

# Prévisions du temps et du climat : chronique d'une révolution

par Peter Lynch\*

**Actuellement, on peut savoir plus tôt s'il faut emporter son parapluie lors d'une journée maussade, grâce à la révolution que constitue la prévision météorologique et climatique.**

Les avancées spectaculaires des prévisions météorologiques au cours des cinq dernières décennies ont apporté de grands bénéfices à l'humanité. Lorsqu'elles sont disponibles, des prévisions précises sauvent de nombreuses vies, et grâce aux alertes précoces, réduisent les conséquences des phénomènes météorologiques violents. Des prévisions détaillées et fiables présentent une valeur économique énorme, et de nombreuses études démontrent que leurs bénéfices sont d'un ordre de grandeur bien supérieur aux frais engagés.

Les avancées de la modélisation du climat au cours des cinquante années écoulées ont été, elles aussi, remarquables. Des modèles de circulation générale ont été mis au point et utilisés pour examiner les facteurs responsables des évolutions de notre climat, et leur probable échéance.

Lorsque le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme a été établi en 1976, on osait à peine rêver de prévisions à dix jours. L'objectif officiel du Centre était de produire des prévisions météorologiques à échéance de quatre à dix jours. En février 2010, la « barrière des 10 jours » a été franchie.

\* Directeur du Centre météorologique et climatique, École des sciences mathématiques, Collège universitaire de Dublin, Irlande. Courriel : Peter.Lynch@ucd.ie

## Naissance de la prévision scientifique

La thermodynamique, qui a effectué un grand pas au XIX<sup>e</sup> siècle, venait compléter l'ensemble des lois fondamentales gouvernant les mouvements atmosphériques. Autour de 1890, le grand météorologue américain Cleveland Abbe a constaté que la météorologie consiste tout simplement à appliquer les lois hydrodynamiques et thermodynamiques à l'atmosphère.

Peu après, le scientifique norvégien Vilhelm Bjerknes analysait le temps de manière plus explicite, grâce à une procédure en deux étapes. Dans la phase de *diagnostic*, l'état initial de l'atmosphère est déterminé grâce aux observations ; dans la phase de *pronostic*, les lois de la dynamique sont utilisées pour calculer la façon dont cet état évolue avec le temps. Bjerknes ne voyait pas la possibilité de mettre en œuvre ses idées, sur le plan pratique.

Le scientifique anglais Lewis Fry Richardson s'est révélé plus audacieux. Les prévisions de Richardson consistaient à mettre en œuvre la phase de pronostic de Bjerknes. Comme le mentionnait Richardson, son système est compliqué, car l'atmosphère elle-même est très complexe. Il impliquait un volume phénoménal de calculs numériques, qu'il était impensable d'effectuer dans l'ère pré-informatique. Mais Richardson ne s'est pas laissé intimider. « Peut-être sera-t-il possible dans

un futur lointain d'effectuer les calculs plus vite que l'atmosphère n'évolue... Mais cela reste un rêve », déclarait-il en 1922. Aujourd'hui, les prévisions sont calculées opérationnellement sur des ordinateurs puissants faisant tourner des algorithmes qui ressemblent étrangement à ceux de Richardson. Son rêve s'est donc concrétisé.

Alors que le rêve de Richardson semblait irréalisable à l'époque où son livre a été publié, des évolutions majeures au cours des décennies suivantes, ont ouvert la porte au progrès.

Une évolution en profondeur de la *théorie de la météorologie* a permis une connaissance indispensable de la dynamique atmosphérique. Des avancées en *analyse numérique* ont garanti l'établissement d'algorithmes stables. L'invention de la *radiosonde* et son utilisation dans le réseau mondial ont rendu disponibles des observations de l'atmosphère en trois dimensions en temps opportun. Enfin, l'*ordinateur* a fourni un moyen de traiter l'énorme volume de calcul nécessaire à la prévision météorologique.

Au milieu des années 1930, John von Neumann a commencé à s'intéresser à l'écoulement des fluides turbulents. Von Neumann connaissait le travail pionnier de Richardson, et a bien vu que les progrès en hydrodynamique s'accéléraient si l'on avait un moyen de résoudre les équations complexes. Il était évident qu'il fallait compter sur des machines à calculer rapides et automatiques. Von Neumann considéra que la prévision du temps – problème d'une

## Les pionniers de la prévision numérique



Avec l'aimable autorisation d'Oliver Ashford



© Nora Rosenbaum

Lewis Fry Richardson (à gauche) et Jule Charney (à droite)

importance pratique considérable et d'un intérêt scientifique intrinsèque – était un problème idéal pour un ordinateur.

Von Neumann discuta des perspectives de la prévision numérique du temps avec Carl Gustaf Rossby, qui convainquit Jule Charney de participer au projet. Charney dirigea le « Princeton Project » (USA) pendant huit ans, et notamment l'équipe qui effectua les premières prévisions du temps sur ordinateur.

### Les ordinateurs, moteurs de la révolution de la prévision

Des dispositions furent prises pour faire tourner l'intégration sur ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), le seul ordinateur disponible à la fin des années 1940. Les intégrations sur ENIAC ont vraiment constitué une étape révolutionnaire ; en effet, la prévision météorologique avait toujours été considérée comme un Grand Défi, tout au cours de l'histoire de l'informatique. Quatre prévisions à 24 heures furent effectuées. Chaque intégration à 24 heures a demandé à peu près 24 heures de calcul, c'est-à-dire que l'équipe arrivait tout juste à « suivre » le temps qu'il faisait.

Les prévisions ENIAC furent effectuées en utilisant un modèle extrêmement simplifié. Pendant les années qui ont suivi, plusieurs modèles plus sophistiqués et plus réalistes furent élaborés.

### Les modèles climatiques deviennent de plus en plus sophistiqués

L'impact des changements climatiques présente une importance énorme pour notre avenir, et les modèles climatiques globaux sont le meilleur outil que nous possédons pour anticiper les évolutions probables.

Norman Phillips (Université de Princeton, États-Unis) a effectué la première simulation à long terme de la circulation générale de l'atmosphère en 1956, pour un mois environ.

À la suite des travaux fondateurs de Phillips, de nombreux modèles ont été développés. Ils prennent désormais en compte le réchauffement solaire, le rayonnement terrestre, la convection et la turbulence à petite échelle et bien d'autres processus. Les modèles modernes englobent les océans, la cryosphère et les processus continentaux. Le modèle EC-Earth, mis au point par une communauté de scientifiques européens, s'appuie sur IFS, le Système de prévisions intégrées.

Il est utilisé pour fournir des simulations numériques de pointe pour les états passés, présents et futurs de la Terre (<http://eearth.knmi.nl/>).

Les modèles atmosphériques exhaustifs font partie des prouesses les plus éclatantes de la météorologie au XX<sup>e</sup> siècle. Ces modèles sont affinés et améliorés en permanence, et mettent en jeu des processus de plus en plus sophistiqués et élaborés. Ils simulent l'atmosphère et les océans ainsi que les rétroactions chimiques et biologiques. Ces modèles, aujourd'hui appelés Earth System Models (Modèles du système terrestre), sont appliqués à la prévision numérique ainsi qu'à l'étude de la variabilité du climat et de l'impact de l'humanité sur celui-ci.

### La prévision météorologique numérique aujourd'hui

Il n'est pas exagéré de décrire les progrès effectués au cours du dernier demi-siècle comme une révolution. Grâce à ces travaux, la météorologie est désormais fermement établie comme une science quantitative, et sa valeur et validité sont démontrées chaque jour par le test impitoyable auquel doit se soumettre toute science : sa capacité à prévoir le futur.

Les prévisions opérationnelles utilisent aujourd'hui les sorties d'un large éventail de modèles. Dans la plupart des centres, on s'appuie sur une combinaison de modèles globaux et locaux. On peut considérer, à titre d'exemple, le modèle global du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme. Les objectifs du centre consistent à fournir des prévisions de plus en plus précises et dont les échéances vont de quelques jours à quelques saisons. Opérationnel depuis 1979, le Centre continue à développer des prévisions et autres produits dont la précision et la qualité ne cessent de s'accroître, confortant ainsi sa position de meilleur centre du Monde.

### L'avènement de la prévision d'ensemble

La nature chaotique des écoulements atmosphériques est maintenant bien

comprise. Il impose ses limites à la prévisibilité – les erreurs inévitables de l'état initial s'amplifient rapidement, et enlèvent toute utilité aux prévisions après un certain nombre de jours. Le moyen le plus efficace de franchir cet obstacle consiste à faire tourner une série, ou ensemble de prévisions, chacune partant d'un état initial un peu différent. Pour permettre un degré d'incertitude, les paramètres physiques des modèles de prévision sont également perturbés de manière aléatoire. Les résultats combinés sont utilisés pour en déduire les futurs changements dans l'atmosphère.

Depuis le début des années 1990, la prévision d'ensemble est opérationnelle au Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme ainsi qu'aux National Centers for Environmental Prediction à Washington. Au CEPMMT, on effectue un ensemble de 51 prévisions, chacune ayant une résolution deux fois moindre que la version déterministe.

Les prévisions probabilistes sont devenues un guide essentiel pour la prévision à moyen terme. Une fois produites, elles sont diffusées aux centres opérationnels pour y être utilisées. Le Centre européen, par exemple, prépare des prévisions saisonnières à une échéance de six mois. Elles sont effectuées sur la base d'un modèle couplé océan-atmosphère, et un grand nombre de prévisions sont combinées en un ensemble chaque mois.

Ces prévisions d'ensemble ont montré leur valeur dans les régions tropi-

cales. Les prévisions récentes de l'arrivée d'El Niño et La Niña ont été impressionnantes. Par contre, aux latitudes tempérées, et notamment pour la région Europe, on n'obtient pas encore de résultats significatifs. En effet, la prévision saisonnière pour les latitudes tempérées est l'un des plus grands problèmes que nous affrontons aujourd'hui.

## Les applications sont nombreuses, du verglas sur les routes aux fumées des incendies de forêt

La prévision à court terme demande des sorties détaillées, mises à jour fréquemment. De nombreux services météorologiques nationaux font tourner des modèles à haute résolution sur des zones limitées pour fournir de telles sorties.

Les alertes précoces pour les phénomènes météorologiques extrêmes pourraient en être l'application la plus importante. Il serait possible de sauver de nombreuses vies et d'éviter des dommages conséquents grâce à ces alertes. Transport, consommation d'énergie, bâtiments, tourisme et agriculture, tous sensibles aux conditions météorologiques, ont une demande de plus en plus forte de précision pour les prévisions à court terme, afin de prendre en permanence des décisions ayant des implications financières importantes.

La communauté maritime utilise également la prévision numérique.

Les vents prévus sont utilisés dans les modèles qui estiment la hauteur et la période des vagues et de la houle. Les cartes de prévisions de l'état de la mer, ainsi que d'autres produits spécialisés peuvent être calculés automatiquement et distribués aux utilisateurs.

Les alertes de verglas sont fournies par des modèles utilisant des prévisions de température, d'humidité, de précipitations, de nébulosité et d'autres paramètres pour estimer les conditions de surface des routes. Des applications existent pour modéliser les panaches de pollution, d'accidents nucléaires, des incendies de forêt et autres phénomènes.

L'aviation a un besoin évident de la prévision numérique, permettant d'émettre des alertes concernant la foudre, le givrage et la turbulence en air clair. De nombreux aéroports peuvent être alimentés par des services centraux fournissant des prévisions automatiques d'aérodromes.

## L'avenir

Les ordinateurs ont permis des avancées révolutionnaires en prévision. L'éminent météorologue norvégien Sverre Petterssen constatait qu'avant l'ordinateur les progrès s'effectuaient à dose homéopathique.

Mais aujourd'hui, des défis considérables subsistent. Les variations météorologiques subites, les phénomènes extrêmes imposent des épreuves aux êtres humains et provoquent des dommages consi-

**Protection du trafic aérien.** *Après l'éruption récente du volcan islandais Eyjafjallajökull, de nombreux services météorologiques ont coopéré pour produire des prévisions aidant les compagnies aériennes à déterminer s'il était possible de voler au-dessus de l'Europe, en toute sécurité. Dix millions de voyageurs sont restés cloués au sol lors de la fermeture de l'espace aérien européen pendant cinq jours, en avril. La localisation des panaches de cendres volcaniques est basée sur des modèles de prévision complexes.*



dérables. Ces évolutions rapides dépendent de phénomènes à grande et à petite échelle temporelle, avec des interactions complexes entre les processus dynamiques et les paramètres physiques. La mise en équations de ces interactions complexes constitue un défi considérable.

La prévision immédiate consiste à indiquer les évolutions sur une période de quelques heures. Les sorties des modèles numériques actuels peuvent être insuffisantes pour mettre en œuvre des actions efficaces de prévention des catastrophes. Aujourd'hui, les meilleurs résultats s'appuient sur une combinaison de produits de prévisions numériques avec des observations classiques, l'imagerie radar et satellitaire et d'autres données. Mais il reste beaucoup à faire pour élaborer des systèmes de prévision immédiate, et nous pouvons penser avec optimisme que les futurs développements amèneront des améliorations importantes dans ce domaine.

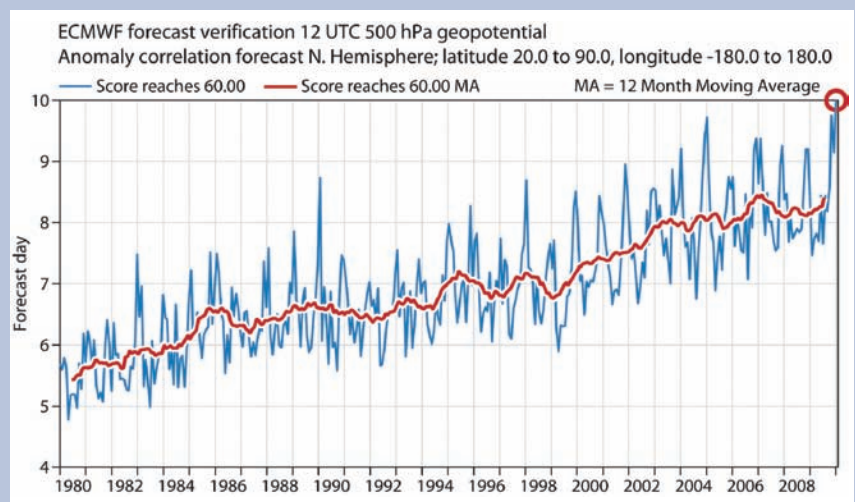
À l'autre extrémité de l'échelle temporelle, la nature chaotique de l'atmosphère impose une limite aux progrès des prévisions classiques. Les techniques de prévisions d'ensemble permettent certes des résultats probabilistes, mais elles se sont révélées difficiles à appliquer en de nombreux cas. Les interactions entre l'atmosphère et l'océan s'imposent comme un facteur essentiel à considérer pour des échéances de prévisions plus longues. Malgré les progrès importants de la prévision saisonnière sous les tropiques, les prévisions utiles à long terme pour

## Précision : un gain d'un jour chaque décennie

Les prévisions se sont améliorées d'environ un jour par décennie au cours des 30 dernières années, et en 2010 leur précision était acceptable à 10 jours.

La qualité d'une prévision peut être jugée grâce au coefficient de corrélation d'anomalie (ACC) de l'altitude de la surface 500 hPa. On estime qu'une prévision reste utile jusqu'au moment où son ACC tombe à 60 %. En moyenne, ce seuil est atteint aujourd'hui autour du huitième jour. En février 2010, l'ACC moyenne mensuelle est restée au-dessus de 60 % pendant toute l'échéance de 10 jours de la prévision déterministe pour l'hémisphère nord.

Voir <http://www.ecmwf.int/publications/cms/get/ecmwfnews/255>



les régions tempérées restent un défi pour les futurs modélisateurs. Un autre défi majeur consiste à modéliser et à prévoir le changement climatique, objet d'inquiétudes de plus en plus importantes.

Les développements de la dynamique de l'atmosphère, des instruments et des méthodes d'observation et de l'informatique ont rendu possible au quotidien ce dont Bjerknes et Richardson rêvaient. Les modèles numériques sont maintenant au cœur de la prévision opérationnelle. Pour les prévisions, après une amélioration rapide de leur précision, les progrès continuent sur de nombreux fronts.



Une tâche de calcul énorme rendue plus aisée. Il y a un siècle, les prévisions météorologiques étaient un rêve. Aujourd'hui, elles ont franchi la barrière des 10 jours. Cette révolution a été rendue possible grâce à l'invention de la radiosonde, et aux progrès spectaculaires de la météorologie théorique, de l'analyse numérique et des superordinateurs.