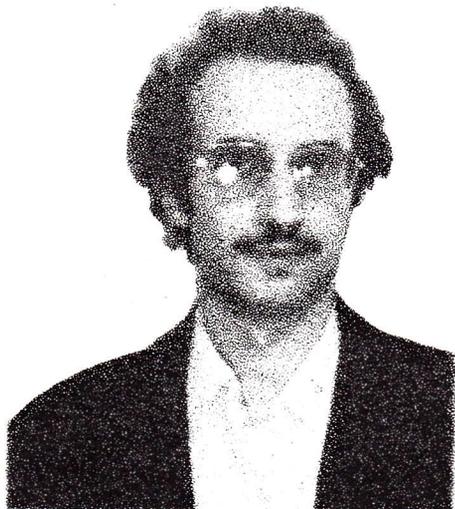


LE CLIMAT DU FUTUR

J.F. Royer (*)



Le climat exerce une influence considérable sur les activités humaines. Mais l'homme est encore presque complètement désarmé devant les caprices du temps, et leurs conséquences au niveau de l'agriculture et de l'économie. Il se préoccupe donc d'arriver à une meilleure connaissance des phénomènes climatiques. Ses outils : des modèles qui permettent de simuler le climat. Aujourd'hui, à trois jours de distance ; demain, peut-être, des prévisions à plus longue échéance...

Le climat exerce une influence, plus ou moins directe, mais souvent déterminante, sur les diverses activités de l'homme et sur sa vie quotidienne. Alors que les autres éléments naturels du cadre géographique semblent être relativement stables, le climat apparaît, dans ses variations d'une année à l'autre, soumis à des fluctuations mystérieuses et imprévisibles. Une fluctuation de plus grande amplitude qu'à l'ordinaire surtout si elle a des répercussions néfastes sur la vie économique, ne manque pas de susciter dans l'opinion publique de graves inquiétudes pour l'avenir, la crainte qu'un tel changement soit permanent et irréversible.

Ne sait-on pas en effet que dans un passé certes lointain dans l'histoire humaine, mais tout récent dans l'histoire géologique, notre planète a connu un régime climatique fort différent du régime actuel, et que des calottes glaciaires de plus d'un kilomètre d'épaisseur ont recouvert la partie septentrionale des continents ? Bien que de nombreuses théories aient été proposées, les causes de cette glaciation et des autres fluctuations du climat sont encore très controversées et très mal connues. Malgré les énormes progrès technologiques accomplis depuis le début du siècle, l'homme est encore à peu près totalement impuissant face aux énergies gigantesques mises en œuvre dans les phénomènes météorologiques et climatiques, et désarmé devant les caprices du temps, les adversités du climat, et leurs répercussions sur l'agriculture et sur l'économie.

D'autre part, la croissance industrielle elle-même, par les modifications de la surface terrestre et les nombreuses pollutions atmosphériques qu'elle entraîne, fait déjà sentir son influence sur la climatologie locale (îlot de chaleur des villes). On estime que, vers la fin de ce siècle, cette influence pourrait s'étendre et avoir des répercussions sur le système climatique tout entier.

En raison du grand danger potentiel que ferait courir à notre civilisation tout bouleversement climatique de quelque ampleur, qu'il soit dû à des causes naturelles ou anthropogéniques, il devient urgent de se préoccuper de ce problème et d'arriver à une meilleure connaissance des phénomènes qui contrôlent le climat et en assurent la stabilité. Une telle recherche doit s'appuyer à la fois sur l'étude des climats du passé reconstitués à l'aide des techniques de la paléoclimatologie, sur l'observation globale du climat actuel, notamment au moyen de satellites, et sur une étude conduite à l'aide de modèles physico-mathématiques.

Ces derniers sont, en quelque sorte, des maquettes numériques du système climatique et, intégrés par ordinateur, permettent

de simuler son comportement. Ils sont donc les outils essentiels grâce auxquels on réalise des « expériences climatiques » dont on peut contrôler tous les paramètres et ils jouent ainsi, pour le théoricien des climats, un peu le même rôle que le laboratoire pour le physicien. C'est en multipliant de telles expériences que l'on arrivera progressivement à édifier une théorie du climat sur laquelle pourront s'appuyer des tentatives de prévision scientifique de son évolution.

Étude statistique du climat : un calcul sur 30 ans

Essayons tout d'abord de préciser un peu cette notion de climat. L'état instantané de l'atmosphère constitue le « temps » qui change très souvent. Cette grande variabilité conduit, pour des raisons pratiques, à considérer un état moyen de l'atmosphère que l'on appelle le climat. Cette distinction se justifie par le fait que la plupart des systèmes auxquels on s'intéresse (comme, par exemple, une production agricole) ne réagissent aux fluctuations du temps qu'à travers un certain filtre qui intègre ces fluctuations. On peut donc concevoir le climat comme un ensemble statistique dont les éléments aléatoires seraient constitués par les états instantanés de l'atmosphère au cours de la succession temporelle des situations météorologiques et chercher à déterminer les paramètres statistiques de cet ensemble. La structure de cet ensemble est rendue particulièrement complexe par la présence du cycle des saisons qui se reflète très nettement dans les statistiques mensuelles, et qui est, effectivement, un changement régulier de climat. Les paramètres climatiques sont donc fonction du temps, ce qui rend d'autant plus difficile leur estimation.

La solution apportée à ce problème par la climatologie classique consiste à découper le climat en 12 sous-climats distincts selon les mois de l'année, d'introduire une hypothèse de stationnarité et de calculer des statistiques sur 30 ans pour estimer les paramètres de chacun de ces sous-climats.

Dans cette optique, les fluctuations interannuelles, c'est-à-dire les différences entre les statistiques mensuelles d'une année à l'autre, sont interprétées comme des fluctuations dues à la méthode d'échantillonnage, autrement dit, comme un bruit de fond plutôt gênant que les moyennes sur 30 ans ont précisément pour but d'éliminer, afin de mettre en évidence le signal utile : les paramètres statistiques qui sont les caractéristiques du climat. Toute estimation à l'aide d'un échantillon fini

(*) Établissement d'Études et de Recherches Météorologiques - Paris.



s'accompagnant d'une certaine erreur aléatoire, la question des changements de climat revient à déterminer si les écarts entre les paramètres climatiques calculés pour deux périodes distinctes sont ou non significatifs par rapport à un test statistique approprié.

Cette méthodologie a l'avantage de reposer sur des bases statistiques solides, mais il ne faut pas oublier les hypothèses sur lesquelles on les édifie. Le postulat sous-jacent est que le climat est stationnaire ou varie très lentement (en dehors du cycle saisonnier) et, pour bien le souligner, on pourrait qualifier cette climatologie de « climatologie statique ».

Les utilisateurs de données climatologiques font ainsi implicitement des prévisions climatiques. En utilisant les valeurs relatives à une période passée (les valeurs climatiques sont généralement calculées pour la période 1930-1960) pour représenter les caractéristiques du climat de la période actuelle ou des années à venir, ils supposent que le climat est stationnaire et le restera. Cette méthode de persistance, en l'absence d'une théorie scientifique des changements de climat, reste, à l'heure actuelle, une des procédures les moins arbitraires... et les moins aléatoires.

Diverses méthodes statistiques peuvent être appliquées à l'étude de la structure

Vents contraires et astrologie.

des séries temporelles constituées par les valeurs mensuelles d'un élément climatique et offrir certaines possibilités de prévision. Citons, par exemple, la méthode d'ajustement d'une tendance linéaire, dont l'extrapolation conduit souvent à des déboires. Parmi les avatars de cette méthode, on peut rappeler que, dans la première moitié du siècle, on avait constaté une tendance à la hausse des températures en de nombreux points du globe.

Un réchauffement en l'an 2000 ?

Certains ont attribué cette hausse à l'accroissement de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère et, extrapolant cette tendance jusqu'en l'an 2000, ont prévu un réchauffement de plusieurs degrés qui pourrait entraîner la fonte des calottes glaciaires, submergeant une grande partie des zones habitées (c'est la fonte des glaces continentales de l'Antarctique et du Groënland qui provoquerait une remontée du niveau de la mer et non celle de la banquise polaire puisqu'elle est constituée de glace flottant à la surface de l'Océan Arctique).

Puis, la tendance s'étant renversée, autour de 1950, on a pu craindre le retour d'un épisode glaciaire... En fait, des variations similaires ont déjà été observées dans le passé. En regardant les courbes correspondantes, on a l'impression que chaque fois qu'une tendance semble se dessiner nettement (et donc pouvoir offrir un espoir de prévision) elle tend aussitôt après à se renverser (et à déjouer notre prévision), comme si le système climatique était animé d'une sorte d'oscillation pseudopériodique au voisinage d'une position d'équilibre.

Des prévisions décevantes

Beaucoup d'espoirs avaient été fondés sur l'étude des périodes de ces oscillations qui permettrait, peut-être, de mettre en évidence des cycles climatiques réguliers ou de retrouver, dans les fluctuations du climat, l'influence de cycles connus comme celui des taches solaires. Le bilan de plus d'un siècle de recherche dans ce domaine est assez décevant : beaucoup de ces études n'ont pas été conduites avec une rigueur suffisante, ni selon une méthode statistique précise et il est difficile de juger la valeur de leurs résultats. Les cycles mis en évidence se révèlent souvent tout aussi capricieux que les tendances et tendent à disparaître, ou à changer de phase, lorsqu'on croit les tenir... Des analyses plus rigoureuses montrent qu'on a en général un spectre continu de fréquences dont les amplitudes s'accroissent vers les basses fréquences, sur lequel peuvent se détacher quelques pics provenant d'oscillations un peu plus fortes. Mais les périodes ainsi trouvées, même lorsqu'elles atteignent un niveau de signification suffisant, ne représentent, en général, qu'un faible pourcentage de la variance et se révèlent de peu d'utilité pour la prévision.

Une exception intéressante mérite cependant d'être signalée. Des analyses de la composition isotopique d'une carotte de glaces fossiles prélevée au Groënland ont mis en évidence des périodes voisines de 80 et 180 ans dans le rapport O_{18}/O_{16} de deux isotopes de l'oxygène (ce rapport peut être relié à la température de l'air au moment de la formation de la glace).



En ajoutant deux sinusoïdes — ayant pour période 80 et 180 ans — on arrive à synthétiser une courbe mathématique représentant approximativement les variations observées depuis 1200. En extrapolant cette courbe mathématique, on peut prévoir que, si les cycles naturels persistent, on devrait observer un refroidissement jusqu'en 1990, suivi d'un léger réchauffement se terminant vers 2020.

Mais si on essaie de tenir compte (de façon très qualitative) de l'effet possible du gaz carbonique sur le climat, on arrive à une vision très différente. Dans l'hypothèse d'un accroissement annuel de 3 % de la consommation en combustible, si on admet que 50 % du CO₂ reste dans l'atmosphère et que 10 % d'accroissement du CO₂ conduit à une augmentation de 0,3° de la température globale, on obtient, pour « l'effet de serre » résultant, une courbe qui, ajoutée à la première (ce qui revient à supposer que l'« effet de serre » et les cycles agissent indépendamment sur le climat et sans interférence), fait apparaître que le refroidissement commencé vers 1940 serait bien plus faible, et qu'à partir de 1980 l'effet du CO₂ (qui avait été jusqu'alors compensé par des oscillations naturelles dont la cause est inconnue) deviendrait prépondérant et conduirait à un réchauffement sans précédent du climat global.

Ces deux courbes illustrent assez bien toutes les incertitudes liées à une extrapolation de tendances ou de cycles et à des

raisonnements qualitatifs dont la validité est souvent contestable.

Pour parvenir à des conclusions plus positives, il est nécessaire d'étudier plus en détail les processus qui gouvernent le climat et ses variations.

On voit se dessiner, à travers cette description du climat (voir encart), l'énorme complexité du système climatique qui fait intervenir à la fois, l'atmosphère, les océans, le sol, et la cryosphère (neiges et glaces). Cette complexité est encore accrue par l'existence de nombreux couplages (feedback) entre leurs éléments. Il y a beaucoup de rétroactions négatives qui tendent à amortir les oscillations et à maintenir le climat en équilibre. Par exemple, la relation entre la température et les pertes radiatives : un accroissement de température conduit à une augmentation du rayonnement infra-rouge émis, donc à une perte d'énergie plus grande qui tend à réduire la température.

Mais, il existe également des rétroactions positives qui tendent, au contraire, à amplifier les anomalies et sont un facteur d'instabilité. Un bon exemple est fourni par le couplage entre température et albedo (1) provoqué par une couverture neigeuse. La neige, qui ne peut persister que si la température est suffisamment basse, augmente l'albedo du sol (car elle est très réfléchissante) ce qui a pour effet de diminuer la fraction du rayonnement solaire absorbé par le sol et donc d'accroître le refroidissement initial. On remarque à ce propos l'importance capitale du cycle

L'Atlantique surveillé en permanence par le satellite géostationnaire SMS (Etats-Unis).

hydrologique, les changements de phase de l'eau intervenant dans les échanges énergétiques, tant par le transport de chaleur latente que par les variations importantes de l'albedo que provoquent les nuages et la neige.

La plupart de ces couplages sont fortement non-linéaires et la présence de certains déphasages (dûs à des temps de réactions différents pour diverses parties du système climatique) peut produire des oscillations entretenues qui peuvent nous apparaître comme des changements de climat si leur période est suffisamment longue. Outre ces causes internes, le climat est également sous la dépendance de facteurs externes tels que les variations possibles du rayonnement solaire, de la composition de l'atmosphère, de sa teneur en poussières (à la suite d'éruptions volcaniques) et des caractéristiques de la surface terrestre.

La multiplicité des causes internes ou externes qui peuvent agir simultanément rend extrêmement difficile et incertaine

(*) Établissement d'Etudes et de Recherche Météorologiques — Paris.

(1) c'est le rapport entre le rayonnement qui a atteint une surface et le rayonnement qui quitte cette surface. Par exemple dans le cas du rayonnement solaire : c'est le rayonnement qui n'est pas absorbé par le sol.

toute analyse empirique des fluctuations du climat. Pour progresser, il faut procéder à une analyse quantitative au moyen des équations physiques régissant ces phénomènes et construire un modèle mathématique traduisant de façon précise et détaillée leurs interactions et leur évolution.

Construire des modèles numériques

Ces modèles sont fondés sur l'application des lois bien connues de la physique. Les principes de la thermodynamique peuvent servir de base à des modèles décrivant le bilan des échanges énergétiques qui sont à l'origine du climat. Une des difficultés de cette approche, encore trop peu développée, est que de nombreux mécanismes essentiels doivent être représentés de façon très schématique par des formules empiriques incertaines. Étant donné que les mouvements atmosphériques et océaniques interviennent de façon essentielle dans ces échanges énergétiques, il est souhaitable de faire intervenir également leur dynamique.

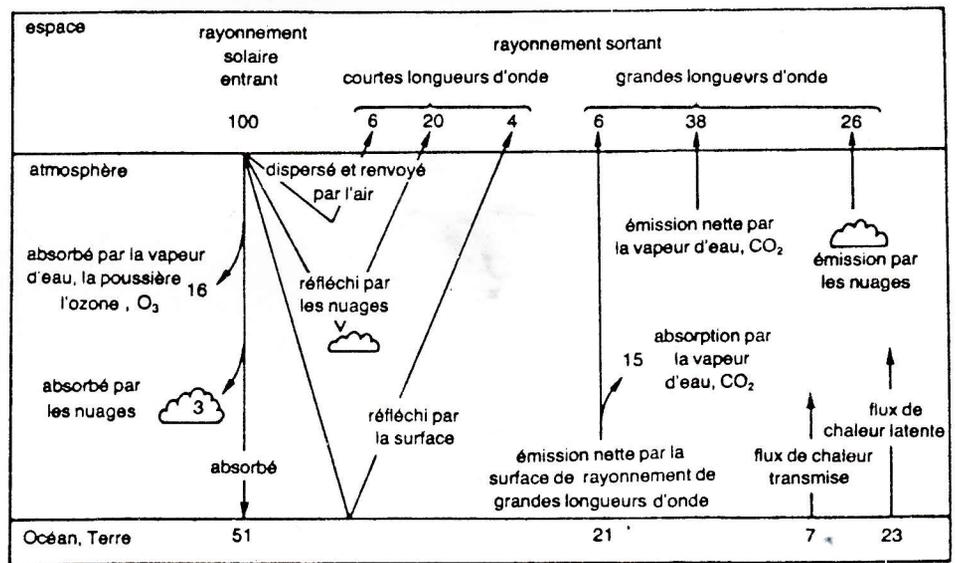
On juge donc préférable, à l'heure actuelle, de développer d'abord des modèles de circulation générale de l'atmosphère, fondés sur les équations de la mécanique des fluides. Ces équations représentent, sous forme différentielle, des principes élémentaires tels que la conservation de la masse (équation de continuité), le transport (ou advection) de chaleur, de quantité de mouvement et de vapeur d'eau, l'équation d'état et l'équilibre hydrostatique de l'atmosphère. Ce sont fondamentalement les mêmes équations que celles utilisées pour la prévision du temps et les techniques pour les résoudre sont similaires.

Les champs des divers paramètres atmosphériques (pression, température, vent, humidité) sont représentés par un nombre fini de composantes, soit par leurs valeurs aux nœuds d'une grille de calcul régulière, soit par les coefficients de leur décomposition en une série de fonctions particulières telles que les fonctions sphériques (méthodes spectrales).

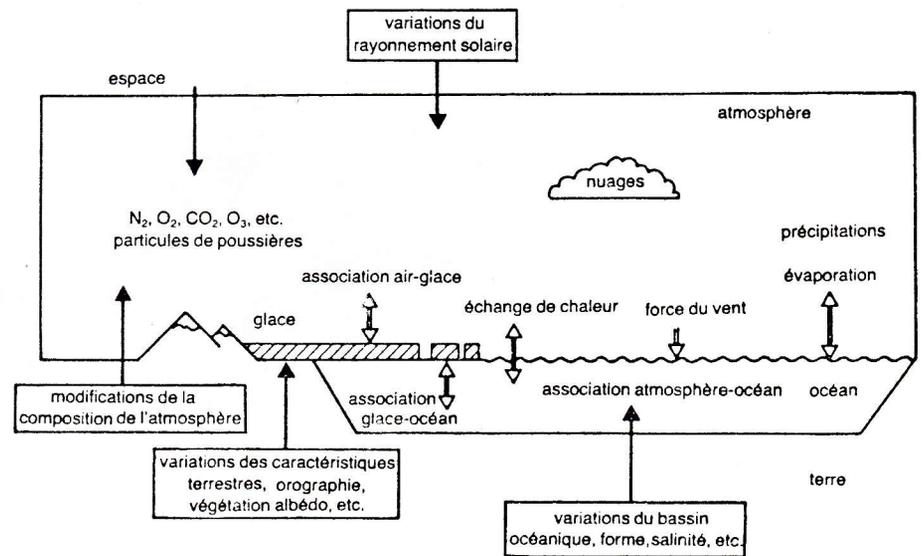
L'intégration de ces équations consiste à calculer des dérivés par rapport au temps, à partir desquelles on fait ensuite évoluer les diverses composantes selon un schéma numérique d'avance dans le temps. Les conditions de stabilité de ce schéma pour un modèle en équations primitives imposent le choix d'un pas de temps assez réduit (de l'ordre de 10 mn). Une formulation particulière, dite semi-implicite, ayant pour effet de filtrer certaines ondes atmosphériques, peut permettre d'étendre ce pas de temps jusqu'à 1 heure.

Une première différence entre les modèles de prévision et les modèles de circulation générale est que ces derniers doivent être globaux, mais peuvent se contenter d'une moins grande finesse dans la représentation spatiale, donc comporter moins de composantes. Par contre, comme il faut pouvoir les intégrer sur des durées plus importantes que les modèles de prévision, leurs critères de stabilité sont plus sévères. Les méthodes spectrales semblent particulièrement bien adaptées pour les modèles de circulation générale.

Un certain nombre de phénomènes ne peuvent être traités explicitement et leur effet doit être pris en compte à travers une « paramétrisation », c'est-à-dire une



Bilan des rayonnements dans le système atmosphère-terre, mettant en évidence la redistribution des rayonnements solaires qui entrent dans le système et les mécanismes de cette redistribution (d'après [2]).



- Processus physiques qui régissent le climat général

Bilan des rayonnements dans le système atmosphère-terre

représentation plus ou moins schématique en fonction des variables calculées par le modèle. C'est le cas notamment des mouvements d'une échelle inférieure à la résolution du modèle, des phénomènes de convection et de turbulence dans la couche limite.

Les échanges thermiques, qui ne jouent qu'un rôle secondaire pour la prévision du temps à quelques jours d'échéance, ont un effet cumulatif, et il est donc indispensable d'en tenir compte pour reproduire convenablement la circulation générale. Ceci conduit à introduire dans les modèles les équations du transfert radiatif des rayonnements visibles et infrarouge, le cycle hydrologique avec une paramétrisation appropriée des processus d'évaporation, de condensation et de précipitation, ainsi que des échanges turbulents de chaleur et de vapeur d'eau avec le sol ou l'océan. Les mécanismes de formation ou de dissipation des nuages sont très complexes et il est difficile de les in-

corporer dans les modèles ; on se contente souvent de prendre une répartition moyenne des nuages selon les statistiques climatiques, et de nombreuses recherches sont en cours pour améliorer la paramétrisation de la nébulosité.

Les paramètres relatifs à la couche superficielle du sol ou de l'océan doivent être spécifiés, car ils jouent pour l'atmosphère le rôle de conditions aux limites. On peut se contenter, en première approximation, de se donner des valeurs fixes pour la température de l'océan, car elle évolue beaucoup plus lentement que celle de l'air, et de calculer la température du sol qui équilibre à chaque instant ses gains et ses pertes de chaleur, ce qui revient à négliger sa capacité thermique. Il est important de tenir compte de la présence éventuelle d'une couverture neigeuse qui modifie alors profondément les échanges thermiques, et d'avoir une paramétrisation reflétant l'accumulation ou la fonte de la neige. Il y a bien entendu bien d'autres processus qui devront être incorporés dans les modèles de climat. A l'heure actuelle, on se contente d'y mettre les mécanismes

les plus importants pour réaliser des expériences qui permettront d'améliorer notre connaissance du fonctionnement de la circulation générale.

Les modèles aujourd'hui : quelques jours à l'avance

Les modèles de prévision numérique ne permettent de prévoir le temps qu'à quelques jours d'échéance. Des études théoriques ont montré que, même si on réalisait un modèle reproduisant parfaitement le comportement de l'atmosphère (ce qui est encore loin d'être le cas), on ne pourrait cependant pas prévoir le temps plus de trois semaines à l'avance à cause des imprécisions inévitables des conditions initiales. On peut donc s'étonner que des modèles, certes plus sophistiqués, mais identiques dans leur principe aux modèles de prévision soient utilisés pour simuler le climat. En réalité, les deux problèmes sont de nature très différente. Dans le cas de la simulation climatique, on ne cherche pas à savoir le temps qu'il fera un jour donné, mais simplement à reproduire le comportement moyen de l'atmosphère et de calculer ses propriétés statistiques. Il est beaucoup plus facile d'estimer la probabilité d'un événement aléatoire (ex : la fréquence d'apparition d'un chiffre donné à la roulette) que de faire une prévision déterministe d'un événement particulier (le prochain numéro qui va sortir). Le premier critère que l'on peut appliquer pour tester un modèle climatique, c'est de voir dans quelle mesure, partant d'une situation arbitraire (ex : l'atmosphère au repos), il est capable de reproduire dans ses statistiques les propriétés connues du climat présent.

Des reconstitutions paléoclimatiques

Les modèles actuels reproduisent assez bien les grands traits de la circulation générale et on peut donc les utiliser avec une certaine confiance dans diverses expériences.

On étudie à l'aide de ces modèles la sensibilité du climat par rapport à des facteurs extérieurs. Il est possible de réaliser des expériences dans lesquelles on fait varier l'un de ces facteurs et de déterminer si la réaction du modèle est significative, ce qui donne une indication de l'importance de ce facteur sur le climat. On peut ainsi voir quelle est l'influence d'une variation de la constante solaire, d'une augmentation du gaz carbonique, ou d'une anomalie de la température de l'océan.

Les modèles peuvent être utilisés également pour des reconstructions paléoclimatiques. On arrive maintenant, par diverses techniques, à reconstituer la température de l'océan et l'étendue des glaces pour diverses époques du passé. En introduisant ces températures et la couverture de glace comme conditions aux limites dans un modèle, on peut calculer les mouvements correspondants de l'atmosphère et reconstituer la circulation générale correspondante.

Les modèles climatiques sont ainsi des outils puissants pour l'étude du climat. Leur principal inconvénient provient du temps d'intégration assez long nécessaire pour réaliser une expérience climatique, car, pour avoir des statistiques valables, il faut simuler le comportement de l'atmosphère sur plus d'un mois, ce qui nécessite plusieurs heures de calcul sur les ordinateurs les plus performants.

J.F. R.

Qu'est-ce que le climat?

Le climat est formé par l'ensemble des états de l'atmosphère. Les propriétés de l'atmosphère dépendent, avant tout, de ses mouvements de grande échelle qu'on appelle la circulation générale. Une étape importante de la théorie des climats est donc la compréhension et la description appropriée de cette circulation générale, de ses propriétés et de ses causes.

La première question qui se pose est de savoir quel en est le moteur. Pour cela, il faut suivre les transformations de l'énergie solaire qui parvient à la frontière supérieure de l'atmosphère.

Une partie du rayonnement solaire incident est absorbée par l'ozone, le gaz carbonique, la vapeur d'eau, ou par les nuages, et est alors transformée directement en chaleur ; ou bien est renvoyée vers l'espace par diffusion sur les molécules d'air, les aérosols ou par réflexion sur les nuages. Une fraction du rayonnement arrivant finalement à la surface de la terre est encore réfléchi vers l'espace, le reste est absorbé par le sol ou les couches superficielles de l'océan. On appelle « albedo » le rapport d'un flux réfléchi sur le flux incident. L'albedo planétaire, voisin de 30 %, représente une valeur moyenne de l'énergie de rayonnement renvoyée vers l'espace, du fait de la diffusion, de la réflexion sur les nuages et de l'albedo de surface, qui varie selon la nature et l'état du sol ou de l'océan.

Sous l'action du rayonnement absorbé, cette surface s'échauffe et transmet de la chaleur à l'atmosphère, soit directement par conduction ou convection sous forme de chaleur sensible, soit sous forme de chaleur latente par production de vapeur d'eau (qui plus tard en se condensant libérera de la chaleur sensible), soit sous forme de rayonnement infra-rouge par transfert radiatif. Ces flux de chaleur conduisent à la formation au voisinage de la surface d'une couche limite dans laquelle les phénomènes de turbulence sont particulièrement intenses.

Les transferts radiatifs sont influencés par la présence dans l'atmosphère de constituants tels que le gaz carbonique, la vapeur d'eau, les nuages, qui absorbent le rayonnement infra-rouge et élèvent la température locale, provoquant ainsi un « effet de serre ». Finalement, après des absorptions et des émissions successives sur les diverses couches de l'atmosphère, les processus complexes du transfert radiatif aboutissent à la limite supérieure

de l'atmosphère à une perte d'énergie sous forme de rayonnement infra-rouge. Vue de l'extérieur, la Terre et son atmosphère apparaît ainsi comme une sorte de machine thermodynamique qui absorbe du rayonnement visible et rejette du rayonnement infra-rouge de plus basse fréquence, en convertissant une partie en énergie mécanique.

Comme il ne peut y avoir dans ce système ni accumulation, ni perte indéfinie d'énergie, il s'établit un équilibre, et le bilan radiatif global entre l'énergie reçue dans le visible et celle perdue dans l'infra-rouge, tend à être nul. Cet état d'équilibre dynamique, qui dépend des nombreux facteurs (nébulosité, albedo, vapeur d'eau...) intervenant dans les transferts de chaleur et de rayonnement, caractérise le climat de la planète, et toute modification de l'un de ces facteurs est susceptible de conduire à un déplacement de l'équilibre, donc à un changement de climat.

Plusieurs éléments contribuent à rendre inhomogène la répartition géographique de l'énergie reçue par le système : angle d'incidence moyen du rayonnement qui dépend de la latitude et de la saison (l'obliquité des rayons conduisant à répartir leur énergie sur une plus grande surface), nébulosité, albedo du sol qui dépend de sa nature géologique, de son état hygrométrique, des variations de sa couverture végétale ou d'une couverture neigeuse. C'est cette inégalité de la répartition du bilan radiatif, déficitaire aux pôles et positif près de l'équateur, qui entretient les mouvements de la circulation générale. Sous l'influence de la rotation de la terre, les mouvements ne se font pas directement dans le sens des gradients de température, mais sont déviés par la force de Coriolis, et conduisent à la formation des dépressions mobiles des moyennes latitudes qui jouent un rôle important dans les échanges d'énergie entre le pôle et l'équateur. Les océans ont une grande influence sur la circulation générale, car c'est à leur surface (couvrant 2/3 du globe) qu'est absorbée la majeure partie de l'énergie solaire. Les interactions océan-atmosphère sont malheureusement insuffisamment étudiées, de même que la circulation océanique, à laquelle on attribue maintenant 1/3 du transport d'énergie. L'inertie des océans, plus grande que celle de l'atmosphère, fait d'eux un élément stabilisateur très important puisqu'il tend à régulariser le climat.