorologiques ne sont pas prédits partout dans l'espace mais aux nœuds d'un maillage dont le pas est de quelques centaines de kilomètres. Pour mener à bien les calculs qui en résultent, il conçoit un « ordinateur humain », une sorte d'immense amphithéâtre où des employés chargés de mener les calculs pour la station « Paris » les confient immédiatement à ceux de la station « Calais », sous la surveillance d'un chef d'orchestre accélérant ou ralentissant le rythme des milliers d'opérateurs avec des lampes vertes ou rouges. Dans le même ordre d'idée, rappelons que l'Anglais Gilbert Walker, directeur des observatoires de l'Inde de 1904 à 1924, ne disposant pas d'ordinateur mais d'une main-d'œuvre pléthorique dont il fait des « calculateurs », recherche systématiquement les corrélations entre la mousson et les observations météorologiques à travers le monde et établit ainsi, en 1909, la première formule de prédiction de cet événement.

## Modélisateurs malgré nous ?

« Nous ne raisonnons que sur des modèles », proclamait le poète français Paul Valéry car, comme monsieur Jourdain qui, dans *Le Bourgeois gentilhomme* de Molière, fait de la prose sans le savoir, le « modèle », apparenté à ce que les encyclopédistes du XVIII<sup>e</sup> siècle appelaient « système », paraît lié au raisonnement. Implicitement, quand nous gérons notre patrimoine, prêtant attention à nos gains et à nos pertes, nous inquiétant du taux du livret A ou de celui des emprunts pour notre appartement, nous construisons un modèle conceptuel. Même si le concept de modélisation est encore ignoré de pas mal de dictionnaires, l'homme construit « dans sa tête » avant de concevoir.

Pour l'écologiste américain Eugene Odum (1975), « un modèle est une formulation simplifiée qui imite les phénomènes du monde réel de telle sorte qu'il nous permet de comprendre des situations complexes et de faire des prévisions ». Ce n'est donc pas un *deus ex machina* mais, au contraire, un instrument de simplification, de visualisation, d'expérimentation sans recours au terrain, ainsi qu'un mode de transmission des connaissances. Or, dans les polémiques autour du climat, un certain nombre de pseudo-scientifiques se méfient ou partent en guerre contre les modèles, leur opposant l'observation historique des phénomènes. Mais qu'est-ce donc qu'un modèle ?

Modéliser consiste à identifier des entités, leurs propriétés et leurs relations, ce qui se traduit généralement sous la forme d'équations. Des sciences comme la météorologie se sont rapidement trouvées en face d'un écueil qui tient à la forme particulière des équations sur lesquelles elles s'appuient, qui n'admettent pas de solutions mathématiques simples. Il a donc fallu s'adresser à des modèles numériques qui permettent, par la « force brute » du calcul, de s'approcher des solutions — mais de s'en approcher seulement — et, ainsi, de réaliser des prévisions imparfaites mais indispensables.

Immédiatement après la seconde guerre mondiale, les premiers ordinateurs implantés au Massachusetts Institute of Technology permettent aux équipes du mathématicien américain d'origine hongroise John von Neumann et du météorologue américain Jule Charney d'inaugurer une ère nouvelle. Leur système initial utilise simplement un champ unique (l'altitude de la surface 500 millibars) sur le seul hémisphère Nord, avec un jeu d'équations simplifié et filtré et un temps de calcul supérieur au temps réel. Mais les progrès vont suivre le développement spectaculaire des ordinateurs. Les premiers modèles apparaissent dans les années 1960 aux États-Unis d'Amérique et dans les années 1970 en Europe, notamment en France. Les prévisionnistes utilisent alors au mieux ces outils, allongeant régulièrement la fiabilité et l'échéance des prévisions, qui dépasse aujourd'hui 5 jours.

Ces succès ont immédiatement touché la climatologie, science qui décrit et explique la répartition des climats. Les modèles atmosphériques utilisés pour la prévision du temps ont donc tout de suite permis de mieux comprendre les mécanismes fondamentaux de la circulation atmosphérique: pourquoi y a-t-il des alizés et des moussons? Comment comprendre et évaluer le régime global des précipitations? Ainsi, dès les années 1970, Jule Charney, grâce à des simulations numériques, propose une explication toujours d'actualité de la sécheresse persistante au Sahel tandis que l'équipe du climatologue américain d'origine japonaise Syukuro Manabe attire déjà l'attention sur les risques climatiques liés à l'augmentation, dans l'atmosphère, de la teneur en dioxyde de carbone.

Pourtant, ce passage de la météorologie à la climatologie, de la prévision du temps à celle des modifications du climat par les activités humaines n'a pas été direct. En 1963, le travail du météorologue américain Edward Lorenz prouve que la prévision de l'évolution atmosphérique se limite à une dizaine de jours. Il sépare ainsi clairement deux domaines :

- la météorologie, qui permet de prévoir l'évolution du temps sur une durée courte, en fonction de conditions initiales bien déterminées ;
- la climatologie, science statistique, s'intéressant à des échelles de temps plus longues.

Les modèles climatiques partagent certaines contraintes des modèles météorologiques, comme la nécessité de représenter sous une forme paramétrique tous les phénomènes d'échelle inférieure à la maille de calcul, telle la convection. Ils peuvent, par contre, négliger l'une des difficultés majeures de la prévision météorologique: connaître l'état initial de la

circulation atmosphérique. Mais le climatologue est confronté à de nouveaux problèmes. Il lui faut en effet considérer de nombreuses autres influences :

- océaniques, avec, en particulier, les variations de la température de l'océan qui, si elles affectent peu la prévision à court terme, sont essentielles dès qu'il s'agit de comprendre les mécanismes qui maintiennent le climat moyen de la planète et qui affectent sa variabilité, qu'elle soit naturelle (épisodes El Niño) ou d'origine anthropique ;

- atmosphériques, comme la formation des nuages qui conditionne l'entrée de rayonnement dans l'océan.

Certains de ces nouveaux « partenaires » sont délicats à appréhender. Si l'océan est un fluide dont le comportement est défini par les équations de la mécanique des fluides, l'interaction avec la surface continentale, où coexistent des types de paysages et de couverts végétaux variés, implique une représentation simplifiée de systèmes hétérogènes dont le comportement n'obéit pas à des lois fondamentales. L'introduction des cycles biogéochimiques, du carbone, du soufre et des aérosols soufrés ne fait qu'accroître cette difficulté.

Les outils numériques permettent d'associer des ordres de grandeur et des probabilités à des événements susceptibles de se produire. La modélisation numérique n'est pas la même dans les domaines où elle s'appuie sur des équations précises (l'ingénierie par exemple) et dans ceux où elle constitue un outil de réflexion pour traduire des réalités statistiques. La climatologie se situe entre ces deux domaines ; elle élabore des modèles complexes, à certains égards précis et sophistiqués, mais qui tiennent également compte des approches dont la validité et la qualité prédictive sont plus limitées. La capacité prédictive des modèles dépend donc étroitement de l'utilisation que l'on souhaite en faire.

## **QUELQUES SCÉNARIOS**

Prévoir le climat, c'est évaluer les conséquences d'activités humaines, qui ne sont pas toutes déterminées et que nous pouvons, heureusement, encore infléchir. La communauté scientifique a défini des scénarios de référence pour guider ces choix (figure 7.1).

Le premier de ces scénarios, qui demeure une référence et la source d'illustrations fréquentes du changement climatique dans la littérature grand public, consiste à évaluer le sort du climat associé à un doublement du dioxyde de carbone atmosphérique (figure 7.2). L'augmentation actuelle du dioxyde de carbone atmosphérique est d'environ 0,5 % par an.

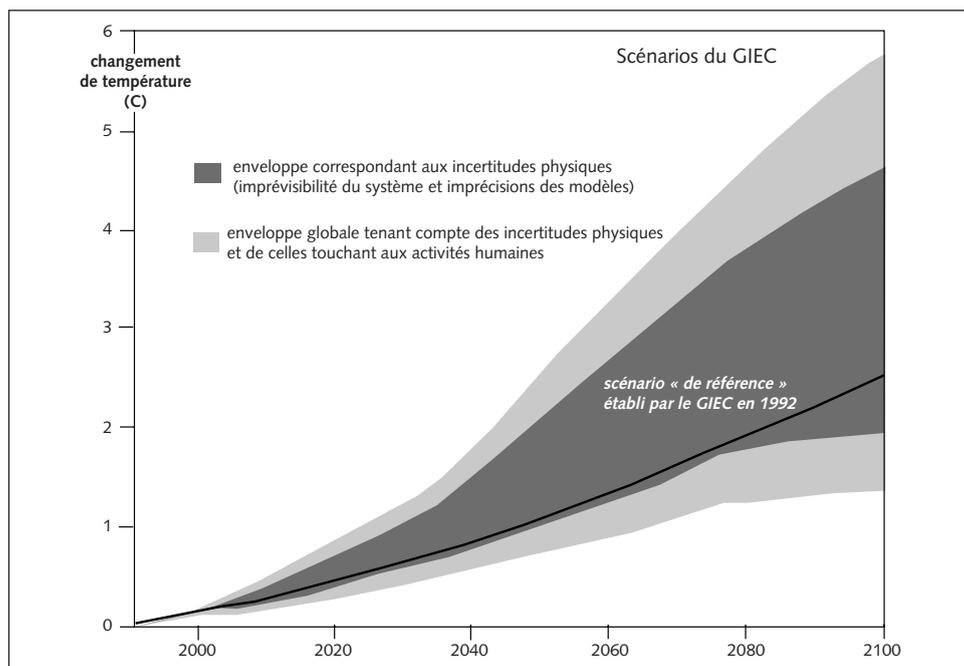


Figure 7.1

#### Scénarios d'évolution de la température au cours du prochain siècle.

L'évolution de la température moyenne à la surface du globe constitue l'un des meilleurs indices des changements climatiques. Pour estimer son évolution durant le XXI<sup>e</sup> siècle, il faut combiner deux types de prévisions et cumuler ainsi deux types d'incertitudes :

- la première tient à la réponse du climat à l'évolution de nos sociétés, qu'il s'agisse de la démographie, du mode de développement, de l'évolution des relations Nord-Sud, des choix énergétiques. Un vaste ensemble de modèles socio-économiques a été utilisé par le GIEC pour décrire les scénarios d'évolution de la température sans attacher à aucun d'eux une plus grande probabilité d'occurrence. À chacun de ces scénarios est associée une estimation des émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols ;
- la seconde tient à ce que la réponse du climat à ces contraintes dépend de processus imparfaitement décrits et imparfaitement prévisibles même avec un modèle « parfait », car ils se déroulent à petite échelle : formation des nuages, formation des eaux profondes, évolution de la végétation.

Les travaux du GIEC ont permis de comparer différents modèles physiques forcés par différents scénarios socio-économiques. L'évolution du climat se situe ainsi à l'intérieur de plages d'incertitude qui distinguent les effets physiques encore insuffisamment compris et les incertitudes liées aux approches socio-économiques. Les modèles les moins sensibles (par exemple la rétroaction négative des nuages qui atténue l'amplitude du changement) combinés à des scénarios économiques très optimistes (stabilisation à terme des émissions de gaz à effet de serre à leur niveau actuel) conduisent malgré tout à un réchauffement de l'ordre de 2 °C. C'est donc à un effort important qu'il convient *a priori* de consentir (division par deux ou trois des émissions) si l'on souhaite contrôler l'évolution de notre environnement. Il faut noter que ces scénarios n'incluent pas certains effets amplificateurs comme l'action du climat sur le cycle du carbone ou sur la concentration atmosphérique en méthane. Nous avons également représenté le « scénario de référence » établi par le GIEC en 1992, correspondant à une augmentation approximative des gaz à effet de serre de 1 % par an et à un modèle physique de sensibilité moyenne. Cette option conduit à une élévation de 2,5 °C en 2100, accroissement d'un tiers inférieur à la prévision effectuée en 1990 ; cette différence tient à un plus faible niveau d'émission en particulier pour le CO<sub>2</sub> et les CFC, et à l'incorporation du refroidissement par les aérosols soufrés.

Mais, à cela, s'ajoute une élévation de la teneur de l'ensemble des autres gaz à effet de serre induisant un effet radiatif à peu près équivalent; nous sommes donc confrontés à une augmentation en « équivalent CO<sub>2</sub> » (en confondant le rôle de tous les gaz à effet de serre sous la même étiquette de CO<sub>2</sub>) de 1 % par an. Un doublement du CO<sub>2</sub> est ainsi atteint en 80 ans, soit vers 2040 puisque l'augmentation des gaz à effet de serre s'est accélérée vers 1960. Encore faut-il définir ce que signifie l'expression « climat associé à un doublement du CO<sub>2</sub> ». La modification de la composition chimique de l'atmosphère est un processus dynamique auquel le système répond avec un retard qui reflète principalement l'inertie thermique des océans. Le changement climatique d'équilibre (si l'on maintient le niveau de CO<sub>2</sub> indéfiniment à une valeur double de la valeur actuelle) ne se produira donc qu'une vingtaine d'années après le doublement de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique. Un modèle couplé océan-atmosphère simulant l'évolution progressive du climat en réponse à une augmentation du CO<sub>2</sub> de 1 % par an, permettant donc une estimation sur 20 ans autour du moment du doublement du CO<sub>2</sub>, donnera une valeur un peu inférieure à la valeur d'équilibre.

Ces scénarios ne rendent pas compte des inflexions éventuelles des activités humaines. Ainsi, la concentration en méthane, qui augmente très rapidement, pourrait atteindre la saturation avant le dioxyde de carbone. Les Fréons, interdits à cause de leur impact sur la couche d'ozone, ont laissé la place à des produits de substitution entraînant également un effet de serre. Le rôle des aérosols soufrés ou carbonés, beaucoup plus faciles à éliminer que les gaz à effet de serre, peut être modulé de manière directe en fonction de choix politiques. Il est important d'essayer de sérier ces effets si l'on veut passer d'un diagnostic scientifique à la mise en place de mesures de réduction des impacts anthropiques sur le climat. C'est dans ce dessein que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a établi quelques scénarios de référence simulant l'évolution des gaz à effet de serre en fonction de plusieurs hypothèses sur l'évolution démographique et socio-économique de la planète. Notons d'emblée l'ambiguïté de son interprétation qui souligne la difficulté de l'exercice: il s'agit de scénarios qui sont établis sans tenir compte d'éventuelles mesures de réduction des gaz à effet de serre et qui suivent les lois usuelles de l'économie. Mais l'évolution de l'économie peut faire une place plus ou moins belle à des techniques sobres pour nombre de raisons — y compris la peur des conséquences de la croissance de l'effet de serre — et il n'est guère aisé de séparer ainsi les choses.

Modèle de l'IPSL

23/09/1998 – 20:32

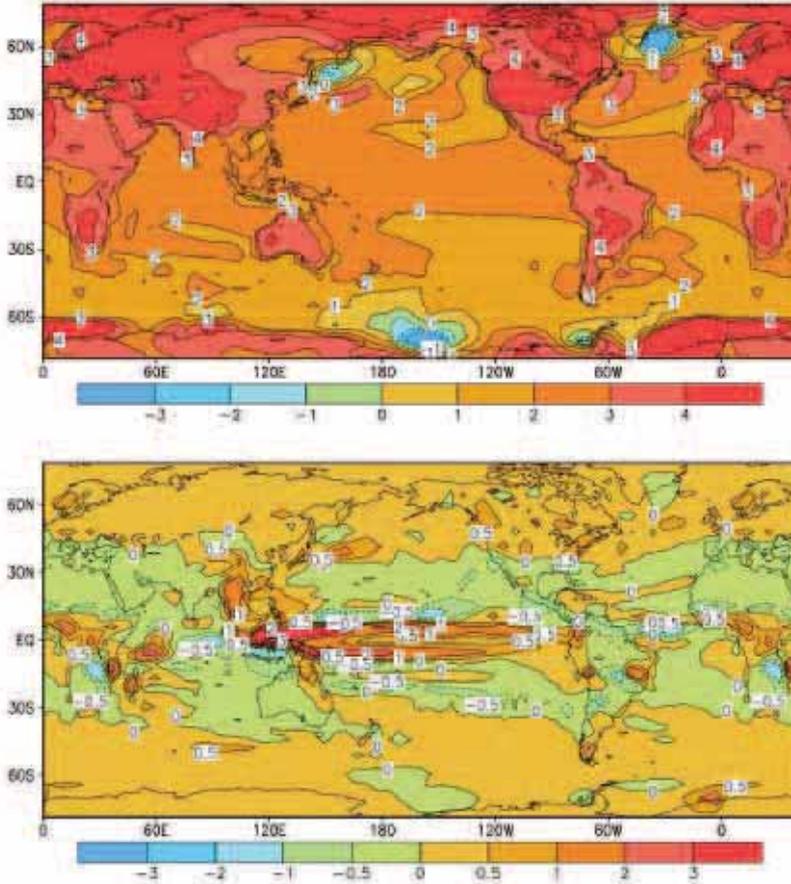


Figure 7.2

**Variation de la température annuelle de surface de l'air et des précipitations en cas de doublement de la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère.**

Les simulations numériques permettent d'estimer la distribution des changements de température et de précipitations en cas de réchauffement global de la planète. Les divergences entre les modèles montrent que ces indications doivent être considérées comme l'indication d'un risque et non comme une véritable prévision. Mais des tendances systématiques existent, qui révèlent de profondes différences régionales :

- réchauffement plus important sur les continents, aux hautes latitudes ;
- à l'inverse, modification des précipitations plus marquée aux basses latitudes avec une tendance vers des régions humides plus humides et des régions arides encore plus arides.

L'évaluation des dommages climatiques éventuels consiste à croiser ce facteur de risque « physique » avec la vulnérabilité des sociétés ou des économies concernées.

## ÉVOLUTIONS PRÉVISIBLES DU CLIMAT AU XXI<sup>E</sup> SIÈCLE

### AUGMENTATION GLOBALE DE LA TEMPÉRATURE

L'augmentation globale de la température de la planète, amorcée à l'heure actuelle, due à l'augmentation des gaz à effet de serre, ne peut que s'aggraver. Nous verrons que cette évolution globale masque des évolutions régionales contrastées. Les scénarios du GIEC situent à l'horizon 2100 l'augmentation de température dans une fourchette de 2 à 6 °C par rapport au niveau préindustriel. Il s'agit d'une perturbation importante, comparable en amplitude à l'écart entre un âge glaciaire et une période interglaciaire. L'étendue de cette fourchette peut surprendre et laisser croire que les modèles ne sont pas fiables. Il faut cependant savoir que la moitié de cette incertitude tient au choix des scénarios d'émission des gaz à effet de serre ou des aérosols. Cet aspect est rassurant puisqu'il indique que nos sociétés peuvent moduler notablement ces changements. Une deuxième composante reflète au contraire les limites de précision des modèles, notamment à propos de l'action des nuages.

L'écart entre les différents scénarios révèle-t-il une incertitude réelle sur le climat futur ou des défauts inhérents aux modèles ? Nous tenterons d'apporter une réponse à cette question délicate, mais il faut noter que tous les modèles sont sensibles à une augmentation des gaz à effet de serre. La valeur minimale de 2 °C atteinte par le modèle le plus optimiste, qui table sur une stabilisation progressive des émissions de gaz à effet de serre durant le XXI<sup>e</sup> siècle, représente déjà une modification importante du climat.

Régionalement, les variations de température seront importantes, surtout aux hautes latitudes et sur les continents. Ainsi, l'augmentation moyenne de 2 °C mentionnée précédemment correspond à un réchauffement voisin de 4 °C pour l'Europe. C'est principalement la convection atmosphérique qui modère le réchauffement aux basses latitudes : les modifications moindres de la température s'accompagnent alors de modifications beaucoup plus importantes des précipitations. Cette modification du cycle de l'eau constitue une des conséquences majeures du changement climatique et l'une des plus difficiles à prédire. L'augmentation moyenne des précipitations associée à un doublement du CO<sub>2</sub> varie selon les modèles entre 2 et 12 %. Les différences régionales seront considérables : l'augmentation du contenu en vapeur d'eau atmosphérique associé au réchauffement (parce que le seuil de saturation s'élève) intensifie les précipitations dans les régions déjà pluvieuses alors que les régions semi-arides s'assèchent encore par un renforcement de la circulation atmosphérique intertropicale. Mais

ces effets sont difficiles à évaluer car les systèmes météorologiques pourraient également se déplacer. Par ailleurs, dans un climat plus chaud, les dégagements de chaleur latente se renforceront, affectant la fréquence, l'intensité et le trajet des tempêtes et des cyclones.

#### CONSÉQUENCES DU RÉCHAUFFEMENT

La poursuite d'un réchauffement global de la planète entraînera des modifications inéluctables, comme la diminution progressive de l'enneigement des montagnes d'Europe et la fonte presque totale de leurs glaciers (figure 2.2), ainsi que celle de tous les autres glaciers de montagne, en particulier ceux de l'Alaska (leur rythme de fonte a doublé ces cinq dernières années) ou de la cordillère des Andes. Mais l'exemple le plus remarquable est sans doute celui de l'Himalaya. Sur le plateau tibétain, le plus haut du monde, l'augmentation de la température depuis une cinquantaine d'années atteindrait 0,16 °C par décennie, valeur supérieure à la moyenne mondiale. Ce réchauffement devrait s'accélérer durant ce siècle avec une élévation de la température moyenne atteignant 3 °C d'ici à 2100. Un tel réchauffement entraînera une fonte des glaciers du toit du monde (la plus grande étendue de glace de la planète en dehors des calottes polaires) de l'ordre de 45 %, provoquant entre-temps des inondations mais réduisant très fortement, au-delà, l'approvisionnement des grands fleuves qui alimentent l'Inde, avec le Gange et l'Indus, ainsi que la Chine avec le Yang-tsé-kiang et le Houang-ho.

Il n'y a guère de doutes non plus sur un relèvement du niveau marin, conséquence de cette fonte et de la dilatation des océans, même si l'amplitude varie assez largement : entre 20 centimètres et 1 mètre en 2100, ce qui pourrait permettre une retraite progressive de la population de la bande côtière et sa protection. Cette vision ne tient pas compte d'un scénario catastrophe, l'effondrement d'une partie de la glace de l'Antarctique de l'Ouest dans les deux prochains siècles. Il s'agit d'une catastrophe dont il est difficile d'établir la probabilité mais qui relève d'un scénario plausible.

D'autres conséquences sont plus difficiles à évaluer, comme le risque d'apparition de sécheresses ou de tempêtes dans une région donnée. Le changement climatique ne se produira pas non plus de manière continue : il se manifesterá souvent comme la répétition de plus en plus fréquente d'événements inhabituels ou surprenants pour une région donnée. Le comportement de l'océan constitue aussi, à bien des égards, une inconnue. Le « tapis roulant Atlantique », qui emmène vers le nord l'eau des océans

chauds de l'hémisphère Sud, peut-il se ralentir, voire s'arrêter ? Les modèles soulignent cette possibilité, mais ils divergent sur l'échéance et l'amplitude de cet effet, comme sur ses conséquences pour l'Europe. De même, ces modèles prévoient que les événements El Niño seront plus intenses ou plus fréquents, ce qui rendra encore plus délicates les prévisions climatiques dans la zone Pacifique et, au-delà, dans la bande intertropicale.

La complexité croît encore si l'on cherche à évaluer ce qui pourrait advenir à des horizons plus lointains ou si l'on prend en compte les cycles biogéochimiques. En effet, si les dérèglements climatiques au XXI<sup>e</sup> siècle se manifestent sous la forme d'événements inattendus, combien plus incertains et à certains égards plus redoutables seront les changements qui pourraient se produire au-delà ? Les conséquences des dérèglements climatiques que nous pouvons induire ne s'arrêtent pas en 2100. Il faut s'habituer aux échelles de temps un peu vertigineuses qui sont en cause : le CO<sub>2</sub> émis aujourd'hui va modifier le cycle du carbone pendant un siècle, et les éléments lents du système climatique (océans profonds, glaciers continentaux) verront leur dynamique affectée pendant plusieurs siècles. Certaines de ces évolutions plus lointaines sont potentiellement dangereuses : une fonte de l'Antarctique de l'Ouest n'est pas à redouter au XXI<sup>e</sup> siècle, mais qu'en sera-t-il au siècle suivant ? On peut craindre une déstabilisation d'une partie de la calotte glaciaire, qui repose sur un socle sous-marin, sous l'effet de l'augmentation du niveau de la mer combinée au réchauffement des océans.

Si de tels événements, incertains, devaient se produire, le niveau de la mer ne monterait pas de quelques dizaines de centimètres, mais bien de quelques mètres. Les effets de la complexité de notre système naturel n'ont pas non plus été complètement explorés. Par exemple, la végétation de la planète sert de modérateur à l'augmentation des gaz à effet de serre. On estime en effet que seule la moitié du CO<sub>2</sub> émis est gardée par l'atmosphère. L'autre moitié est absorbée par l'océan et la végétation : quel en sera le devenir si l'efficacité de ce puits naturel de carbone est remise en cause par le changement climatique ?

Des simulations réalisées au Hadley Centre, au Royaume-Uni, et à l'Institut Pierre-Simon Laplace, en France, montrent que le changement climatique pourrait provoquer, à partir de 2050, une augmentation notable de la proportion du CO<sub>2</sub> émis qui reste dans l'atmosphère. Dans le modèle anglais, la végétation meurt même à cette échéance et provoque un réchauffement du climat en 2100 plus important que ceux qui sont envisagés par les scénarios du GIEC.

Nous sommes donc dans une situation où il est plus facile de prédire le caractère inéluctable d'un dérèglement climatique que d'en décrire toutes les caractéristiques. Estimer dans ces conditions les impacts de ces modifications sur nos sociétés relève d'une démarche scientifique très différente qui réclame l'évaluation de la vulnérabilité de nos systèmes économiques, de notre paysage, de notre habitat, de nos ressources à l'aléa climatique, pour confronter cette vulnérabilité à l'éventail finalement assez large des changements possibles. La prise en compte du changement climatique relève ainsi d'une prise de risque collective particulièrement délicate à appréhender.

# 8 Polémiques et groupes de pression

## UN CONTEXTE DIFFICILE ET CONTROVERSÉ

Voici quelques années, un lauréat du prix Nobel de physique déclarait que la science, loin de créer des certitudes, supprimait les mythes pour les remplacer par des mystères! Pour la plupart de nos contemporains, la météorologie et le climat présentent encore cet aspect mystérieux malgré l'amélioration spectaculaire des prévisions. Cette incertitude que les progrès de la recherche atténuent sans jamais l'éradiquer doit être prise en considération.

La majorité des climatologues est convaincue qu'un changement du climat ne pourra être évité au cours du siècle à venir, ce qui leur vaut d'être accusés de représenter un groupe de pression dont le but inavoué serait d'obtenir des crédits. Cet argument est classique, les scientifiques devant rechercher les moyens financiers pour mener à bien leurs travaux. Mais l'argument peut être retourné; la discipline n'attirerait-elle pas des financements plus variés si elle présentait un front moins unanime?

En France, la position et les arguments des scientifiques sont bien acceptés tout d'abord dans la haute administration (la Mission interministérielle sur l'effet de serre dépend du Premier ministre) mais également par les associations et partis écologistes. Bien sûr, les contraintes et les impatiences des uns et des autres ne sont pas les mêmes.

La communauté scientifique est confrontée à un enjeu majeur: comment alerter l'opinion publique en lui dévoilant la complexité des mécanismes et l'existence de questions irrésolues? L'éthique scientifique

procède d'un questionnement rigoureux et progressif qui ne peut impunément être bradé. La vulgarisation du changement climatique requiert de la prudence de la part des scientifiques... qui n'en manquent pas si l'on prête attention aux titres de leurs ouvrages se terminant souvent par l'inévitable point d'interrogation. L'un de nous deux a récemment écrit *L'effet de serre. Allons-nous changer de climat?*

Si les scientifiques, les politiques et même les écologistes sont accusés de former parfois un même groupe de pression, les médias sont, eux aussi, sur la sellette. Dans son article « Journalistes scientifiques sous influence », le journaliste scientifique suisse Suren Erkman renvoie dos à dos ses collègues et les revues scientifiques. Les journalistes, qui doivent souligner les implications économiques, politiques et sociales du changement climatique, sont sensibles aux contraintes de la publicité ou tentés par le sensationnel. Il pourrait même y avoir convergence d'intérêts entre les médias et les revues scientifiques dans le choix de thèmes « à la mode ». On peut porter à l'actif de la dramatisation par les médias une prise de conscience de la société. Si le grand public a découvert les risques liés à l'effet de serre, c'est seulement en raison de la profusion d'articles sur la sécheresse qui frappa les États-Unis d'Amérique durant l'été 1988, trop hâtivement attribuée à l'accroissement de l'effet de serre.

Mais ceux qui dramatisent la situation ne rendent pas nécessairement un meilleur service à la cause qu'ils prétendent servir. C'est le cas des tenants de « l'écologie profonde » qui profitent du débat sur l'effet de serre pour remettre en cause l'habitabilité de la Terre. Pour ce courant de pensée, l'action de l'homme est de toute façon illégitime et y chercher remède est illusoire.

Nous allons illustrer la difficulté inhérente au mélange des débats scientifiques, sociopolitiques et médiatiques en prenant l'exemple de l'amplitude du réchauffement au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Nous examinerons d'abord les arguments scientifiques suggérant que le changement global récent n'a pu se produire autrement que par l'augmentation des gaz à effet de serre, sans exclure par ailleurs une part anthropique. Nous opposerons cette attitude, qui relève du débat scientifique le plus classique et le plus nécessaire, à celle des « bateleurs » de l'environnement qui exhument des hypothèses périmées et mettent systématiquement en doute des faits établis. Cette mouvance polymorphe comprend des médias, des politiques, des écologistes, mais également des « scientifiques » travaillant le plus souvent dans d'autres domaines que le climat. Devant une situation souvent confuse au niveau médiatique, nous partageons l'idée avancée par

la fondation canadienne David Suzuki: « Étant donné les effets désastreux que cela pourrait avoir sur les systèmes climatiques de notre planète et sur la santé humaine, il serait déraisonnable d'exiger des preuves absolues, hors de tout doute, que les émissions dégagées par les combustibles fossiles entraînent un réchauffement du globe. Ce principe de précaution fait partie du concept de développement durable, comme le souligne un article de la Convention de Rio: "Quand il y a risque de perturbations graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique ne doit pas servir de prétexte pour différer l'adoption de telles mesures." »

## **CHANGEONS-NOUS DE CLIMAT ?**

### **UN RÉCHAUFFEMENT EST-IL EN COURS ?**

Un premier sujet de polémique tient à la réalité du réchauffement en cours. Pourtant, savoir si le réchauffement de la Terre est ou non commencé manque d'intérêt car, demain, le réchauffement sera inéluctable! Cependant, le symbole d'un « réchauffement en marche » est tel que le rapport 2001 du GIEC a accordé beaucoup d'importance aux signes du réchauffement et à leurs liaisons avec les activités humaines.

Peut-on prêter crédit aux mesures qui paraissent montrer un réchauffement de 1 °C en un siècle? Ceux qui nient tout réchauffement présentent des arguments qui ignorent le plus souvent les résultats scientifiques. Quelques-uns avancent ainsi l'existence d'« îles de chaleur urbaines » qui seraient privilégiées dans le réseau météorologique; ces anomalies du réseau expliqueraient le diagnostic de réchauffement, un nombre croissant de stations étant progressivement incluses dans le tissu urbain. Cette hypothèse fait abstraction de l'ensemble du travail de la communauté scientifique pour éliminer ce défaut. Si des faiblesses existaient encore dans le réseau de mesures au début du XX<sup>e</sup> siècle, rien de tel ne peut être avancé durant les dernières décennies où ce réchauffement est observé. D'autre part, les mesures de température ne sont pas les seules en cause; le recul généralisé des glaciers, l'élévation du niveau marin étayent l'hypothèse d'un réchauffement qu'il paraît difficile de remettre en question.

D'autres arguments se fondent sur un fait mal expliqué mais incontestable: les radiomètres micro-ondes, en place depuis 1978 à bord de satellites météorologiques, n'ont pas mesuré d'augmentation notable de la température moyenne de l'atmosphère. Pourquoi? Les causes sont multiples. Lorsque cette découverte a été médiatisée, les mêmes mesures montraient même un refroidissement... qui ne fut pas confirmé par les

analyses ultérieures. L'utilisation de la technique micro-onde ne constitue pas une mesure absolue de la température de l'air, beaucoup moins que la mesure de la température des océans dans l'infrarouge. La mesure micro-onde dépend en effet d'une calibration précise des capteurs qui se sont succédé sur les satellites, des variations d'altitude de ces satellites, des incertitudes sur certains capteurs (contenu en vapeur d'eau par exemple). L'inertie thermique de l'atmosphère est faible, sa température varie rapidement, ce qui implique aussi un échantillonnage beaucoup plus fréquent que pour les océans ou la surface terrestre si l'on veut obtenir des séries temporelles cohérentes. D'autre part, la période de suivi est courte, une vingtaine d'années, et inclut des épisodes perturbateurs comme l'éruption du Pinatubo en juin 1991. Enfin, il faut rester attentif à l'interprétation de ces résultats : tout accroissement des gaz à effet de serre de l'atmosphère, s'il entraîne un réchauffement de l'atmosphère près du sol, s'accompagne d'un refroidissement en altitude accentué par la diminution de la couche d'ozone. Ce n'est donc pas le réchauffement de surface qui serait mis en cause mais l'altitude à laquelle la tendance s'inverse. Incontestablement, nous sommes en présence d'un problème complexe qui dépend de la nature des mécanismes dominants ayant agi au XX<sup>e</sup> siècle (forçage solaire? effet de serre?), de celle des rétroactions qui ont pu les amplifier, comme la vapeur d'eau, et des incertitudes qui subsistent sur la mesure elle-même. Cela ne justifie pas la remise en cause de l'ensemble du « dossier effet de serre ».

#### CE RÉCHAUFFEMENT EST-IL D'ORIGINE ANTHROPIQUE ?

L'origine anthropique de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère n'est guère contestée dans le débat public car les faits sont probants. Le niveau jamais atteint des concentrations, le rythme d'accroissement inconnu et les preuves par les analyses isotopiques permettent d'affirmer que ce sont les activités humaines qui en sont la cause. Le débat public, souvent animé, porte donc sur la relation entre l'homme et l'augmentation des températures, même si cet aspect n'est pas fondamental pour la compréhension des dérèglements climatiques futurs, celle-ci étant fondée sur d'autres arguments.

Au cours des dernières décennies, la communauté scientifique a fourni des indications toujours plus nombreuses d'un lien entre les activités humaines et le réchauffement récent de la planète. La solidité de cette hypothèse tient d'abord à la permanence du phénomène : records de température sans cesse battus, études statistiques de plus en plus fines

prouvant la correspondance entre mesures et prévisions pour différents facteurs de forçage, démontrant une relation de cause à effet.

Pour certains, ce réchauffement s'inscrirait dans la logique des fluctuations climatiques qui jalonnent l'histoire de la Terre. Cet argument, maintes fois répété, repose, sous couvert du bon sens (« vous voyez, tout cela n'est pas nouveau »), sur une confusion des échelles de temps et une méconnaissance des moteurs des changements climatiques passés. L'étude de plus en plus fine de carottes de glace de plus en plus longues (le forage de Vostok, en 1999, a ramené une carotte de 3 623 mètres couvrant 420 000 ans d'histoire de l'atmosphère, soit les quatre derniers cycles climatiques) met en lumière des fluctuations climatiques majeures dont la cause astronomique est connue. Le prochain carottage Epica devrait couvrir 800 000 ans. Les archives glaciaires du Groenland soulignent aussi des fluctuations climatiques parfois très rapides. Mais celles-ci apparaissent dans un contexte climatique très différent de celui de notre époque puisqu'elles caractérisent les âges glaciaires où des masses d'eau douce considérables fondent rapidement, modifiant les courants océaniques. À l'opposé, les 5 000 dernières années ont été extrêmement stables. Cette stabilité est aussi d'origine astronomique et durerait encore des milliers d'années... si l'homme n'intervenait pas. Inutile donc de rêver à un nouveau cycle glaciaire pour contrebalancer le réchauffement climatique car les échelles de temps sont totalement différentes: le réchauffement en cours est à l'échelle du siècle, un refroidissement important dans le cadre d'un nouveau cycle glaciaire surviendra peut-être dans 20 000 ans!

Le réchauffement climatique en marche est donc inédit. Bien sûr, l'humanité s'adaptera à ces changements malgré leur rapidité, malgré leur amplitude, comme elle s'est toujours « adaptée » aux épidémies, aux guerres, aux famines.

## **LES FONDEMENTS THÉORIQUES DES PRÉVISIONS**

Les critiques à l'égard des climatologues se doublent souvent d'affirmations péremptoires. L'ingénieur français Yves Lenoir, dans *Climat de panique*, prétend que, sans effet de serre, la température de la surface terrestre ne serait pas de  $-18\text{ °C}$  mais de  $+160\text{ °C}$ ! On pourrait évidemment sourire de cette révolution en physique du rayonnement si un tel ouvrage n'avait pas attiré l'attention des médias et du public francophones. Il s'agit d'un cas intéressant. Bien que l'auteur revendique, à juste titre, l'étiquette de « non-spécialiste du climat », il a tout de même écrit un

ouvrage où se mêlent des réflexions générales, parfois pertinentes, et un essai fondé sur des théories personnelles erronées qui n'ont évidemment jamais été publiées dans la littérature scientifique. Le géographe Marcel Leroux, dans *La dynamique du temps et du climat*, relève également les prétendus errements des services météorologiques qui ne prendraient pas en compte sa théorie des anticyclones mobiles polaires! Pourtant, dépressions et anticyclones constituent une des structures les mieux représentées par les modèles et dont le suivi offre le minimum d'ambiguïté! À partir de là, il nie tout dérèglement du climat « réchauffement dû à l'effet de serre » qui n'est démontré ni par les modèles numériques du climat, ni par les courbes « reconstituées » de la température moyenne, ni par l'évolution du temps examiné à l'échelle régionale ». En publiant un article sur cette hypothèse en mai 1999, *Science & Vie* laisse au lecteur le choix : « Marcel Leroux, un nouveau Wegener ou un nouveau Benveniste? »

De tels excès ont des racines particulières en France où tout contradicteur devient un esprit rebelle donc sympathique parce qu'il s'attaque aux puissants. La communauté scientifique n'en finit pas de payer ainsi des errements auxquels elle est étrangère, comme ceux qui ont conduit le nuage de Tchernobyl à s'arrêter à nos frontières.

#### **D'AUTRES PISTES POUR EXPLIQUER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Existe-t-il d'autres mécanismes qui pourraient expliquer le réchauffement terrestre du dernier siècle? Plusieurs éléments peuvent *a priori* être avancés: le volcanisme, le changement d'usage des sols, etc. Mais nous considérerons ici l'hypothèse régulièrement proposée expliquant, au moins partiellement, que l'évolution en cours serait due à une oscillation naturelle de l'activité solaire portant sur plusieurs siècles.

La constante solaire est inconstante... Les changements de l'activité solaire tiennent à des modifications du champ magnétique de cet astre qui, en plus de l'apparition de taches solaires, entraînent des variations du rayonnement solaire arrivant sur Terre sous forme de vent solaire. La diminution de l'activité solaire pendant le minimum de Maunder (1645-1715) constitue une explication plausible du petit âge glaciaire, surtout si son effet a été amplifié. Indépendamment de l'action de l'homme, un refroidissement du même type pourrait apparaître vers l'an 4000 si un cycle solaire de 2 300 ans est confirmé. Dans ce cas, l'activité solaire augmentera légèrement jusque vers l'an 2800. Pour certains, le réchauffement actuel correspondrait donc à la fin de l'âge glaciaire et à la réponse du climat terrestre à une insolation supérieure.

Une reconstitution du cycle solaire depuis l'année 1610 montre que la constante solaire a augmenté d'un peu moins de  $2 \text{ W.m}^{-2}$  entre 1650 et 1800, et de la même valeur de 1800 à nos jours, ce qui correspond à un « forçage radiatif » (la part de cette énergie agissant sur le climat) compris entre 0,3 et  $0,4 \text{ W.m}^{-2}$ . Dans le même temps, la température s'est élevée d'un quart de degré durant la première période et du double durant la seconde. Ces estimations n'ont pas la précision des mesures directes qui datent seulement de 1996 avec le lancement de la sonde Soho (*solar and heliospheric observatory*) équipée de douze instruments complémentaires et libérée des perturbations atmosphériques. Sur cette courte période d'observation, l'intensité solaire a augmenté de 0,15 %. La plupart des climatologues reconnaissent que cet accroissement de l'irradiance explique une part de l'élévation de la température jusque vers les années 1950. Il est beaucoup plus difficile d'expliquer l'accroissement du réchauffement dans les 30 dernières années par la seule contribution du Soleil. Une contribution partielle, expliquant de 20 à 30 % du réchauffement, paraît un maximum, à moins de faire appel à des mécanismes amplificateurs additionnels.

Certains chercheurs voudraient pourtant faire du Soleil le seul « coupable » du réchauffement climatique. Pour Mike Lockwood et Richard Stamper (Rutherford Appleton Laboratory, Angleterre), c'est l'accroissement du rayonnement solaire depuis 1900 qui aurait provoqué l'augmentation du dioxyde de carbone et, secondairement, de la température, et non l'inverse. Cela est démenti par les mesures isotopiques du  $\text{CO}_2$  atmosphérique qui prouvent l'origine « fossile » de l'augmentation, liée à la combustion du charbon et du pétrole.

Le débat sur d'éventuels processus amplificateurs des effets du Soleil n'est cependant pas clos. La circulation stratosphérique, sensible à l'absorption des ultraviolets, pourrait être affectée par une modification des propriétés spectrales du rayonnement solaire incident. Le rôle du vent solaire, ce flux de particules chargées qu'émettent les éruptions à la surface du Soleil, est également invoqué. Il aurait entraîné une augmentation du champ magnétique de 40 % par rapport à 1964 et de 130 % depuis 1900. Les Danois Knud Lassen, Eigil Friis-Christensen et Henrik Svensmark avancent alors une hypothèse audacieuse en s'appuyant sur le rôle de bouclier à l'égard du rayonnement cosmique des électrons et protons du vent solaire et sur une corrélation qu'ils auraient établie entre les rayons cosmiques et les nuages bas. Reprenant une piste ouverte au siècle dernier par le physicien écossais Charles Wilson, ils proposent la

chaîne d'événements suivante : augmentation du vent solaire  $\Rightarrow$  efficacité accrue du bouclier à l'égard des rayons cosmiques  $\Rightarrow$  moins de nuages bas  $\Rightarrow$  réchauffement. Les données qu'ils produisent à l'appui de leur théorie sont fragiles car elles découlent de mesures encore incertaines de l'insolation et de la nébulosité basse, d'interprétation délicate.

Toutes ces hypothèses sont complexes, indirectes et peu étayées. Mais pourquoi ne pas les envisager puisque la science chemine entre hypothèses audacieuses et réalité des mesures. Il est normal, et même salubre, que de tels débats animent la communauté scientifique. Le lancement de satellites mesurant l'insolation apportera prochainement des faits irréfutables qui mettront peut-être fin à ces polémiques sur le rôle du Soleil ou soulèveront de nouvelles hypothèses. Il n'est pas question d'encadrer le débat scientifique mais d'éviter la confusion entre débat citoyen et débat scientifique. Ces exemples montrent que nos sociétés sont insuffisamment armées pour évaluer sereinement les risques scientifiques et techniques. L'éducation du public, seul remède véritable, doit être menée à long terme avec la coopération des scientifiques de toutes disciplines qui détiennent le « savoir ». L'introduction rapide des concepts du climat et de l'environnement dans l'enseignement secondaire est prometteuse. À plus court terme, les lieux de débat font cruellement défaut, notamment en France où, sauf dans le monde médical, les « conférences de consensus », si développées en Europe du Nord, n'existent qu'à l'état embryonnaire.

# 9 Autour de Kyoto

## DE GENÈVE À KYOTO

La compréhension de systèmes aussi complexes que le couple océan-atmosphère implique une coopération de toute la communauté scientifique. L'Année géophysique internationale de 1957 donne le signal de départ de recherches coordonnées qui portent encore leurs fruits : mesure du CO<sub>2</sub> atmosphérique, suivi d'El Niño, forages polaires, etc. Puis, en 1979, est lancé le Programme mondial de recherche sur le climat soutenu par l'Organisation météorologique mondiale, le Programme des Nations Unies pour l'environnement et le Conseil international des unions scientifiques. Le monde scientifique entre alors dans une ère d'activité intense, associant campagnes de terrain, analyses, expérimentations et modélisations. Cette opération a été complétée par le Programme international géosphère-biosphère, destiné à la renforcer dans les domaines de la chimie, de la biochimie, de l'écologie et de la biologie. Physiciens de l'atmosphère et de l'océan forment maintenant une communauté unique qui coopère, au sein des nombreux programmes internationaux touchant aux climats actuels et passés ou aux cycles des éléments majeurs, avec des chimistes et des écologistes s'intéressant aux écosystèmes terrestres et à l'océan.

La création, en 1988, toujours sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale et des Nations Unies, et à la demande des sept pays les plus riches du monde (Allemagne, Canada, États-Unis d'Amérique, France, Grande-Bretagne, Italie, Japon), du Groupe d'experts intergou-

vernemental sur l'évolution du climat (GIEC, dont l'appellation anglaise est IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]), chargé d'analyser le réchauffement climatique, marque une nouvelle étape dans la mondialisation des recherches et des propositions qui en découlent.

### EN SAVOIR PLUS SUR LE GIEC

C'est à la communauté scientifique que revient la mission d'expertise : évaluer l'information scientifique sur le changement climatique, définir son impact et les mesures de prévention et d'adaptation envisageables. Les chercheurs investissent alors un monde nouveau et les visions du GIEC se sont rapidement imposées :

- la poursuite des émissions de gaz à effet de serre modifiera le climat ; un foisonnement d'indices montre que le réchauffement planétaire des dernières décennies est probablement une première manifestation de cet effet ;
- les sciences sociales entrent en jeu, les aspects économiques, politiques et juridiques devenant les compléments naturels de l'approche des sciences de la vie et de l'univers ;
- les scientifiques, qu'ils le souhaitent ou non, ne peuvent plus rester dans leur « tour d'ivoire ». Toute idée, toute prévision avancée prend un sens politique.

Deux exemples illustrent le lien entre les mondes scientifique et sociopolitique. C'est d'abord, en 1992, le sommet de la Terre à Rio qui propose de stabiliser les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui « empêche toute perturbation dangereuse du système climatique ». Cet objectif n'est pas aisé à atteindre car les recherches des climatologues ne se traduisent pas facilement en termes de danger quantifiable. C'est ensuite la troisième conférence des Parties (Parties signifiant ici pays ou gouvernements) à Kyoto, en 1997, qui matérialise cet objectif et renforce la réponse internationale à l'évolution du climat. Le protocole de Kyoto fixe des objectifs chiffrés juridiquement contraignants de réduction des émissions et met en place un processus de permis d'émission négociables. La quantification de ces objectifs résulte d'un compromis entre ce qui est souhaitable et ce qui est possible sur le plan politique. Les scientifiques se trouvent confrontés à une interrogation cruciale : sera-ce suffisant ? Même si tous les éléments de réponse ne sont pas réunis, il est clair que le protocole de Kyoto constitue seulement une étape dans la mise en place d'un mécanisme international unifié pour réduire les émissions.

Avant tout débat sur sa crédibilité, il faut connaître le fonctionnement du GIEC qui groupe tous les membres des Nations Unies, soit 189 pays en 2000. Son rôle est de synthétiser l'information scientifique et socio-économique du risque de changement climatique provoqué par l'homme. Il comporte trois groupes de travail : le premier sur le fonctionnement du climat et l'appréciation du changement climatique, le deuxième sur la vulnérabilité de la biosphère et du système socio-économique face aux risques du changement climatique, et le troisième sur les scénarios d'émission de gaz à effet de serre et leur variation en fonction de nos souhaits pour le futur (figure 7.1). Les rapports régulièrement édités par le GIEC sont définis plusieurs années à l'avance et subissent des analyses croisées de plusieurs milliers d'experts et de scientifiques. Les rapports d'évaluation, qui mettent en lumière les aspects consensuels et les problèmes encore ouverts, sont approuvés en assemblée plénière avant publication. Outre ces évaluations, le GIEC publie des documents plus focalisés, par exemple sur le rôle des avions ou sur la contribution du changement d'usage des sols, mais qui ne sont pas formellement approuvés par l'assemblée.

C'est, à notre connaissance, une des rares occasions où la prise de conscience politique d'un problème d'environnement a été suscitée par la communauté scientifique et où les chercheurs ont été impliqués aussi avant dans le processus de décision. Bien entendu, le lien entre le diagnostic scientifique qui se conclut par « oui, nous allons vivre un changement climatique lié aux activités humaines » et la décision politique n'est pas simple. Celle-ci doit aussi tenir compte d'autres critères et faire appel à une panoplie de mesures qui touchent aussi bien la modération de l'augmentation de l'effet de serre que l'adaptation de nos sociétés au changement climatique. Le GIEC se limite à une expertise et il ne participe pas aux décisions, qui concernent la conférence des Parties. Cette séparation des fonctions est essentielle. Les scientifiques ne sont pas en mesure d'apporter une solution unique, mais ils nourrissent le débat démocratique. Comment organiser un tel débat est une autre affaire.

## **LE PROTOCOLE DE KYOTO**

### **DES OBJECTIFS CHIFFRÉS**

L'entrée en vigueur du protocole de Kyoto impliquait qu'il soit ratifié avant la fin 2003 par 55 pays représentant au moins 55 % des émissions de CO<sub>2</sub> du monde développé. Au moment où nous écrivons ces lignes, il

ne l'a pas encore été par un nombre suffisant de pays représentant une quantité suffisante d'émissions pour entrer en vigueur. La non-ratification par la Fédération de Russie n'a pas permis de franchir ce cap et il est légitime de se demander si le protocole de Kyoto est mort-né. Ce report de signature de la part de la Russie n'est pas le seul élément qui risque d'empêcher que les objectifs de Kyoto soient atteints. Un des obstacles majeurs tient à ce que les pays en développement, comme la Chine et l'Inde, ne sont pas soumis à une réduction de leurs émissions. Au bout du compte, l'Europe et le Japon constituent les forces motrices du protocole.

Pour réduire de 5,2 % les émissions des gaz à effet de serre entre 2008 et 2012 par rapport au niveau de 1990, le protocole de Kyoto impose à 38 pays industrialisés un objectif national. La triade Union européenne (- 8 %), États-Unis d'Amérique (- 7 %) et Japon (- 6 %) se voit imposer des contraintes voisines. L'Europe s'est présentée unie à la négociation, ce qui lui a permis de répartir elle-même l'effort pour chaque pays : - 21 % pour l'Allemagne mais seulement 0 % pour la France qui part d'un taux d'émission plutôt bas à cause de son parc nucléaire et peut se contenter de maintenir ses émissions à leur niveau de 1990. Ces différences affectent évidemment les autres pays européens : 0 % pour l'Ukraine, + 1 % pour la Norvège et + 10 % pour l'Islande.

Les pays en développement n'ont aucun engagement de ce type, la démarche proposée consistant à fixer un point de départ, 2010, pour déterminer leurs droits. Il est vrai que, pour le moment, les deux tiers des émissions de gaz à effet de serre sont le fait des pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) qui regroupe 30 pays attachés à la démocratie et à l'économie de marché. Les États-Unis d'Amérique rejettent un peu moins de 6 tonnes équivalent carbone par habitant et par an (le Luxembourg également !), l'OCDE environ 3, la France moins de 2, le rejet mondial étant voisin de 1. Cependant, à cause de leur surpopulation, certains pays émergents présentent des émissions qui se rapprochent à grands pas de celles des pays occidentaux, bien que le taux d'émission par habitant soit faible : 0,7 tonne équivalent carbone par personne et par an pour la Chine et seulement 0,5 pour l'Inde. Les pays africains sont très éloignés avec, en moyenne, un rejet de 0,2 tonne équivalent carbone par habitant. Lors des débats Nord-Sud qui constituent et constitueront l'élément essentiel, les Américains interprètent différemment ces données en mettant en avant leur efficacité énergétique. Notons qu'un Américain émet 0,86 tonne de CO<sub>2</sub> pour produire un revenu de 100 dollars quand un Chinois doit en émettre

3,93 tonnes pour produire le même revenu. Mais la monnaie constitue un mauvais étalon de mesure de l'efficacité énergétique car elle ne valorise pas de manière égale les « services rendus » dans des pays aux niveaux de vie si différents.

Si nous citons la plupart du temps le CO<sub>2</sub>, les mesures prises à Kyoto concernent en fait six gaz : le dioxyde de carbone, le plus important des gaz à effet de serre, le méthane, l'oxyde nitreux et, dans une moindre mesure, trois gaz fluorés : les hydrofluorocarbones, les hydrocarbures perfluorés et l'hexafluorure de soufre. La notion de « tonne équivalent CO<sub>2</sub> » permet d'établir une équivalence entre ces gaz. Pour cela, on compare la perturbation radiative associée à l'introduction dans l'atmosphère d'une même masse, par exemple de méthane, et de dioxyde de carbone. Cette comparaison est établie pour un état de référence précis de l'atmosphère (l'ajout d'une certaine quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a un effet différent selon la quantité qui s'y trouve déjà) et pour une échéance donnée puisque les gaz ne demeurent pas éternellement dans l'atmosphère. L'utilisation des tonnes équivalent CO<sub>2</sub>, certes pratique, n'en demeure pas moins ambiguë car la durée de vie des différents gaz, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que le système chimique revienne à son équilibre après perturbation, est éminemment variable : une décennie pour le méthane et l'oxyde nitreux, un siècle pour le dioxyde de carbone, un millénaire pour certains des composés fluorés précités. Le partage de l'effort entre les pays devrait prendre en compte ces aspects de même que les émissions passées de gaz à effet de serre, comme le réclame le Brésil.

Pour parvenir à cet objectif sans freiner le développement, les pays signataires ont choisi deux mécanismes régulateurs :

- la différenciation que nous venons de présenter, puisque les quotas tiennent compte des situations particulières des pays ;
- la flexibilité par l'échange de permis d'émission qui implique la création d'un marché, sujet que nous allons développer.

#### LES PERMIS D'ÉMISSION ET LEUR NÉGOCE

La solution retenue à Kyoto, l'ouverture de marchés de permis d'émission de gaz à effet de serre, tente de réunir les avantages de la norme, qui fixe un objectif quantitatif et incite à la réduction, et de la pénalité, comme la taxe sur l'émission de polluants. Comment atteindre un objectif d'émission donné au moindre coût ? En le faisant exécuter par ceux dont les coûts pour diminuer les rejets de CO<sub>2</sub> sont les plus bas et qui seraient

## Il y a pollution et pollution

De nombreux adjectifs peuvent qualifier une pollution, indiquant le lieu où elle se produit, son origine, sa nature, son mode de répartition. L'effet de serre anthropique, perturbation plutôt que pollution, échappe largement à cela, à la fois par la globalité de son extension et par le caractère différé de ses effets.

Souvent, les catastrophes naturelles ou les atteintes à l'environnement affectent essentiellement les régions où elles se produisent ; c'est le cas des tremblements de terre, des inondations ou des sécheresses associées à une mauvaise gestion de l'eau (l'exemple extrême étant celui de la mer d'Aral), de la pollution des nappes phréatiques, des marées noires, des efflorescences algales, etc.

D'autres catastrophes dépassent les frontières, utilisant les voies aquatique et atmosphérique avec deux exemples emblématiques : l'explosion de la centrale nucléaire de Tchernobyl en Ukraine, le 26 avril 1986, et les éruptions du volcan El Chichón au Mexique, en 1982, et du Pinatubo aux Philippines, en 1991. Si les dégâts les plus graves furent locaux, l'impact de ces catastrophes dépassa largement les frontières, affectant toute l'Europe pour Tchernobyl et entraînant une baisse de la température de toute la planète pour les éruptions. Enfin, certaines perturbations touchent la planète entière sans affecter particulièrement les régions d'origine : la création d'un « trou d'ozone » au-dessus de l'Antarctique liée aux émissions de chlorofluorocarbones est le premier exemple d'une atteinte à l'environnement résultant d'activités diffuses sur l'ensemble du globe.

Les émissions de gaz à effet de serre constituent un cas encore plus complexe, tant par la multiplicité des pollueurs que par la variété des impacts. Dans ce cas, on ne peut plus considérer que la « pollution optimale » soit la pollution zéro qu'il serait politiquement et socialement impossible d'atteindre. Dans le cas de pollutions entraînant des ruptures irréversibles, comme le déversement de cyanure dans un cours d'eau, la pollution zéro s'impose en effet comme le but à atteindre. Mais certaines perturbations « banales » et quotidiennes entraînent des modifications presque imperceptibles à court terme. Tant que ces perturbations ne dépassent pas un certain seuil et ne créent pas de nuisances apparentes, l'immensité et le caractère régulateur des systèmes naturels offrent une relative immunité à l'action de tout pollueur, c'est-à-dire à chacun d'entre nous puisque nous nous chauffons et que nous utilisons quotidiennement notre voiture.

En revanche, quand ce seuil risque d'être dépassé, la nuisance engendre un coût social parfois considérable. Déterminer la solution optimale dépend alors du coût de la dépollution qui permette d'atteindre le seuil d'auto-épuración du milieu. L'augmentation de l'effet de serre par accroissement du rejet de dioxyde de carbone relève de cette problématique mais pose des problèmes encore plus complexes. Nul ne sait avec certitude s'il existe un seuil séparant le domaine où l'effet de serre serait sous contrôle d'un domaine où les perturbations échapperaient à toute prévision. Le seuil de danger, évoqué au sommet de la Terre, demeure une notion imprécise que seule une observation attentive et continue et une compréhension accrue de l'évolution de notre planète permettront de préciser.

« sélectionnés » par l'ouverture d'un marché de ces droits. Sans cette possibilité d'échange de crédits d'émission, chaque pays devrait atteindre les objectifs qui lui sont assignés totalement à l'intérieur de ses frontières. Les entreprises ou les pays à faibles coûts de dépollution seront « vendeurs » puisqu'ils dépasseront aisément l'objectif, ceux aux coûts les plus élevés (ce qui ne signifie pas les plus polluants) seront « acheteurs ». Prenons un exemple : un pays parvenant à faire mieux que son quota (par exemple - 10 % au lieu de - 8 %) pourra revendre un permis d'émettre correspondant à la différence (2 %) à un autre pays qui ne pourrait tenir ses engagements. La logique du marché pénalise ainsi les pollueurs les moins efficaces dans leur effort de dépollution ainsi que les plus gros utilisateurs du bien commun. Ceci resterait incompréhensible si l'on ne tenait pas compte des spécificités de la perturbation par les gaz à effet de serre (encadré ci-dessus) qui explique les atouts de la politique des permis d'émission :

- dans le cas de l'effet de serre, les dommages environnementaux dépendent seulement de la quantité globale des rejets, le lieu d'émission étant indifférent, d'où la logique d'échange entre pays, fussent-ils éloignés ;

- il y a bien minimisation du coût pour un résultat donné. L'application du protocole de Kyoto coûterait aux pays industrialisés 56 milliards de dollars des États-Unis par an sans flexibilité mais seulement 16 milliards de dollars si le marché des permis d'émission était ouvert à tous les pays ;

- elle accentue la probabilité d'atteindre la réduction d'émission des gaz à effet de serre.

Les inconvénients des permis d'émission tiennent principalement au travail de négociation titanesque qui reflète la difficulté de quantifier (et donc de monétariser) les diverses émissions et à la mauvaise adaptation des permis aux sources individuelles. Or, si l'on ne prend pas en compte le chauffage des maisons et les véhicules particuliers, c'est presque la moitié des émissions qui demeurent hors de la convention.

La création d'un marché des permis d'émission porte aussi en elle les risques d'une aggravation de l'inégalité Nord-Sud. Les pays du Sud vendent en quelque sorte leur non-développement et le crédit de pollution qu'ils représentent aux puissances dont l'agriculture et l'industrie sont plus développées. Ce mécanisme recréerait l'exploitation coloniale des ressources naturelles. Le protocole de Kyoto exclut ces dérives en limitant les pays ayant accès au marché, mais la vigilance est de rigueur...

### **UNE NÉCESSITÉ : DÉTERMINER LA « VALEUR DU CARBONE »**

Dans le cadre d'une politique conciliant le coût et l'efficacité, un outil incontournable est le concept de « valeur du carbone » ; c'est le coût des actions à entreprendre pour ne pas émettre une tonne de carbone ou encore pour la faire absorber par un puits. Ce concept permet à la fois d'estimer le coût marginal de réduction des émissions de différents pays et d'analyser les ensembles de pays au sein desquels il y aura création d'un marché de permis d'émission. Le volume d'échanges de permis entre les pays du même ensemble dépend des écarts entre les coûts marginaux de réduction nationaux (valeurs nationales du carbone) et le coût marginal de réduction de l'ensemble des pays (valeur internationale du carbone qui correspond au prix du permis d'émission).

La valeur nationale du carbone est la résultante des coûts marginaux des divers secteurs de l'économie pour un niveau donné de réduction d'émissions. En France, les coûts de réduction diffèrent largement d'un secteur à l'autre. Dans une politique qui privilégierait l'efficacité économique, les secteurs de l'électricité et de l'industrie réaliseraient l'essentiel des réductions nécessaires pour respecter l'objectif de Kyoto. Inversement, si l'on affecte des objectifs identiques à tous les secteurs, la stabilisation des émissions au niveau de 1990 mènera à un coût marginal de réduction très important dans les transports et les services, et à un coût nul pour les secteurs de l'électricité et de l'industrie.

Le concept de valeur du carbone constitue ainsi un outil d'aide à la décision pour les États, tant à l'occasion des négociations internationales que pour définir les politiques nationales. Il contribue en particulier à définir la balance entre les efforts de réduction sur le territoire national et le taux de recours au marché international de permis.

### **UNE POLÉMIQUE : PERMIS D'ÉMISSION OU DROITS À POLLUER ?**

Le débat sur les permis d'émission touche à des valeurs de gratuité, de partage, profondément ancrées dans nos mentalités. Aussi, l'opposition de beaucoup de chercheurs, d'hommes politiques, d'organisations non gouvernementales (ONG) relève-t-elle de considérations morales qui prennent parfois un caractère passionnel. Ainsi, une animatrice d'une ONG, dans son article « L'air n'appartient pas à ceux qui peuvent l'acheter », déclare : « Habituellement, les marchés offrent des biens positifs, que les gens ont envie d'acheter et qui peuvent leur appartenir en propre. Les gros utilisateurs ont pris les devants et suggéré de créer un marché "en négatif", un marché de la détérioration de l'air. Un marché

des “maux” infligés à tous et qui permettra à quelques-uns de continuer à émettre des gaz nocifs dans l’atmosphère. Bref, de faire officiellement ce qu’ils faisaient auparavant à la sauvette. Ce marché constituerait en fait un blanchiment officiel des émissions polluantes que l’on ne pourra plus désormais interdire puisqu’elles auront été “légalement” reconnues comme marchandises. »

Ceux qui trouvent beaucoup d’avantages aux échanges de quotas d’émission le font, au contraire, au nom d’une certaine rationalité. On peut ainsi lire sur le site Internet du Sénat français : « Le principe des marchés de permis n’est pourtant en aucun cas immoral : loin de consacrer un “droit à polluer”, la création de marchés de permis d’émission restreint au contraire la faculté des agents économiques d’émettre du CO<sub>2</sub>, qui était auparavant illimitée. »

Il est normal de constater des désaccords et des inquiétudes, parce qu’il s’agit de créer *ex nihilo* un marché mondial, de changer le concept de la croissance économique et d’organiser l’égalité entre les nations. Toute régulation sur les gaz à effet de serre viole une tendance à la dérégulation qui « triomphe » depuis l’ère Reagan-Thatcher et s’inscrit en faux contre le mot d’ordre des sphères économiques et financières : moins d’État et vive le marché ! Nous verrons que cet adage pourra parfois être retourné en « davantage de marché, plus d’État ». Le protocole de Kyoto, s’il est ratifié, sera historique puisque les pays les plus riches, en acceptant de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, s’engageront en fait à limiter leur croissance matérielle sauf si l’on trouvait une énergie inépuisable et non polluante. Le défi n’est pas moindre pour les pays en développement que l’expansion démographique oblige à une croissance économique bien plus rapide que celle des pays occidentaux à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, qui était seulement de 2 % par an. Même s’ils réclament le bénéfice du libéralisme énergétique auquel les pays occidentaux ont eu droit, ils ne pourront longtemps provoquer une pollution croissante et majeure de la planète. Ce constat de la nécessité d’un développement durable est bien d’actualité aussi dans les pays en développement.

## **COMMENT DIMINUER LES ÉMISSIONS ?**

### **ASPECT TECHNIQUE**

Aucun spécialiste du climat n’est en mesure d’établir un seuil en-dessous duquel nous ne courons aucun danger et au-dessus duquel nous allons avec certitude vers une catastrophe. La plupart des modèles montrent

que les options techniques connues actuellement conduiront, dans un siècle, à des concentrations de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère se situant de 550 ppmv, 450 ppmv ou même moins suivant la politique choisie. Les 6 à 7 milliards de tonnes équivalent carbone émis annuellement dans les années 1990 sont déjà très supérieurs à l'absorption par les puits océanique et terrestre qui est estimée à 3 GtC an<sup>-1</sup>. Revenir à une émission annuelle de 3 GtC devrait stabiliser la teneur en CO<sub>2</sub> autour de 450 ppmv, 60 % de plus qu'à l'ère préindustrielle avec, probablement, un réchauffement de 1 °C.

Une telle cible reviendrait à mettre à disposition de chaque habitant de la Terre, chaque année, un « capital » de 500 kilogrammes de CO<sub>2</sub> fossile : le dixième de la consommation d'un Américain, le quart de celle d'un Français... mais le double de celle d'un habitant du Sahel. Un aller-retour entre Paris et New York suffit à atteindre ce plafond.

Cette réduction des émissions de gaz à effet de serre peut être atteinte de différentes manières suivant les pays et les régions du monde. Elle implique des améliorations techniques et des transferts de technologie. Pour le secteur crucial de l'énergie, une telle stabilisation nécessite l'introduction de techniques efficaces pour son transport et son utilisation ainsi que la mise en place d'énergies émettant peu ou pas de carbone. Aucune option technique unique ne permet d'atteindre ces objectifs.

#### ASPECT ÉCONOMIQUE

En théorie, la puissance publique peut intervenir de deux manières dans le domaine économique. Elle peut soit adopter une attitude autoritaire et imposer des règles en fonction du principe pollueur-payeur (réglementation ou taxation), soit adopter des solutions de marché qui incitent les décideurs privés à résoudre eux-mêmes le problème. Il est admis, et c'est le cas pour l'administration française, qu'une opposition idéologique entre réglementation et taxation n'a guère de signification car, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, il faut absolument recourir aux deux mécanismes :

- *la réglementation* impose des normes de pollution ou de dépollution. Chaque entreprise, sous peine de sanctions, doit diminuer sa consommation d'un certain pourcentage. C'est l'approche la plus naturelle, très pratiquée, même si elle atteint rapidement ses limites, moins en raison des fraudes que de sa rigidité au regard des évolutions techniques. Cette politique peut aller jusqu'à l'interdiction totale, par exemple celle du rejet d'un produit toxique dans une réserve d'eau. Pour une telle pollu-

tion, les coûts externes pour la collectivité sont infiniment supérieurs aux avantages pour le pollueur ; alors le gouvernement interdit tout simplement un tel comportement. Mais nous sommes loin de cette simplicité dans le cas des gaz à effet de serre ;

- *la taxation* consiste à imposer chaque tonne d'équivalent carbone émise pour que les entreprises aient intérêt, pour limiter les coûts, à diminuer au maximum leurs émissions. Comme elles s'arrêtent dès que le coût de réduction est inférieur à celui de la taxe, en fixant la taxe, on règle le compteur, le « taxostat », sur le niveau de réduction souhaitée. Ce mode d'action souffre cependant d'un grave inconvénient : le coût de l'obtention des informations nécessaires pour fixer le niveau des taxes. Cette méthode peut être affinée avec, à côté de la taxation des activités négatives, des subventions aux activités positives, comme la réduction d'une pollution. On se rapproche alors du système d'échange des permis d'émission ;

- *les accords négociés* peuvent constituer une solution intermédiaire et équilibrée. Toute branche professionnelle, tout pays peut soit acheter soit vendre des permis. Le système reste équilibré car un permis peut s'acheter seulement auprès d'une entité qui a dépassé ses objectifs et qui vend le dépassement à une autre entité qui peine à les atteindre. Il faut donc organiser un « marché » pour mettre en contact acheteurs et vendeurs. Ce marché et ses règles de fonctionnement constituent la base même du système des permis d'émission négociables adopté à Kyoto puis confirmé à Buenos Aires.

Voyons quelles sont les pierres d'achoppement de la mise en œuvre du protocole de Kyoto :

- la position des États-Unis d'Amérique qui, lors de la signature à Buenos Aires du protocole de Kyoto, ont annoncé que ce protocole ne serait pas soumis au Sénat aux fins de ratification tant que la participation des grands pays en développement ne serait pas plus importante. Depuis l'élection de George Bush, la politique des États-Unis d'Amérique se durcit encore. Dans sa déclaration du 14 février 2002, le président Bush reconnaît « que des facteurs humains contribuent au changement climatique ». Mais il considère que la croissance économique doit être poursuivie ; elle est « la clé du progrès environnemental parce que la croissance fournit les ressources permettant d'investir dans les technologies propres ». Autrement dit, la croissance est la solution et non le problème. Le discours se termine ainsi : toutes les mesures approfondies sont reportées à... 2012 si « leurs progrès sont insuffisants et qu'une science fiable le

justifie ». Il s'agit là d'une manière insidieuse de détourner le débat scientifique ; en remplaçant la question « une poursuite des émissions de gaz à effet de serre modifiera-t-elle le climat? », pour laquelle la réponse largement majoritaire des chercheurs est « oui », par « les effets de l'augmentation des gaz à effet de serre sont-ils déjà perceptibles? », où la réponse reste incertaine... même si elle l'est de moins en moins. La position des États-Unis d'Amérique se situe bien dans la logique des propositions du GIEC qui indiquent que les nations prendront leurs décisions en tenant compte non seulement des conséquences économiques et environnementales mais également de l'attitude de leur société à l'égard des risques, terrain où il y aura inéluctablement une amélioration des certitudes scientifiques dans une dizaine d'années, ce qui n'apporte pas de solution au problème posé actuellement ;

- le Canada, longtemps derrière son grand voisin, considère cette politique comme insuffisante mais il a néanmoins signé le protocole à la fin de l'année 2002. Même si on estime incertaine l'ampleur du réchauffement climatique, le coût de la réduction des émissions sera bien moindre en agissant dès 2002 plutôt qu'en 2012. Il sera alors temps d'infléchir cette politique dans un sens ou dans l'autre suivant que l'on se situe au-dessus ou en-dessous du seuil de modification du climat. En d'autres termes, Kyoto propose une architecture internationale à long terme pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre mais personne ne connaît exactement les effets sur le climat si les objectifs de Kyoto sont atteints. Les États-Unis d'Amérique prétendent, et certains modèles économiques le montrent, que cela coûtera moins cher plus tard, notamment en raison des progrès techniques. Cet optimisme, guère partagé en Europe, est sans doute une des caractéristiques les plus remarquables de l'attitude américaine ; ce pari laisse le problème entier à court et à moyen terme ;

- la demande pressante de certains pays, dont le Canada, les États-Unis d'Amérique et la Fédération de Russie, d'un allègement de leur effort de réduction d'émission de gaz à effet de serre en fonction des puits de carbone biosphériques qu'ils possèdent ou développeront, notamment par agroforesterie. En dehors de la difficulté d'estimation de ces puits et de la durée du stockage, la question même de leur réalité est pourtant discutable (chapitre 5) ;

- la position de certains pays en développement qui n'acceptent pas de diminuer leurs émissions avec un double argument :

- l'accroissement de l'effet de serre est de la seule responsabilité des pays riches. Si la Chine et l'Inde, guides de cette contestation, sont respec-

tivement le deuxième et le sixième pollueur en CO<sub>2</sub>, leur consommation par habitant est faible,

– ils ne voient pas au nom de quel principe ils devraient freiner leur croissance économique, poussée par une forte expansion démographique, et pourquoi ils se priveraient d'utiliser les énergies fossiles dont ils disposent. Au nom du principe d'égalité des nations, ils demandent le bénéfice du libéralisme énergétique auquel ont eu droit jadis les pays occidentaux. Ils ne sont guère convaincus par l'argument des pays industrialisés qui soulignent qu'en leur achetant des permis d'émission, ils les aideront à mettre au point des techniques propres leur permettant d'associer croissance et moindre pollution.

On ne peut analyser ces prises de position sans les inscrire dans deux courants de pensée. Le premier a pour origine la philosophie selon laquelle l'homme doit maîtriser, cultiver, en un mot humaniser la nature. Le second s'enracine dans le romantisme et s'inscrit en réaction au premier ; le « naturel » est ce qui n'est pas encore touché par l'homme. Les plus nombreux et les moins doctrinaires cherchent, par une politique de l'environnement, à protéger l'homme, fût-ce de lui-même. Les autres, tenant de « l'écologie profonde », invitent à inverser la perspective anthropocentriste de l'écologie dite superficielle : l'homme est seulement un des éléments de l'écosphère.

### **TROIS EXEMPLES D'APPLICATION DU PROTOCOLE DE KYOTO**

Tous les pays ne sont pas sur la même ligne de départ pour atteindre les objectifs fixés à Kyoto parce que leurs cibles et leurs politiques industrielles diffèrent. Il fallait certes choisir une date de base, et ce fut l'année 1990, mais certains font remarquer que, en déterminant les futures émissions au niveau récemment atteint, le protocole récompense ceux qui ont historiquement été les plus grands émetteurs. À long (à très long) terme, un accord juste pourrait d'ailleurs être fondé sur des émissions égales par tête.

#### **L'ALLEMAGNE**

Fin 1999, l'Allemagne, qui tient à remplir les engagements de Kyoto, enregistre déjà un recul de 15 % de ses émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à 1990 par la liquidation de l'économie polluante de l'ex-République démocratique allemande. Mais elle émet encore 13 % de CO<sub>2</sub> de plus par habitant que la Grande-Bretagne et 50 % de plus que la France au climat plus doux.

Pour maintenir son développement, l'Allemagne, dont les deux tiers de l'électricité proviennent de la houille et du lignite, compte augmenter d'ici à 2010 la part des énergies renouvelables, notamment l'éolien, pour atteindre le dixième de ses besoins. Même si le remplacement de certaines installations à charbon et à lignite par des centrales à gaz réduira la production de gaz à effet de serre, le problème majeur reste l'abandon de la filière nucléaire. À titre de comparaison, si la France remplaçait d'ici à 2020 ses centrales nucléaires par des turbines à gaz, elle émettrait environ 110 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> de plus et dépasserait alors son quota d'un tiers. En fait, l'Allemagne mise beaucoup sur les économies d'énergie dans les habitations anciennes et dans les usines, le problème majeur demeurant celui du transport individuel.

Pour atteindre ses objectifs, l'Allemagne compte s'appuyer sur une politique dissuasive, avec un impôt écologique sur les carburants, et développer ainsi un savoir-faire dans le domaine de l'environnement, créateur d'emplois et générant des retombées financières.

#### LA FÉDÉRATION DE RUSSIE

La Fédération de Russie n'a pas ratifié le protocole de Kyoto lors de la conférence sur le climat qui s'est tenue en septembre 2003... à Moscou, sans totalement fermer la porte puisque la position officielle des Russes est : « Il n'y a pas de décision sur la ratification, mais nous évoluons vers une ratification. » Plusieurs raisons ont dû motiver cette position alors que Moscou avait promis à maintes reprises cette ratification : l'extension de l'agriculture dans le nord de la Russie et en Sibérie en cas de réchauffement, le retrait des États-Unis d'Amérique, acheteurs potentiels des permis d'émission russes et, surtout, les profits que tirera la Russie de la vente de ses immenses ressources de pétrole et de gaz. La Fédération n'était d'ailleurs pas préparée à la mise en application du protocole de Kyoto. Pourtant, elle pourrait être la grande « gagnante » du marché des pays d'émission. Avec le choix de 1990 comme année de référence, Moscou dispose en effet d'emblée d'un crédit d'émission de près de 1 milliard de tonnes de gaz carbonique qu'elle pourrait céder à d'autres pays ou à des groupes industriels dépassant leur quota. Si elle se trouve en position d'être l'unique vendeur mondial important, c'est en raison de l'effondrement de son économie. En 2010, la Russie ne devrait pas dépasser son niveau d'émission annuel de 1990, soit 2,3 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>. Or, la baisse dramatique de sa production, les fermetures des mines et des conglomerats chimiques et métallurgiques ont entraîné une réduction des

émissions de 30 % en 1997. Outre cet « avantage » initial, la Russie, si elle se redresse, pourrait profiter de la vente de ses droits d'émission pour moderniser ses structures et éviter ainsi l'immense gâchis énergétique qui la distingue de tous les pays industrialisés.

Pourtant, le temps n'est pas à l'optimisme. Tout d'abord, parce que rien ne laisse prévoir la mise en place d'un système sûr, aux normes internationales vérifiables par des experts indépendants, du contrôle des émissions de gaz. C'est pourtant un préalable indispensable à la participation au marché des certificats d'émission. Ensuite, parce que l'économie russe, premier producteur mondial de gaz, troisième producteur de pétrole, est en pleine crise, souffrant d'une panne chronique d'investissement et de l'obsolescence des équipements. Or, ni les autorités russes ni les grandes entreprises (le géant de l'électricité, à lui seul, est à l'origine du tiers des rejets de dioxyde de carbone) n'avancent ne serait-ce qu'une ébauche de stratégie.

#### LA CHINE ET L'INDE

Pour l'instant, la Chine, montrée du doigt, contre-attaque car elle s'accorde le droit d'utiliser ses immenses réserves de charbon. Au rythme actuel, elle deviendra le premier émetteur mondial de gaz à effet de serre vers 2020. Elle est la première victime de ses rejets de polluants, à tel point que, selon l'estimation du World Resources Institute, 9 des 10 villes les plus polluées du monde sont chinoises; cette pollution entraîne 180 000 décès chaque année. La racine du mal est ancienne: c'est l'hégémonie du charbon, puisque la Chine se situe au premier rang avec le tiers de la production mondiale.

Les problèmes de l'Inde sont proches. Ses médias réagissent d'ailleurs avec vivacité à tout écrit sur le rôle du méthane, principalement issu des rizières, ou sur le désormais fameux « nuage brun » qui couvre l'océan Indien en hiver. Ce nuage, issu de la pollution par les deux géants asiatiques, la Chine et l'Inde, a certainement un impact climatique. Mais ce n'est rien à côté de son impact médiatique...

# Conclusion

L'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre constitue l'un des signes majeurs indiquant que notre planète devient peu à peu bien étroite pour une humanité de quelques milliards d'individus. Ce n'est certainement pas le seul : le partage des ressources en eau, la pollution des océans que l'on croyait protégés par leur immensité, la disparition d'espèces animales ou des forêts les plus anciennes constituent aussi des sujets de préoccupations légitimes. Mais l'augmentation de l'effet de serre, plus que tout autre problème, se situe d'emblée à l'échelle planétaire et touche de manière directe l'ensemble des citoyens du monde en nous interrogeant sur le type de développement que nous voulons promouvoir. L'émission des gaz à effet de serre est, pour le moment, le fait d'un petit nombre de pays très industrialisés, mais ces gaz se répartissent ensuite à l'échelle du globe : leur effet est donc sensible partout et en particulier dans des régions particulièrement vulnérables — certains pays pauvres du Sud, qui sont affectés par un climat rude et fluctuant, dans les zones semi-arides ou littorales par exemple. Ces pays dépendent le plus souvent de ressources agricoles locales et leur faiblesse financière les rend incapables de faire face à des situations de crise. La dimension Nord-Sud du problème est compliquée par la situation de certains pays émergents fortement peuplés comme la Chine, l'Inde ou le Brésil, en forte croissance économique, qui commencent à contribuer sensiblement à l'augmentation de l'effet de serre, mais sont encore loin d'avoir rattrapé le niveau de vie et de consommation des pays occidentaux.

Face à cette situation complexe, les scientifiques ont avant tout cherché à exercer leur devoir d'alerte sur un dossier scientifique certes solide et étayé mais dont les éléments essentiels sont en constante évolution. Ils se sont donné pour cela des structures comme le GIEC, certes imparfaites, mais qui existent et fonctionnent, et qui permettent de mettre le suivi scientifique à la portée des décideurs et des citoyens.

L'exemple de l'Afrique, que nous avons présenté car il s'agit d'un continent qui a souffert de variations climatiques importantes au cours des derniers millénaires (alors que la température globale de la planète ne diminuait que légèrement), marquées par la disparition de paysages et de civilisations, montre par une analogie simple ce que pourrait signifier un réchauffement de plusieurs degrés en quelques décennies. Le dernier millénaire est riche en fluctuations climatiques qui sont *a priori* beaucoup plus faibles que celles que nous allons vivre, mais qui ont laissé une empreinte historique durable.

La science ne peut pas prendre à son compte les choix que nous avons à faire car il s'agit de véritables choix de société. Mais les scientifiques doivent donner tous les éléments qui permettent d'éclairer ce débat. Nous avons cherché à montrer dans cet ouvrage, au travers d'exemples nécessairement limités, l'imbrication des différents facteurs scientifiques, socio-économiques, politiques ou culturels. La traduction médiatique du débat scientifique peut aussi facilement déraiser sous l'effet d'enjeux financiers énormes. Notre approche des problèmes environnementaux et, donc, l'« acceptabilité » des mesures à prendre dépendent aussi de la très longue histoire de nos liens avec la nature, de notre perception du rôle qu'y joue l'homme. Elle peut être modulé par une approche très différente de la notion de risque.

Nous espérons que cet ouvrage contribuera à une réflexion sur l'ensemble de ces interactions.

# Glossaire

## Absorption

Action de certains atomes et de certaines molécules consistant à « capter » une partie du **rayonnement électromagnétique** à des **longueurs d'onde** déterminées. L'énergie du rayonnement électromagnétique absorbé « excite » ces structures et augmente leur température. Ainsi, le CO<sub>2</sub> absorbe le rayonnement **infrarouge** de la Terre mais n'absorbe pas le rayonnement du Soleil dans le visible. Les atomes et molécules absorbantes émettent à leur tour du rayonnement lors de la phase de désexcitation ou de refroidissement; ce rayonnement n'a pas la même longueur d'onde que le rayonnement absorbé.

## Aérosol

Suspension dans un milieu gazeux, l'air par exemple, de particules solides (poussières) ou de gouttelettes microscopiques. Le brouillard et les nuages sont des aérosols.

## Albédo

(En latin : blancheur.) Proportion du rayonnement réfléchi par un objet. Un miroir parfait a un albédo de 100 %, la neige fraîche un albédo de 80 % et un **corps noir** parfait un albédo nul.

## Aléa et vulnérabilité

Le risque de toute catastrophe et son coût dépendent de deux facteurs : le phénomène lui-même, plus ou moins dangereux (aléa), et le degré de

fragilité des infrastructures et des organisations économiques et sociales où se produit la catastrophe (vulnérabilité).

### Alizés

Composante de la circulation atmosphérique s'établissant près de l'équateur entre les **anticyclones** subtropicaux des deux hémisphères. Centrés autour de 15° de latitude, ces vents soufflent de nord-est dans l'hémisphère Nord et de sud-est dans l'hémisphère Sud. Les alizés des deux hémisphères convergent à la **ZITC** (zone intertropicale de convergence).

### Anthropique

Résultant de l'activité humaine.

### Anticyclone (anticyclonique)

Anticyclone : région où la pression atmosphérique en surface est maximale. Anticyclonique qualifie un mouvement horizontal tourbillonnaire de l'atmosphère ou de l'océan qui s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord (dans le sens contraire des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud) autour des zones de haute pression.

### Ascendance et subsidence

Ascendance : montée de l'air. En montant, l'air chaud en surface se détend (la pression diminue) et se refroidit. Ce mouvement peut être, par exemple, provoqué par la **convergence** de masses d'air près de la surface, par l'avancée d'un courant chaud sur une masse d'air plus froide (qui résiste plus fortement à l'ascension) ou par l'élévation de la température de l'air au contact d'un océan tropical. Les **alizés**, qui créent une convergence d'air chaud et humide, provoquent une ascendance à l'est des bassins océaniques tropicaux et, en particulier, sur l'Indonésie.

Subsidence : descente vers le sol de l'air à l'ouest de ces mêmes bassins, ce qui crée des aires de haute pression arides.

### Atmosphère

Enveloppe gazeuse qui entoure les planètes. L'atmosphère de la Terre se compose d'azote (77 %), d'oxygène (21 %), d'argon (1 %), de vapeur d'eau, de **dioxyde de carbone** et d'autres gaz en faible quantité. Les phénomènes météorologiques et climatiques se déroulent dans les basses couches de l'atmosphère : dans la **troposphère** (du sol à 7 kilomètres aux

pôles et à 15 kilomètres à l'équateur) et dans la **stratosphère** qui culmine à une cinquantaine de kilomètres.

### **Banquise ou pack (*pack ice* en anglais)**

Surface de mer gelée composée pour 70 à 80 % de glace d'origine marine et issue pour 20 à 30 % des précipitations atmosphériques. Son épaisseur moyenne est de 1 mètre dans l'Antarctique, où durant l'hiver austral elle couvre 25 millions de kilomètres carrés, et de 3 mètres dans l'Arctique.

### **Bilan radiatif**

Résultante de l'ensemble des échanges de **rayonnements électromagnétiques** (absorption, réflexion, émission). Les échanges d'énergie dans l'espace s'effectuant entièrement par rayonnement, le bilan énergétique de la Terre s'identifie à son bilan radiatif qui régit donc l'état thermique de l'enveloppe externe de la Terre (sols, **hydrosphère, atmosphère**).

### **Biogéochimie (biogéochimique)**

Terme quelque peu barbare, traduit de l'anglais, ne désignant pas une science en propre mais l'ensemble des approches biologique (bio), géologique (géo) et chimique (chimie) des processus d'élaboration, de transformation des éléments constitutifs des molécules organiques.

La dénomination « cycles biogéochimiques » est de plus en plus utilisée. Elle désigne l'ensemble des transformations que subit un élément donné (le carbone, le phosphore, le mercure, etc.) dans les différents milieux, y compris au sein de la **biosphère**.

### **Biomasse**

Quantité de matière vivante présente à un instant donné dans un espace ou un volume donnés.

### **Biosphère (biosphérique)**

*Stricto sensu*, ensemble des êtres vivants (végétaux, animaux et micro-organismes) qui peuplent la Terre; il s'agit d'une masse insignifiante (70 000 fois moindre que l'hydrosphère) mais qui, par sa composition et son activité chimique, présente une originalité exceptionnelle. *Sensu lato*, gigantesque système formé par l'ensemble des **écosystèmes** du globe. Dans ce dernier cas, il vaut probablement mieux utiliser le terme **écosphère**.

### Calottes glaciaires

Grands glaciers polaires qui recouvrent actuellement le Groenland et l'Antarctique. En période glaciaire, dans l'hémisphère Nord, la calotte glaciaire recouvre le Canada, le nord des États-Unis d'Amérique et l'Eurasie.

### Carotte de glace

Échantillon de glace obtenu par forage. C'est à compter du milieu des années 1960 que les scientifiques ont compris l'intérêt d'interroger la mémoire de la glace accumulée durant des centaines de milliers d'années notamment au Groenland, dans l'Arctique et dans l'Antarctique. Fin 2002, les Européens ont foré la banquise antarctique au dôme Concordia à plus de 3 000 mètres, ce qui correspond à 700 000 années de climat. Le carottage le plus profond demeure celui réalisé à la station russe Vostok en 1999, également en Antarctique; cependant, cet échantillon permet « seulement » d'analyser les derniers 420 000 ans.

### Cellule (ou circulation) de Hadley

Circulation atmosphérique méridienne marquée par l'**ascendance** d'air chaud et humide (**convection**) au-dessus de la ZITC et par sa subsidence au-dessus des aires de haute pression **subtropicales** où se situe la ceinture des grands déserts.

Les cellules de Hadley et de **Walker** correspondent à deux schématisations différentes d'une même réalité et décrivent la structure en latitude ou en longitude des circulations intertropicales.

### Cellule (ou circulation) de Walker

Circulation atmosphérique de la région équatoriale marquée par l'**ascendance** d'air chaud et humide (**convection**) au-dessus des zones de basse pression situées à l'ouest des océans en zone **intertropicale** et par sa **subsidence** au-dessus des aires de haute pression arides à l'est de ces océans.

Les cellules de **Hadley** et de Walker correspondent à deux schématisations différentes d'une même réalité et décrivent la structure en latitude ou en longitude des circulations intertropicales.

## CFC ou chlorofluorocarbones

Nom générique désignant une molécule d'hydrocarbure (composée uniquement de carbone et d'hydrogène) dans laquelle on a remplacé tous les atomes d'hydrogène par des atomes de chlore et/ou de fluor.

## Chaleur latente (de vaporisation)

Énergie absorbée ou dégagée par une substance lors d'un changement de phase. Ainsi, la fusion, la vaporisation et la sublimation nécessitent un apport d'énergie, alors que la solidification et la condensation (liquide ou solide) libèrent de l'énergie. L'eau joue un rôle capital dans les transferts de chaleur dite « latente » car libérée ultérieurement à son absorption. À 20 °C, 2 500 kilojoules sont nécessaires pour évaporer 1 kilogramme d'eau, la même énergie étant libérée lors de la condensation de 1 kilogramme de vapeur d'eau. À titre de comparaison, il faut 4,18 kilojoules pour chauffer de 1 °C la même masse d'eau (voir **chaleur sensible**).

## Chaleur sensible

Chaleur qui provoque un changement de température d'un corps, à l'exclusion de toute quantité d'énergie correspondant à un changement de phase. C'est la chaleur sensible qui réchauffe l'air au contact des surfaces océaniques ou terrestres.

## Changement global

Issu de l'anglais *global change*. Indique l'ensemble des changements naturels ou **anthropiques** de la Terre, tant dans sa structure physique que biologique, qui, agrégés, sont significatifs à l'échelle globale.

## Chlorofluorocarbones *voir* CFC

## Circulation thermohaline

Courants induits par les différences de densité, elles-mêmes liées aux changements de température et de salinité, entre différentes régions océaniques. Analogie avec l'atmosphère où les vents résultent des différences de pression atmosphérique.

## Climat et climatologie

Climat (du grec *klima* : inclinaison [du Soleil]). La définition grecque : « Ensemble des qualités de l'atmosphère d'un lieu sur une longue durée » demeure valable.

Climatologie : science statistique qui décrit et explique la répartition et l'évolution du temps à des échelles temporelles plus longues que celles prises en compte par la **météorologie**.

**CO<sub>2</sub>** *voir* **Dioxyde de carbone**

**Constante solaire** *voir* **Solaire**

### Convection

Mouvement vertical d'une masse d'air ou d'une masse d'eau résultant d'une instabilité de densité en général d'origine thermique. Dans un fluide chauffé, la partie la plus chaude s'élève, la plus froide descend de part et d'autre, créant une cellule de circulation. Les parcelles d'air qui s'élèvent dans l'atmosphère subissent une variation de densité qui résulte aussi de la dépression à laquelle elles sont soumises et du réchauffement éventuel par dégagement de **chaleur latente**. Ces deux éléments font de la théorie des nuages convectifs une théorie complexe mais capitale pour l'étude de la circulation atmosphérique. Les mouvements de convection engendrent **convergences** et **divergences** qui peuvent également être dénommées **ascendance** et **descendance**.

### Convergence et divergence

La convergence est une zone de rencontre, la divergence une zone de séparation entre deux masses d'air ou deux masses d'eau. Se déroulant dans un plan horizontal, les convergences et les divergences entraînent des mouvements verticaux de compensation.

À l'interface océan-atmosphère, une convergence des vents (**ZITC** par exemple) entraîne une ascendance de l'air à la base de la cellule de circulation. Une convergence des eaux superficielles entraîne, au contraire, une plongée des eaux car on se situe alors au sommet de la cellule de circulation océanique.

### Corps noir

Corps idéal qui absorberait toutes les radiations de n'importe quelle longueur d'onde. La loi de Stefan qui énonce que la quantité d'énergie émise augmente proportionnellement à la puissance quatrième de la température s'applique en toute rigueur seulement au corps noir, même si elle est utilisée pour le Soleil ou pour la Terre.

### Courant des Aiguilles

Issu du courant est malgache, le courant des Aiguilles longe la côte africaine. D'origine tropicale, il rencontre, à la pointe sud de l'Afrique, le puissant courant circumpolaire antarctique portant à l'est. Cette interaction provoque de nombreux tourbillons mais également la formation de vagues géantes.

### Courant de Somalie

Longeant la côte de Somalie, ce courant marin change de direction deux fois par an. Par **mousson** de nord-est, en hiver boréal, il porte au sud et traverse l'équateur. Par mousson de sud-est, durant l'été boréal, il porte au nord avec la vitesse la plus élevée du globe :  $3,5 \text{ m.s}^{-1}$  ; il est alors accompagné d'*upwellings*.

### Courant-jet ou *jet-stream*

Vents d'ouest très violents qui affectent les couches supérieures de la **troposphère**, principalement aux latitudes moyennes.

### Cycle climatique

Ce terme est le plus souvent utilisé pour décrire la succession de glaciations et de déglaciations qui caractérisent le quaternaire. Le cycle climatique couvre l'ensemble constitué par une période **glaciaire** et un **interglaciaire**.

### Cycle solaire *voir* Solaire

### Cyclone (cyclonique)

Cyclone : zone de basse pression peu étendue des régions tropicales dans laquelle l'air s'engouffre en tourbillonnant avec des vents dépassant 200 kilomètres par heure.

Cyclonique qualifie un mouvement horizontal tourbillonnaire qui s'effectue en sens inverse des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord (dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud) autour des zones de basse pression.

### Dépollution *voir* Pollution

### Dépression

Région où la pression atmosphérique en surface est minimale (*voir* Cyclonique).

### Dérive des continents (théorie de la)

Théorie due à Alfred Wegener (1912) selon laquelle les continents, formés de sial, se déplaceraient au cours des temps géologiques sur le sima. Au début de l'ère mésozoïque, ces continents auraient constitué un bloc unique, la **Pangée**. Cette théorie est maintenant intégrée, avec des modifications et des précisions, dans la **tectonique des plaques**.

### Dérive nord-atlantique *voir* Gulf Stream

### Diffraction

Déviation par certains milieux d'un **rayonnement électromagnétique** hors du trajet prévu par l'optique géométrique.

### Diffusion

Modification par certains milieux de la trajectoire d'un **rayonnement électromagnétique** incident dévié dans plusieurs directions.

### Dioxyde de carbone ou gaz carbonique ou CO<sub>2</sub>

Corps composé, gazeux dans les conditions de température et de pression qui règnent sur la Terre, incolore, inodore et soluble dans l'eau. Sa molécule (CO<sub>2</sub>) est formée de l'association d'un atome de carbone (C) et de deux atomes d'oxygène (O).

### Divergence *voir* Convergence

### *Downwelling*

Plongée d'eau de surface, notamment dans les régions océaniques de **convergence**.

### Écologie

Terme créé en 1866 par Ernst Haeckel. L'écologie, ou « science de l'habitat », s'intéresse aux **écosystèmes**, entités formées par l'ensemble d'une communauté et de son milieu (un lac, une forêt, un marais, etc.). L'écologie étudie les interactions des populations animales et végétales entre elles et avec leur milieu : cohabitation, compétition, prédation, parasitisme.

### Écologie profonde

L'écologie profonde (*deep ecology* en anglais) est un courant de pensée qui invite à un renversement de la perspective anthropocentriste de l'écologie

dite « superficielle » (*shallow ecology*). L'homme ne se situe pas au sommet de la hiérarchie du vivant, mais s'inscrit au contraire dans l'**écosphère**. L'écologie profonde exerce une critique radicale de l'humanisme. Afin de bien marquer la rupture avec la tradition libérale qui accorde toujours la préséance au développement sur l'environnement, ses principes se présentent comme « inhumanistes » ou « suprahumanistes ».

## Écosphère

Terme créé en 1958 par Raymond Cole pour désigner la partie de la planète qui renferme l'ensemble des êtres vivants et de leur environnement immédiat ainsi que les processus biologiques de production, de transformation, de destruction.

## Écosystème

Unité fonctionnelle formée des organismes (biocénose) et des facteurs de l'environnement (biotopie) d'une aire ou d'un volume spécifique.

## Effet de serre

Réchauffement de l'atmosphère terrestre résultant de l'**absorption** par des composés comme la vapeur d'eau ou le dioxyde de carbone du rayonnement **infrarouge** émis par la surface de la Terre. Cet effet naturel assure à la Terre une température moyenne de 15 °C. Les activités humaines accroissent cet effet de serre et peuvent ainsi modifier le climat.

## Énergies fossiles

Sources d'énergie constituées dans le passé, comme le charbon, le gaz, le pétrole, et qui se renouvellent seulement à l'échelle des temps géologiques. Leur utilisation revient à émettre en quelques années dans l'atmosphère le carbone qui avait été stocké par **photosynthèse** en quelques dizaines de millions d'années.

## ENSO : El Niño-Southern Oscillation

Oscillation de la pression atmosphérique entre la zone de haute pression du Pacifique central et la zone de basse pression de la région indo-pacifique. Cette oscillation est couplée aux variations de la température de surface de l'océan Pacifique équatorial.

## Environnement

Désigne le « cadre de vie de l'homme » et ses interactions avec la nature et le milieu urbain. Ce terme a été popularisé à partir des années 1960. On parle souvent de « problèmes d'environnement » correspondant à des atteintes portées à la nature lorsque la pression de l'homme devient trop forte.

## Équateur météorologique *voir* ZITC

## Équatorial

Relatif à l'équateur. Régions proches de l'équateur.

## Équinoxe

Moment de l'année où la durée du jour et celle de la nuit sont égales (actuellement le 21 mars et le 21 septembre).

## Excentricité d'une orbite

Cette grandeur permet de caractériser la distance plus ou moins grande qui existe entre le centre d'une ellipse et ses foyers. Plus l'ellipse est excentrique, plus elle est « aplatie » (*voir Paramètres orbitaux de la Terre*).

## Extra-tropicale (zone)

Il s'agit de la partie de la surface terrestre située au nord du tropique du Cancer ou au sud du tropique du Capricorne; elle comprend les moyennes latitudes et les zones polaires.

## « Forçage » radiatif

Le mot « forçage » est un néologisme utilisé par les scientifiques à défaut d'une meilleure traduction du *forcing* anglais. Il désigne l'action qui oblige (qui « force ») un système dynamique à évoluer dans une direction donnée. Prenons l'exemple du **dioxyde de carbone** : il absorbe une partie du rayonnement de la Terre et produit un **effet de serre**, c'est-à-dire un gain connu d'énergie pour la planète. On peut calculer l'augmentation du bilan énergétique de la planète avant qu'elle ne réagisse et s'adapte en se réchauffant : c'est le « forçage » radiatif.

## Force de Coriolis

Force de déviation exercée sur tout mobile en mouvement à la surface de la Terre. Elle est engendrée par la rotation de la Terre autour des pôles. La

force de Coriolis s'exerce perpendiculairement à la vitesse du mobile, à droite dans l'hémisphère Nord, à gauche dans l'hémisphère Sud. Cette force organise une grande partie de la circulation atmosphérique et la circulation océanique à la surface de la Terre.

### Fréons

Nom déposé. Il s'agit de dérivés chlorés et fluorés (**CFC**) de l'éthane ou du méthane utilisés comme agents frigorigènes.

### Gaz à effet de serre

Gaz qui, en raison de leur capacité d'**absorption** importante du rayonnement **infrarouge**, contribuent fortement à l'**effet de serre** (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, etc.). Les activités humaines produisent de tels gaz, notamment le dioxyde de carbone, le méthane et les chlorofluorocarbones, et accroissent ainsi l'effet de serre.

### GIEC

Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC, dont l'appellation anglaise est IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change*) est chargé d'analyser le réchauffement climatique. Il a été créé en 1988 sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale et des Nations Unies à la demande des 7 pays les plus riches du monde : l'Allemagne, le Canada, les États-Unis d'Amérique, la France, la Grande-Bretagne, l'Italie et le Japon.

### Glaciaire (épisode, période)

Période durant laquelle les hautes et moyennes latitudes sont recouvertes de glaciers continentaux. Le pléistocène, la plus reculée des divisions du quaternaire, représente la dernière période de glaciation.

### Gondwana

Cette région du Dekkan, en Inde, a donné son nom à une masse continentale d'un seul tenant du carbonifère au trias. Il regroupait l'Inde, l'Afrique (et Madagascar), l'Australie, l'Amérique du Sud et l'Antarctide. Les preuves de son existence, essentiellement paléontologiques, ont conduit à la théorie de la **dérive des continents**.

## Gulf Stream

Puissant courant océanique de surface né dans le golfe du Mexique. Il grossit entre le cap Hatteras et les Bahamas où son flux atteint  $90.10^6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . En quittant les côtes américaines, une branche s'infléchit vers le sud et se dissipe en de nombreux tourbillons alors qu'une autre continue vers l'est, formant la dérive nord-atlantique qui assure à l'Europe de l'Ouest un climat doux.

## Halocarbures

Nom générique désignant une molécule d'hydrocarbure (composée uniquement de carbone et d'hydrogène) dans laquelle on a remplacé une partie des atomes d'hydrogène par des atomes de gaz halogène (fluor, chlore, brome, iode, astate). Les **HFC**, **PFC**, **CFC** sont des catégories particulières d'halocarbures.

## HFC, ou hydrofluorocarbones

Nom générique désignant une molécule d'hydrocarbure dans laquelle on a remplacé une partie des atomes d'hydrogène par des atomes de fluor.

## Holocène

Période actuelle qui a débuté il y a environ 10 000 ans. Elle fait suite au **pléistocène**, première phase du quaternaire.

## *Homo sapiens sapiens*

Cet ensemble, souvent appelé « Hommes modernes », regroupe toutes les populations humaines vivantes et toutes celles qui les ont précédées et qui leur étaient très similaires depuis environ 100 000 ans. Les plus anciens fossiles viennent d'Afrique de l'Est (vallée de l'Omo) et, surtout, du Proche-Orient (grottes de Qafzeh et de Skhul, en Israël). Cette sous-espèce est proche de l'*Homo sapiens* mais sa capacité cérébrale est plus élevée ( $1\,450 \text{ cm}^3$ ) et les superstructures osseuses du visage allégées.

## Hydrosphère

Ensemble de toutes les fractions de la planète impliquées dans le cycle de l'eau : mers et océans, glaces, surface des continents, atmosphère et biosphère. Estimée à 1,410 milliard de kilomètres cubes, l'hydrosphère est constituée à 97,5 % d'eau salée. Près des trois quarts de l'eau douce sont sous forme de glace, le quart restant se situant dans le sol. Finalement, les eaux de

surface qui conditionnent l'existence des écosystèmes aquatiques et régulent les activités humaines représentent seulement 0,6 % des eaux douces.

### Infrarouge

**Rayonnement électromagnétique** dont la longueur d'onde est comprise entre 0,8 micromètre et 1 millimètre (1 000 micromètres).

### Interglaciaire (épisode, période)

Période souvent très courte du **pléistocène**, ne dépassant jamais de 15 000 à 25 000 ans, séparant deux périodes **glaciaires** et durant laquelle la Terre connaît un climat plus chaud.

### Intertropical

Appartenant à la zone comprise entre les deux tropiques (Capricorne au nord, Cancer au sud), incluant donc la zone **équatoriale**.

### Irradiance

Quantité d'énergie solaire arrivant par unité de surface plane et par unité de temps. Exprimée en  $J.m^{-2}.s^{-1}$ .

### Isotopes

Éléments chimiques de même numéro atomique (donc de même nom et de même position dans la classification des éléments) mais qui diffèrent par leur masse atomique.

### Isotopique (analyse)

Procédé qui consiste à mesurer les proportions respectives des divers **isotopes** d'un même élément dans un milieu. Cette méthode permet de reconstituer les conditions qui régnaient au moment de la formation du composé chimique contenant les isotopes mesurés.

### Jets atmosphériques ou courants-jets

Il s'agit de vents rapides (jusqu'à quelques centaines de kilomètres par heure) prenant place dans la haute atmosphère.

### Jupiter voir Planètes géantes

### **Kelvin (degrés) ou K**

Unité légale de température absolue, de symbole K, dont le zéro correspond à un matériau qui ne posséderait plus aucune énergie thermique (limite théorique impossible à atteindre). Les degrés Kelvin s'obtiennent en rajoutant 273,15 aux degrés Celsius (avec lesquels l'eau gèle à 0 °C).

### **Kuroshio**

Ce terme signifie en japonais « courant noir », ce qui souligne son oligotrophie. Ce courant superficiel chaud de bord ouest est similaire au **Gulf Stream** en Atlantique. Il baigne les côtes du Japon puis se prolonge par la dérive nord-pacifique qui, à l'image de la dérive nord-atlantique, assure aux côtes américaines une douceur climatique semblable à celle de l'Europe de l'Ouest.

### **Lithosphère**

Partie externe et rigide de la Terre, par opposition à l'**atmosphère** (gaz) et à l'**hydrosphère** (eau). Épaisse d'une centaine de kilomètres, elle comprend la croûte terrestre et le manteau supérieur.

### **Longueur d'onde voir Onde**

### **Maillage et maille**

Le maillage est une opération d'échantillonnage qui permet de limiter les valeurs étudiées d'un milieu à celles qui existent aux nœuds d'un filet imaginaire (en deux ou trois dimensions). Cette étape est indispensable à la modélisation car un ordinateur ne sait pas gérer directement un milieu continu qui contient une infinité de points.

### **Mars voir Planètes telluriques**

### **Météorologie**

Science des phénomènes atmosphériques qui permet de prévoir l'évolution du temps sur une durée courte (quelques jours) en fonction de conditions initiales bien déterminées.

La prévision météorologique se fonde sur une simulation numérique de l'évolution de l'atmosphère calculée à partir d'informations délivrées en permanence par un réseau de points d'information disposés suivant une maille qui, souvent, est de l'ordre de la dizaine ou de la

centaine de kilomètres. Le passage à une maille kilométrique nécessiterait une puissance informatique multipliée par 10 000 !

## Méthane

Hydrocarbure saturé, le méthane ( $\text{CH}_4$ ) est le plus simple des alcanes. C'est un gaz incolore, d'odeur légèrement alliagée. On obtient des produits de substitution par remplacement d'un ou de plusieurs hydrogènes par des halogènes. Il se forme par fermentation au cours de la décomposition des matières organiques, d'où son appellation de « gaz des marais ».

## Micro-onde

**Rayonnement électromagnétique** dont le domaine de longueur d'onde se situe entre l'**infrarouge** (1 cm) et les ondes radio qui débutent à quelques mètres.

## Modèle

Représentation idéalisée d'un phénomène naturel permettant de le comprendre ou de le prédire. Le modèle ne cherche pas à reproduire tous les aspects du phénomène naturel. Il peut être purement conceptuel (exprimant l'imbrication de quelques idées simples en physique) ou utiliser une forme mathématique de simplicité très variable en utilisant des équations pour traduire les phénomènes. La résolution de certains modèles mathématiques impose le recours à des ordinateurs; on parle alors de modèles numériques.

## Modèle climatique

Les modèles climatiques permettent de reconstituer une « planète numérique » qui fonctionne de manière comparable à la vraie planète mais sur la base d'équations. Ces modèles couplent des représentations de l'atmosphère, de l'océan, des glaces de mer ainsi que des processus biogéochimiques. Ils ont une histoire qui diffère de celle de la planète réelle mais le climat (les conditions moyennes en un lieu donné) qu'ils prévoient est, au contraire, de plus en plus réaliste.

## Modèle météorologique

Les modèles météorologiques sont des **modèles numériques** de l'atmosphère utilisés dans une perspective de prédiction. La détermination de l'état de l'atmosphère « initial » (à partir duquel se réalise la prévision) constitue une difficulté importante. Elle met en jeu des techniques mathé-

matiques complexes pour tirer partie d'un réseau d'observations mondial en temps réel. La durée de prévision fiable ne pourra jamais dépasser une dizaine de jours, limite dont les modèles actuels se rapprochent pas à pas.

### Modèle numérique

Les modèles numériques (*voir aussi* **Modèle**) sont utilisés dans une grande variété de disciplines, depuis l'aéronautique ou la construction d'une voiture au génie civil, à la chimie ou à l'économie. Les équations de la circulation océanique ou atmosphérique (ou celles du mouvement des glaciers) ne peuvent pas se résoudre de manière directe. Les ordinateurs permettent de calculer des solutions aux nœuds d'un maillage qui a un pas de quelques centaines de kilomètres à l'horizontale et quelques dizaines de niveaux verticaux. Toutes les échelles plus petites que la maille sont traitées de manière statistique, ce qui constitue une limitation de ce type de modèle. Depuis les années 1950, mais surtout durant la dernière décennie, le développement de l'informatique a permis un progrès considérable de ces modèles numériques; elle se poursuit encore. L'arrivée d'une nouvelle génération d'ordinateurs (l'*earth simulator* japonais) devrait encore accroître le réalisme de ces outils. Les modèles numériques sont utilisés comme outils de prévision mais également comme outils d'analyse et de mise en cohérence des données climatiques, très nombreuses mais souvent disparates.

### Mousson

Nom donné à des vents saisonniers (de l'arabe *mausim* qui signifie saison). Ce terme fut appliqué à l'origine aux vents au-dessus de la mer d'Arabie qui soufflent de sud-est en été et de nord-est en hiver.

### Nappe phréatique

Eau contenue dans un aquifère peu profond et dont le trop-plein peut donner naissance à une source. Généralement libre, cette nappe peut également être « en charge » si les terrains de couverture sont peu perméables.

### Nilomètre

Système de mesure de la hauteur du Nil. De différentes formes (pilier, fontaine ou série de marches), les nilomètres étaient calibrés avec la même unité de mesure, la coudée, subdivisée en unités plus petites. Celui qui a été implanté près de la première cataracte à l'île Éléphantine dans le

temple de Khnoum, le dieu de la fertilité, donc des inondations, revêtait une importance suprême car c'était le poste avancé de contrôle des crues. Il a été remplacé et déplacé à plusieurs reprises notamment durant la XXVI<sup>e</sup> dynastie puis à l'époque romaine où il fut de nouveau calibré et recouvert d'un toit de granite.

### Niña (La)

Épisode d'**ENSO** durant lequel l'indice de l'oscillation australe est fortement positif. S'observent parallèlement une activation de la **cellule de Walker** du Pacifique et un refroidissement marqué des eaux de surface dans le Pacifique est et près de l'équateur, ce qui correspond à une activation de la remontée d'eau côtière et de la divergence équatoriale.

### Niño (El)

Initialement, courant marin chaud superficiel dirigé vers le sud, se développant parfois au large des côtes d'Amérique du Sud (Équateur-Pérou). Maintenant, ce terme désigne l'épisode d'**ENSO** caractérisé par un indice de l'oscillation australe fortement négatif et des températures océaniques anormalement chaudes à l'équateur et à l'est du Pacifique ainsi qu'un affaiblissement de la **cellule de Walker**.

### Obliquité

Cette grandeur caractérise l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur le plan de son orbite (que l'on appelle encore plan de l'écliptique). *Voir Paramètres orbitaux de la Terre.*

### Onde

Associant une perturbation magnétique et une perturbation électrique, une onde électromagnétique peut être définie par :

- sa longueur d'onde (distance séparant deux pics successifs) qui s'exprime en mètres ;
- sa fréquence (nombre de perturbations par seconde) qui s'exprime en hertz.

### Organique

Se dit de substances composées essentiellement de chaînes d'atomes de carbone et liées à la vie ou qui l'ont été.

### Oscillation australe *voir* ENSO

## Ouverture et fermeture d'un océan *voir* Tectonique des plaques

### Ozone

Corps simple, gazeux dans les conditions de température et de pression qui règnent sur Terre, de couleur bleue, à l'odeur forte, très soluble dans l'eau, très toxique; c'est un oxydant puissant et un bactéricide. Sa molécule (O<sub>3</sub>) est formée de trois atomes d'oxygène (O). Présent dans les hautes couches de l'atmosphère où il se forme en permanence, l'ozone absorbe certaines des radiations ultraviolettes solaires dont il protège les organismes vivants de la planète.

### Ozone (couche d', « trou » d')

L'ozone (O<sub>3</sub>), que l'on rencontre dans toute l'épaisseur de l'atmosphère, présente deux couches de concentration maximale :

- dans la **troposphère** avec un maximum près du sol car sa production dépend de la concentration, en augmentation actuellement, des hydrocarbures (méthane, monoxyde de carbone) et des oxydes d'azote ;
- dans la **stratosphère** où il se forme par photolyse du dioxygène moléculaire. Sa concentration est proportionnelle au flux de photons, qui augmente avec l'altitude et à la concentration en O<sub>2</sub> qui, au contraire, diminue. La production d'ozone passe donc par un maximum vers 25 kilomètres d'altitude, formant la « couche d'ozone ».

Les activités **anthropiques** conduisent à une augmentation des teneurs en protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) et en dérivés chlorés issus des **CFC** qui conduisent à une destruction de l'ozone stratosphérique marquée entre 35 et 40 kilomètres d'altitude, particulièrement intense dans les conditions de froid permettant l'apparition de nuages stratosphériques polaires. Ceci a entraîné l'apparition d'un « trou d'ozone » à partir du début des années 1980 au-dessus de l'Antarctique. La réduction (1992) puis l'arrêt (1998) de la fabrication des CFC a permis la stabilisation de leur concentration atmosphérique.

### Pack *voir* Banquise

### Pangée

Continent unique (du grec *pan* : tout et *gê* : terre) existant à la fin du paléozoïque et qui s'est ensuite séparé en Laurasie au nord et **Gondwana** au sud.

## Paramètres orbitaux de la Terre

Éléments qui définissent la forme de l'orbite terrestre, sa distance moyenne par rapport au Soleil et l'orientation de son axe de rotation par rapport au plan de l'orbite. La forme de l'orbite terrestre, très proche d'une ellipse, est définie par son demi-grand axe et son **excentricité**. L'orientation de l'axe de rotation est déterminée par l'obliquité (angle de cet axe avec la normale au plan de l'orbite terrestre) et par la position de cet axe sur un cône qui est décrit en 26 000 ans.

## Pélagique

Qualifie le milieu de pleine eau et la vie qui s'y déroule. Le pelagos comprend le plancton et l'ensemble des organismes nageurs (céphalopodes, poissons, mammifères, etc.) qui forment le necton.

## Permis d'émission

Le protocole de Kyoto (1997) a fixé des objectifs quantitatifs contraignants en matière d'émission de gaz à effet de serre. La solution retenue pour y parvenir est l'ouverture de marchés de permis d'émission. Si un pays « fait mieux » que le quota qui lui a été fixé, il peut revendre un permis d'émettre correspondant à la différence entre son émission réelle et son quota.

## PFC ou perfluorocarbones

Nom générique désignant une molécule d'hydrocarbure (composée uniquement de carbone et d'hydrogène) dans laquelle on a remplacé tous les atomes d'hydrogène par des atomes de fluor.

## Photochimique (réaction)

Une réaction photochimique est une réaction chimique qui nécessite du **rayonnement électromagnétique** (par exemple de la lumière) pour se produire.

## Photosynthèse

Processus au cours duquel les végétaux convertissent de l'énergie lumineuse en énergie chimique. Ils utilisent l'énergie solaire, le **dioxyde de carbone** de l'atmosphère et de l'eau pour élaborer, dans leurs tissus, les matières **organiques** dont ils ont besoin pour leur métabolisme et leur croissance.

**Phytoplancton**

Plancton végétal formé d'organismes microscopiques photosynthétiques dont la taille est comprise entre moins de 1 millièmètre de millièmètre et 1 millièmètre.

**Plancton**

Organismes vivant dans la pleine eau (milieu **pélagique**) dont les déplacements sont faibles comparés à celui des masses d'eau.

**Planètes géantes**

Planètes constituées essentiellement d'hydrogène moléculaire, une dizaine de fois plus grosses que la Terre, comme Jupiter et Saturne.

**Planètes telluriques**

Planètes du type de la Terre formées de matériaux silicatés et dont la densité varie entre 3,9 (Mars) et 5,5 (la Terre). La plus petite, Mercure, a un diamètre de 2 439 kilomètres, la plus grosse, la Terre, de 6 378 kilomètres.

**Pléistocène**

Débutant il y a un peu moins de 2 millions d'années, cette période, qui marque le début du quaternaire, se différencie du cénozoïque qui l'a précédée par l'évolution des hominidés et la succession de périodes glaciaires.

**Pollution et dépollution**

La pollution est l'ensemble des perturbations apportées à l'environnement par les déchets de la vie quotidienne et de l'activité productive. Elle touche les différents milieux, l'air, l'eau, les sols, les océans et même le sous-sol et les nappes d'eau souterraines.

La lutte antipollution est désormais une des tâches majeures de nos sociétés et la dépollution (réparation des pollutions) génère une nouvelle industrie, un nouveau savoir-faire.

**ppm ou ppmv**

Parties par million (en volume) ; 1 ppmv vaut  $10^{-6}$  fois l'unité ou encore 0,0001 %.

## Précession des équinoxes

La direction de l'axe de rotation de la Terre, fixe au cours d'un cycle saisonnier, détermine deux équinoxes et deux solstices (d'hiver et d'été). La position de ces solstices et de ces équinoxes se déplace progressivement dans l'ellipse que forme la trajectoire de la Terre autour du Soleil, avec une périodicité de 20 000 ans environ. On appelle ce processus la « précession » des équinoxes. Voir **Paramètres orbitaux de la Terre**.

## Production primaire

Quantité de matière vivante produite par des organismes autotrophes (producteurs primaires) par unité de surface (ou de volume) et unité de temps.

## Protocole de Kyoto

Accord élaboré en 1997 lors de la conférence sur le réchauffement climatique tenue en 1997 à Kyoto. Ce protocole fixe à chaque pays des objectifs chiffrés, juridiquement contraignants, de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Son entrée en vigueur impliquait qu'il soit ratifié avant 2002 par 55 pays représentant au moins 55 % des émissions de CO<sub>2</sub> du monde développé.

## Quota d'émission

Le protocole de Kyoto vise à réduire de 5,2 % les émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012 par rapport au niveau de 1990 grâce à un objectif national pour chaque pays : - 21 % pour l'Allemagne, 0 % pour la France, etc. Les pays en développement n'ont aucun engagement de ce type, la démarche proposée constituant à fixer un point de départ, 2010, pour déterminer leurs droits.

## Rayonnement électromagnétique

Il s'agit de l'ensemble des ondes émises par des atomes lorsque ces derniers cèdent de l'énergie à la suite d'une transition entre états. La lumière **visible**, les **infrarouges**, les **ultraviolets**, les ondes radio, les rayons X et gamma sont des exemples de rayonnements électromagnétiques, de longueurs d'onde différentes. On parle de rayonnement solaire (voir **Solaire**), de rayonnement terrestre, etc.

## Rayonnement solaire *voir* Solaire

### Réflexion

Changement de direction d'une onde se propageant dans un milieu transparent lorsqu'elle arrive à la frontière avec un milieu opaque. Le rayon réfléchi repart avec un même angle de déviation que le rayon incident (par convention, cet angle est pris par rapport à la normale à la surface réfléchissante). La réflexion peut être totale ou partielle.

### Réfraction

Déviation de la propagation d'une onde passant obliquement d'un milieu transparent dans un autre. L'angle de déviation dépend de l'indice de réfraction des deux milieux ; le rayon subit une plus forte déviation quand il passe dans un milieu dont l'indice de réfraction est plus élevé.

## Remontée d'eau *voir* *Upwelling*

### Sahara

En arabe, *sabra* signifie « zone plate sans eau ». Désert du nord de l'Afrique s'étendant de l'Atlantique à la mer Rouge et de la Méditerranée au Mali, au Niger, au Tchad et au Soudan. C'est le plus grand désert du monde (plus de 9 millions de kilomètres carrés) occupant le quart de l'Afrique et s'élevant jusqu'à 3 300 mètres dans le Hoggar et le Tibesti. La pluviosité annuelle est, en moyenne, inférieure à 50 millimètres et la température maximale atteint 58 °C.

### Sahel

De l'arabe *sahel* qui signifie « rivage », zone de transition entre le **Sahara** et le Soudan. Par son rythme climatique annuel, il appartient au domaine tropical humide. Mais la longueur et la rigueur de la saison sèche le classent aussi dans les régions semi-arides tropicales dont il est l'exemple de référence, en raison de son extension et de sa disposition rigoureusement zonale. Frappé depuis 1967 par des sécheresses aux conséquences dramatiques, le Sahel a suscité un grand mouvement d'intérêt humanitaire et scientifique.

## Saturne *voir* Planètes géantes

## Solaire (constante, rayonnement, taches, vent)

La constante solaire (flux de rayonnement solaire ramené à la distance moyenne Soleil-Terre) vaut 1 368 watts par mètre carré. À l'échelle de l'histoire de la Terre, elle a probablement fortement varié (augmentation de plusieurs dizaines d'unités de pourcentage). Sur la période beaucoup plus courte où l'on a su la mesurer, elle varie de moins de 0,1 %. Mais cette variation, qui reflète les fluctuations de l'activité solaire, existe et son impact climatique reste un sujet de débat.

On observe un grand nombre de centres actifs (taches solaires) durant des périodes se répétant tous les 11 ans. La montée de chaque cycle, qui dure 4,5 ans, est plus rapide que sa descente (6,5 ans). La périodicité est en réalité de 22 ans en raison du comportement parfois inversé des deux hémisphères solaires. L'activité solaire et le cycle sont liés à la régénération du champ magnétique à l'intérieur du Soleil.

Les effets de l'activité solaire sur la haute atmosphère terrestre sont spectaculaires lors des grandes éruptions. Les vecteurs impliqués sont de trois sortes : le **rayonnement électromagnétique**, les particules ionisées et les perturbations dues au vent solaire.

## Stratosphère

Couche de l'atmosphère qui se situe au-dessus de la **troposphère** et se termine vers 50 kilomètres d'altitude. Elle est caractérisée par le fait que la température augmente quand on s'élève; ce réchauffement est dû à l'absorption des **ultraviolets** par l'**ozone**.

## Subsidence *voir* Ascendance

## Subtropical

Régions du monde situées vers 30° de latitude, juste au nord du tropique du Cancer (23,5° N) et au sud du tropique du Capricorne (23,5° S).

## Tache solaire *voir* Solaire

## Tectonique des plaques

Théorie suivant laquelle la lithosphère (croûte terrestre) est fracturée en plaques qui se déplacent les unes par rapport aux autres, entraînées par les courants de convection du manteau. Les vitesses de déplacement des plaques vont de 1 à 20 centimètres par an. Les déformations qui se

produisent dans l'écorce terrestre se déroulent uniquement entre les plaques ou à leurs bordures :

- mouvements verticaux qui modifient les reliefs ;
- mouvements horizontaux avec rapprochement et compression qui donnent naissance aux chaînes de montagnes ;
- mouvements horizontaux avec écartement et distension qui sont à l'origine des rides médio-océaniques et des océans. Ceux-ci constituent donc des zones de distension caractérisées par une activité volcanique importante. L'écartement est compensé par le mouvement des plaques qui se rapprochent ou coulissent

### Téledétection

Étymologiquement « détection à distance ». Utilisée actuellement pour les méthodes faisant appel à des capteurs embarqués à bord d'avions ou, plus souvent, de satellites (téledétection spatiale).

### Température absolue *voir* Kelvin (degrés)

### Thermocline

Le suffixe -cline désigne une couche où les propriétés physiques ou chimiques présentent un fort gradient. La thermocline est donc la zone de forte variation de la température de la mer en fonction de la profondeur ; elle sépare la couche homogène chaude de surface des couches profondes froides.

### Tonne équivalent carbone

Après la tonne équivalent pétrole (unité conventionnelle d'énergie valant 44,6 milliards de joules, ou encore 11 600 kWh, soit l'énergie dégagée par la combustion de 1 tonne de pétrole), a été créée la tonne équivalent carbone. Plutôt que de mesurer le poids de dioxyde de carbone, les économistes ont pris l'habitude de parler d'équivalent carbone. Par définition, 1 kilogramme de CO<sub>2</sub> vaut 0,273 kilogramme d'équivalent carbone, c'est-à-dire le poids du carbone seul dans le composé dioxyde de carbone-gaz carbonique.

Pour les principaux gaz à effet de serre, les équivalents carbone par kilogramme émis sont, pour une échéance à 100 ans :

- dioxyde de carbone                    0,27 ;
- méthane                                    5,73 ;
- protoxyde d'azote                    84,5 ;

- hydrofluorocarbones de 38 à 3 191 ;
- hexafluorure de soufre 6 518.

Cette mesure tient compte de l'absorption infrarouge résultant de l'ajout dans l'atmosphère de 1 kilogramme de corps considéré, comparée à l'ajout de 1 kilogramme de dioxyde de carbone pour une échéance temporelle donnée (puisque la concentration des gaz ajoutés ne décroît pas de la même manière dans le temps).

### Topex-Poséidon

Satellite franco-américain lancé en 1992 qui mesure, grâce à un altimètre, les variations du niveau de la mer au centimètre près. La topographie du niveau de la mer qui en découle est la carte du niveau de la mer par rapport à une surface géométrique de référence.

### Tropical

Appartenant aux régions voisines des tropiques qui sont situés actuellement à 23,27° de latitude.

### Troposphère

Il s'agit de la plus basse couche de l'atmosphère, se terminant à une altitude variant de 7 à 15 kilomètres selon la latitude. Elle est caractérisée par le fait que la température diminue quand on s'élève, phénomène qui s'inverse lorsque l'on passe dans la stratosphère.

### « Trou » d'ozone *voir* Ozone

### Ultraviolet

**Rayonnement électromagnétique** dont la longueur d'onde est comprise entre 0,4 micromètre et  $10^{-8}$  mètre (0,01 micromètre).

### Upwelling

Synonyme de « remontée d'eau », ce terme s'utilise surtout, en français, pour désigner le phénomène côtier où les eaux de surface sont chassées vers le large et remplacées, à la côte, par des eaux « profondes » relativement froides et riches en nutriments. Au large, quand des vents ou des courants provoquent une ascendance de l'eau profonde, le terme **divergence** est généralement préféré.

### Vent solaire *voir* Solaire

## **Vénus voir Planètes telluriques**

### **Visible**

**Rayonnement électromagnétique** dont la longueur d'onde est comprise entre 0,4 et 0,8 micromètre. L'œil humain est adapté seulement à la détection de cette partie du spectre des ondes électromagnétiques.

### **ZITC = zone intertropicale de convergence ou équateur météorologique**

Zone où convergent les alizés des deux hémisphères. Elle se situe, en moyenne, à 5 ° au nord de l'équateur géographique. Sa position varie avec les saisons puisqu'elle se déplace vers le nord durant l'été boréal. Sa position correspond le plus souvent au maximum de température de l'eau de mer superficielle.

# Pour en savoir plus

- Burroughs, W. 2000. *L'encyclopédie du climat*. Lausanne, Delachaux et Niestlé.
- Chapel, A. ; Fieux, M. ; Jacques, J.-M. ; Jacques, G. ; Laval, K. ; Legrand, M. ; Le Treut, H. 1996. *Océans et atmosphère*. Paris, Hachette Éducation.
- Duplessy, J.-C. ; Morel, P. 1990. *Gros temps sur la planète*. Paris, Odile Jacob. (Également en poche, Paris, Le Seuil, Points.)
- Fagan, B. 2000. *Foods, famines and emperors*. Londres, Pimlico.
- . *The little ice age*. New York, Basic Books.
- Fellous, J.-L. 2003. *Avis de tempêtes. La nouvelle donne climatique*. Paris, Odile Jacob.
- Gill, Richardon B. 2000. *Great Maya droughts. Water, life and death*. Albuquerque (New Mexico), University of New Mexico Press.
- Graedel, T. E. ; Crutzen, P. J. 1997. *Atmosphere, climate and change*. New York, Scientific American Library.
- Huet, S. 2000. *Quel climat pour demain?* Paris, Calman-Lévy.
- Jancovici, J.-M. 2002. *L'avenir climatique. Quel temps ferons-nous?* Paris, Le Seuil.
- Joussaume, S. 1999. *Climat d'hier à demain*. Paris, CNRS-CEA.
- Kandel, R. 1998. *Les eaux du ciel*. Paris, Hachette Littératures.
- . 2002. *Le réchauffement climatique*. Paris, PUF.
- Kandel, R. ; Monchicourt M.-O. 2002. *Avis de tempête sur le climat*. Paris, Platypus Press.
- Katz, E. ; Lammel, A. ; Goloubinoff, M. 2002. *Entre ciel et terre. Climat et sociétés*. Paris, IRD/ Ibis Press.

- Lambert, G. 1995. *L'air de notre temps: le climat, les hommes et les molécules*. Paris, Le Seuil.
- Lambert, G. 2001. *La Terre chauffe-t-elle? Le climat de la Terre en question*. Les Ulis, EDP Sciences.
- Le Monde*. 2001. *Coup de chaud sur la planète*. Paris, Librio (n° 449).
- Le Roy Ladurie, E. 1983. *Histoire du climat depuis l'an mil*. Paris, Flammarion (Champs).
- Le Treut, H. ; Jancovici, J.-M. 2001. *L'effet de serre. Allons-nous changer le climat?* Paris, Flammarion (Dominos). Édition revue et augmentée, Paris, Flammarion, 2004 (Champs).
- Leakey, R. ; Lewin, R. 1998. *The sixth extinction*. Londres, Phoenix.
- Lenoir, Y. 2001. *Climat de panique*. Lausanne, Favre.
- Lorius, C. 1993. *Glaces de l'Antarctique*. Paris, Odile Jacob. (Également en poche, Paris, Le Seuil, Points.)
- Magny, M. 1995. *Une histoire du climat*. Paris, Errance.
- Nesme-Ribes, E. ; Thuillier, G. 2000. *Histoire solaire et climatique*. Paris, Belin (Pour la science).
- Nicolet, C. 1996. *L'inventaire du monde. Géographie et politique aux origines de l'Empire romain*. Paris, Hachette (Pluriel).
- Petit, M. 2003. *Qu'est-ce que l'effet de serre?* Paris, Vuibert.
- Petit-Maire, N. 2002. *Sahara. Sous le sable... des lacs*. Paris, CNRS.
- Sadourny, R. 1994. *Le climat de la Terre*. Paris, Flammarion.
- . 2002. *Le climat est-il devenu fou?* Paris, Le Pommier.
- . 2003. *Peut-on croire à la météo?* Paris, Le Pommier.
- Soudière, M. (de la). 1999. *Au bonheur des saisons*. Paris, Grasset et Fasquelle.
- Staszak, J.-F. 1995. *La géographie d'avant la géographie. Le climat chez Aristote et Hippocrate*. Paris, L'Harmattan.
- Vernet, R. 1995. *Climats anciens du nord de l'Afrique*. Paris, L'Harmattan.
- Victor, D. 2001. *The collapse of the Kyoto protocol*. Princeton (New Jersey), Princeton University Press.
- Voituriez, B. 1992. *Les climats de la Terre*. Paris, Presses Pocket.
- . 2003. *Les humeurs de l'océan. Effets sur le climat et les ressources vivantes*. Paris, Éditions UNESCO.
- Voituriez, B. ; Jacques, G. 1999. *El Niño. Réalité et fiction*. Paris, Éditions UNESCO.

■ Il n'est guère de jours où le climat ne fasse la « une » d'un média. Pour certains, journalistes ou scientifiques, le changement climatique est là et l'homme en est responsable. Pour d'autres, s'il s'amorce..., l'homme n'y est pour rien ! Nous présenterons les éléments scientifiques de ce dossier mais aussi la manière dont ils ont conduit à ce débat de société. Comme la plupart des climatologues, nous montrerons que les activités humaines accentuent les concentrations des gaz à effet de serre, étape d'une inéluctable élévation de la température moyenne du globe qui modifiera les climats.

■ Par un langage simple, grâce à une perspective historique et à la prise en considération des aspects humains, *Le changement climatique* explique et démystifie le climat et son évolution actuelle.

■ Avant de découvrir le contexte du changement climatique actuel, nous prendrons de la hauteur en nous penchant sur les rapports entre l'homme et le climat dans différentes cultures. Puis le lecteur se familiarisera avec le fonctionnement de la machine climatique, exercice indispensable pour comprendre les éléments susceptibles de la modifier. Les changements climatiques qu'a connus le Sahara entraîneront alors le lecteur dans une saga débutant il y a des centaines de millions d'années pour s'achever... demain, thème du chapitre suivant qui évoquera les scénarios d'évolution les plus probables. L'étude des polémiques autour du changement climatique nous conduira à décrire les enjeux du « protocole » de Kyoto de 1997, dans ses aspects scientifiques, économiques et politiques intimement liés.

■ Guy Jacques, directeur de recherches au CNRS, est un écologiste marin qui s'est intéressé au rôle de la photosynthèse marine dans le cycle du carbone tant en Méditerranée qu'en milieu tropical puis dans l'océan Austral. Depuis une dizaine d'années, il s'est investi dans l'information scientifique avec notamment la publication d'ouvrages sur les écosystèmes marins, le cycle de l'eau, les échanges entre l'océan et l'atmosphère. Avec Bruno Voituriez, il a publié en 1999 *El Niño. Réalité et fiction* qui a lancé cette série d'ouvrages de vulgarisation de l'UNESCO.

■ Hervé Le Treut, directeur de recherches au CNRS et chargé de cours à l'École Polytechnique, développe des modèles numériques pour comprendre l'évolution du système climatique et évaluer l'impact de l'effet de serre anthropique. Il a participé à de nombreux programmes internationaux d'étude du climat et du cycle de l'eau. Il s'est également investi dans la communication scientifique en publiant, en 2001, *L'effet de serre, allons-nous changer le climat ?* avec Jean-Marc Janvovici. Il est directeur du Laboratoire de météorologie dynamique du CNRS qui comprend 150 membres et qui étudie les mécanismes, l'évolution et la prévision des phénomènes météorologiques et du climat.

[www.unesco.org/publishing](http://www.unesco.org/publishing)



Organisation  
des Nations Unies  
pour l'éducation,  
la science et la culture



Commission  
océanographique  
intergouvernementale

