

entre mère et fils ou entre frères et sœurs, tuait le désir sexuel. Les individus qui ont été élevés ensemble auraient très peu d'attirance sexuelle les uns pour les autres. Pour Westermarck, qui était un fervent darwiniste, cette absence de désir résultait de l'évolution : l'évitement de l'inceste prévient les conséquences délétères de la consanguinité.

Récemment, Arthur Wolf, un anthropologue de l'Université de Stanford, a étudié le mariage à Taïwan. Les familles de cette île ont coutume d'adopter et d'élever leurs futures belles-filles : les époux grandissent ensemble dès leur plus jeune âge. A. Wolf les a comparés à des conjoints dont le mariage avait été arrangé sans qu'ils se rencontrent au préalable. Il a utilisé la proportion de divorces et le nombre d'enfants par couple comme indicateurs du bonheur conjugal et de l'activité sexuelle. Ses résultats corroborent l'hypothèse de Westermarck : élever les futurs époux ensemble compromet leur vie conjugale. Un mécanisme similaire existe chez les primates. Ils évitent la consanguinité par la migration des individus mâles ou femelles à la puberté. Quand les individus restent dans le groupe familial après la puberté, ils ne s'accouplent pas.

Dans les années 1950, Kisaburo Tokuda observa ces comportements pour la première fois, au sein d'un groupe de macaques japonais du zoo de Kyoto. Un jeune mâle, qui était devenu le chef du groupe usait fréquemment de ses privilèges sexuels, en s'accouplant avec toutes les femelles... sauf avec sa mère. Ce cas n'est pas isolé : chez les primates, les rapports sexuels entre mère et fils sont quasi inexistants, même chez les bonobos, pourtant les plus actifs de tous les singes sur le plan sexuel. On sait désormais que l'intimité des premières années de la vie, à l'inté-

rieur du cercle familial, supprime l'attirance sexuelle.

Le travail de E. Westermarck peut servir d'exemple aux approches darwiniennes du comportement humain. Il montre clairement que le comportement est déterminé par des facteurs innés (effet de l'intimité des premières années de la vie), acquis (apprentissage de l'aversion sexuelle), évolutionnistes (inhibition de la consanguinité, similitude avec le comportement animal), culturels (certains peuples élèvent ensemble des enfants sans liens de parenté, d'autres séparent les frères de leurs sœurs, mais la plupart ont des arrangements familiaux qui conduisent automatiquement à l'inhibition des pulsions sexuelles entre individus apparentés). À tout cela s'ajoute le tabou culturel propre à notre espèce. Sert-il simplement à renforcer l'«effet Westermarck» ou ajoute-t-il une nouvelle dimension ?

Au XXI^e siècle, la science progressera en cassant les vieilles barrières entre biologie du développement, génétique, sociologie, évolutionnisme et anthropologie. Ainsi, l'opposition traditionnelle entre comportement acquis et inné sera remplacée par une approche beaucoup plus globale. On s'intéressera de plus en plus aux effets de l'environnement où vivent les individus et à la transmission de l'information au sein de groupes de primates et de cétacés. Par exemple, certaines communautés de chimpanzés utilisent des pierres pour casser les noix dans la forêt, alors que d'autres communautés, qui disposent aussi de noix et de pierres, n'ont pas ce comportement. La génétique n'explique pas cette différence. Ce n'est qu'en enterrant définitivement le débat opposant les composantes culturelles acquises et la nature innée du comportement humain que nous progresserons dans sa compréhension.

Société Mathématique de France

P

r



Prix d'Alembert des Lycéens

Créé à l'occasion de l'Année Mondiale Mathématique 2000, le Prix d'Alembert des Lycéens récompense des conférences de mathématiques pour un public de jeunes...

Les candidatures au Prix d'Alembert peuvent être soumises par les candidats eux-mêmes ou par toute autre personne physique ou morale **avant le 1^{er} février 2000**.

Les candidatures pour le Prix d'Alembert des Lycéens sont soumises par les candidats eux-mêmes **avant le 1^{er} février 2000**. Ils doivent fournir à l'appui de leur candidature un CV, un résumé de leur conférence ainsi qu'un texte complet ou un enregistrement audiovisuel de leur conférence.

Frans de WAAL est directeur de recherche au Centre d'étude de primates d'Atlanta et professeur en science du comportement des primates au Département de psychologie de l'Université d'Emory.

Edward O. WILSON, *Sociobiology : The New Synthesis*, Belknap Press (Harvard University Press), 1975, édition du 25^e anniversaire (à paraître).

Arthur P. WOLF, *Sexual Attraction and Childhood Association : A Chinese Brief for Edward Westermarck*, Stanford University Press, 1995.

Stephen Jay GOULD, *The Mismeasure of Man*, W.W. Norton, 1996.

Frans de WAAL, *Good Natured : The Origins of Right and Wrong in Humans and Other Animals*, Harvard University Press, 1997.

Modifions-nous le climat ?

THOMAS KARL • KEVIN TRENBERTH

On ne le saura vers 2050 que si tous les pays s'engagent dès aujourd'hui dans une surveillance météorologique régulière et rigoureuse.

« L'ensemble des observations indique que l'espèce humaine a une influence perceptible sur le climat du Globe. » Par ces mots choisis, le Groupe intergouvernemental sur les changements climatiques, en liaison avec l'Association météorologique mondiale et le Groupe environnement de l'Organisation des Nations unies, a admis, en 1995, que l'espèce humaine a sa part de responsabilité dans la santé de la planète. Ce groupe n'a pas dit quand l'influence humaine sur le climat se fera sentir, ni où et comment ; ce sont là des questions dont les scientifiques et les hommes politiques débattent âprement.

Jusqu'ici, les changements climatiques qui semblent dus aux activités humaines ont été relativement limités, mais divers calculs indiquent que des effets importants risquent de se faire sentir à partir du milieu du XXI^e siècle ; ils seraient même supérieurs à ceux que le Globe a connus depuis la dernière glaciation, il y a environ 10 000 ans. Certaines régions profiteront peut-être, temporairement, des changements, mais on craint généralement des perturbations nuisibles, voire très graves. Évidemment, si les météorologues prévoyaient mieux l'influence des diverses activités sur le climat, on pourrait prendre des mesures pour limiter les perturbations ou pallier leurs effets. L'évaluation des changements climatiques est-elle possible ? Nous le pensons. Mieux encore, une telle évaluation pourrait s'achever aux alentours des années 2050 si elle devenait une priorité internationale.

Bien qu'on ne sache pas évaluer avec précision l'impact des activités humaines sur le climat, on sait que

ces activités perturbent l'atmosphère. Par exemple, l'utilisation des combustibles fossiles dans les centrales thermiques et dans l'ensemble des moyens de transport rejette des particules et des gaz qui modifient la composition chimique de l'atmosphère. La combustion des produits riches en soufre engendre une pollution visible, sous la forme de petites particules qui donnent souvent au ciel un aspect laiteux. Ces particules, dont le diamètre est voisin de un micromètre (un millième de millimètre), refroidissent temporairement l'atmosphère, parce qu'elles réfléchissent vers l'espace certains rayonnements qui composent la lumière solaire ; toutefois elles ne restent pas dans l'atmosphère, parce que les précipitations les ramènent vers la surface de la Terre. Certains gaz, invisibles, ont des conséquences plus durables. Le dioxyde de carbone reste dans l'atmosphère pendant plus d'un siècle, par exemple. Or ce composé et d'autres « gaz à effet de serre » laissent arriver jusqu'au sol beaucoup de rayonnements solaires, mais ils retiennent les rayonnements infrarouges, de sorte qu'ils contribuent au réchauffement de la basse atmosphère.

Personne ne conteste que les émissions de combustibles fossiles, à elles seules, ont augmenté de presque 30 pour cent la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère, depuis le début de la Révolution industrielle. Les océans et les végétaux absorbent une partie du dioxyde de carbone ainsi rejeté, mais les concentrations en dioxyde de carbone continuent d'augmenter. L'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère réchauffe inévitablement l'atmosphère : la plu-

part des météorologues admettent que la température moyenne de la Terre a augmenté d'au moins 0,6 °C au cours des 120 dernières années ; cette augmentation résulte en grande partie de l'utilisation des combustibles fossiles.

Le réchauffement global dû à l'effet de serre évapore de l'eau des océans, des sols et des plantes. Or, toutes les précipitations puisent dans l'énorme réservoir d'eau qui se constitue dans l'atmosphère : tornades tropicales, pluies d'orage, tempêtes de neige... L'intensification du cycle hydrologique mondial aggrave les sécheresses et intensifie les chutes de pluie ou de neige dans les régions humides, ce qui accroît le risque d'inondations. Dans les dernières décennies, de nombreux endroits du monde ont déjà été touchés.

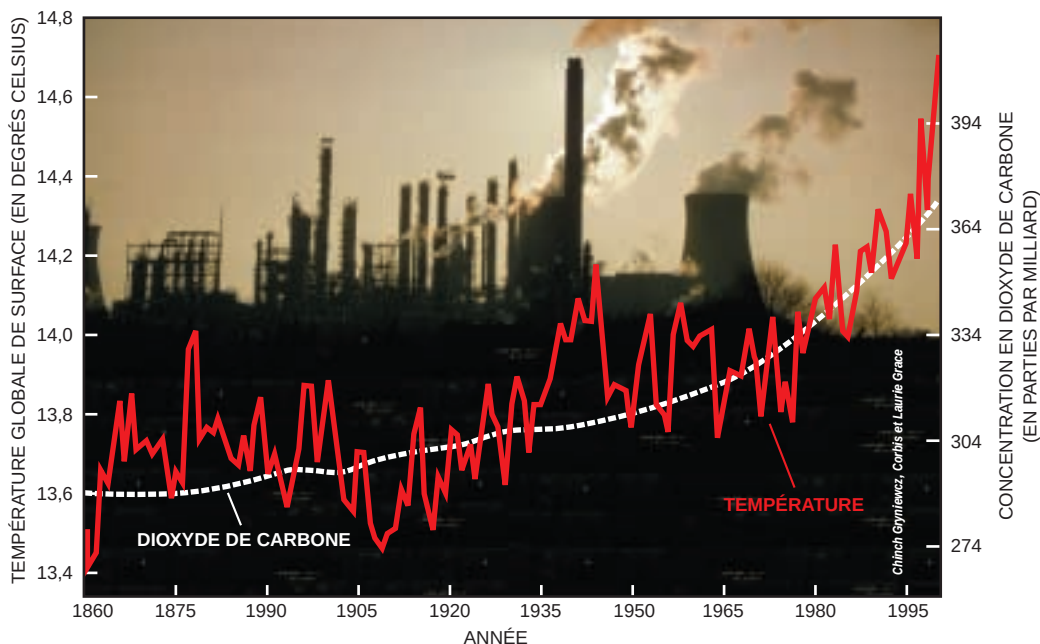
Des problèmes de puissance

D'autres activités humaines que la combustion des combustibles fossiles perturbent le climat global. Par exemple, le défrichage des forêts et leur transformation en pâturages éliminent des arbres qui absorberaient le carbone de l'atmosphère et réduiraient l'effet de serre ; de surcroît, les sols sont plus lessivés par les eaux qui ruissellent, ce qui augmente les risques d'inondation.

La connaissance des phénomènes qui modifient le climat global est utile, mais insuffisante. Les pays ont également besoin de savoir comment les diverses activités humaines perturbent

1. CE PIÉTON est pris dans une tempête comme il risque de s'en produire de plus en plus souvent si le climat du Globe se réchauffe.





2. L'UTILISATION DES COMBUSTIBLES FOSSILES (photographie) a augmenté la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone (pointillés blancs) et a augmenté les températures du Globe depuis 140 ans (courbe rouge).

localement le climat et quelles sont les conséquences de ces activités sur le climat mondial. Pour obtenir ces informations, les climatologues devront construire des modèles climatiques plus précis que ceux qui ont été réalisés jusqu'ici. À cette fin, ils auront besoin d'ordinateurs un million de fois plus rapides que les plus rapides d'aujourd'hui et ils devront identifier les innombrables interactions des océans, de l'atmosphère et de la biosphère, afin de savoir exactement quelles variables ils devront utiliser dans leurs simulations informatiques. Ils devront démontrer que leurs programmes reproduisent bien les changements climatiques du passé et du présent, avant de se fier à eux pour prévoir l'avenir. Cette validation nécessite des mesures effectuées pendant de nombreuses années. Les simulations et les prévisions du climat n'atteindront leur maturité que si l'on enregistre régulièrement les changements, au moment où ils se produisent.

Pour les climatologues qui élaboreront des modèles climatiques, tous les phénomènes, des fluctuations des périodes glaciaires jusqu'à la désertification actuelle de l'Afrique centrale, jouent un rôle dans les simulations. Les interactions des composants climatiques – l'atmosphère, les océans, la surface des continents, la banquise, les eaux de surface, la biosphère... – évoluent selon des lois physiques décrites par des équations. Les concepteurs des programmes de simulation climatique

utilisent les ordinateurs pour appliquer ces équations à des blocs de volume terrestre, l'ensemble de ces blocs couvrant toute la surface du Globe. Comme l'atmosphère est un ensemble continu, et non un assemblage de blocs indépendants, les climatologues doivent non seulement décrire l'évolution de chaque élément de volume, mais aussi calculer les interactions de ces éléments, en simulant les transferts d'énergie et de masse entre eux.

Dans les principaux centres mondiaux de simulation du climat, les ordinateurs effectuent jusqu'à 50 milliards d'opérations par seconde, mais les variables à prendre en compte pour simuler l'évolution de l'atmosphère sont si nombreuses que la simulation d'un siècle de temps réel peut prendre des mois. Aussi considère-t-on des éléments de volume assez gros pour que leur nombre reste limité. Pour les modèles avec lesquels on prévoit l'évolution du temps, ces éléments correspondent à des volumes d'atmosphère d'environ 250 kilomètres de côté, dans le plan horizontal, et de un kilomètre d'épaisseur.

Même le plus complexe des modèles de climat global ne reproduit pas la formation des nuages ou la chute de pluie : les violents orages d'été, avec leurs pluies parfois torrentielles, n'arrosent souvent que des surfaces de moins de dix kilomètres de côté, et la condensation des gouttes

de pluie s'effectue à des échelles inférieures au millimètre. Comme chacun de ces événements se produit dans une région plus petite que le volume de la plus petite unité du maillage utilisé pour la simulation, les modèles doivent se fonder sur une description statistique de nombreux phénomènes.

Les phénomènes météorologiques sont aléatoires aux petites échelles, mais leur fréquence diffère selon les régions du Globe. En revanche, les phénomènes qui perturbent le climat, telle l'accumulation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre, touchent toutes les zones de la planète au même degré. Aussi les variations météorologiques

locales masqueront d'autant plus un signal climatique à grande échelle que les régions prises en compte seront petites. Pour supprimer ce masquage, les météorologues conduisent plusieurs simulations simultanées, avec, pour chacune, des conditions initiales légèrement différentes. Les particularités climatiques qui se trouvent dans toutes les simulations constituent le signal climatique, tandis que celles qui ne sont pas reproductibles sont considérées comme des bruits de nature météorologique.

Les interactions climatiques

Les informaticiens estiment que la vitesse des ordinateurs augmentera de bien plus d'un million de fois d'ici 2050. Avec leurs ordinateurs perfectionnés, les climatologues simuleront alors plusieurs siècles par jour, avec une résolution de moins de un kilomètre dans le plan horizontal et une résolution verticale de 100 mètres, en moyenne.

Les ordinateurs n'indiqueront les changements climatiques que si les équations mathématiques qu'on leur aura fournies décrivent correctement les phénomènes naturels. Par exemple, si un modèle d'atmosphère considère des températures inférieures de 4 °C aux températures réelles (ce qui n'était pas rare il y a dix ans), la simulation indiquera que l'atmosphère contient environ 20 pour cent de moins d'eau que sa capacité réelle ; l'erreur enlève

tout sens à des estimations ultérieures sur l'évaporation et les précipitations.

D'autre part, nous ne savons pas encore bien reproduire les divers phénomènes qui déterminent le climat, telles les brusques variations du cycle du carbone ou les changements d'utilisation des sols. Or ces changements provoquent des rétroactions qui, si on n'en tient pas compte, conduisent à des résultats aberrants. Ainsi une augmentation de la température modifie l'hygrométrie de l'atmosphère, ce qui amplifie la perturbation d'origine, parce que la vapeur d'eau est un puissant gaz à effet de serre.

Les climatologues commencent seulement à comprendre à quel point certaines de ces rétroactions influencent le cycle du carbone sur la planète. Par exemple, en 1991, l'éruption du mont Pinatubo, dans les Philippines, rejeta dans l'atmosphère suffisamment de cendres et de dioxyde de soufre pour refroidir temporairement le climat mondial : les composés libérés ont interagi avec les gouttelettes d'eau contenues dans l'air, empêchant certains

rayonnements solaires d'atteindre la Terre. De ce fait, l'assimilation rapide du dioxyde de carbone par les plantes a été réduite.

Les diverses utilisations du milieu naturel perturbent différemment les climats continentaux et régionaux, et l'on décrit difficilement ces perturbations dans les simulations. La déforestation, par exemple, fait apparaître des zones (cultivées) qui sont plus claires que les forêts et qui, de ce fait, réfléchissent plus d'énergie solaire, ce qui conduit à un refroidissement du climat, surtout en automne et en été. Dans les régions qui étaient initialement très boisées, ce refroidissement peut réduire l'évaporation et, par là même, la nébulosité et les précipitations.

Mesures manquantes

Les simulations climatiques ne valent rien si l'on ne les confronte pas aux observations, afin de montrer que les modèles reflètent vraiment la réalité. Autrement dit, pour mieux connaître

l'influence des activités humaines sur le climat du Globe, on doit savoir comment le climat a changé dans le passé. Au minimum, on doit simuler convenablement l'évolution du climat depuis que l'homme a modifié la composition de l'atmosphère.

Pour comprendre le climat aux époques antérieures aux observations par les satellites météorologiques, on analyse l'air piégé dans les carottes de glace, les cernes de croissance des arbres, le corail, et les sédiments au fond des océans et des lacs.

Cependant, pour bien comprendre le climat actuel, les climatologues ont besoin de plus que ces instantanés ; ils doivent également utiliser de longs enregistrements qui révèlent l'évolution actuelle du climat. Les mesures actuelles de la banquise, de l'humidité du sol, du couvert végétal, et des mesures tridimensionnelles de la salinité et de la température des océans sont nécessaires, mais non suffisantes.

Or l'organisation actuelle du monde ne favorise pas l'étude des climats :



Neil Rabinowitz, Corbis

3. LA DÉFORESTATION perturbe le climat de plusieurs façons. D'une part, l'abattage des arbres réduit l'absorption du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère. Les forêts, plus sombres que les

zones dénudées, absorbent davantage le rayonnement solaire, maintenant les zones boisées plus chaudes et plus humides que les zones cultivées ou en friche.

L'UNIVERS DES SCIENCES

L'UNIVERS DES SCIENCES

LES ÉTOILES

Vie et mort des soleils lointains

JAMES KALER



POUR LA
SCIENCE

LES ÉTOILES

Ce livre expose l'origine et la nature de nos connaissances sur les étoiles, avant de les décrire dans leur dynamique et leur devenir. Les objets célestes les plus insolites, géantes rouges, supernovae, pulsars et trous noirs, s'insèrent alors naturellement dans le récit de l'évolution stellaire.

272 pages - 220 F

c o d e

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

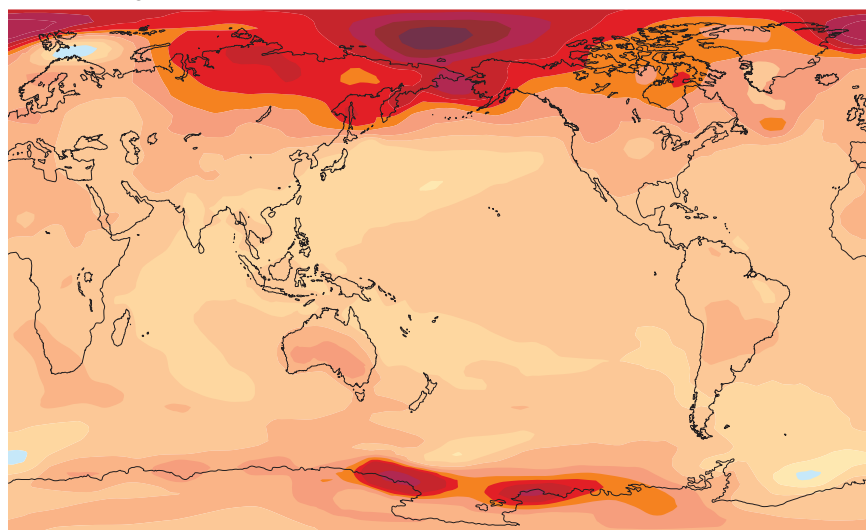
Bon de commande en p.98

aucune institution n'a le mandat ou les ressources pour assurer le contrôle du climat à long terme. Aujourd'hui les climatologues effectuent leurs interprétations du changement climatique à l'aide des mesures recueillies par un grand réseau de satellites et de détecteurs de surface qui sont équipés pour l'observation météorologique : bouées, navires océanographiques, observa-

toires, stations météorologiques, avions. Les climats du passé sont souvent très mal connus.

Les quantités que nous mesurons aujourd'hui représentent-elles de réels changements de l'environnement, à l'échelle de quelques décennies? On ne pourra le dire que si l'on dispose d'observations continues. Que se passe-t-il quand on change les caméras

TEMPÉRATURE

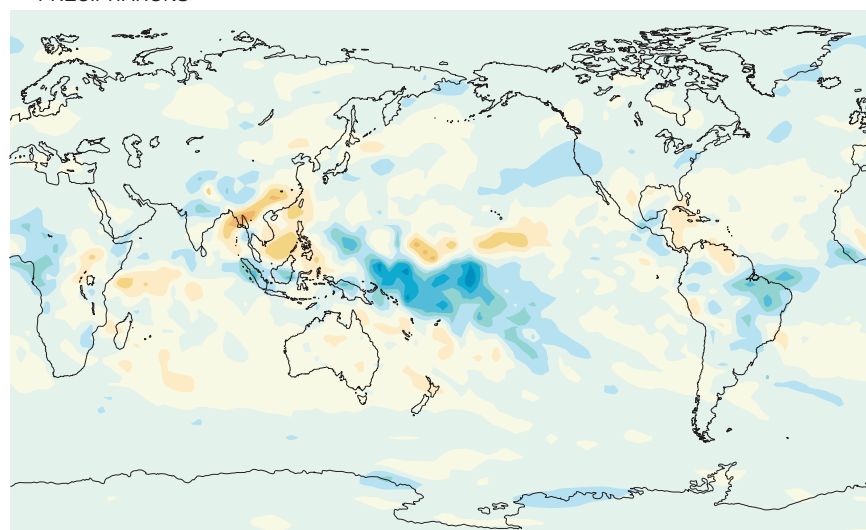


PLUS FROID ← → PLUS CHAUD

0 0,5 1 1,5 2 2,5 3 3,5 4 4,5 5

DEGRÉS CELSIUS

PRÉCIPITATIONS



PLUS SEC ← → PLUS HUMIDE

-1,5 -1,2 -0,6 -0,3 0 0,3 0,6 0,9 1,2 1,5

MILLIMÈTRES PAR JOUR

4. UN RÉCHAUFFEMENT GLOBAL atteignant cinq degrés (en haut) augmenterait les précipitations (en bas) sur l'ensemble du Globe, au cours du XXI^e siècle. Ces simulations du climat dans la première moitié du XXI^e siècle sont fondées sur des estimations de 1992.

NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

d'observation météorologique ou quand on les oriente différemment? La question est importante, car les satellites ne fonctionnent habituellement que quatre ans, avant d'être remplacés par d'autres satellites, qui sont placés sur des orbites différentes et sont équipés de nouveaux instruments. Au total, les signaux enregistrés représentent à la fois les variations climatiques et les changements dus aux modifications méthodologiques. Si l'on ne se préoccupe pas rapidement d'évaluer les modifications des techniques d'observation, les enregistrements climatiques déjà effectués risquent de devenir inutilisables : on ne pourra comparer les nouvelles données aux anciennes.

Nous avons la responsabilité de donner aux climatologues qui nous succéderont des moyens d'évaluer leurs simulations climatiques avec des données claires, correctement archivées. Aujourd'hui, toutefois, les données que les climatologues accumulent à partir des satellites et des détecteurs répartis à la surface du Globe risquent d'être perdues. Aux États-Unis, par exemple, les observations de nombreuses stations climatologiques continuent à être enregistrées sur des bandes de papier perforé ou sont stockées sur des ordinateurs périmés, où les données sont perdues ou illisibles par les ordinateurs modernes. La moitié des données enregistrées par les nouveaux radars Doppler est perdue, parce que le système d'enregistrement n'est pas automatique : comme on doit archiver les données manuellement, les tâches urgentes font inévitablement perdre des données.

Si de bons choix scientifiques et techniques sont faits, les travaux des 50 prochaines années diront comment les activités humaines modifient le climat terrestre et comment elles perturbent les climats locaux. N'ayons pas l'imprudence d'attendre trop avant de lancer une étude internationale, bien coordonnée : les gaz à effet de serre subsistent si longtemps dans l'atmosphère, et cette dernière évolue si lentement, que le climat global risque de changer considérablement, même si l'humanité interrompt aujourd'hui ses activités à risque.

La fonte des glaciers dans les Andes et dans d'autres endroits du monde est un premier signe d'un réchauffement planétaire. Un réchauffement global qui atteindrait deux

degrés avant la fin du siècle prochain s'accompagnerait d'une élévation du niveau de la mer qui menacerait certaines côtes. Le changement climatique risque d'avoir des conséquences politiques et sociales. Les habitations et les équipements des régions côtières, de plus en plus peuplées, seront menacés, et l'approvisionnement en eau potable deviendra localement difficile. Les États devraient prendre des mesures pour éviter les catastrophes, de ce double point de vue, mais ils restent gênés par les incertitudes ; tant qu'on ignorera l'impact de l'homme sur le climat, les lois sur l'émission de gaz à effet de serre, sur la consommation de combustibles fossiles ou sur le déboisement seront difficiles à édicter. Les études du climat global favoriseront la planification des équipements : par exemple, elles révéleront comment les barrages et les réservoirs pourraient être mieux conçus pour s'adapter aux inondations prévues ou à des pénuries d'eau.

Le climat change ; il changera encore certainement, peut-être beaucoup. Les États peuvent agir pour ralentir ce changement et préparer judicieusement les réactions aux effets inévitables du changement. Aujourd'hui, toutefois, ils ne font ni l'un ni l'autre.

Si nous voulons vraiment connaître les changements climatiques et les effets de l'activité humaine aux alentours de 2050 et si nous voulons activement traiter le problème des perturbations écologiques, nous devons agir autrement qu'aujourd'hui. La Convention cadre de l'Organisation des Nations unies sur le changement climatique lie 179 gouvernements qui se sont engagés à remédier aux influences préjudiciables de l'homme sur le climat global. Le protocole de Tokyo, en 1997, a permis des progrès dans la stabilisation des émissions de gaz à effet de serre, mais les observations climatiques globales à long terme et les systèmes de contrôle climatique manquent. Il faut poursuivre le travail.

Thomas KARL dirige le Centre des données climatiques de Denver depuis 1998. Kevin TRENBERTH dirige la Section d'analyse du climat du Centre de recherches atmosphériques de Boulder.

Kerin E. TRENBERTH, *Global Warming: It's Happening*, in *naturalSCIENCE*, vol. 1, article 9, 1997.
