



Après des années de débats, il est désormais probable qu'une partie du réchauffement mondial des températures peut être attribuée à l'augmentation de l'effet de serre résultant des activités humaines.

Ce phénomène, qui s'accélère encore depuis 1975, n'est pourtant pas une première historique : la terre a déjà connu durant certaines périodes des phénomènes de réchauffement avec élévation des gaz à effet de serre et montée du niveau des océans. Il importe donc de comprendre le climat du passé et de faire appel à la paléoclimatologie pour prévoir l'avenir.

Fonte d'un glacier des Alpes.
Melting of a glacier in the Alps.

© E. Bard

Variations climatiques naturelles et anthropiques



Edouard Bard

COLLÈGE DE FRANCE,
CHAIRE DE L'ÉVOLUTION
DU CLIMAT ET DE L'OcéAN
CEREGE (UMR 6635)
bard@cerege.fr

Une planète habitable

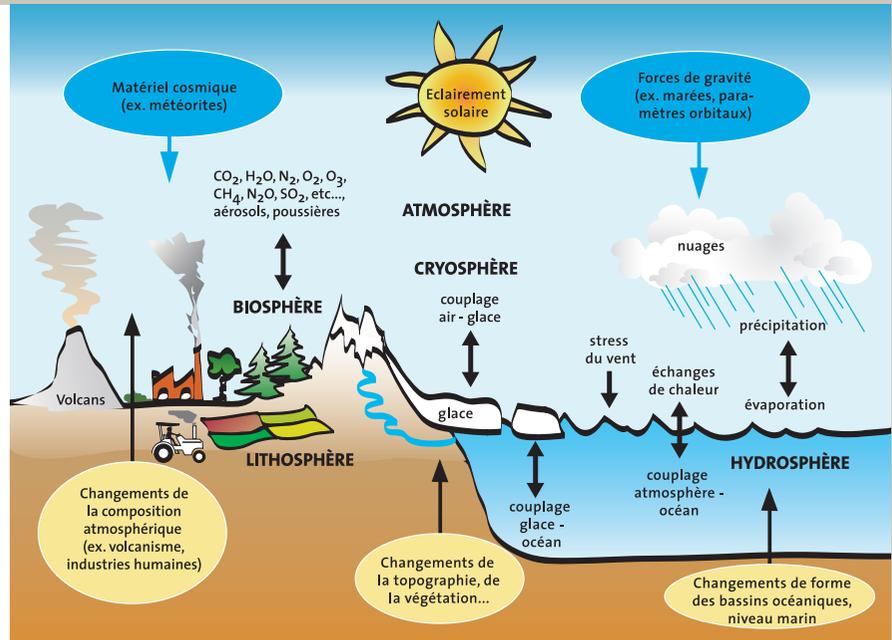
Comprendre l'évolution du climat nécessite de considérer le système climatique dans sa globalité avec des compartiments très divers comme l'atmosphère, l'hydrosphère, notamment les océans, la cryosphère, en particulier les calottes de glace polaires, la biosphère et enfin la lithosphère (Fig. 1). Ces différents compartiments échangent entre eux de la matière et surtout de l'énergie. Le soleil par son flux lumineux est un moteur qui met en mouvement les enveloppes fluides comme l'atmosphère et l'océan. Objet d'étude du météorologue, les turbulences rapides et incessantes de la basse atmosphère ne doivent cependant pas faire oublier que le climat mondial a atteint un équilibre dynamique dicté par l'éclairement solaire et la teneur en gaz à effet de serre.

Cet équilibre énergétique de la Terre s'établit entre le flux solaire, la propagation et finalement l'émission vers l'espace de ce flux énergétique. À la distance moyenne Terre-Soleil, une surface d'un mètre carré perpendiculaire aux rayons du Soleil reçoit actuellement 1 368 watts (cette valeur est appelée, un peu abusivement, la constante solaire). La valeur moyenne du flux solaire au sommet de l'atmosphère est donc de $1\ 368/4$ soit $342\ \text{W/m}^2$ car la surface de la sphère représente le quadruple de sa section diamétrale.

Fig. 1 : Représentation schématique des composants du système climatique mondial. Modifié d'après Bradley (Paleoclimatology, Academic Press, pp. 610, 1999) et IPCC (Climate Change 2001. The Scientific Basis (vol. I). eds. J.T. Houghton et al. Cambridge Univ. Press, pp. 881, 2001).

Fig. 1: Schematic representation of the components of the Earth's climatic system. Modified from Bradley (Paleoclimatology, Academic Press, pp. 610, 1999) and IPCC (Climate Change 2001. The Scientific Basis (vol. I). eds. J.T. Houghton et al. Cambridge Univ. Press, pp. 881, 2001).

Source : E. Bard d'après Bradley (1999) et IPCC (2001)



Environ 30 % du flux solaire sont réfléchis directement vers l'espace par les nuages, les aérosols, l'atmosphère et la surface de la Terre. Les 70 % restants sont absorbés par l'atmosphère ou par la surface de la Terre et donc transformés en chaleur. La surface terrestre étant nettement plus froide que celle du Soleil, elle émet un rayonnement infrarouge qui ressortira après un cheminement complexe à travers l'atmosphère : plusieurs de ses composants chimiques, essentiellement transparents aux rayonnements visibles, absorbent les infrarouges qui retournent par émission vers la surface terrestre. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre.

Soulignons toutefois que l'image de l'effet de serre, bien que commode, n'est pas tout à fait exacte. Dans la serre, l'air chaud reste essentiellement piégé par la cage de verre où la convection thermique est bloquée : l'air chaud ne peut pas se propager vers l'extérieur alors que dans l'atmosphère, courants d'air chaud et d'air froid circulent librement. La chaleur est piégée à la surface de la Terre parce que certains composants chimiques absorbent les infrarouges émis par la surface.

La Terre n'est pas la seule planète concernée. Un effet de serre existe par exemple sur Vénus et sur Mars, qui possèdent une atmosphère opaque aux infrarouges. Plus proche du Soleil que la Terre, Vénus reçoit un flux énergétique presque double de celui reçu par la Terre. Mais, son atmosphère, très dense et nuageuse, en réfléchit environ 80 %. On pourrait donc penser que la température au sol est plus basse sur Vénus que sur la Terre. Pourtant, les sondes spatiales ont relevé quelque 460 °C. C'est qu'une atmosphère composée pour l'essentiel de gaz carbonique rend l'effet de serre particulièrement intense. Une situation équivalente à celle qui prévaudrait sur Terre si tout le carbone terrestre contenu dans les réservoirs géologiques (calcaires et carbone organique) et des océans était

“ L'effet de serre terrestre est aujourd'hui l'objet de nombreuses inquiétudes car les activités humaines ont perturbé notablement l'équilibre atmosphérique. ”

converti en gaz carbonique. Sur Mars, dont l'atmosphère est également plus riche en dioxyde de carbone que l'atmosphère terrestre, l'effet de serre est beaucoup plus modeste et ne réchauffe la surface que d'une dizaine de degrés (la température moyenne est de -55 °C). Trois raisons à cela : la faible pression au sol (cent fois plus faible que sur Terre), l'absence de vapeur d'eau et la présence de poussières - dont l'effet est globalement équivalent à celui de nos aérosols - injectées dans la haute atmosphère lors des tempêtes martiennes.

Les conditions hospitalières que nous connaissons sur Terre dépendent d'une combinaison fortuite de la distance par rapport au Soleil, de la présence de la Lune et de la composition chimique de l'atmosphère, paramètres qui conditionnent l'état physique de l'eau sur notre planète. Si le flux solaire était beaucoup plus important qu'il n'est actuellement, l'eau des océans serait rapidement vaporisée ce qui engendrerait un énorme effet de serre. Un emballement se produirait même si la température dépassait celle du point critique de l'eau, à partir de laquelle elle ne peut plus être sous forme liquide.

VARIATIONS CLIMATIQUES NATURELLES ET ANTHROPIQUES

Au contraire, si le Soleil s'affaiblissait suffisamment longtemps pour que les océans gèlent et que la neige recouvre les continents, la surface de la Terre réfléchirait l'essentiel du flux solaire. De plus, l'effet de serre de la vapeur d'eau diminuerait considérablement. Ces conditions tendraient à établir un climat extrêmement froid et stable, tant que les volcans ne viennent, lentement mais sûrement, augmenter la concentration atmosphérique en gaz carbonique.

Fort heureusement, la catastrophe chaude n'est jamais arrivée car nous ne serions certainement pas là pour en parler. En revanche, un état de Terre gelée semble avoir eu lieu pendant certaines périodes très reculées, entre 3 milliards et 600 millions d'années ("snowball Earth").

Un climat variable à toutes les échelles de temps

L'effet de serre terrestre est aujourd'hui l'objet de nombreuses inquiétudes car les activités humaines ont perturbé notablement l'équilibre atmosphérique. Les variations de la composition atmosphérique peuvent être converties en équivalent de forçage radiatif exprimé en Watts par mètre carré. Les changements dus aux gaz à effet de serre représentent au total une augmentation de l'ordre de 3 W/m^2 , c'est-à-dire environ 1 % du flux solaire. Pour l'essentiel, cette augmentation est liée à la combustion de carbones fossiles et à leur transformation en gaz carbonique. La Figure 2 montre l'augmentation de la température atmosphérique moyenne depuis un peu plus d'un siècle. La tendance est clairement au réchauffement mondial. Après des années de doutes et de controverses, il apparaît maintenant qu'une partie de cette augmentation peut être attribuée à l'augmentation de l'effet de serre résultant des activités humaines ou anthropiques.

Le fait majeur est que l'atmosphère s'est globalement réchauffée d'environ huit dixièmes de degré depuis un siècle. Cette tendance n'a toutefois pas été régulière et l'on distingue clairement deux périodes : la première de 1920 à 1940 et la seconde commençant vers 1975. Celle-ci perdure encore car les quinze années les plus chaudes enregistrées ont toutes eu lieu après 1985.

Une conséquence directe du réchauffement actuel est une dilatation des couches superficielles de l'océan. Les estimations les plus récentes indiquent un taux de remontée du niveau marin de l'ordre de 25 cm par siècle. Ces fluctuations ont pu être suivies pendant la dernière décennie par altimétrie satellitale et sont résumées sur le premier panneau de la Figure 3. Les deux autres panneaux de ce graphique remettent en perspective les changements récents du niveau de la mer. Ceux-ci viennent se surimposer à des variations naturelles liées aux glaciations à l'échelle de plusieurs dizaines de milliers d'années et à des changements de la géométrie des océans à l'échelle de plusieurs centaines de millions d'années.

Cette mise en perspective n'est pas destinée à minimiser les variations récentes, mais souligne au contraire la nécessité de suivre et de quantifier les changements climatiques à toutes les échelles de temps afin de pouvoir détecter des variations significatives, en particulier celles effectivement liées aux activités humaines. Un diagramme très simplifié (Fig. 4) présente donc les principales causes des changements du climat en fonction de leurs constantes de temps en unités logarithmiques. En rouge et en vert sont distingués les forçages externes au système climatique, en bleu les réarrangements internes au système et finalement en noir les effets anthropiques. L'intérêt de ce diagramme est de montrer que les différentes origines de fluctuations climatiques possèdent leurs caractéristiques temporelles propres mais qu'elles peuvent aussi interférer les unes avec les autres.

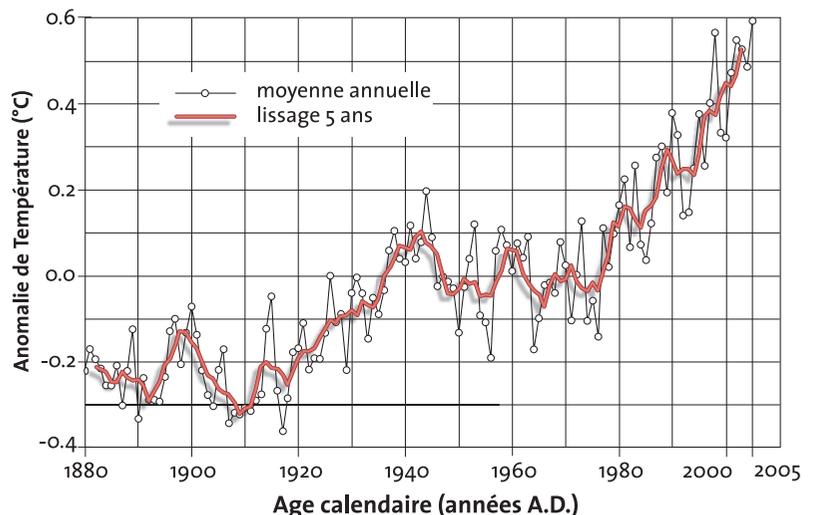
Tenir compte de la lente dérive des continents pour prévoir le climat du prochain siècle est sans doute superflu, mais il est indispensable de replacer les changements anthropiques dans un contexte plus large que le dernier siècle et donc de faire appel à la paléoclimatologie.

“ Le fait majeur est qu'en un siècle l'atmosphère s'est globalement réchauffée d'environ huit dixièmes de degré. ”

Fig. 2 : Changements de la moyenne mondiale de température de surface. Cette évolution moyenne est basée sur des mesures réalisées par les stations météorologiques et par les satellites pour la surface de l'océan (NASA-GISS).

Fig. 2: Changes in the world average of surface temperatures, based on measurements made by meteorological stations and ocean-surface measurements by satellites (NASA-GISS). In black: annual averages; in red: smoothed averages.

Source : E. Bard



Il est indispensable de replacer les changements anthropiques dans un contexte nettement plus large que le dernier siècle et donc de faire appel à la paléoclimatologie.

Quelques exemples de reconstitutions paléoclimatiques

Pour connaître l'état de l'atmosphère en un point donné et à un moment précis, le climatologue réalise des observations à l'aide d'appareils basés sur des principes de physico-chimie. Les postes d'observation les plus nombreux relèvent la température de l'air, la nature et la hauteur des précipitations, la nébulosité, la force et la direction du vent, la pression atmosphérique, l'humidité de l'air et la chimie de l'air et des poussières.

Pour remonter plus loin que les deux derniers siècles, les spécialistes du climat ont aussi recherché d'autres sources documentaires, ou archives climatiques, dans lesquelles ils peuvent lire les fluctuations de paramètres comme la température, le niveau marin ou la pluviosité. Ces archives sont de nature géologique au sens large du terme. L'information climatique y est enregistrée par de nombreux paramètres physico-chimiques ou même biologiques qui sont liés aux conditions environnementales lors du dépôt de ces archives.

Pour les sédiments marins, on peut faire une liste des principaux outils du paléoclimatologue basés sur les microfossiles, des rapports isotopiques ou certaines molécules et atomes disséminés à l'état de trace dans les roches sédimentaires. On peut faire de même pour les glaces polaires avec une mention particulière pour les bulles d'air emprisonnées qui permettent de remonter aux teneurs passées des gaz à effet de serre. Les récifs coralliens donnent un accès privilégié aux variations du niveau marin. Ces listes ne sont évidemment pas exhaustives et l'on pourrait en détailler d'autres pour le bois fossile, les dépôts de lacs, les stalagmites et même les documents historiques pour les périodes plus récentes.

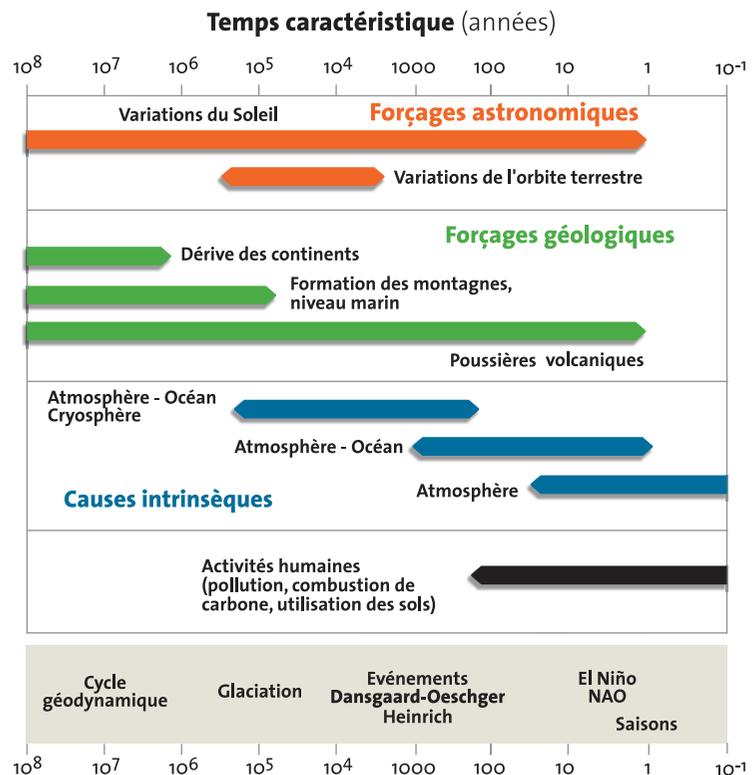
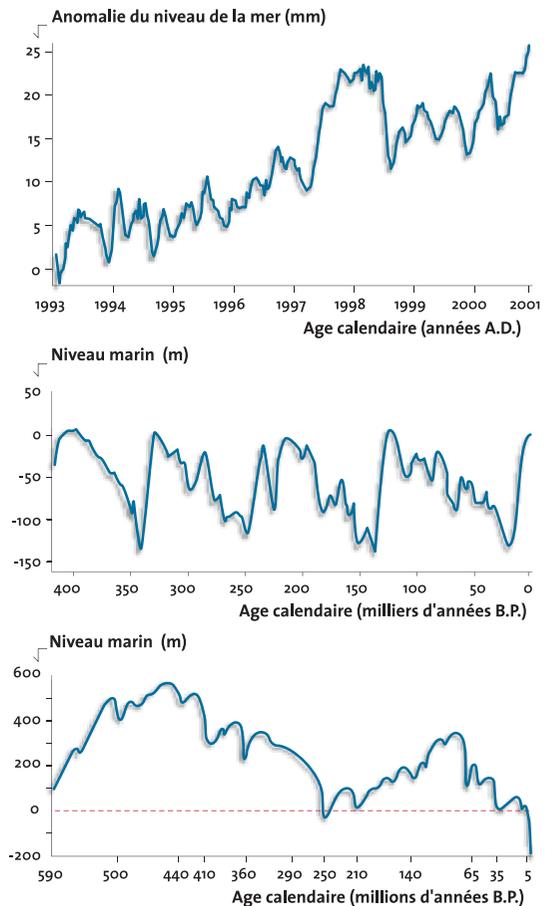
Fig. 4 : Schéma en unité logarithmique présentant les principales causes de changements du climat ainsi que quelques exemples caractéristiques de fluctuations climatiques. En rouge et en vert sont distingués les forçages externes au système climatique, en bleu les réarrangements internes au système et finalement en noir les effets anthropiques. Modifié d'après Kutzbach (World Met. Org. Bull. 23, 155-163, 1974).

Fig. 4: Logarithmic unit scheme presenting the main causes for climate change as well as some characteristic examples of climate fluctuation. Red and green: external forces acting upon the climatic system; blue: internal rearrangements of the system; black: Man-made effects. Modified from Kutzbach (World Met. Org. Bull. 23, 155-163, 1974).

Source : E. Bard

Fig. 3 : Variations à court, moyen et long termes du niveau de la mer. Il faut noter que les échelles de temps et de niveaux marins sont très différentes pour les trois panneaux de ce graphique.
 Fig. 3: Short-, medium- and long-term sea-level variations. N.B.: the time (abscissa) and sea-level (ordinate) scales are quite different for the three panels of this graph.

Source : Cabanes et al. (Science 294, 840-842, 2001), Waelbroeck et al. (Quat. Sci. Rev. 21, 295-305, 2002) et Vail et al. (Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 36, 129-144, 1984)



VARIATIONS CLIMATIQUES NATURELLES ET ANTHROPIQUES

À l'échelle des dernières centaines de milliers d'années, l'évolution du climat se caractérise par des cycles glaciaires-interglaciaires. La cause principale est la cyclicité de la répartition géographique de l'insolation due à des changements des paramètres de l'orbite terrestre. Les trois cycles majeurs sont liés aux variations de l'excentricité de cette orbite, de l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre et enfin de la précession des équinoxes. La théorie astronomique des glaciations a été formulée dans les années 30 par l'astronome serbe Milutin Milankovitch. Néanmoins, ce n'est qu'au cours des dernières décennies que les chercheurs ont pu reconstituer des séries temporelles bien datées pour tous les compartiments du système climatique. Ces données confirment la puissance explicative de la théorie de Milankovitch.

Chaque transition glaciaire-interglaciaire, marquée par la fonte des calottes continentales et la remontée du niveau marin, est prévue par la théorie astronomique, mais sa vitesse et son amplitude sont amplifiées par des interactions complexes entre l'océan, l'atmosphère et les calottes de glace. Ainsi, la dernière déglaciation, entre 20 000 ans et 6 000 ans avant nos jours, a entraîné une formidable remontée du niveau marin d'environ 130 mètres. La chronologie précise de cette période tourmentée a pu être reconstituée grâce à des forages de récifs coralliens et des mesures géochronologiques précises. Durant cette période, de nombreux autres paramètres climatiques et océanographiques ont subi des variations de premier ordre : réchauffement mondial de l'ordre de 5 °C, augmentation d'environ 40 % des teneurs en gaz à effet de serre (gaz carbonique et méthane), diminution de la vitesse des vents, réorganisation de la circulation océanique... Un des résultats majeurs est aussi la découverte de variations brusques du niveau marin qui correspondent à des périodes de débâcle glaciaire. Par exemple, un tel événement a eu lieu vers 14 000 ans avant nos jours et a été marqué par une hausse rapide du niveau mondial à un taux supérieur au mètre par siècle, donc beaucoup plus rapide que la hausse observée pendant le dernier siècle.

À la fin des années 80, le géologue allemand Hartmut Heinrich a découvert que ces débâcles étaient très fréquentes en période glaciaire, lorsque les calottes continentales recouvraient le nord des continents. La calotte Laurentide qui couvrait alors le Canada « rabotait » littéralement les roches du socle nord-américain. Ces débris finement broyés étaient ensuite transportés par les icebergs qui les ont disséminés en Atlantique Nord. Ces débris détritiques glaciaires sont concentrés dans les sédiments marins sous la forme de couches dont l'épaisseur s'amenuise à mesure que l'on s'éloigne de la baie d'Hudson.

« À l'échelle des dernières centaines de milliers d'années, l'évolution du climat se caractérise par des cycles glaciaires-interglaciaires. La cause principale en est la cyclicité de la répartition géographique de l'insolation due à des changements des paramètres de l'orbite terrestre. »

L'injection d'énormes quantités de glaces continentales pendant les événements de Heinrich a diminué la densité de l'eau de mer, freinant considérablement la circulation océanique profonde. La conséquence directe de ces variations de la circulation océanique a été un refroidissement généralisé en Atlantique Nord et sur les continents limitrophes. Les fréquentes débâcles d'icebergs se sont conjuguées à d'autres modifications du cycle hydrologique, pour générer des fluctuations climatiques extrêmement brusques et de grande amplitude.

Ces variations ont été identifiées dans les années 80 par le glaciologue danois Willi Dansgaard et le géochimiste suisse Hans Oeschger. Lors de ces transitions climatiques, la température de l'air au niveau du Groenland change environ d'une quinzaine de degrés en moins d'un siècle.

Les fluctuations de la température de l'océan de surface sont plus limitées, mais peuvent atteindre plus de 5 °C sur la même échelle de temps. Les enregistrements montrent que les refroidissements correspondent précisément aux injections de sédiments détritiques glaciaires, les fameux événements de Heinrich. À l'aide de marqueurs isotopiques, il est possible de suivre l'intensité de la circulation profonde atlantique. Les enregistrements montrent clairement que les variations de la température sont intimement liées à celles de la formation d'eau profonde.

Des études basées sur l'abondance relative des pollens préservés dans les sédiments océaniques ou lacustres permettent d'étudier l'impact de ces changements climatiques brusques sur l'Europe et la côte est de l'Amérique du Nord. La végétation du sud de l'Europe oscillait ainsi entre une steppe froide et sèche et des forêts arborées typiques d'un climat tempéré.



▲
Les forages de la barrière récifale de Tahiti sont étudiés pour reconstituer les fluctuations du niveau marin.

Borings of the barrier reef in Tahiti are studied to reconstruct sea-level fluctuations.

© J. Oremüller/IRD

Comprendre le climat du passé pour prévoir l'avenir

La prévision climatique n'est pas fondée sur de simples considérations historiques car les nombreux paramètres du système climatique ne se reproduisent jamais à l'identique. L'approche la plus fructueuse est de comprendre quantitativement les variations observées, en les simulant à l'aide de modèles numériques incluant toute la compréhension physique, chimique et biologique dont on dispose actuellement. Après les avoir testés à l'aide des variations du passé, ces mêmes modèles sont utilisés pour prévoir le climat futur en faisant certaines hypothèses sur l'évolution des paramètres externes au climat, notamment les activités humaines.

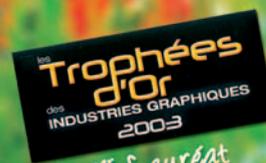
Ces modèles numériques ont fait d'immenses progrès, les capacités des ordinateurs autorisant des représentations de plus en plus fines conduisant à des résultats de plus en plus convergents. Il y a trente ans les simulations pour le prochain siècle se limitaient à des expériences de doublement du gaz carbonique uniquement dans des modèles atmosphériques. Les interactions entre les paléoclimatologues et les modélisateurs ont progressivement conduit à la prise en compte des autres compartiments du système climatique comme l'océan, les glaces, la biosphère, les sols et les cycles biogéochimiques fondamentaux.

La paléoclimatologie permet d'obtenir des données sur les variations de ces compartiments dont les constantes de temps sont longues par rapport à celles des processus atmosphériques. L'apport fondamental de ce domaine est donc d'élargir considérablement le spectre d'étude de la variabilité climatique en échantillonnant des périodes pendant lesquelles on peut être sûr que cette variabilité est naturelle. Il y a plus d'un siècle, le célèbre chimiste Svante Arrhenius l'avait déjà bien compris lorsqu'il considérait dans le même article le climat glaciaire et le climat futur perturbé par un doublement de gaz carbonique atmosphérique. ■

“ La prévision climatique n'est pas fondée sur de simples considérations historiques car les nombreux paramètres du système climatique ne se reproduisent jamais à l'identique. ”

 **IMPRIMERIE
NOUVELLE**
Groupe Jouve

L'imprimé maîtrisé
et une équipe de 90 personnes à votre service



1^{er} Lauréat
du Trophée de l'Environnement



93, avenue Denis-Papin - 45800 Saint-Jean-de-Braye - France
Tél : + 33 (0) 2 38 70 94 94 - Fax : + 33 (0) 2 38 86 03 61



Natural and man-made climatic variations

The hospitable conditions found on Earth are due to a fortuitous combination of its distance from the Sun, the presence of the Moon, and the chemical composition of the atmosphere. This gaseous envelope as well as the oceans and the ice caps, each play a specific role in the climatic system, though with different reaction times. Recent advances in various disciplines, in particular paleoclimatology at the interface between climatology, oceanography and geology, have helped in documenting the various phenomena that act upon different compartments of the Earth's environment. The comparison between observed data and their simulation with mathematical models leads to a better understanding of the climatic variability at all time scales. Today, the greenhouse-gas effect is the subject of numerous worries as Man's activities have clearly disturbed the radiative equilibrium of the atmosphere. Research provides the means to place the recent period in the perspective of the last millennia, in order to detect and predict the influence of Man's activities upon the climate.