

Les origines de la prévision numérique du temps et de la modélisation climatique

Peter Lynch⁽¹⁾ et Gérard De Moor⁽²⁾

(1) Meteorology and Climate Centre, School of Mathematical Science, University College Dublin, Belfield, Ireland
Peter.Lynch@ucd.ie

(2) *La Météorologie*, Société météorologique de France
lameteorologie@meteo.fr

Résumé

La simulation numérique d'un nombre sans cesse croissant de phénomènes géophysiques enrichit considérablement notre compréhension des processus complexes du système terrestre. Les modèles du système terrestre sont, par exemple, aujourd'hui, capables de restituer les régimes climatiques des millénaires passés et constituent les meilleurs moyens à notre disposition pour prédire le futur de notre climat ; or les conséquences pour l'humanité du changement climatique en cours seront bien évidemment d'une portée considérable.

Les idées de base de la prévision numérique et de la modélisation climatique ont été développées il y a à peu près un siècle, bien avant que le premier ordinateur électronique ne soit construit, mais plusieurs obstacles pratiques majeurs ont dû être surmontés avant que la prévision numérique puisse être mise en pratique. Une compréhension plus complète de la dynamique atmosphérique a permis le développement de systèmes simplifiés d'équations ; des observations régulières de l'atmosphère libre par radiosondage et, plus tard, les données satellitaires ont ouvert l'accès aux conditions initiales ; des schémas aux différences finies stables ont pu être développés et, enfin, des ordinateurs électroniques puissants ont fourni le moyen pratique de conduire les prodigieux calculs requis pour prévoir les changements du temps. ●●●

Ndlr L'année 2008 marque le soixantième anniversaire de la publication par Jule Charney (1948) d'un article fondamental de météorologie dynamique, intitulé « On the scale of atmospheric motions ».

En présentant une méthode de simplification des équations primitives de l'atmosphère et de filtrage d'ondes indésirables, cette contribution ouvrait la voie à la prévision numérique du temps, qui à cette époque était pressentie comme l'application idéale pour tester le premier ordinateur automatique alors en gestation.

Cet anniversaire est l'occasion pour *La Météorologie* de revenir sur les origines de la prévision numérique du temps et de la modélisation climatique, avec cette traduction, due à Gérard De Moor, d'un article historique publié en 2007 par Peter Lynch dans le *Journal of Computational Physics* : « The origins of computer weather prediction and climate modeling », (DOI:10.1016/j.jcp.2007.02.034). En complément, les lecteurs trouveront un encadré sur l'histoire de la prévision numérique en France et une bibliographie des articles publiés dans *La Météorologie* sur le sujet.

Introduction

Notre aptitude à simuler des systèmes physiques complexes à l'aide de modèles numériques, et donc à prévoir leur évolution, figure parmi les avancées les plus significatives du siècle passé. Un exemple particulièrement frappant est le développement de modèles de circulation générale de l'atmosphère et de l'océan (GCM pour Global Circulation Models), qui nous ont donné deux grands atouts : nous pouvons désormais prévoir le temps plusieurs jours à l'avance avec un grand degré de confiance et nous avançons dans la connaissance des facteurs responsables des changements de notre climat, comme dans celle du rythme et de la gravité de ceux-ci.

Il y a un siècle, le processus de prévision du temps était peu méthodique, très imprécis et sans fiabilité. Les observations étaient rares et irrégulières, particulièrement en altitude et au-dessus des océans. Les principes de la physique théorique jouaient peu ou pas de rôle dans la prévision pratique : le prévisionniste utilisait des techniques grossières d'extrapolation, sa connaissance de la climatologie locale et certaines hypothèses reposaient sur l'intuition ; la prévision était plus un art qu'une science. Les observations de pression et des autres variables étaient pointées en forme codée sur une carte météorologique et des lignes joignant les points d'égale pression mettaient en évidence les configurations des systèmes météorologiques – dépressions, anticyclones,

... Les progrès accomplis ces cinquante dernières années dans les domaines de la prévision du temps et de la modélisation climatique ont été spectaculaires. Dans cette présentation, on retrace l'histoire de la prévision automatique, depuis les intégrations réalisées avec l'Eniac jusqu'à nos jours. L'échéance utile de la prévision déterministe s'allonge désormais d'environ un jour tous les dix ans, et notre compréhension du changement climatique augmente rapidement avec le développement en sophistication des modèles du système terre-atmosphère.

Abstract

The origins of computer weather prediction and climate modeling

Numerical simulation of an ever-increasing range of geophysical phenomena is adding enormously to our understanding of complex processes in the Earth system. The consequences for mankind of ongoing climate change will be far-reaching. Earth System Models are capable of replicating climate regimes of past millennia and are the best means we have of predicting the future of our climate.

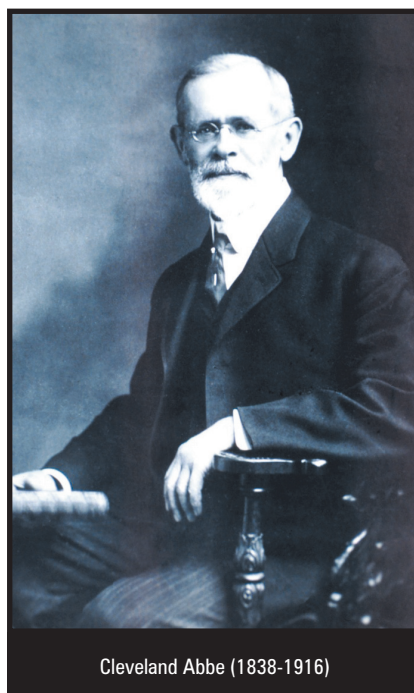
The basic ideas of numerical forecasting and climate modeling were developed about a century ago, long before the first electronic computer was constructed. There were several major practical obstacles to be overcome before numerical prediction could be put into practice. A fuller understanding of atmospheric dynamics allowed the development of simplified systems of equations; regular radiosonde observations of the free atmosphere and, later, satellite data, provided the initial conditions; stable finite difference schemes were developed; and powerful electronic computers provided a practical means of carrying out the prodigious calculations required to predict the changes in the weather.

Progress in weather forecasting and in climate modeling over the past 50 years has been dramatic. In this presentation, we will trace the history of computer forecasting through the Eniac integrations to the present day. The useful range of deterministic prediction is increasing by about one day each decade, and our understanding of climate change is growing rapidly as Earth System Models of ever-increasing sophistication are developed. ■

thalwegs et dorsales. Le prévisionniste utilisait son expérience, sa mémoire et une foule de règles empiriques pour produire une carte prévue. Le principal processus physique qu'il prenait en compte était l'advection, c'est-à-dire le transport des caractéristiques et propriétés par le mouvement du fluide lui-même. Mais une propriété cruciale de l'advection est sa non-linéarité ; le prévisionniste humain est certes capable d'extrapoler les tendances sous l'hypothèse d'invariabilité du vent, mais son intuition est totalement impuissante devant les subtilités des processus advectifs complexes.

La préhistoire de la prévision scientifique

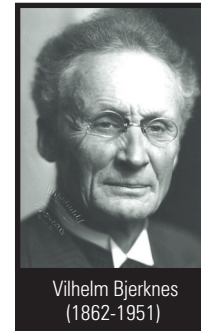
L'ensemble des principes physiques fondamentaux gouvernant l'écoulement atmosphérique se trouve complété au XIX^e siècle avec le développement de la thermodynamique. Vers 1890, le grand météorologiste américain Cleveland Abbe reconnaît que « la



Cleveland Abbe (1838-1916)

météorologie est essentiellement l'application à l'atmosphère de l'hydrodynamique et de la thermodynamique » (Willis et Hooke, 2006). Dans son article, *Les bases physiques de la prévision du temps à longue échéance*, Abbe (1901) propose une approche mathématique de la prévision. Il exprime l'espoir que les scientifiques de l'atmosphère « prendront le problème au sérieux et mettront au point des méthodes graphiques, analytiques ou numériques »

de résolution des équations. Une analyse plus explicite du problème de la prévision du temps sous l'angle scientifique est entreprise peu de temps après par le savant norvégien Vilhelm Bjerknes. Bjerknes (1904) propose une démarche en deux temps pour une prévision rationnelle : une étape diagnostique, dans laquelle



Vilhelm Bjerknes (1862-1951)

l'état initial de l'atmosphère est déterminé par le recours aux observations et une étape pronostique, utilisant les lois du mouvement pour calculer l'évolution de cet état au cours du temps.

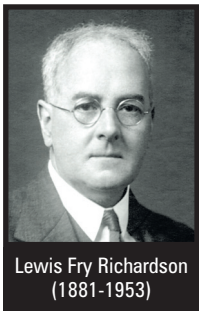
Il règne à cette époque une grave pénurie en matière d'observations, particulièrement sur mer et en altitude, mais Bjerknes est optimiste : des programmes internationaux d'observation déjà en cours d'élaboration, sous l'égide de la Commission internationale pour l'aéronautique scientifique, sont en effet susceptibles de fournir un diagnostic raisonnable de l'état de l'atmosphère. L'étape pronostique doit être abordée en constituant un jeu d'équations, une par variable décrivant l'atmosphère. Bjerknes liste sept variables de base : la pression, la température, la masse volumique, l'humidité, et trois composantes pour la vitesse. Il identifie ensuite sept équations indépendantes : les trois équations hydrodynamiques du mouvement, l'équation de continuité, l'équation d'état et les équations traduisant les première et seconde lois de la thermodynamique (en fait, il aurait pu aussi bien retenir une équation de continuité pour l'humidité plutôt que la seconde loi de la thermodynamique).

Comme il ne peut résoudre ces équations numériquement, et une solution analytique étant hors de question, Bjerknes développe une méthode graphique approchée. L'idée est de représenter l'état initial de l'atmosphère par un ensemble de cartes décrivant la répartition des variables à différents niveaux, puis d'appliquer des méthodes graphiques adaptées aux équations fondamentales pour construire les nouvelles cartes représentant l'atmosphère quelques heures plus tard. Le processus peut ensuite être itéré jusqu'à l'échéance désirée. Constatant l'opposition entre les méthodes de la météorologie et celles de l'astronomie, justiciable de prévisions d'une grande précision,

Bjerknes énonce l'objectif de faire de la météorologie une physique à part entière de l'atmosphère, et une science exacte.

Le rêve de Richardson

Bjerknes ne pouvait entrevoir comment mettre en pratique ses idées. Plus audacieux, le scientifique quaker anglais, Lewis Fry Richardson, tente une résolution directe des équations du mouvement atmosphérique. Richardson a entendu pour la première fois parler du plan de Bjerknes pour une prévision rationnelle quand il a pris son poste à l'Office météorologique (Meteorological Office ou Met. Office) en 1913. Dans la préface de son



livre *La prévision du temps par procédés numériques* (Richardson, 1922), il écrit : « *Les recherches de V. Bjerknes et de son École sont imprégnées de l'idée d'utiliser les équations différentielles autant qu'on le peut. J'ai lu ses ouvrages sur la statique et sur la cinématique peu après avoir commencé la présente étude, et ces ouvrages ont eu une influence considérable sur le déroulement de celle-ci.* »

Le livre de Richardson commence par une discussion de la pratique alors en cours au Met. Office. Il décrit l'usage d'un « catalogue de cartes météorologiques », élaboré en classant par catégories des situations synoptiques passées. Ce catalogue (Gold, 1920) aide le prévisionniste à exhumer des cartes passées ressemblant à celle du jour et à déduire l'évolution probable en étudiant celle de ces cas passés. Mais Richardson n'est pas optimiste sur l'avenir de cette méthode. « *La prévision est basée sur l'hypothèse que l'atmosphère va refaire maintenant ce qu'elle a fait alors... L'histoire passée de l'atmosphère est utilisée, pourrait-on dire, comme modèle à l'échelle réelle de son état présent* », écrit-il (Richardson, 1922). Bjerknes avait opposé la précision de la prévision astronomique aux méthodes « radicalement inexactes » de la prévision météorologique. Richardson revient sur le sujet : « *...l'Almanach nautique, cette merveille de prévision exacte, n'est pas basé sur le principe que dans l'ensemble l'histoire astronomique peut se*

répéter. Il est au contraire plus juste de dire qu'une disposition particulière d'étoiles, de planètes et de satellites ne se met jamais en place deux fois. Pourquoi alors espérons-nous qu'une situation météorologique d'aujourd'hui figure-rait dans un catalogue de situations passées ? »

Le schéma de prévision de Richardson consiste dans une mise en œuvre détaillée et précise des étapes pronostiques du programme de Bjerknes. Il s'agit là d'une procédure hautement compliquée (comme le note Richardson, « *le schéma est compliqué parce que l'atmosphère est complexe* »), impliquant en outre une quantité phénoménale de calculs numériques et pratiquement irréalisable avant l'avènement des ordinateurs. Mais Richardson est imperturbable : « *Peut-être dans un futur proche sera-t-il possible de calculer plus vite que l'atmosphère n'évolue... Mais aujourd'hui c'est encore un rêve.* »

Aujourd'hui, les prévisions sont élaborées opérationnellement sur de puissants calculateurs à l'aide d'algorithmes remarquablement semblables au schéma de Richardson, dont le rêve est donc devenu réalité.

La prévision de Richardson

Richardson commence sérieusement son travail sur la prévision numérique en 1913, quand il est nommé responsable de l'observatoire d'Eskdalemuir, dans les hautes terres du sud de l'Écosse. Il n'a que peu ou pas d'expérience de la météorologie lorsqu'il prend son poste, « dans la solitude maussade et humide d'Eskdalemuir ». Probablement est-ce le manque de formation académique sur le sujet qui lui permet d'approcher le problème de la prévision du temps sous un angle aussi radicalement original et non conventionnel. Son idée est d'exprimer les principes physiques qui gouvernent le comportement de l'atmosphère sous la forme d'un système d'équations mathématiques et d'appliquer des méthodes en différences finies à la résolution de ce système. Il a déjà, dans le passé, eu l'occasion d'utiliser des méthodes graphiques et des méthodes numériques pour résoudre des équations différentielles, et en était venu à donner la préférence à ces dernières. Les équations de base ont déjà été identifiées par Abbe et Bjerknes, mais elles doivent encore être simplifiées par recours à l'hypothèse hydrostatique, et transformées

pour les rendre propices à une résolution approchée. L'idée fondamentale est de tabuler les pressions, vitesses, etc., à certaines latitudes, longitudes et altitudes, de façon à donner une description numérique de l'état de l'atmosphère à un instant donné. Puis ces quantités sont traitées par une méthode arithmétique, qui en fournit les nouvelles valeurs après un intervalle de temps Δt , et le processus est itéré pour fournir l'état de l'atmosphère après $2\Delta t$, $3\Delta t$, et ainsi de suite.

Richardson ne se préoccupe pas seulement de rigueur théorique, il veut montrer par un exemple complètement résolu comment sa méthode pourrait être mise en application. Partant du jeu le plus complet d'observations qui lui soit accessible, il applique sa méthode numérique au calcul des changements dans les pressions et les vents en deux points d'Europe centrale. Le résultat est désastreux : il obtient une évolution en six heures de la pression de surface de 145 hPa, ce qui est totalement irréaliste. Les calculs eux-mêmes sont présentés dans son livre, sur un ensemble de vingt-trois feuilles de calcul, ressemblant à nos tables Excel actuelles. Ceux-ci ont été conduits à la main, pour fournir les valeurs des changements des variables primaires sur une période de six heures. Richardson explique ainsi le résultat principal : « *La tendance de la pression de surface... reportée sur la feuille P_{sm} est de 145 millibars en 6 heures, alors que l'observation indique une quasi-stabilité barométrique. Cette erreur flagrante a fait l'objet d'un examen détaillé... et est attribuée à des erreurs dans la représentation des vents initiaux.* »

Richardson juge que sa prévision constitue « une déduction relativement correcte à partir d'une distribution initiale irréaliste ». Il émet l'hypothèse que des résultats raisonnables pourraient être obtenus si les données initiales étaient lissées et il discute plusieurs méthodes pour le faire. En fait, les tendances erronées résultent d'un déséquilibre entre les champs de pression et de vent, lequel engendre des ondes de gravité de fréquences élevées, se traduisant par des oscillations de grande amplitude. Le remède consiste à modifier l'analyse pour rétablir l'équilibre, une opération aujourd'hui appelée **initialisation**. On peut le voir en construisant un modèle numérique, dans une démarche aussi proche que possible de la méthode de Richardson (à l'omission près de processus physiques mineurs) et en utilisant les

mêmes équations et la même grille de discrétisation que lui (Lynch, 2006). Les résultats obtenus à partir des données initiales utilisées par Richardson sont pratiquement identiques à ceux que celui-ci a obtenus ; en particulier, on obtient la même évolution de 145 hPa en six heures pour la pression de surface au point central. Mais si les données initiales sont modifiées dans une initialisation par filtre digital, les prévisions de tendances deviennent réalistes.

Le tableau 1 montre les changements de pression en six heures à chaque niveau de ce modèle. La colonne libellée LFR indique les valeurs obtenues par Lewis Fry Richardson, la colonne libellée MOD celles obtenues par le modèle numérique, qui sont très proches des précédentes. La colonne libellée IFD fait référence à une prévision obtenue à partir d'une initialisation par filtre de Dolph-Chebyshev (Lynch, 2006). La tendance de pression de surface prévue y passe de la valeur irréaliste de 145 hPa/6h à une valeur raisonnable de moins de 1 hPa/6h (tableau 1, ligne du bas). Ces résultats indiquent clairement que l'irréalisme de la prévision de Richardson est dû au déséquilibre dans les données initiales qu'il utilise. Pour le détail de la reconstitution complète de la prévision, voir Lynch, 2006.

À sa parution, *La prévision numérique par procédés numériques* ne suscite qu'une réaction très banale, qui a dû être décevante pour Richardson. L'ouvrage est certes largement critiqué, avec des commentaires généralement favorables – Ashford (1985) couvre une bonne partie des réactions – mais l'impraticabilité de la méthode et la défaillance, apparemment abyssale, du seul exemple présenté, attirent pour leur part inévitablement la critique défavorable. La véritable portée du travail de Richardson n'est pas immédiatement évidente ; la complexité calculatoire du processus et les résultats désastreux de l'unique tentative de prévision découragent d'autres d'en suivre les traces.

Niveau	LFR	MOD	IFD
1	48,3	48,5	-02
2	77,0	76,7	-2,6
3	103,2	102,1	-3,0
4	126,5	124,5	-3,1
Surface	145,1	145,4	-0,9

Malgré les réactions initiales naturellement prudentes, les idées brillantes et prémonitoires de Richardson sont aujourd'hui universellement reconnues des météorologistes, et son travail constitue la fondation sur laquelle s'est bâtie la prévision moderne.

Les débuts de la prévision moderne

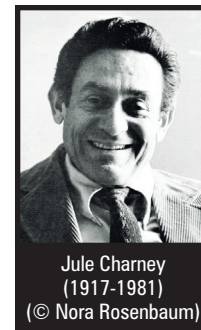
Bien que le rêve de Richardson paraisse irréaliste au moment de la publication de son livre, un certain nombre d'avancées déterminantes vont dans les décennies suivantes planter le décor pour de nouveaux progrès. On peut citer de profonds développements de la météorologie théorique, débouchant sur une compréhension cruciale de la dynamique atmosphérique et des avancées en analyse numérique, permettant l'élaboration d'algorithmes stables. L'invention de la radiosonde et son introduction dans le réseau mondial mettent à disposition des observations en trois dimensions, et dans les délais requis, de l'atmosphère. Et, enfin, le développement des calculateurs numériques donne les moyens de s'attaquer à l'énorme tâche de calcul impliquée dans la prévision du temps.

John von Neumann et le « projet météorologie »

John von Neumann est l'un des mathématiciens majeurs du XX^e siècle. Il a apporté d'importantes contributions dans plusieurs disciplines : logique mathématique, analyse fonctionnelle, algèbre abstraite, physique quantique, théorie des jeux et applications des calculateurs. On peut se référer pour une brève esquisse de sa vie à Goldstine (1993), et pour une biographie récente à Macrae (1999).

Au milieu des années 1930, von Neumann s'intéresse aux écoulements fluides turbulents. Les équations non linéaires aux dérivées partielles, gouvernant de tels écoulements, défient l'approche analytique, et même leur investigation qualitative est difficile. Von Neumann voit combien les progrès de l'hydrodynamique seraient accélérés par un moyen de résolution numérique d'équations complexes. Il est clair qu'il faut pour cela des machines de calcul automatique très rapides. Il pilotera

alors avec génie la conception et la construction d'un ordinateur électronique à l'Institute for Advanced Study (IAS) de Princeton. Cette machine est construite entre 1946 et 1952, et sa conception aura un impact déterminant sur l'évolution ultérieure de l'industrie. Le « projet de ordinateur électronique » (Electronic Computer Project) a été « indubitablement l'entreprise la plus influente de l'histoire des calculateurs durant cette période » (Goldstine, 1993, page 255). Le projet comprend quatre groupes : (1) Ingénierie ; (2) Conception logique et programmation ; (3) Mathématiques et (4) Météorologie. Le quatrième groupe est dirigé de 1948 à 1956 par Jule Charney.



Von Neumann identifie la prévision du temps, un problème à la fois de grande pertinence pratique et d'intérêt scientifique intrinsèque,

comme un problème idéal pour un ordinateur automatique. De plus, selon Goldstine (1993, page 300), von Neumann « était au courant du travail de pionnier... de Lewis F. Richardson ». Au cours des années 1920, Courant, Friedrichs et Lewy (1928) avaient étudié la résolution numérique des équations aux dérivées partielles et avaient montré l'existence d'une limite au pas de temps, pour un pas d'espace donné (ce que l'on nomme aujourd'hui « le critère CFL »). Von Neumann était alors à Göttingen et avait pris toute la mesure des applications pratiques de ce travail. Ses estimations de la puissance de calcul nécessaire à l'intégration des équations du mouvement le font conclure à la faisabilité probable de celle-ci sur le ordinateur de l'IAS. Une proposition formelle sollicitant un soutien financier pour le montage d'un « projet météorologique » est adressée à l'US Navy. Selon Platzman (1979), cette proposition est « peut-être la brochure la plus visionnaire en matière de prévision numérique du temps depuis la publication du livre de Richardson un quart de siècle plus tôt ». La proposition est couronnée de succès, et le « projet de recherche en météorologie » (Meteorological Research Project) démarre en juillet 1946.

Une rencontre – la Conférence sur la Météorologie (Conference on Meteorology) – est organisée à l'Institut le mois suivant, pour s'assurer du soutien de la communauté météorologique,

Tableau 1 - Changements en six heures de la pression (en hPa). LFR : Richardson ; MOD : modèle ; IFD : initialisation par filtre digital.

et la plupart des sommités du domaine y assistent. Von Neumann avait discuté avec Carl Gustav Rossby des perspectives en matière de prévision numérique du temps, et celui-ci avait pris les dispositions pour que Jule Charney, alors déjà quelque peu familier avec le livre de Richardson, participe à la rencontre de Princeton. La prévision de Richardson est abondamment discutée lors de la rencontre. Il y apparaît clairement que le critère de stabilité « CFL » exclut l'emploi d'un pas de temps aussi long que celui jadis utilisé par Richardson (1922).

Le projet vise d'abord l'intégration des équations primitives, mais l'existence de solutions de ces équations sous forme d'ondes de gravité rapides impose l'utilisation d'un pas de temps tellement petit que le volume des calculs nécessaires dépasserait alors les capacités de la machine de l'IAS. Et il existe une autre difficulté, plus fondamentale : l'impossibilité de calculer exactement la divergence du vent à partir des observations. Deux obstacles se dressent donc devant les participants à la rencontre : comment éviter la nécessité d'un pas de temps abusivement court, et comment éviter d'avoir à utiliser la divergence pour calculer la tendance de pression. Les réponses à ces questions ne vont pas de soi ; il reste à Charney à trouver la piste pour aller de l'avant.

Les intégrations de l'Eniac

Dans son étude de l'instabilité barocline, c'est « en éliminant d'entrée toute référence aux oscillations acoustiques et de cisaillement-gravité, sans pertinence météorologique » que Charney (1947) obtient, pour les ondes instables, une équation traitable mathématiquement. Les avantages d'un système d'équations filtrées ne seraient pas confinés à l'utilisation de celles-ci dans des études analytiques, mais pourraient se révéler également spectaculaires dans un contexte d'intégration numérique. La nature multiéchelles de la dynamique atmosphérique, avec la coexistence de composantes de basses et de hautes fréquences, se retrouve d'ailleurs aussi dans une large gamme d'autres contextes physiques. Charney analyse les équations primitives en utilisant la technique de l'analyse selon les échelles et parvient à les simplifier de telle façon que les solutions en ondes de gravité soient complètement éliminées (Charney, 1948). Le jeu d'équations ainsi obtenu est connu sous le nom de

système quasi géostrophique. Dans le cas particulier d'un écoulement horizontal en présence d'une stratification statique constante, la variation verticale peut être traitée à part et l'équation pour le tourbillon potentiel quasi géostrophique se réduit à une forme équivalente à l'équation pour le tourbillon barotrope non divergent :

$$\frac{d(\zeta + f)}{dt} = 0,$$

où ζ est le tourbillon du mouvement, et f le tourbillon planétaire. L'équation barotrope avait, bien sûr, été utilisée par Rossby dans son étude analytique des ondes atmosphériques, mais personne n'imaginait sérieusement qu'elle pouvait contribuer à des prévisions quantitatives exactes de l'écoulement atmosphérique.

Au début de 1950, le groupe de météorologie a achevé l'indispensable analyse mathématique du problème et a conçu un algorithme numérique pour résoudre l'équation barotrope du tourbillon. L'enregistrement scientifique de ce travail est le papier dans *Tellus*, souvent cité, de Charney et al. (1950). Les dispositions sont prises pour conduire les intégrations sur le seul ordinateur alors disponible, le « calculateur et intégrateur numérique électronique » (Electronic Numerical Integrator and Computer, Eniac), à Aberdeen, Maryland (illustration ci-contre). Les intégrations de l'Eniac sont réellement innovantes, et de fait, tout au long de l'histoire ultérieure du calcul scientifique, la prévision du temps est restée un « super défi ». L'histoire de la mission à Aberdeen a été racontée de manière pittoresque par Platzman (1979). Quatre prévisions à 24 heures sont réalisées, et les résultats montrent clairement que les caractéristiques de grande échelle de l'écoulement dans le milieu de la troposphère peuvent être prévus, avec une ressemblance raisonnable avec la réalité, de manière barotrope. Chaque prévision à 24 heures prend 24 heures de calcul ; l'équipe du projet est donc tout juste capable d'aller à la même vitesse que l'atmosphère.

S'adressant à la Société royale de météorologie quelques années après les prévisions de l'Eniac, Jule Charney dit que « ...dans la mesure où mon travail en prévision du temps a été couronné de

succès, il a constitué une justification de la vision de mon distingué prédécesseur, Lewis F. Richardson... » (Chapman, 1965). Il est réconfortant de penser que Richardson a été mis au courant du succès de Princeton ; Charney lui fait parvenir les copies de plusieurs rapports, dont celle du papier sur les intégrations de l'Eniac. Richardson répond que les résultats de l'Eniac constituent « un énorme progrès scientifique » sur la prévision unique et complètement fautive sur laquelle s'était achevé son propre travail.

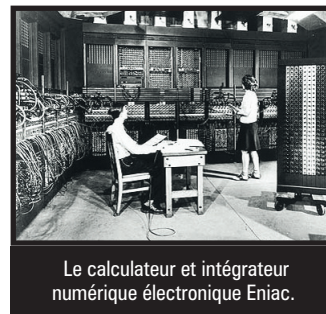
Du modèle barotrope aux modèles à plusieurs niveaux

Les premiers résultats encourageants de l'équipe de Princeton suscitent un intérêt généralisé et soulèvent l'espoir que des prévisions numériques opérationnelles puissent devenir bientôt réalité. Dans les deux années qui suivent, des groupes de recherche se constituent dans plusieurs centres au quatre coins du monde. Dans un entretien avec Platzman (voir Lindzen et al, 1990), Charney remarque : « *Je pense que nous avons tous été plutôt surpris... que les prévisions soient aussi bonnes.* »

Plus tard, Fjortoft décrit comment le succès des prévisions de l'Eniac « a eu un effet électrisant sur la communauté mondiale des météorologistes ». En fait, comme l'observe Platzman (1979) dans sa compilation des intégrations de l'Eniac, personne n'avait anti-

cipé l'énorme valeur pratique de ce modèle simple et le rôle déterminant qu'il jouerait dans la prévision opérationnelle pour de nombreuses années à venir.

Plusieurs modèles baroclines sont développés dans les quelques années suivant les prévisions de l'Eniac. Tous sont établis sur le système d'équations quasi géostrophiques. L'équipe de Princeton étudie la tempête sévère du Thanksgiving Day 1950, avec des modèles à deux et à trois niveaux. Après quelques ajustements, il s'avère que la cyclogenèse peut être raisonnablement bien simulée. Il apparaît donc que le problème de la prévision opérationnelle a bien été surmonté. Cependant, on découvre plus tard que le succès de la prévision du Thanksgiving Day avait



Le calculateur et intégrateur numérique électronique Eniac.

ressemblé à un coup de chance. Shuman (1989) rapporte que les modèles à plusieurs niveaux y sont systématiquement plus mauvais que la simple équation barotrope ; et c'est de fait le modèle à un seul niveau qui est utilisé quand commencent en 1958 les prévisions numériques opérationnelles.

Les modèles aux équations primitives

Les limitations des équations filtrées ont été reconnues très tôt. Dans un résumé prospectif pour le *Compendium of Meteorology*, Charney (1951) écrit : « *Les perspectives de la prévision numérique seraient en vérité bien lugubres si l'approximation géostrophique représentait la limite supérieure de la précision possible, car on sait qu'elle ne s'applique, au mieux, que médiocrement aux mouvements de petite échelle ayant une signification météorologique.* » Charney discute les perspectives d'utilisation des équations primitives et argumente qu'avec l'utilisation de vents initiaux géostrophiques, la petitesse des ondes de gravité resterait acceptable.

Dans son papier de 1951 « Le mécanisme du bruit météorologique », Karl-Heinz Hinkelmann (1951) s'attaque à la question des conditions initiales appropriées pour l'intégration des équations primitives. Hinkelmann est convaincu depuis le début que la meilleure approche réside dans l'utilisation de ces équations. Il est convaincu qu'elles simuleraient les comportements dynamiques et énergétiques de l'atmosphère de façon plus réaliste que les équations filtrées. De plus, de ses études du bruit, il tire la certitude que les oscillations de haute fréquence pourraient être contrôlées par une initialisation appropriée. D'autres études importantes sur l'initialisation suivent, par Charney (1955), Phillips (1960) et d'autres. La première application des équations primitives est un succès, avec une bonne simulation du développement, de l'occlusion et de la structure frontale (Hinkelmann, 1959). La prévision numérique en routine est mise en place en 1966 au Deutscher Wetterdienst ; il s'agit là de la toute première utilisation des équations primitives dans un contexte opérationnel. Un modèle à six niveaux en équations primitives est également introduit en opérations au National Meteorological Center à Washington en juin 1966, sur un CDC 6600 (Shuman et Hovermale, 1968). Une amélioration immédiate dans les performances s'ensuit : le score S_1 pour la prévision à un

jour à 500 hPa est réduit d'environ cinq points (le score S_1 mesure la performance de la prévision en comparant les gradients spatiaux dans la prévision et dans l'analyse de vérification, voir Teweles et Wobus, 1954).

Considérant que les modèles à un niveau sont trop inconstants en performance pour faire de la prévision, le Met. Office britannique n'a jamais utilisé de modèles barotropes pour la prévision au Royaume Uni, et, c'est en partie pour cette raison que le premier modèle opérationnel n'y est introduit qu'à la fin de 1965. C'est en 1972 qu'y est mis en place un modèle à dix niveaux en équations primitives. Les modèles antérieurs étaient essentiellement dynamiques, sans aucune représentation sérieuse de la vaste gamme des processus « physiques » qui déterminent le temps sensible. Le nouveau modèle incorpore une paramétrisation sophistiquée des processus physiques et avec lui sont produites les premières prévisions utiles de précipitations.

Les modèles de circulation générale et la modélisation climatique

Selon une déclaration prononcée en 2000 au Forum économique mondial de Davos (Suisse), « le changement climatique est le plus grand défi faisant face à l'humanité au XXI^e siècle », et il n'y a aucun doute sur le fait que l'étude du changement climatique et de ses impacts soit d'une énorme importance pour notre futur. Les modèles climatiques globaux sont les meilleurs moyens dont nous disposons pour anticiper les évolutions probables en ce domaine.

C'est Phillips (1956) qui a produit, en 1956, la première simulation de longue durée de la circulation générale de l'atmosphère. Il utilise pour ce faire un modèle quasi géostrophique à deux niveaux, dans un « bêta-plan canal », avec une physique rudimentaire. Le calcul, réalisé sur une des machines de l'IAS (Maniac 1), utilise une grille spatiale de 16 x 17 points, et la simulation porte sur une durée d'environ un mois. Une onde de 6 000 km de longueur d'onde s_y développe sur la base d'un écoulement zonal et de petites perturbations aléatoires. Phillips examine les échanges d'énergie de l'onde en développement et constate un bon accord qualitatif avec les observations des

systèmes baroclines dans l'atmosphère. Il présente ce travail à une réunion de la Société royale de météorologie (Royal Meteorological Society), qui l'a désigné comme premier lauréat du prix Napier Shaw. Von Neumann est extrêmement impressionné par le travail de Phillips et organise, en octobre 1955, à l'université de Princeton, une conférence sur les applications des techniques numériques au problème de la circulation générale (Application of numerical integration techniques to the problem of the general circulation), pour en examiner les implications. Le travail galvanise la communauté météorologique : dans les dix ans qui suivent, plusieurs groupes importants de recherche en modélisation de la circulation générale de l'atmosphère voient le jour.

À la suite du travail pilote de Phillips, plusieurs modèles de circulation générale (GCM) sont donc mis en chantier. Un des premiers, particulièrement intéressant, est développé au Centre national de recherche atmosphérique (National Center for Atmospheric Research, NCAR) par Kasahara et Washington (1967). Un trait distinctif de ce modèle réside dans l'utilisation de l'altitude comme coordonnée verticale (la plupart des modèles utilisent la pression p ou la pression normalisée σ). La vitesse verticale w est calculée par utilisation de l'équation de Richardson et, d'une façon générale, le cœur dynamique du modèle ressemble beaucoup à celui de Richardson. Le modèle de Kasahara - Washington sera le premier d'une lignée ininterrompue de modèles climatiques intégrant des processus physiques variés comme l'apport d'énergie par le soleil, le rayonnement terrestre, la convection, et la turbulence de petite échelle. Le dernier en date est le modèle communautaire d'atmosphère (Community Atmosphere Model), CAM 3.0, qui sert de composante atmosphérique au système de modélisation communautaire du climat (Community Climate System Model) CCSM, un modèle de climat global complètement couplé, qui fournit des simulations de référence des états du climat terrestre passé, présent et futur.

Des modèles couplés atmosphère-océan de circulation générale sont utilisés au Centre Hadley (UK Hadley Centre) pour la modélisation du climat. HadCM3 utilise une formulation conventionnelle de la dynamique, tandis que HadGEM repose sur la nouvelle formulation dynamique. Une majorité des premiers modèles couplés nécessitaient un ajustement de flux (adjonction

de flux artificiels de chaleur et d'humidité à la surface de l'océan) pour être en mesure de fournir de bonnes simulations. La résolution plus fine de l'océan dans HadCM3 a été un facteur déterminant pour abandonner le recours à cette nécessité. La composante atmosphérique de HadCM3 comporte dix-neuf niveaux d'altitude et une résolution en latitude/longitude de $2,5^\circ \times 3,75^\circ$, avec une grille de 96×73 points couvrant le globe. La résolution est d'environ 417×278 km à l'équateur. Le jeu de paramétrisations physiques du modèle est très sophistiqué. La composante océanique de HadCM3 a vingt niveaux et une résolution horizontale de $1,25^\circ \times 1,25^\circ$, permettant la représentation de détails importants dans la structure des courants océaniques. HadCM3 et HadGEM ont été utilisés dans une grande variété d'études climatiques, qui ont fourni des contributions cruciales au quatrième rapport d'évaluation (*Fourth Assessment Report, AR4*) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ou Giec (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), publié en 2007.

Le développement de modèles détaillés de l'atmosphère est à n'en pas douter un des accomplissements majeurs de la météorologie au xx^e siècle. Les modèles en pointe dans ce domaine sont de plus en plus sophistiqués et complets. Ils simulent, non seulement l'atmosphère et les océans, mais aussi une vaste gamme de processus et de rétroactions géophysiques, chimiques et biologiques. Ces modèles du système terrestre (Earth System Models) sont appliqués au problème très concret de la prévision du temps ainsi qu'à l'étude de la variabilité du climat et à celle de l'action de l'homme sur celle-ci.

La prévision numérique du temps aujourd'hui

Il n'est pas exagéré de qualifier de révolutionnaires les progrès du dernier demi-siècle écoulé. Grâce à eux, la météorologie est désormais fermement ancrée dans un statut de science quantitative, dont la rigueur et la légitimité sont démontrées au quotidien par le test de vérité de toute science, sa capacité à prévoir le futur. La prévision opérationnelle se fonde aujourd'hui sur une vaste panoplie de modèles. Dans la plupart des centres, on utilise une combinaison

de modèles globaux et locaux. Comme illustration, on considère ici le modèle global du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT).

Le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme

Peut-être l'événement le plus important des cinquante dernières années pour la météorologie européenne est-il la création du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF). La mission du CEPMMT consiste en la fourniture de prévisions météorologiques de qualité toujours plus grande, pour des échéances de quelques jours à quelques saisons. Le Centre a spectaculairement réussi dans cette mission, et il continue à progresser continûment dans la validité

et la qualité de ses prévisions, confortant ainsi sa position de leader mondial dans son domaine. Ses premières prévisions opérationnelles remontent au 1^{er} août 1979. Depuis, il s'est élargi en permanence. Une nouvelle convention, qui vient de faire l'objet d'un accord, est en cours de ratification.

Le modèle du CEPMMT est doté d'un schéma temporel semi-lagrangien, semi-implicite, d'un traitement détaillé des processus physiques et d'un couplage interactif avec un modèle de vagues océaniques. Sa résolution spatiale est de 25 km et il possède 91 niveaux sur la verticale. Les données initiales utilisées par la prévision sont préparées par recours à un schéma d'assimilation variationnelle à quatre dimensions, qui utilise une vaste gamme d'observations conventionnelles et satellitaires dans une fenêtre de 12 heures. Un effort de recherche continu et en partenariat a été dévolu à l'exploitation des données satellitaires, et désormais celles-ci sont déterminantes dans la qualité des prévisions.

Et en France... quelle histoire pour les modèles météorologiques ?

Comme dans la plupart des autres pays, la prévision numérique débute en France par l'exploitation quotidienne de modèles quasi géostrophiques filtrés avant que l'on ne passe à des modèles à équations primitives. L'exception notée par Peter Lynch est celle du Met Office britannique qui commence directement par un modèle à équations primitives. À la Météorologie nationale, la transition s'opère pendant la décennie 1970, qui voit cohabiter les deux types de modèles sur des calculateurs Control Data du site de Paris-Alma. C'est à la même époque que la France contribue de façon déterminante à la création du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme, le CEPMMT : Jean Labrousse en fut l'un des créateurs, le premier directeur de l'exploitation à Reading et aussi le directeur du CEPMMT.

Depuis les années 1980, les modèles se développent sur des calculateurs vectoriels, puis parallèles, et souvent les deux à la fois. Vers la fin de la décennie, la Météorologie nationale (qui deviendra Météo-France en 1994) fait le choix de développer ses modèles dans le cadre d'un logiciel et d'un projet communs avec le CEPMMT. Ainsi le modèle global Arpège de Météo-France est intégré dans le même logiciel que le modèle IFS de Reading. Il diffère de ce dernier par des options de mise en œuvre, telles que la « maille variable », qui privilégie la résolution numérique sur la France, et donc la prévision à courte échéance. Cette collaboration permet en 2000 à Météo-France d'être le premier service météorologique national au monde à utiliser opérationnellement une assimilation de type 4DVAR, derrière le CEPMMT (1997).

Le développement des modèles à domaine limité Aladin à partir de 1990 est aussi adossé au même logiciel et à une collaboration internationale impliquant (outre le CEPMMT) une quinzaine d'autres services météorologiques nationaux. À partir de l'an 2000, on assiste aussi au virage des modèles à équations primitives vers les modèles non-hydrostatiques. Le projet Arome est la concrétisation à Météo-France de ce virage : Arome s'appuie sur la « science non-hydrostatique de petite échelle » du modèle de recherche Méso-NH, mais aussi sur le logiciel Aladin (donc Arpège, IFS), prolongeant ainsi cette logique de collaboration.

La modélisation climatique n'est pas en reste. Dès les années 1970, les chercheurs de Météo-France commencent à développer des modèles de climat. Arpège et Aladin ont maintenant leurs versions « climatiques », ce qui permet à Météo-France d'être au cœur des actions sur l'évolution du climat.

Jean Pailleux

Le CEPMMT produit une large gamme de prévisions atmosphériques et marines globales et les diffuse à ses États membres sur une base régulière. En voici une liste dont les termes techniques sont expliqués dans le texte qui suit :

- des prévisions atmosphériques à échéance de 10 jours, diffusées deux fois par jour, basées sur un modèle déterministe de troncature T799 (25 km) et comportant 91 niveaux (L91) ;
- des prévisions issues du système de prévisions d'ensemble EPS, calculées et diffusées deux fois par jour, sur la base d'une version T399 (50 km)/L62 du modèle, et d'un ensemble de 51 membres ;
- des prévisions à échéance mensuelle, diffusées une fois par semaine, basées sur des ensembles utilisant une résolution T255 (78 km) et 62 niveaux ;
- des prévisions saisonnières, diffusées une fois par mois, basées sur des ensembles utilisant un modèle à T159 (125 km) et L40.

La base des opérations de prévision numérique du temps du CEPMMT réside dans le système de prévision intégré dit « IFS » (Integrated Forecast System). IFS fait usage d'une représentation spectrale des champs météorologiques. Chacun de ces champs est développé en série d'harmoniques sphériques, par exemple :

$$u(\lambda, \Delta, t) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n U_n^m(t) \cdot Y_n^m(\lambda, \Delta),$$

où les $Y_n^m(\lambda, \Delta)$ sont des harmoniques sphériques et les coefficients $U_n^m(t)$ ne dépendent que du temps. Les coefficients des harmoniques constituent une alternative à la spécification des valeurs $u(\lambda, \Delta)$ du champ dans le domaine spatial. Le passage dans l'espace spectral transforme les équations initiales en équations pour les coefficients spectraux U_n^m . Ces dernières sont utilisées pour faire évoluer les coefficients avec le temps, après quoi les nouveaux champs physiques peuvent être reconstitués. La troncature dans le développement spectral, précisée par le nombre d'onde total N , détermine la résolution spatiale. Il lui est associé une grille de calcul, dite de Gauss.

Le système IFS a bénéficié d'une amélioration majeure au printemps 2006, consistant en l'augmentation substantielle des résolutions horizontale et verticale de ses systèmes de prévision déterministe, d'ensemble (EPS) et de prévision mensuelle. La troncature du

modèle déterministe est désormais 799, ce qui est équivalent à une résolution spatiale de 25 km (elle était antérieurement de 40 km). Le nombre de niveaux sur la verticale a été augmenté de 50 %, passant de 60 à 91. La nouvelle grille de Gauss comporte environ 8.10^5 points. Avec 91 niveaux et cinq variables primaires en chaque point, l'état de l'atmosphère est représenté à chaque instant par 3.10^8 nombres. Le modèle a donc environ trois cents millions de degrés de liberté. La tâche de calcul de la prévision avec une résolution aussi élevée est vraiment redoutable.

Le Centre conduit son programme opérationnel à l'aide d'un système de calcul complexe et puissant, au cœur duquel se trouve un IBM « High Performance Computing Facility » (HPCF). La phase 3 de HPCF comprend deux ensembles identiques de clusters p690+. Chaque « cluster » (grappe) comprend 68 serveurs, disposant chacun de 32 CPU avec une fréquence d'horloge de 1,9 GHz. Le pic de performance est de 16,5 teraflops pour chaque cluster, le système complet a donc un potentiel de 33 teraflops, soit 33 000 milliards d'opérations de calcul par seconde. Le HPCF est de l'ordre de 10 ordres de grandeur plus rapide que l'Eniac. Il correspond à un accroissement de puissance sur cinquante ans largement en accord avec la loi empirique de Moore, qui gouverne l'évolution des calculateurs et selon laquelle la densité de puces double tous les dix-huit mois. Sur cinquante ans, cette règle implique un accroissement de $2^{50/1.5} \approx 10^{10}$, et l'évolution de l'Eniac à l'HPCF est donc en bon accord avec elle.

La prévision d'ensemble

La nature chaotique de l'écoulement atmosphérique est maintenant bien connue. Elle impose une limite à la prévisibilité météorologique, les inévitables erreurs qui affectent l'état initial croissant rapidement au point de pouvoir rendre la prévision sans utilité au bout de quelques jours. La façon la plus utile de surmonter cet obstacle est de lancer une série, ou ensemble, de prévisions, à partir d'états initiaux légèrement différents, et d'utiliser l'ensemble des résultats pour obtenir une information probabiliste sur l'évolution de l'atmosphère. Depuis le début des années 1990, cette méthode systématique de générer une mesure à priori de la performance d'une prévision est opérationnelle, à la fois au CEPMMT et au

Centre national de prévision environnementale (National Center for Environmental Prediction, NCEP) à Washington (pour une description du système américain, voir Kalnay, 2002, section 6.5). Dans le système de prévision d'ensemble (Ensemble Prediction System, EPS) du CEPMMT, ce sont 51 prévisions qui sont actuellement réalisées, chacune partant de conditions initiales légèrement différentes et utilisant une résolution moitié de celle de la prévision déterministe. Les prévisions probabilistes pour une grande variété d'événements météorologiques sont ensuite élaborées et diffusées, pour être utilisées dans les centres opérationnels. Celles-ci sont devenues la pierre angulaire de la prévision à moyen terme. Pour une revue récente, voir Buizza et al., 1999.

Des prévisions saisonnières, à l'échéance de six mois, sont aussi préparées au Centre européen. Elles sont élaborées à l'aide d'un modèle couplé atmosphère-océan, et un grand nombre de prévisions sont réunis dans un ensemble chaque mois. Ces prévisions d'ensemble ont prouvé leur pertinence pour les régions tropicales. Des prévisions récentes de l'installation d'événements El Niño et La Niña se sont révélées véritablement impressionnantes. Cependant, dans les latitudes tempérées, et en particulier dans la région de l'Europe, la pertinence de telles prévisions n'est pas établie, et celles-ci ne sont pas encore utilisées opérationnellement dans cette zone. La prévision saisonnière aux latitudes moyennes reste à coup sûr un des grands problèmes auxquels nous sommes aujourd'hui confrontés.

Les applications de la prévision numérique du temps

L'aide objective à la prévision à courte échéance doit être détaillée et remise à jour fréquemment. Beaucoup de services météorologiques nationaux s'appuient pour cela sur des modèles à aire limitée (Limited-Area Models, LAM). De tels modèles permettent de choisir librement l'emprise géographique et la résolution spatiale, et de calculer les prévisions aussi souvent que nécessaire. Ils permettent l'accès à une gamme complète de sorties, avec une haute résolution temporelle. Des grilles emboîtées de résolutions croissantes peuvent être utilisées pour obtenir un plus grand degré de détail local. Le modèle Weather Research and Forecasting (WRF) est un système de prévision

numérique du temps de nouvelle génération, développé en partenariat entre les agences nationales américaines (NCEP et NCAR) et des universités. Il est conçu pour répondre aux besoins à la fois opérationnels et de recherche atmosphérique. Il est adapté à une multitude d'applications, pour des échelles de quelques mètres à quelques milliers de kilomètres. Il est utilisé opérationnellement au NCEP. Des détails complets sur le système peuvent être consultés en ligne [http://www.wrf-model.org].

Une autre initiative, qui passionne le monde de la prévision numérique du temps, est la décision prise par deux groupes européens de premier plan de fusionner leurs activités. Les scientifiques des projets Hirlam (High Resolution Limited Area Model) et Aladin (Aire limitée adaptation dynamique développement international) ont uni leurs efforts pour développer un nouveau modèle appelé Harmonie (Hirlam-Aladin Research on Mesoscale Operational NWP in Euromed). Il s'agit d'un modèle non-hydrostatique basé sur le modèle Arome, en cours d'élaboration à Météo-France. Il inclut un ensemble très complet de processus microphysiques. Le système est codé pour tourner sur des calculateurs massivement parallèles. Le développement de son système d'assimilation variationnelle est très avancé, et sa version opérationnelle aura une résolution horizontale typiquement de l'ordre de 2 km.

Les modèles de prévision numérique du temps sont utilisés pour une grande variété d'applications. Peut-être la plus importante de ces applications est-elle de donner en temps utile des avis d'extrêmes météorologiques. De grosses pertes financières peuvent être dues aux tempêtes, aux inondations et aux autres événements météorologiques rares. L'annonce de tels événements, permise par l'apport des modèles, permet de sauver des vies et de préserver des biens. Les secteurs des transports, de l'énergie, de la construction, du tourisme et de l'agriculture sont tous sensibles aux conditions météorologiques ; ils sont tous demandeurs de l'amélioration de la précision et du détail des prévisions à courte échéance, en raison des décisions à fortes conséquences financières qui doivent en permanence être prises.

Les modèles de prévision numérique du temps sont utilisés pour fournir une assistance spécifique à la communauté maritime. Les vents prévus sont utilisés pour forcer des modèles de vagues, qui prévoient l'état de la mer et la hauteur et la

période de la houle. Les cartes prévues de l'état de la mer, ainsi que d'autres produits spécialisés, peuvent être fabriqués et diffusés automatiquement aux usagers. La prévision du verglas routier peut être réalisée par des modèles spécifiques, qui utilisent des prévisions de température, de précipitations, de nébulosité pour l'estimation des conditions à la surface de la route. Les modèles à domaine limité déterminent facilement des trajectoires, ce qui est vital pour la modélisation du déplacement de la pollution ou de la fumée des feux de forêts, des retombées nucléaires, etc. L'aéronautique est un autre secteur qui bénéficie de façon notable de l'assistance qu'apporte la prévision numérique du temps, avec les avis de risques comme la foudre, le givrage, la turbulence en air clair. La génération automatique de TAF (Terminal Aerodrome Forecasts), à partir des sorties de LAM et de modèles colonnes, permet d'assister un grand nombre d'aéroports à partir d'un même système de prévision centralisé.

Conclusion

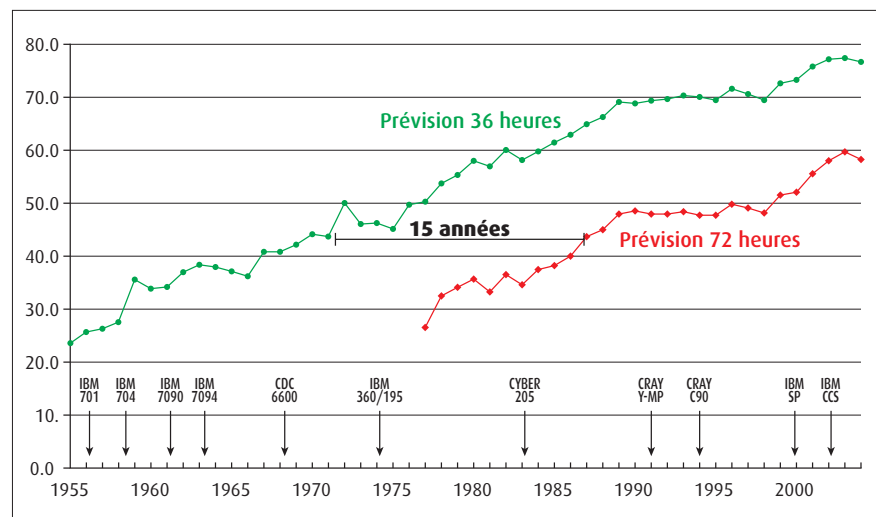
Avant l'avènement du ordinateur, la prévision du temps se trouvait en stagnation ; selon Petterssen (2001), les avancées se produisent alors « à doses homéopathiques ». Les remarquables progrès réalisés au cours des cinquante dernières années sont illustrés de façon frappante par l'évolution du score de performance des prévisions à 500 hPa produites au Centre météorologique national américain (National Meteorological Center, désormais NCEP), mesurées par le critère S_1 (Teweles et Wobus,

1954). La série des scores à 36 heures remonte aux tout débuts de la prévision numérique opérationnelle et constitue la plus longue série de vérification existante. Les scores de performance, exprimés en pourcentages de la performance maximale possible, se sont améliorés de façon continue sur les cinquante dernières années, et chaque mise en service d'un nouveau modèle de prévision a conduit à un nouveau progrès (figure 1). Le degré de sophistication des modèles de prévision est étroitement lié à la puissance de calcul disponible ; l'introduction de chaque nouvelle machine est aussi indiquée sur la figure 1. La barre horizontale indique un délai de quinze ans pour que la prévision à 72 heures ait la même performance que celle déjà atteinte à 36 heures. Cela est cohérent avec l'expérience, généralement partagée, du gain d'un jour d'échéance de prévision tous les dix ans.

Les avancées dans les domaines de la dynamique atmosphérique, de l'instrumentation et de l'observation, et en calcul numérique, ont transformé les rêves de Bjerknes et de Richardson en réalité quotidienne. Les modèles numériques sont désormais au cœur de la prévision opérationnelle. Sur le demi-siècle de leur existence, la précision des prévisions a crû rapidement et les progrès se poursuivent sur plusieurs fronts.

En dépit de ces progrès remarquables des cinquante dernières années, il subsiste quelques formidables défis. Les changements soudains du temps et les extrêmes météorologiques sont la cause de beaucoup de détresse humaine et de dommages aux biens. Ces évolutions rapides impliquent souvent des interactions

Figure 1 - Performance des prévisions à 500 hPa produites au NCEP, à 36 heures (1955-2004) et à 72 heures (1977-2004). La performance est appréciée comme pourcentage de celle d'une prévision parfaite. Remerciements à Bruce Webster (NCEP), pour le graphique relatif au score.



complexes entre processus dynamiques et physiques, lesquels ont chacun des échelles de temps courtes et longues. Le calcul efficace du couplage entre processus dynamiques et paramétrisations physiques constitue un défi colossal. Les indications des modèles numériques actuels de prévision immédiate, pour une échéance courte de quelques heures, ne sont parfois pas suffisantes pour prendre des mesures concrètes et avertir des catastrophes. On augmente la fiabilité de ce type de prévision en combinant les produits de la prévision numérique et les observations conventionnelles, les imageries radar et satellitaire, et d'autres types de données. Mais il reste beaucoup à faire pour développer des systèmes de prévision immédiate efficaces, même si l'on peut être optimiste sur les progrès à attendre dans ce domaine.

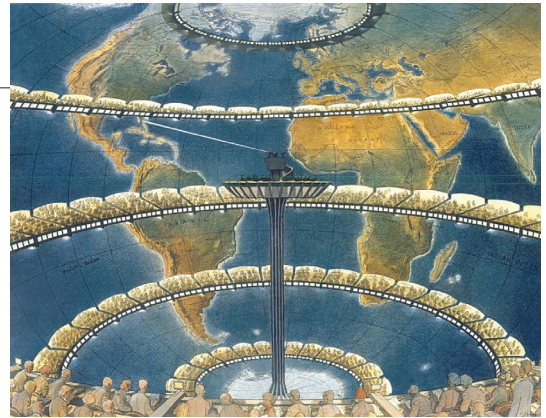
À l'autre extrémité de la palette des échelles temporelles, la nature chaotique de l'atmosphère limite la validité des prévisions déterministes. La technique de prévision d'ensemble fournit bien une aide probabiliste, mais elle apparaît jusqu'ici difficile à utiliser dans bien des cas. L'interaction entre atmosphère et océan devient un facteur dominant aux échéances les plus longues. Bien que la prévision saisonnière ait fait des progrès conséquents dans les tropiques, il reste aux modélisateurs à venir de s'attaquer à la production de prévisions à long terme qui soient utiles dans les régions tempérées. Un autre grand défi réside dans la modélisation et la prévision du changement climatique, un domaine d'importance et de préoccupations grandissantes.

Probablement la plus souvent citée des sections du livre de Richardson est-elle la section 11.2, « Vitesse et organisation du calcul » (The speed and organization of computing), dans laquelle il décrit en détail son rêve d'une « usine à

Figure 2 - Vue d'artiste de l'usine à prévisions de Richardson
(© François Schuiten)

prévisions » dédiée au processus de calcul météorologique :

« Imaginez une grande salle, comme un théâtre, mais dans lequel les rangées circulaires et les balcons encerclent complètement l'espace habituellement occupé par la scène. Sur les murs est peinte une carte du monde : le plafond représente la région du pôle Nord, l'Angleterre est au dernier balcon, les tropiques occupent la rangée supérieure, l'Australie le premier balcon, l'Antarctique le parterre. Une nuée d'opérateurs sont chargés du calcul du temps de la région dans laquelle ils sont assis, mais chacun s'occupe d'une seule équation, ou d'une partie d'une équation. Le travail est coordonné pour chaque région par un responsable de rang plus élevé. De nombreux petits panneaux lumineux affichent les valeurs instantanées des résultats de chacun, de sorte que les calculateurs voisins puissent lire celles-ci. Chaque nombre est donc affiché dans trois zones adjacentes, pour assurer la communication du nord au sud de la carte. Du parterre s'élève jusqu'à mi-hauteur de la salle un grand pilier, supportant en son sommet une chaire. Dans celle-ci trône le responsable de l'ensemble du théâtre, entouré de plusieurs assistants et porte-parole. Une de ses missions est de maintenir une vitesse d'avancement des calculs uniforme dans les différentes parties du globe. De ce point de vue, il est le chef d'un orchestre dans lequel les instruments sont les règles à calcul et les machines à calculer. Mais, au lieu d'agiter une baguette, il déplace un rayon



lumineux rose sur chaque région qui se trouve en avance, et un rayon lumineux bleu sur les régions retardataires. »

Richardson estime que 64 000 personnes seraient nécessaires pour faire avancer le calcul à la même vitesse que l'atmosphère. Son usine à prévisions a donc à peu près la puissance de l'Eniac, puisque ce calculateur automatique parmi les premiers calcule environ cinq ordres de grandeur plus vite qu'un opérateur humain.

La figure 2 présente une vue d'artiste de l'usine à prévisions, due à François Schuiten. La fantasmagorie de Richardson préfigure le calcul massivement parallèle, dans lequel chaque calculateur est responsable d'un point de grille donné, reçoit l'information dont il a besoin et transmet aux calculateurs voisins les données qui leur sont nécessaires. De telles transmissions de messages et distribution de mémoire sont en œuvre dans les machines de calcul modernes, comme le HPCF utilisé au Centre européen. Mais, en puissance de calcul crête, le HPCF calcule environ quinze ordres de grandeur plus vite qu'un opérateur humain, donc équivaut, en termes de pure manipulation de nombres, à 10 milliards d'usines à prévisions de Richardson !

Bibliographie

- **Abbe C.**, 1901 : The physical basis of long-range weather forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 29, 551-561.
- **Ashford O. M.**, 1985 : *Prophet or Professor ? The life and work of Lewis Fry Richardson*. Adam Hilger, Bristol et Boston, 304 p.
- **Bjerknes V.**, 1904 : Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. *Meteor. Zeit.*, 21, 1-7. Traduit en anglais par Y. Mintz, 1954 : The problem of weather forecasting as a problem in mechanics and physics. Traduit en français par D. Gondouin, 1995 : Le problème de la prévision du temps du point de vue de la mécanique et de la physique. *La Météorologie*, 8^e série, 9, 55-62. Réédité dans M. A. Shapiro et S. Grønås, 1999 : *The life cycles of extratropical cyclones*. Éditeur Boston, Massachusetts, American Meteorological Society, 1-4.
- **Buizza R., M. J. Miller et T. N. Palmer**, 1999 : Stochastic simulation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125, 2887-2908.
- **Chapman S.**, 1965 : Introduction de *Weather prediction by numerical process* pour Dover Publications, New York, (voir Richardson, 1922).
- **Charney J. G.**, 1947 : The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J. Meteor.*, 4, 135-162.
- **Charney J. G.**, 1948 : On the scale of atmospheric motions. *Geofysisk. Publ.*, 17, n° 2, 17 p.
- **Charney J. G.**, 1951 : *Dynamic forecasting by numerical process*, *Compendium of Meteorology*. American Meteorological Society, Boston, 470-482.
- **Charney J. G.**, 1955 : The use of the primitive equations of motion in numerical prediction. *Tellus*, 7, 22-26.

- **Charney J. G., R. Fjortoft et J. von Neumann**, 1950 : Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2, 237-254.
- **Courant R., K. O. Friedrichs et H. Lewy**, 1928 : Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik. *Math. Annalen* 100, 32-74. Traduit en anglais en 1967 : On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM Journal*, 11, 215-234.
- **Gold E.**, 1920 : Aids to forecasting: types of pressure distribution, with notes and tables for the fourteen years, 1905-1918. *Met. Office Geophys. Mem.* 16.
- **Goldstine H. H.**, 1993 (1972) : *The Computer from Pascal to von Neumann*. Réédité avec une nouvelle préface, Princeton University Press, 378 p.
- **Hinkelmann K.**, 1951 : Der Mechanismus des meteorologischen Lärmes. *Tellus*, 3, 285-296. Traduction en 1983 : The mechanism of meteorological noise. NCAR/TN-203+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder.
- **Hinkelmann K.**, 1959 : *Ein numerisches Experiment mit den primitiven Gleichungen*, in : *The atmosphere and the sea in motion, Rossby Memorial Volume*. Rockefeller Institute Press, 486-500.
- **Kalnay E.**, 2003 : *Atmospheric modeling, Data assimilation and predictability*. Cambridge University Press, 341 p.
- **Kasahara A. et W. M. Washington**, 1967 : NCAR global general circulation model of the atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 95, 389-402.
- **Lindzen R. S., E. N. Lorenz et G. W. Platzman**, 1990 : *The atmosphere - A challenge, The science of Jule Gregory Charney*. American Meteorological Society, Boston, 321 p.
- **Lynch P.**, 2006 : *The emergence of numerical weather prediction: Richardson's dream*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0521857295, 279 p.
- **Macrae N.**, 1999 : *John von Neumann*. American Mathematical Society. Publié originalement par Pantheon Books, 1992.
- **Petterssen S.**, 2001 : *Weathering the storm*, in : *J.R. Fleming (Ed.), Sverre Petterssen the D-Day forecast, and the rise of modern meteorology*. American Meteorological Society, Boston, 343 p.
- **Phillips N. A.**, 1956 : The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 82, 123-164.
- **Phillips N. A.**, 1960 : On the problem of initial data for the primitive equations. *Tellus*, 12, 121-126.
- **Platzman G. W.**, 1979 : The ENIAC computations of 1950 - gateway to numerical weather prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 60, 302-312.
- **Richardson L. F.**, 1922 : *Weather prediction by numerical process*. Cambridge University Press, Cambridge, 236 p. Réédité par Dover Publications, New York, 1965, avec une nouvelle introduction de S. Chapman, 236 p. Deuxième édition, 2007, Cambridge University Press, avec une préface de P. Lynch, 236 p.
- **Shuman F. G.**, 1989 : History of numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Weather Forecast*, 4, 286-296.
- **Shuman F. G. et J. Hovernal**, 1968 : An operational six-layer primitive equation model. *J. Appl. Meteor.*, 7, 525-547.
- **Teweles S. et H. Wobus**, 1954 : Verification of prognostic charts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 35, 455-463.
- **Willis E. P. et W. H. Hooke**, 2006 : Cleveland Abbe and American meteorology, 1871-1901. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87, 315-326.

Articles sur la prévision numérique du temps, la modélisation climatique et leur histoire parus dans la 8^e série de *La Météorologie*

- Atger F.**, 2000 : La prévision du temps à moyenne échéance. *La Météorologie*, 8^e série, 30, 61-86.
- Bergot T. et D. Guedalia**, 1996 : Évaluation de la qualité de la prévision du brouillard par un modèle numérique. *La Météorologie*, 8^e série, 14, 27-35.
- Birman D. et D. Paradis**, 2006 : Météorologie, climatologie : à la recherche du calculateur idéal. *La Météorologie*, 8^e série, 55, 18-30.
- Bouttier F.**, 1993 : La prévisibilité. *La Météorologie*, 8^e série, 3, 7-17.
- Bouttier F.**, 2007 : Arome, avenir de la prévision régionale. *La Météorologie*, 8^e série, 58, 12-20.
- Coiffier J.**, 1995 : Les débuts de la prévision météorologique automatique en Algérie. *La Météorologie*, 8^e série, numéro spécial, 126-128.
- Coiffier J.**, 2000 : Un demi-siècle de prévision numérique du temps. *La Météorologie*, 8^e série, 30, 11-31.
- Déqué M.**, 2008 : De la prévision à longue échéance à la prévision saisonnière, des modèles numériques pour prévoir le temps au-delà du prévisible. *La Météorologie*, 8^e série, 61, 25-31.
- Dufresne J.-L., D. Salas y Mélia, S. Denvil, S. Tyteca, O. Arzel, S. Bony, P. Braconnot, P. Brockmann, P. Cadule, A. Caubel, F. Chauvin, M. Déqué, H. Douville, L. Fairehead, T. Fichet, M.-A. Foujols, P. Friedlingstein, J.-Y. Grandpeix, J.-F. Guérémy, F. Hourdin, A. Idelkadi, G. Krinner, C. Lévy, G. Madec, P. Marquet, O. Marti, L. Musat, S. Planton, J.-F. Royer, D. Swingedouw et A. Voldoire**, 2006 : Simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie*, 8^e série, 55, 45-89.
- Fischer C., T. Monmerle, L. Auger et B. Lacroix**, 2006 : L'assimilation opérationnelle de données régionales à Météo-France. *La Météorologie*, 8^e série, 54, 43-48.
- Juonon du Vachat R.**, 1994 : Panorama de la modélisation à échelle fine ou à domaine limité. *La Météorologie*, 8^e série, 6, 31-47.
- Pailleux J.**, 1996 : Impact des mesures satellitaires sur la prévision numérique. *La Météorologie*, 8^e série, 15, 5-18
- Pailleux J.**, 2002 : Les besoins en observation pour la prévision numérique du temps. *La Météorologie*, 8^e série, 39, 29-35.
- Pailleux J., J.-F. Geleyn et E. Legrand**, 2000 : La prévision numérique du temps avec les modèles Arpège et Aladin ; bilan et perspectives. *La Météorologie*, 8^e série, 30, 32-60.
- Palmer T. N., J. Barkmeijer, R. Buizza, E. Klinker et D. Richardson**, 2002 : L'avenir de la prévision d'ensemble. *La Météorologie*, 8^e série, 22-30.
- Rabier F.**, 1993 : Assimilation variationnelle de données météorologiques en présence d'instabilité barocline. *La Météorologie*, 8^e série, 4, 57-72.
- Rabier F., J.-F. Mahfouf et E. Klinker**, 2000 : Une nouvelle technique d'assimilation des données d'observation au CEPMMT : l'assimilation variationnelle quadrimensionnelle. *La Météorologie*, 8^e série, 30, 87-101.
- Ricard D.**, 2005 : Modélisation à haute résolution des pluies intenses dans les Cévennes : le système convectif des 13 et 14 octobre 1995. *La Météorologie*, 8^e série, 48, 28-38.
- Thépaut J.-N. et J.-F. Mahfouf**, 2003 : Le potentiel des nouvelles mesures satellitaires pour la prévision numérique. *La Météorologie*, 8^e série, 40, 86-91.