

# Les changements climatiques : aperçu historique et mécanismes

par C. NICOLIS

Institut d'Aéronomie Spatiale

*ABSTRACT: The principal steps of paleoclimatic evolution since the mesozoic era are outlined. Special emphasis is put on the variability of the possible behaviors of the earth-atmosphere system. The climatic effects of factors of external origin (solar output, orbital variations) or of factors generated by the system's internal dynamics (ice-albedo feedback, fluctuations) are reviewed, and the need for a mathematical modelling is pointed out. A brief description of the results of the analysis of simple energy-balance models is given, and the climatic importance of the abrupt transition and bifurcation phenomena predicted by these models is discussed.*

## 1. L'évolution climatique

Un des aspects les plus frappants du climat terrestre est sa variabilité très prononcée. Ainsi, à l'échelle de la décennie, nous constatons des périodes anormalement rudes ou sèches. A l'échelle du millénaire, nous relevons, grâce aux méthodes de plus en plus perfectionnées de la paléoclimatologie, des changements considérables dans la fertilité du sol et les conditions d'humidité et de température de certaines régions du globe. A l'échelle de dizaines de milliers d'années, nous avons les glaciations de l'ère quaternaire, couvrant de façon intermittente les derniers 1.800.000 ans. Enfin, à des échelles plus longues s'ajoutent des changements de l'environnement géologique (position des continents et reliefs), de la composition de l'atmosphère, ou de l'influx solaire.

Parmi les épisodes climatiques récents, le plus dramatique est sans aucun doute la dernière glaciation [1, 2]. Elle a atteint son maximum il y a 18.000 ans et ses vestiges sont encore en place. Alors qu'actuellement environ 30 millions de km<sup>3</sup> de glaces sont stockés (principalement en Antarctique et au Groenland), il y en avait alors 70 à 80 millions, recouvrant en outre l'Amérique du Nord et l'Europe Septentrionale. L'eau ainsi gelée provenait de l'océan, dont le niveau avait baissé d'environ 120 mètres. A l'occasion du réchauffement qui s'est ensuite produit, une grande partie de la glace a fondu et les lignes de rivage se sont fixées au contour que nous leur connaissons actuellement.

Toutefois, l'existence de calottes glaciaires polaires n'est pas un caractère permanent de notre globe, et dans un passé plus lointain (il y a 20 millions

d'années) il n'existait pratiquement pas de glace continentale. Le niveau de la mer dépassait le niveau actuel de 80 mètres environ. Pendant la partie de l'ère tertiaire antérieure à cette date ainsi que pendant l'ère mésozoïque (il y a 200 à 60 millions d'années) le climat était particulièrement clément : 8 à 10°C aux pôles, 25 à 30°C à l'équateur. En revanche, les zones d'anticyclones subtropicaux s'étendaient vraisemblablement jusqu'à une latitude de 50 à 60° au lieu de 30° qui caractérise notre ère.

Les changements climatiques survenus entre ces régimes si différents sont caractérisés par une échelle de temps beaucoup plus courte que la durée des régimes eux-mêmes. C'est ainsi qu'il y a 38 millions d'années, en 100.000 ans environ, la température des eaux de surface et des eaux profondes a baissé de plusieurs degrés au sud de la Nouvelle Zélande. Cet événement reflète très probablement le début du courant Antarctique provoquant une diminution des échanges thermiques entre les basses et les hautes latitudes, et dès lors un refroidissement rapide de la masse d'eau ainsi isolée près des régions polaires. Par ailleurs, en revenant à l'ère quaternaire, on sait que chacune des grandes glaciations qui se sont succédé s'étendait sur une période d'environ 90.000 ans, mais se terminait brusquement sur une période de 10.000 ans.

Depuis la fin de la dernière glaciation (il y a environ 10.000 ans) le climat est caractérisé par une relative stabilité. Les dernières traces des calottes glaciaires continentales (à l'exception de l'Antarctique et du Groenland) ont fini par disparaître au cours de la période chaude de l'optimum climatique (il y a 6.000 à 7.000 ans). Depuis, il semble se produire un refroidissement progressif, les températures actuelles étant de 1 à 2° inférieures à celles de l'optimum climatique. Toutefois, par rapport à cette tendance, on observe à l'échelle du siècle de nombreuses fluctuations correspondant à des variations de température de l'ordre de 1°C. Il en est ainsi de la période de climat doux de 800-1200 de notre ère au cours de laquelle Eric le Rouge découvre le Groenland (la « Terre verte ») et la frontière de la culture de vigne se situe à 500 km environ au nord de la ligne actuelle.

Un aspect particulièrement surprenant de l'optimum climatique que nous venons de citer est l'apparition de périodes humides [7] dans toute la zone actuellement aride qui s'étend de la Mauritanie (17° Ouest) au Rajasthan (78° Est). Même dans le centre hyperaride du Sahara, qui reçoit actuellement moins de 5 mm de précipitation par an, il y avait des rivières permanentes et une agriculture avancée, indiquant une précipitation annuelle de 300-400 mm.

Ces changements considérables posent évidemment le problème de la dépendance de l'homme par rapport à son environnement, surtout du point de vue de la production agricole. Une étude récente effectuée aux Etats-Unis montre que les récoltes sont peu sensibles aux variations de la température mais dépendent linéairement de la quantité de pluie tombée pendant les mois d'été [2]. Or les exploitations agricoles utilisent actuellement les découvertes agronomiques d'amélioration des rendements orientées sur les conditions clima-

tiques moyennes des dernières décennies. De plus, à cause de la demande accrue, les réserves mondiales de grain sont actuellement relativement basses [3], de sorte qu'une sécheresse future prolongée pourrait avoir des répercussions incalculables. Il est dès lors indispensable d'entreprendre une étude des causes de changement climatique : *Quels sont les facteurs externes et internes qui interviennent dans le système climatique ? L'histoire climatique passée peut-elle se répéter ? Quelle est l'influence des activités de l'homme sur l'évolution « naturelle » du climat ?* [3, 4]. Nous esquissons une brève analyse de ces questions dans le paragraphe suivant.

## 2. Sensibilité climatique aux facteurs externes et internes

Le principal facteur contrôlant le climat terrestre est, sans aucun doute, l'*influx solaire*  $Q$  (énergie par unité de temps et de surface reçue aux confins de l'atmosphère), appelé aussi constante solaire. Il a été établi que la luminosité du soleil, comme d'ailleurs celle de la plupart des étoiles de la séquence principale, croît avec le temps. L'influx  $Q$  serait donc moins élevé (de quelques pourcents) il y a quelques centaines de millions d'années par rapport à sa valeur actuelle. Il apparaît ainsi un paradoxe : Par quel mécanisme la terre a-t-elle pu échapper aux glaciations durant l'ère mésozoïque ? Et inversement, comment se fait-il que les glaciations du quaternaire surviennent lors d'une période d'accroissement continu de  $Q$  ? Quelles que soient les réponses spécifiques à ces questions, il y a une conclusion évidente qui s'impose : *Le système climatique ne suit pas, de manière passive et linéaire, la variation de l'influx solaire.* En d'autres termes, les facteurs internes (composition de l'atmosphère, effets radiatifs, nuages, processus de transport) introduisent une modulation très complexe des effets externes.

Un second élément à considérer est l'ensemble des *variations des caractéristiques orbitales de la terre*. Elles sont à l'origine d'une perturbation de la distribution latitudinale et saisonnière de l'insolation, mais n'affectent pratiquement pas l'influx moyen annuel  $Q$ . Selon Milankovitch, ces perturbations auraient pu causer les glaciations du quaternaire [5]. Il existe actuellement une évidence statistique suggérant que les derniers épisodes climatiques présentent une périodicité proche de celle des éléments orbitaux (soit environ 100.000, 40.000 et 22.000 ans). Toutefois, tous les modèles élaborés prévoient des valeurs des perturbations de la température beaucoup trop faibles pour le passage à une glaciation, en particulier pour la périodicité de 100.000 ans. Encore une fois, il semble que la dynamique interne du système terre-atmosphère joue un rôle au moins aussi important que les variations orbitales.

Avec une échelle de temps très longue également, la *variation des positions des continents* a certainement joué un rôle climatique non négligeable. Rappelons qu'il y a 200 millions d'années, l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Inde, l'Australie et l'Antarctique formaient un continent unique, la « Gondwana ».

De même que l'Eurasie, le Groenland et l'Amérique du Nord formaient « Laurasia ». La dérive des continents qui s'est ensuite produite a contribué à la diminution des échanges d'énergie dans la direction méridionale en provoquant, notamment, l'isolation progressive de l'Arctique il y a environ 10 millions d'années.

La constitution de l'atmosphère terrestre est un autre facteur climatique important. Ainsi la présence de quantités excessives d'aérosols — dues, par exemple, à des éruptions volcaniques particulièrement violentes et fréquentes — diminue l'énergie solaire reçue. Inversement, la présence de substances qui absorbent sensiblement dans l'infrarouge, telles que le  $\text{CO}_2$  ou le  $\text{NH}_3$  induit un « effet de serre » qui a tendance de chauffer le système terre-atmosphère. Par ailleurs l'apparition de la vie modifia radicalement la composition de l'atmosphère et de la surface terrestre et constitua donc un élément d'évolution climatique de grande importance.

Pour terminer ce bref aperçu signalons l'influence des effets se déroulant sur une échelle de temps plus courte. Parmi ceux-ci, les fluctuations jouent un rôle particulièrement important. Ces écarts aléatoires d'une variable ou d'un paramètre autour de sa valeur moyenne surviennent à tout moment, de façon spontanée, dans tout système complexe comprenant un grand nombre de sous-unités. On peut penser qu'ils permettent au système d'explorer différentes issues possibles et de diriger l'évolution vers un état préférentiel. Des études paléoclimatiques [1] ont mis en évidence des variations apparemment aléatoires de plusieurs quantités intervenant dans la description du climat : température de surface des océans pendant la fin de l'ère tertiaire ; avancement et retrait de certains glaciers ; variabilité de l'influx solaire et ainsi de suite.

Les perturbations aléatoires que nous venons de décrire ne sauraient influencer le système terre-atmosphère s'il n'y avait pas, au sein de ce système, des mécanismes d'amplification d'origine interne. Un exemple frappant est l'interaction entre les calottes glaciaires et les processus radiatifs [4]. Nous savons que le pouvoir réfléchissant de la glace (albedo) est très élevé. Supposons que, par une perturbation que nous n'avons pas à spécifier à ce stade, une des calottes glaciaires se déplace légèrement vers l'équateur. L'augmentation de l'albedo qui en résulterait serait responsable d'une diminution de l'énergie reçue par le système terre-atmosphère, ce qui refroidirait le système ; En conséquence, la calotte glaciaire perturbée s'étendrait davantage, ce qui diminuerait encore la température ! Nous sommes en présence d'un phénomène connu sous le nom de *processus de rétroaction*, très courant en climatologie, qui confère à la dynamique un caractère non linéaire très prononcé. Par ailleurs, toutes ces rétroactions se déroulent dans des conditions écartées de l'équilibre thermodynamique. En effet, le système terre-atmosphère reçoit la majeure partie de l'énergie solaire dans les régions équatoriales à température élevée, et évacue une grande partie de cette énergie aux régions polaires à température plus basse. Il en résulte un écart systématique de tem-

pérature entre équateur et pôles (dit « gradient méridional ») nourri par l'influx solaire : nous sommes en présence d'un exemple-type d'état de non-équilibre.

### 3. Modèles climatiques

Les faits exposés dans les paragraphes précédents mettent en évidence la complexité considérable du système climatique. En effet, nous sommes en présence d'un très grand nombre de processus extrêmement divers, en interaction permanente : La circulation dans l'atmosphère et les océans ; les processus de formation des nuages, d'évaporation et de précipitation ; ou encore les phénomènes radiatifs d'absorption, de réflexion ou de diffusion du rayonnement solaire incident, ainsi que du rayonnement infra-rouge émis par la surface de la terre et par l'atmosphère. L'intégration de tous ces éléments dans un cadre cohérent, ainsi que la simulation de leur changement fait l'objet de la modélisation mathématique, qui joue actuellement un rôle central dans la recherche climatique. Au cours des 10 dernières années deux points de vues complémentaires ont émergé.

(i) *Approche détaillée tenant compte de la circulation atmosphérique générale* [8]. La surface de la terre et l'atmosphère sont découpées en secteurs. Les principales propriétés caractéristiques sont paramétrisées d'après les données expérimentales. L'évolution des différentes variables comme la température est alors obtenue par simulation sur ordinateur des équations de bilans d'énergie et de quantité de mouvement. A cause du nombre très élevé de variables, la simulation est limitée à des temps relativement courts de l'ordre de quelques années.

(ii) *Approche globale limitée à la dynamique des variables les plus importantes*. L'exemple classique est l'équation de bilan énergétique suivant la latitude (cf. Fig. 1). Dans ce modèle, on effectue une moyenne sur la longitude et sur l'altitude et on s'attache essentiellement au comportement du courant méridional d'énergie sous l'effet de l'influx solaire et de l'émission infra-rouge,

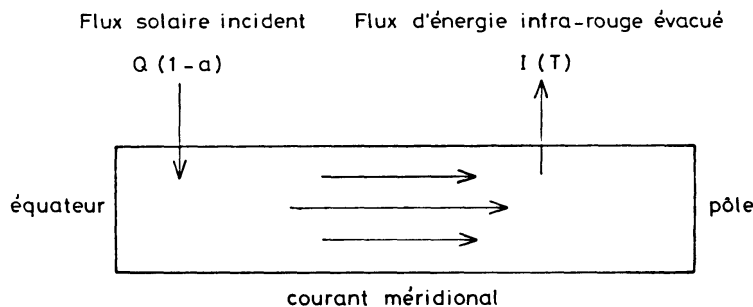


Fig. 1. -- Représentation schématique des échanges énergétiques dans un modèle climatique à une dimension.



$I(T)$ . L'énergie solaire effectivement reçue par le système terre-atmosphère, qui dépend des processus radiatifs extrêmement complexes, est exprimée en terme de l'albédo,  $a$ , du système (pouvoir réfléchissant de la matière), qui en général dépend de la latitude  $\phi$ , et de la température  $T$ . On arrive ainsi à l'équation du bilan pour l'énergie interne  $E$  à la latitude  $\phi$  [4, 6, 10] :

Variation de  $E =$  (énergie reçue)  $-$  (énergie évacuée)  $+ (transport)$   
soit

$$\frac{\partial E}{\partial t} = Q S(\phi) [1 - a(T, \phi)] - I(T) - \text{div}_{\phi} \tilde{j}$$

où  $\tilde{j}$  est le courant méridional d'énergie et  $S(\phi)$ , la distribution moyenne annuelle de l'insolation suivant la latitude. Dans le membre de gauche on applique les relations thermodynamiques bien connues pour écrire la variation de l'énergie interne au cours du temps sous la forme :

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = C \frac{\partial T}{\partial t}$$

où  $C = (\partial E / \partial T)$  est le coefficient de capacité calorifique du système. L'équation du bilan prend alors la forme :

$$C \frac{\partial T(\phi, t)}{\partial t} = Q S(\phi) [1 - a(T, \phi)] - I(T) - \text{div}_{\phi} \tilde{j} \quad (1)$$

Afin d'analyser le comportement prévu par l'éq. (1), il est nécessaire de déterminer comment  $\tilde{j}$  dépend de la température et de son gradient, ainsi que la forme de l'albédo. Il a été établi qu'une relation phénoménologique, analogue à celle décrivant le transfert d'énergie par conduction dans un fluide isotrope, reproduit le climat actuel de façon satisfaisante. Cette relation, connue sous le nom de la *loi de Fick*, a la forme suivante [9] :

$$\tilde{j} = -D \nabla T \quad (2)$$

Par ailleurs, la forme de l'albédo est conçue de telle manière que les rétroactions les plus importantes (cf. 2<sup>me</sup> paragraphe de l'article) soient incorporées. La représentation la plus utilisée introduit une discontinuité de  $a(T, \phi)$  à la latitude  $\phi_s$  où se situe la « ligne de glace » marquant l'extension vers l'équateur des calottes glaciaires [4, 6, 9].

En réalité, ces représentations de  $\tilde{j}$  et de  $a$  sont sensées tenir compte d'un grand nombre de facteurs qui n'interviennent pas explicitement dans l'équation de bilan (1) : couverture nuageuse, caractéristiques du sol, interaction atmosphère-hydrosphère-cryosphère. Pour incorporer ces éléments, on fait souvent appel à des paramétrisations déduites à partir des données expérimentales, notamment à l'aide des satellites météorologiques.

Moyennant ces représentations mathématiques du courant méridional et de l'albedo, l'équation (1) peut être résolue et fournit un profil de température à l'état stationnaire,  $T_o(\phi)$ . La principale caractéristique de la solution est, sans aucun doute, l'apparition des phénomènes de *bifurcation* : Lorsque les paramètres caractéristiques (tels que  $Q$ ,  $D$ , etc) atteignent des valeurs critiques un régime climatique cesse brusquement d'être stable et cède sa place à un régime qualitativement différent.

Dans la Fig. 2, nous représentons, dans un cas particulier [9], la position de la ligne de la glace,  $\phi_s$ , en fonction de la constante solaire  $Q$  réduite par rapport à sa valeur actuelle,  $Q_0$ .

Nous constatons que pour  $Q/Q_0 = 1$ , il existe un régime climatique *stable* semblable au régime actuel ( $\phi_s \cong 72^\circ$ , voir Fig. 2 branche (a)). Toutefois, ce régime n'est pas la seule solution stable. Il existe un régime *stable* de climat « blanc » où les calottes glaciaires couvriraient l'entièreté du globe ( $\phi_s \cong 0^\circ$ , voir Fig. 2 branche (b)). Ces deux climats sont séparés par un état *instable* (Fig. 2 branche (c)) et sont dès lors tous les deux métastables par rapport à des perturbations finies. En outre, le climat terre sans calottes glaciaires ( $\phi_s = 90^\circ$ , courbe (d)) reste possible pour la valeur actuelle de la constante solaire. Notons que les solutions (b) et (d) deviendraient les seuls climats réalisables si la constante solaire reçue par le système terre-atmosphère diminuait de quelques pourcents seulement.

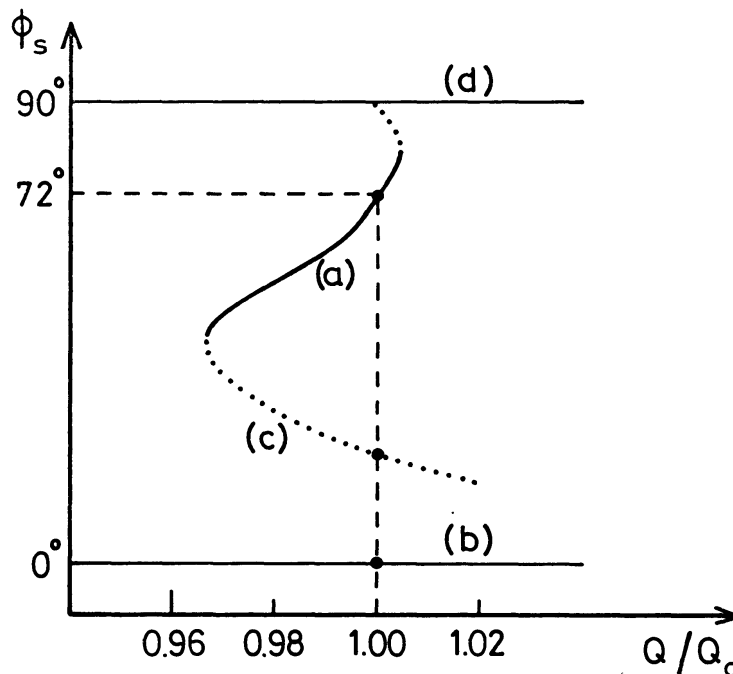


Fig. 2. — Multiplicité des régimes climatiques associée à des phénomènes de bifurcation des solutions de l'éq. (1). Les lignes pleines et pointillées représentent, respectivement, des états stables et instables. Nous constatons que pour la valeur actuelle de la constante solaire il y a 3 régimes climatiques stables (a), (b), (d).

Ces transitions abruptes entre deux régimes climatiques qualitativement différents, déduites de ce modèle climatique simple, sont à rapprocher à l'évidence expérimentale suggérée par les recherches paléoclimatiques. Nous avons en effet vu au paragraphe 1 de cet article que des changements climatiques abrupts caractérisés par une échelle de temps beaucoup plus courte que les régimes climatiques eux-mêmes se sont produits dans le passé.

Faut-il s'attendre à ce que ces événements dramatiques se répètent dans l'avenir ? Actuellement nul ne peut prétendre détenir la réponse à cette question. Une chose est certaine : Dans un monde en pleine explosion démographique, une des tâches majeures de la science devra être l'étude de la dépendance de l'homme par rapport à son environnement, c'est-à-dire essentiellement l'analyse de la variabilité climatique et de ses incidences sur notre société technologique. Une telle étude ne peut être développée que dans un cadre interdisciplinaire qui favorise un effort à long terme. Elle doit faire appel à de nouvelles données paléoclimatiques, à l'analyse des interactions entre l'hydrosphère, l'atmosphère et la cryosphère et à la modélisation mathématique.

#### REFERENCES

##### *Revue Générale*

- [1] LAMB H.H., 1977 : *Climate : Present, Past and Future*, volume 2, Methuen and Co, London.
- [2] LORIUS C. et J.C. DUPLESSY, 1977 : Les Grands Changements Climatiques. *La Recherche* 8, 947-955.
- [3] SCHNEIDER S.H., 1976 : *The Genesis Strategy : Climate and Global Survival* (avec L.H. Mesirov), Plenum, N.Y.
- [4] SMIC, 1971 : *Inadvertent Climate Modification. Report of the Study of Man's Impact on Climate*. MIT Press, Cambridge, Mass.

##### *Articles spécialisés*

- [5] BERGER, A.L., 1978 : *Long term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes*. *J. Atmos. Sci.*, 35, 2362-2367.
- [6] BUDYKO M.I., 1969 : The effect of solar radiation variations on the climate of the earth. *Tellus*, 21, 611-619.
- [7] FLOHN H., 1979 : dans « *Man's Impact on Climate* », pp. 15-28, Elsevier Publ., W. Bach, J. Pankrath, W. Kellog (Eds).
- [8] MANABE S. and R.T. WETHERALD, 1967 : Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.*, 24, 241-259.
- [9] NORTH G.R., 1975 : Theory of energy balance models. *J. Atmos. Sci.*, 32, 2033-2043.
- [10] SELLERS W.D., 1969 : A climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system. *J. Appl. Meteor.* 8, 392-400.