



DE LA SCIENCE NATURELLE A L'INGENIERIE PLANETAIRE

A. Villevielle*

Pendant deux millénaires, la phénoménologie de l'atmosphère a été à la base des méthodes pratiques de prévision du climat. Mais d'autres approches sont aujourd'hui nécessaires pour entrer dans la prévision numérique. Quelle que soit l'ampleur des « modèles » construits, la qualité de la prévision restera malgré tout liée à celle de l'observation. Nombreux sont les instruments nouveaux offerts aux météorologistes : radar, laser, sondeur acoustique, aquasonde... Quant aux méthodes, elles intégreront demain des considérations liées au bilan énergétique et utiliseront peut-être la simulation en bassin hydraulique. A. Villevielle fait le point, pour « 2000 », de ce que l'on peut attendre de cette ingénierie à l'échelle de la planète.

Peu de temps avant notre ère, Lucrèce, poète latin, observait les orages et notait ce phénomène curieux : l'apparition de l'éclair donne, en général, le signal de déclenchement d'une averse violente. Il a fallu attendre la décennie 1960 pour que l'Américain Vonnegut vérifie la réalité physique de cette observation, à grand renfort de radars et de moyens aéroportés. Quant au mécanisme du phénomène, il reste, pour l'heure, inexpliqué.

On pourrait illustrer par cette anecdote le long chemin qui mène de la science naturelle — la « leçon de choses » de nos premières classes — à la science physique objective, c'est-à-dire au domaine du mesurable et du démontrable.

On peut y voir, en même temps, l'image de la complexité atmosphérique, où les facteurs les plus variés interviennent, dans des conditions souvent erratiques (l'orage), sous une forme essentiellement transitoire (l'éclair) et à une échelle de dimensions qui se situe, de toutes manières, très au-delà de l'échelle du laboratoire. Cette notion d'échelle est, à tous égards, fondamentale en météorologie.

Pour s'en faire une idée, reprenons le cas de l'orage. Les mécanismes élémentaires qui dirigent la formation du phénomène s'appellent évaporation et convection. Sous l'effet de l'insolation (on parle souvent, en été, des orages « de chaleur »), des bulles d'air chaud et humide s'élèvent du sol, comme de véritables montgolfières, invisibles (sauf un certain trouble qui est sensible à l'œil), et montent jusqu'au niveau où la vapeur d'eau contenue dans ces bulles vient à se condenser : ainsi se forme la particule d'air nuageux.

Par ce processus, on passe de la dimension de la bulle d'air (quelques dizaines ou centaines de mètres) à la dimension du nuage, où le kilomètre devient la nouvelle unité de compte.

Mais le nuage lui-même se construit en fonction des caractéristiques thermocinétiques générales de l'atmosphère, qui s'expriment à une échelle de dimensions supérieures, de la dizaine à la centaine, voire au millier de kilomètres. Par exemple, dans le cas de l'orage, interviennent à ces échelles tout à la fois l'instabilité et la convergence de basses couches qui conditionnent l'érection de la tour nuageuse, et la « ventilation » de l'atmosphère

supérieure qui favorise le tirage de cette sorte de cheminée atmosphérique.

Des modèles « Matriochka »

On voit de la sorte que l'événement atmosphérique représente, en réalité, la superposition de plusieurs étages d'événements fortement imbriqués entre eux. En termes scientifiques, on parlera de l'existence de plusieurs échelles de turbulence (échelle aérologique, échelle globale) et du couplage entre ces différentes échelles.

De façon peut-être plus évocatrice, nous avons proposé, à l'occasion d'un travail avec nos collègues soviétiques sur les problèmes de la convection, le nom de modèle « matriochka », du nom de ces poupées russes, qui s'emboîtent les unes dans les autres, la nème découvrant — ou « expliquant » — la (n + 1)ème.

Telle est bien l'image de l'atmosphère, avec ses échelles « emboîtées ». La plus grande de ces échelles — l'échelle de la « circulation générale » autour du globe —, est précisément l'échelle du climat.

La météorologie synoptique.

Les météorologistes parlent plus facilement d'échelle synoptique. L'explication de ce mot est intéressante parce qu'elle éclaire bien la genèse de la météorologie moderne.

Remontons à Torricelli pour l'invention du baromètre. C'est, comme Pascal le démontre très vite, un instrument de pesée de l'atmosphère. Au fil des années, on reconnaît (et les marins jouent un grand rôle dans cette découverte) que le baromètre donne une indication précieuse sur le temps.

Si l'atmosphère pèse lourd (hautes pressions), le temps stagne ; il peut souvent être beau. Si, inversement, l'atmosphère perd du poids, c'est l'annonce du vent, des pluies et des tempêtes. Mais tout ceci résulte d'observations isolées, ponctuelles.

(*) Chef de l'Établissement d'Études et de Recherches Météorologiques.

(*) Dès 1963, les météorologistes français ont pu montrer, grâce aux observations de satellites, que nombre de cyclones avaient, en réalité, une origine continentale, sur l'Afrique de l'Ouest.

(**) L'explication scientifique de cet état de choses tient à l'annulation d'un facteur dit « de CORIOLIS », associé au mouvement d'entraînement de la Terre en rotation.

La grande nouveauté qui s'introduit au milieu du siècle dernier, avec l'apparition de télécommunications performantes, c'est, en fait, la possibilité d'obtenir un ensemble d'observations coordonnées et synchrones, d'où le terme « synoptique » qui signifie littéralement « observer en même temps ».

Une catastrophe navale — le naufrage d'une partie de la flotte franco-anglaise au siège de Sébastopol, en Crimée — cristallisait, à ce moment, l'idée de la nécessité d'un réseau d'observation météorologique, pour suivre et prévoir l'évolution et le déplacement des grandes tempêtes. Dans les années 1870, naissait finalement une Organisation Internationale de la Météorologie, qui se donnait pour mission de coordonner les réseaux nationaux.

La circulation générale.

Appréhender les événements de l'échelle synoptique devenait dès lors l'objectif n° 1 des météorologistes.

On avait constaté, depuis longtemps, la prédominance d'une circulation générale de l'atmosphère d'Ouest en Est, accompagnant le mouvement de la Terre elle-même — et cette constatation allait dans le sens de la logique.

Mais, curieusement, la situation s'inverse aux latitudes basses, de l'Équateur aux Tropiques : la circulation générale se fait alors d'Est en Ouest, sous forme d'ondes, encore assez mal connues d'ailleurs. En témoigne aussi le mouvement des cyclones, qui migrent en été, depuis les Îles du Cap Vert (*) jusqu'à la mer des Antilles et aux côtes américaines.

En fait, la circulation tropicale n'a pas un caractère exactement « lié » (**); le champ de pression y est à peu près « plat », favorisant l'organisation de circulations autonomes, en cellules (cellules de Hadley), où les mouvements méridiens de hautes et basses couches se compensent. Ces cellules peuvent atteindre de grandes

dimensions et rendre compte d'échanges entre les deux hémisphères Nord et Sud. Le plus spectaculaire de ces échanges n'est autre que la mousson, dont on connaît les effets en Inde, mais qu'il faut situer aussi en Afrique, où elle conditionne la saison des pluies, avec parfois de graves irrégularités (cf. la sécheresse au Sahel, dont le paroxysme a duré plus de cinq ans).

La météorologie des régions tempérées obéit à des lois plus contraignantes.

On a parlé plus haut des « masses d'air ». Ce concept est important ; il traduit l'homogénéité et la constance des caractéristiques thermodynamiques d'une certaine portion de l'atmosphère en mouvement.

La médecine chinoise traditionnelle fait appel, comme on sait, à l'antagonisme du ying et du yang, le principe bénéfique

Projet Chimène : une veine liquide pour simuler la circulation atmosphérique (Centre de recherches de Magny-France).



et le principe maléfique, que la littérature concrétise dans les termes « vent d'Est, vent d'Ouest ».

C'est, d'autre manière, le chaud et le froid — le vent du Sud et le vent du Nord — qui caractérisent les « masses d'air ». Leur conflit est spectaculaire ; il engendre les « perturbations météorologiques », qui se manifestent de différentes manières : sur le baromètre, par une dépression ; dans le ciel, par des formations nuageuses très épaisses qui donnent la pluie.

Les perturbations ne sont pas, en règle générale, des individus isolés. Il existe, plus souvent, des chaînes de perturbations, qui correspondent à des ondes atmosphériques de grande extension, parfois établies en couronne circumterrestre. On parle alors des ondulations du front polaire, parce que l'activité de ces systèmes peut être reliée de façon directe au déplacement des grandes masses d'air froid. En

Le Bangla-Desh inondé en août 74 : des milliers de morts et de sans-abri ; un coût économique et social incalculable...

symétrie, on reconnaît que les précipitations les plus importantes sont associées aux masses d'air d'origine tropicale.

Dans tous les cas, le passage plus ou moins prolongé d'une masse d'air sur l'océan modifie évidemment, de façon considérable, sa structure et son comportement ultérieur.

Vers la prévision numérique du temps.

Cette phénoménologie de l'atmosphère a été longtemps la base des méthodes pratiques de prévision. On ne saurait manquer de citer ici deux Écoles, qui ont tenu une large place en météorologie jusqu'à une date relativement récente : l'École norvégienne, dite des « systèmes frontaux » (Bjerknes) et l'École française, dite « des masses d'air » (Bessemoulin, Pone).

Mais d'autres approches sont nécessaires pour entrer dans la prévision numérique. Comment prendre le problème ? Le mouvement le plus général de l'atmosphère peut être analysé comme

une aérodynamique particulière — une aérodynamique géante puisqu'elle se place à l'échelle du globe.

L'aérodynamique traditionnelle traite de l'écoulement de l'air autour d'un obstacle de forme quelconque ; la météorologie traite de l'écoulement de l'air autour de notre planète, c'est-à-dire autour d'un corps sensiblement sphérique, en rotation uniforme.

La complexité du traitement vient, naturellement, des contraintes particulières imposées par la géophysique : pesanteur qui « colle » l'atmosphère à la Terre, stratification verticale de l'atmosphère, rugosité inégale du sol et des océans, et surtout, inégalité de répartition du rayonnement solaire — le soleil jouant le rôle de source chaude dans la machine thermique atmosphérique.

Toutes les données du problème étant réunies, on dispose d'un système d'équations parfaitement classiques (ce qu'il est convenu d'appeler un « modèle »), que



l'on cherche à résoudre par des méthodes de « discrétisation », c'est-à-dire en procédant par « pas » d'espace et de temps.

L'atmosphère y est représentée dans un système à « points de grille », placé aux mailles d'un réseau géographique régulier, chaque maille ayant un côté de 250 km pour fixer les idées.

Ceci signifie que l'on néglige — provisoirement — les événements d'échelle inférieure, considérés à la manière d'un bruit de fond. Et c'est là, particulièrement, une des limites de l'efficacité de la méthode, et de l'échéance de la prévision, parce que ces événements négligés peuvent être instables et perturber, à terme, l'évolution générale : le « bruit », initialement léger, devient assourdissant.

Les techniques actuelles de prévision numérique donnent des résultats convenables pour les deux ou trois jours à venir. On peut espérer aller plus loin dans l'échéance prévisionnelle, par exemple :

quatre à cinq jours, peut-être la semaine, par des raffinements divers, qui portent notamment sur la réduction de l'erreur de « troncature » déjà citée et sur une meilleure évaluation de la physique des événements irréversibles : rayonnement, turbulence, changements d'état de l'eau.

Mais, de toute manière, la qualité de la prévision — ou pronostic — reste indissociablement liée à la qualité de l'observation — ou diagnostic.

8 000 stations dans le monde.

Sur ce point, la météorologie mondiale a déjà fait un très gros effort. Il y a près de 8 000 stations météorologiques de par le monde ; 500 d'entre elles pratiquent le sondage vertical, ou radiosondage, qui est indispensable pour connaître la stratification de l'atmosphère et le couplage entre les circulations à différents niveaux d'altitude.

Pourtant, ce réseau d'observation présente encore d'importantes lacunes, notamment sur les océans — soit les deux

tiers de la surface du globe. C'est alors qu'intervient le satellite, qui permet d'établir tout à la fois une densité spatio-temporelle et une homogénéité de l'information météorologique, inaccessibles au réseau traditionnel.

Cependant, le satellite ne saurait constituer une panacée : il a ses limites et ses insuffisances.

On n'échappe pas désormais à la complémentarité d'un système d'observation satellitaire et d'un système d'observation terrien. Celui-ci d'ailleurs, utilise de plus en plus des méthodes de sondage à distance — ou télésondage — mises à l'honneur par le satellite. Ainsi le radar, le laser (lidar) et le sondeur acoustique (sodar) offrent-ils de nouveaux champs d'intérêt pour les observateurs météorologistes.

Ces instruments, satellitaires ou terriens, demandent à leur tour l'aide d'autres instruments capables d'opérer *in situ*, au sein de l'atmosphère, pour calibrer leurs mesures. Ainsi de l'aquasonde, sonde de l'eau des nuages, actuellement développée en France.

Grâce à ces moyens d'observation augmentés, on ne peut douter que la prévision elle-même connaîtra des améliorations substantielles.

Tout au moins dans le domaine de ce que nous appellerons l'héritité rapprochée, à l'échéance de quelques jours, selon les techniques de physique mathématique évoquées plus haut.

S'agissant de prévoir beaucoup plus loin, et d'évaluer en somme le « climat du futur », ce sont d'autres méthodes qui seront mises en œuvre, basées par exemple sur des considérations de bilan énergétique ou peut-être sur la simulation en bassin hydraulique.

Modifier le climat : vers une ingénierie planétaire

De toutes manières, la prévision est entrée dans l'ère numérique. Elle requiert, dès aujourd'hui, les plus gros moyens de calcul existants. Son coût est donc, nécessairement, élevé.

Il est tout à fait singulier d'entendre parler du climat d'une région comme s'il s'agissait d'une constante bien précise et définitivement établie, alors que la perception immédiate, et la simple mémoire, nous en montrent l'extrême variabilité.

Certes lorsque l'on présente des « moyennes climatiques », comme la température, par exemple, les tableaux ne mentent pas : les chiffres cités ont leur valeur statistique, et il est remarquable qu'ils ne varient que relativement peu selon l'échantillonnage pratiqué (les séries d'observation dans le temps sont inégalement longues, et d'une homogénéité parfois discutable).

Mais, en fait, ces moyennes traduisent une certaine loi de compensation entre des écarts positifs et négatifs, et elles déforment, en quelque manière, la réalité, en « gommant » les extrêmes.

Or, l'homme est particulièrement sensible à ces extrêmes. D'abord, comme on peut le voir, par leurs conséquences historiques, puis par leurs conséquences économiques et, enfin, ce ne sont pas les moindres, par leurs conséquences sociologiques. (Voir plus loin : Socio Economie du Climat).



La prévision exige des moyens importants, que l'on peut chiffrer à plusieurs centaines de millions de dollars par an pour l'ensemble des pays du globe. De telles sommes seraient d'ailleurs justifiées par la seule amélioration du rendement agricole, qui représente un produit financier de dix à vingt fois supérieur. Mais est-ce suffisant ?

L'ambition de l'homme ne saurait longtemps se contenter d'une attitude passive, devant un milieu pour le moins capricieux, et parfois excessif dans ses agressions. Modifier le temps, c'est sans doute l'objectif qui nous est fixé pour demain.

Comme on le dira ailleurs, dans ce numéro, il n'est guère imaginable d'agir sur l'atmosphère à la dimension des grands phénomènes météorologiques « synoptiques ».

Climatiser la planète, comme on climatise un quelconque immeuble-tour, nous apparaît impossible, parce que les énergies à mettre en jeu sont tout à fait hors de notre portée (on voudra bien se souvenir qu'un seul orage isolé représente, en termes de puissance, la charge de plusieurs bombes atomiques).

Mais on peut, par contre, jouer sur le caractère instable — ou métastable — de certaines manifestations de l'atmosphère, pour en changer l'évolution au moyen d'une énergie de déclenchement (« trigger ») relativement minime. Ainsi, le judoka profite-t-il de la vitesse propre et de la « quantité de mouvement » de son adversaire pour faire basculer celui-ci et en triompher.

On peut raisonnablement espérer se rendre maître, de la sorte, de certains phénomènes météorologiques, au moins aux petites échelles.

Ce sera le cas du brouillard, qui n'est, en somme, qu'un nuage aux caractéristiques particulières, plaqué au sol ; de la grêle, qui prend naissance dans les parties supérieures des nuages à grand développement vertical ; de la foudre, qui s'élabore à partir de ces mêmes nuages.

Dans les trois cas cités, il s'agit d'éliminer des nuisances, de caractère sporadique ou intermittent.

Il est malheureusement beaucoup plus difficile d'imaginer une action généralisée pour régulariser la production principale de l'atmosphère, à savoir l'eau de la pluie ou de la neige.

Plusieurs approches sont possibles. Toutes se ramènent au déclenchement du processus d'avalanche, par lequel les petites gouttelettes d'eau formées au stade de la nucléation initiale, se rassemblent, ou comme on dit : « coalescent », pour constituer les grosses gouttes de la précipitation.

Il existe des nuages, à structure verticale et pénétrant dans les zones glacées de l'atmosphère, qui présentent, à cet égard, une instabilité naturelle. Le problème est alors : quel détonateur adopter ? où placer le détonateur ?

Aucune solution vraiment satisfaisante n'a été trouvée jusqu'ici, tant du point de vue de la définition des produits d'« insémination » du nuage, qu'au point de vue des véhicules (fusées, moyens aéroportés) qui sont capables d'introduire ces produits dans la zone sensible.

Mais l'espoir existe et les actions de recherche se multiplient dans ce sens, au niveau national (Action concertée DGRST) comme au niveau international, dans le ca-

dre de l'Organisation Météorologique Mondiale.

L'« océan aérien » : un milieu fragile.

« Cette mer qui nous entoure ». On se souvient du livre qui a connu un succès mondial, dans lequel Rachel Carson nous donne à réfléchir sur l'importance de cet environnement maritime, et sur sa précarité.

Sommes-nous aujourd'hui convenablement sensibilisés sur ce fait que notre premier environnement géophysique est l'environnement aérien, autrement dit : l'atmosphère ?

C'est, d'abord, on doit le rappeler, un des réceptacles essentiels de la vie. Et il est bien clair que la qualité de l'atmosphère et du climat conditionne largement la qualité de la vie physiologique. Comme son homologue marin, l'océan aérien est un milieu en état de variabilité incessante. Il peut être agressif, mais il est aussi agressé par la pollution et d'autres nuisances anthropogéniques.

Il a fallu, d'ailleurs, cette agression extérieure pour que l'homme prenne véritablement conscience de ce que l'atmosphère représente une partie, parmi les plus précieuses et les plus fragiles peut-être, de son patrimoine naturel. On doit donc se préoccuper de sa meilleure gestion, dans le double souci de la protéger et de rentabiliser l'utilisation de ses ressources (et d'abord : l'eau).

Les études sur le climat sont destinées, dans ces conditions, à un rapide développement au cours des prochaines années. On cherchera à en mieux connaître les causes et, sinon à les maîtriser, du moins à en régulariser les effets. C'est une œuvre d'imagination scientifique, c'est aussi un pari technique difficile, en raison de la complexité des mécanismes et de l'énormité des puissances mises en jeu.

Une carte météo classique : situation générale de l'Europe et évolution probable (23 au 26 Mai 1976).

