



Le temps qu'il fera

Claude Basdevant, *professeur à l'Université Paris 13 et à l'École polytechnique*

La prévision météorologique ou climatique n'est pas une mince affaire. Elle implique la modélisation de nombreux phénomènes de natures différentes et l'intervention de plusieurs sciences, des mathématiques à la biologie, en passant par l'informatique, la physique ou la chimie.

Derrière les petits nuages gris ou soleils radieux qui parsèment la carte de France au bulletin météo du soir, il y a longtemps qu'il n'y a plus de grenouille et de thermomètre, mais des ordinateurs super puissants, auxquels on a fait absorber un grand nombre de mesures (obtenues principalement par satellite), beaucoup de lois de la mécanique et de la physique, mais aussi beaucoup de mathématiques, parfois très récentes.

Pour que les ordinateurs fournissent des prévisions, il faut élaborer au préalable ce qu'on appelle un *modèle numérique de prévision du temps*. Schématiquement, un tel modèle de prévision à l'échéance de huit à dix jours représente l'état de l'atmosphère à chaque instant par les valeurs des paramètres météorologiques (vitesse du vent,

température, humidité, pression, nuages, aérosols, etc.) aux centres de « boîtes » d'environ deux à vingt kilomètres de côté et de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de hauteur. Ce découpage imaginaire de toute l'atmosphère en boîtes est inévitable, car il est impossible de spécifier les paramètres météorologiques en tous les points de l'atmosphère (ces points sont en nombre infini !). En principe, plus les boîtes sont petites – et donc nombreuses –, plus la description de l'état atmosphérique est précise, et plus les prévisions le seront aussi. Mais en pratique, les boîtes ne font pas moins de quelques kilomètres pour une prévision régionale à courte échéance, et quelques dizaines de kilomètres pour une prévision à dix jours qui est nécessairement sur toute la planète; en deçà, la puissance

des plus gros ordinateurs ne suffirait pas : il faut bien que le calcul s'achève en temps utile, c'est-à-dire en nettement moins de 24 heures !

Partant de l'état de l'atmosphère supposé connu au début de la période à prévoir, le modèle fait calculer par l'ordinateur son évolution future en utilisant les lois de la dynamique et de la physique. L'évolution dans le temps est calculée pas à pas, par intervalles de quelques minutes. Tel est le principe de la prévision numérique du temps, un principe connu depuis le début du xx^e siècle mais qui a attendu les années 1940-1950 et les premiers ordinateurs avant d'être mis en œuvre.

Des mesures inexploitablement directement

Premier problème dans le schéma idéal de prévision qui vient d'être décrit : savoir construire l'état initial de l'atmosphère. Les observations sont loin d'être bien adaptées à cet exercice. Les stations météo au sol sont fort mal réparties sur le globe et fournissent très peu de mesures en altitude. Quant aux satellites, ils sont pour la plupart à défilement, c'est-à-dire qu'ils balayent continûment la Terre. Leurs mesures ne sont donc pas obtenues au même instant en tous points. De plus, les satellites mesurent des quantités intégrées sur toute l'épaisseur de l'atmosphère (il s'agit en général des flux d'énergie reçus dans une certaine gamme de longueurs d'onde) et non pas les grandeurs météorologiques (vent, température, humidité, etc.) qui entrent en jeu dans les équations des modèles.

On dispose donc d'une masse de données disparates, mal distribuées à la surface du globe, étalées sur 24 heures, connues avec des incertitudes variables, avec lesquelles il faut *initialiser* une prévision, c'est-à-dire construire un état météorologique initial dont le modèle simulera l'évolution. Or grâce aux travaux sur l'*optimisation dynamique*, domaine auquel ont beaucoup contribué le chercheur russe Lev Pontriaguine (1908-1988) et l'école mathématique française, on a pu mettre au point, dans les années 1980, des méthodes dites d'*assimilation variationnelle* qui permettent de reconstruire de façon optimale l'état initial. L'idée sous-jacente à ces méthodes, opérationnelles depuis l'année 2000 à Météo-France, est d'obliger en quelque sorte la trajectoire du modèle numérique à passer « près » des données observées pendant les 24 heures précédentes tout en préservant l'équilibre du modèle. L'assimilation variationnelle n'est d'ailleurs pas la seule technique mathématique moderne qui a bouleversé le traitement des observations : l'utilisation des réseaux neuromimétiques ou des ondelettes, inventés dans les années 1980, a donné lieu à des gains spectaculaires en efficacité, précision et rapidité dans le traitement des données fournies par les satellites.

On dispose donc d'une masse de données disparates, mal distribuées à la surface du globe, étalées sur 24 heures, connues avec des incertitudes variables.



Quand l'analyse numérique entre en action

Une fois connu l'état atmosphérique initial dont a besoin le modèle numérique de prévision, reste à écrire le programme informatique capable de calculer le temps futur à partir de cet état initial et des lois de la physique. Ces lois reposent sur une description continue de l'espace et du temps. Or notre modèle numérique, lui, ne connaît qu'un nombre, certes grand, mais fini, de boîtes. De plus, les intervalles de temps entre deux états calculés sont de plusieurs minutes – on dit que le problème a été *discrétisé*. Passer des équations continues à des schémas numériques pour le modèle discrétisé, tout en gardant la meilleure précision possible, tel est le domaine de l'analyse numé-

rique, une branche des mathématiques qui a explosé depuis l'arrivée des ordinateurs. L'analyse numérique a pour but de savoir résoudre des équations et mener les calculs jusqu'au bout, c'est-à-dire jusqu'à l'obtention de valeurs numériques précises, en investissant le moins de temps et d'efforts possible. Elle est indispensable pour que simulation ne soit pas synonyme de simulacre et pour évaluer l'incertitude des prévisions. Par exemple, des progrès très importants ont été obtenus récemment concernant les méthodes permettant de simuler le déplacement des espèces chimiques ou des particules dans la turbulence atmosphérique. Ces avancées ont significativement amélioré l'étude et la prévision de la pollution de l'air.

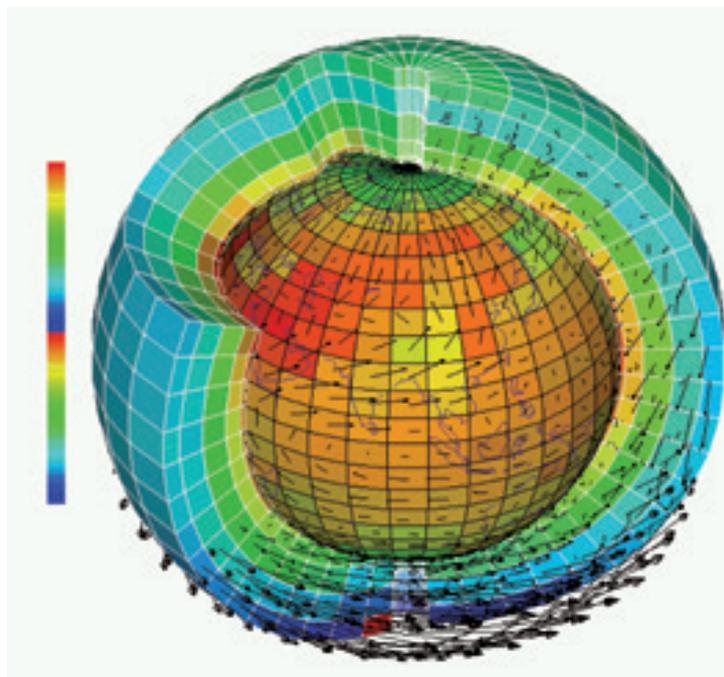


Figure 1. Vue d'artiste des boîtes de calcul d'un modèle de prévision du temps ou du climat. (L. Fairhead LMD/CNRS)

Les prévisions météo sont-elles fiables ?

Un des grands défis de la prévision météorologique est de pouvoir estimer la qualité de ses prévisions; sont-elles fiables à l'échéance de trois, quatre, voire dix jours? Au-delà de l'intérêt pour tout un chacun voulant organiser ses loisirs ou son activité, cette question a des impacts humains ou économiques forts, que ce soit pour la prévision d'évènements extrêmes qui peuvent être dévastateurs ou pour la gestion de productions d'énergie ou de crèmes glacées! Si les progrès constatés a posteriori sont très importants, il reste difficile d'estimer a priori la fiabilité des prévisions. Depuis

quelques années, des outils issus du croisement entre la théorie des systèmes dynamiques et celle des probabilités ont permis de développer ce qui s'appelle la *prévision d'ensemble*: celle-ci consiste à ne plus faire une prévision à partir d'un seul état initial mais à faire en parallèle un grand nombre de prévisions (50 en général) à partir d'état initiaux perturbés. La théorie des systèmes dynamiques permet de choisir les perturbations initiales les plus sensibles, alors que la théorie des probabilités permet d'extraire de la divergence des simulations une information sur la fiabilité de celles-ci et de calculer la probabilité qu'un évènement précis se produise.

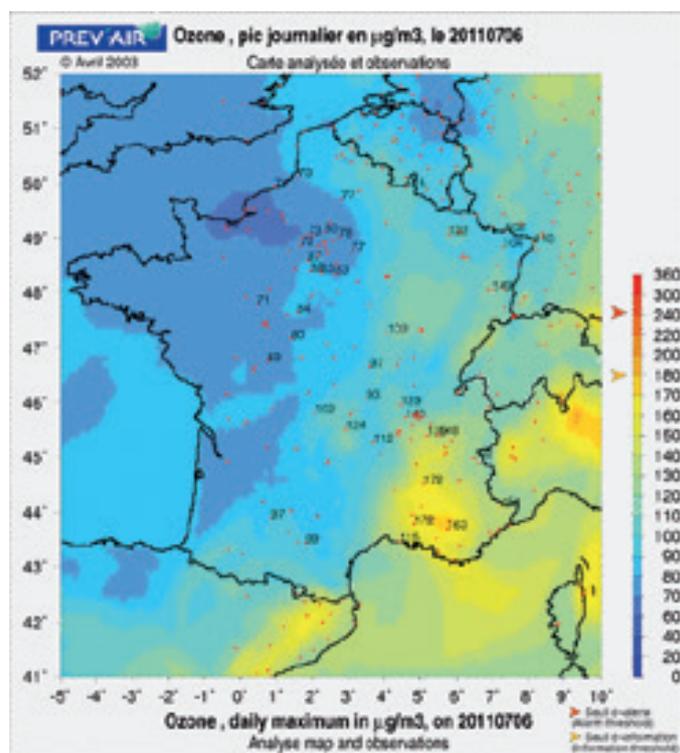


Figure 2. Concentrations d'ozone en surface le 6 juillet 2011 données par le système de prévision nationale de la qualité de l'air PREVAIR (INERIS/IPSL/Météo-France). En couleurs, les concentrations prévues par le modèle de chimie-transport CHIMERE; les valeurs numériques sont les pics de concentration observés dans la journée par le réseau de surveillance.

Peut-on prédire le temps long-temps à l'avance? Non, indique la théorie des systèmes dynamiques.

On a évoqué jusqu'ici la prévision du temps à courte échéance, de huit à dix jours. Mais pourquoi ne fait-on pas des prévisions à plus longue échéance? Le météorologue américain Edward N. Lorenz, dans un célèbre article de 1963, a montré que c'était probablement sans espoir. L'atmosphère est un système chaotique, c'est-à-dire que toute erreur sur l'état météorologique initial, aussi petite soit-elle, s'amplifie rapidement au cours du temps; si rapidement qu'une prévision à l'échéance d'une dizaine de jours perd toute sa pertinence. Néanmoins, cela ne veut pas dire que l'on ne peut pas prévoir le climat – c'est-à-dire faire une prévision de type statistique plutôt que déterministe, s'intéresser à la moyenne des températures ou des précipitations sur une période et une région, plutôt qu'au temps précis qu'il fera sur Quimperlé en Bretagne tel jour du mois de juillet. L'enjeu est d'importance: notre climat futur est menacé par les rejets de gaz dus aux activités humaines et il faut prévoir l'effet à long terme de ces perturbations, conséquences de l'effet de serre. C'est la théorie des systèmes dynamiques qui donne des outils pour justifier cette modélisation du climat. Ce domaine, pour lequel le mathématicien Henri Poincaré, au début du xx^e siècle, fut un grand précurseur, a connu des progrès très importants dans les dernières années du xx^e siècle. La théorie des systèmes dynamiques permet par exemple de dégager ce que les mathématiciens appellent des *attracteurs*, ou des *régimes*

de temps pour les météorologues. Elle permet aussi de savoir quels sont les régimes de temps les plus prévisibles et ceux qui sont les plus instables. Dans les situations d'instabilité, un bon outil serait la modélisation probabiliste du climat, c'est-à-dire la conception de modèles prenant explicitement en compte le caractère aléatoire de la prévision. Encore peu développées, les modélisations de ce type doivent s'appuyer sur des outils très récents de la théorie des équations aux dérivées partielles stochastiques et des statistiques.

Des prévisions météorologiques aux prévisions climatiques

Les modèles numériques de prévision du climat ressemblent comme des frères aux modèles de prévision du temps, à deux différences essentielles près. Pour des raisons de temps de calcul, leurs « boîtes » sont nécessairement plus grandes (100 à 300 km de côté); les temps simulés allant de quelques mois à des centaines voire des milliers d'années, il est impossible d'être plus précis. Mais la différence importante tient au fait que les variations climatiques ont lieu à de longues échelles de temps, et qu'il n'est alors plus possible de négliger dans les interactions entre l'atmosphère, l'océan, les glaces de mer, la biosphère les évolutions de ces autres domaines. C'est pourquoi un modèle de climat doit combiner un modèle d'atmosphère, un modèle d'océan, un modèle de glaces de mer, un modèle de biosphère et tous les cycles d'échanges d'énergie, de quantité de mou-



vement, d'humidité, de gaz, ainsi que les couplages chimiques entre ces milieux. Au-delà de la complexité informatique d'une telle construction, se posent de délicats problèmes mathématiques sur la bonne manière de coupler ces domaines et sur la spécification des conditions aux interfaces atmosphère-océan, océan-glaces, etc. Et pour que le calcul dans les « grandes boîtes » reste significatif, il faut évaluer l'effet statistique, à l'échelle de ces boîtes, de

processus qui se produisent à des échelles beaucoup plus petites (par exemple: quel est l'effet statistique, sur le bilan d'énergie d'une boîte de 300 km de côté, des petits cumulus de quelques km de diamètre qui s'y développent?). Il reste, dans toutes ces questions, encore beaucoup de matière à développements interdisciplinaires dans lesquels les mathématiques tiennent une place importante.

Bibliographie

Jouzel J., Debroise A., (2004). *Le climat: jeu dangereux, quelques prévisions pour les siècles à venir*, éd. Dunod.

Le Treut H., Jancovici J.-M., (2004). *L'effet de serre: allons-nous changer le climat?*, éd. Flammarion.

Sadourny R., (2002). *Le climat est-il devenu fou?*, éd. Le Pommier.

–, (2003). *Peut-on croire à la météo?*, éd. Le Pommier.

–, (2005). *D'où viennent les tempêtes?*, éd. Le Pommier

Temam R., Wang S., (2000). *Mathematical Problems in Meteorology and Oceanography*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 81, p. 319-321.

Autres références possibles :

Joussaume S., (2000). *Le Climat: d'hier à aujourd'hui*, CNRS Editions.

Hauglustaine D., Jouzel J., Le Treut H., (2004). *Climat: chronique d'un bouleversement annoncé*, éd. Le Pommier.

