

## UN DEMI-SIÈCLE DE PRÉVISION NUMÉRIQUE DU TEMPS

Jean Coiffier

*Météo-France*

*Service central d'exploitation de la météorologie*

*42, avenue Gaspard-Coriolis*

*31057 Toulouse Cedex*

### RÉSUMÉ

Cet article donne un aperçu historique des techniques qui ont servi à la construction des modèles de prévision numérique du temps et des principaux jalons qui ont marqué l'évolution de cette discipline au cours des cinquante dernières années. Après un rappel des travaux majeurs qui ont contribué à la réussite de l'expérience de Charney, Fjörtoft et von Neumann en 1950, on tente de montrer la logique qui a présidé au choix des divers systèmes d'équations et des techniques numériques utilisées pour les résoudre avec une précision toujours accrue. Tout en soulignant l'importance croissante de l'assimilation des données météorologiques pour la détermination d'un état initial conduisant à une prévision déterministe, on montre également les limitations de cette approche, qui ont mené au développement des méthodes de prévision probabiliste. Parallèlement, on présente les grandes lignes de l'évolution des ordinateurs scientifiques, qui ont apporté aux météorologistes la puissance de calcul nécessaire pour mettre en œuvre des modèles de prévision numérique de plus en plus complexes. Enfin, on insiste sur la nécessité de la coopération entre services météorologiques pour construire des systèmes de prévision numérique performants.

### ABSTRACT **A half century of numerical weather prediction**

This paper gives an historical background of the techniques currently used in numerical weather prediction models and the milestones in their evolution during the last fifty years. After a reminder of the major contributions of Charney, Fjörtoft and von Neumann in 1950, it tries to show the logic for the choice of the various systems of equations and the numerical techniques used for solving them with increased accuracy. While pointing out the increasing importance of data assimilation in determining the initial state to allow a deterministic forecast, it also shows the limits of this approach, leading to the developments of probabilistic forecast methods. At the same time it gives a general outline of the evolution of the scientific electronic computers, which provided the scientists with the necessary computing power to use ever more complex models. Finally it stresses the need for cooperation between the meteorological services in order to build high performance numerical weather prediction systems.

La prévision numérique du temps (*Numerical Weather Prediction* ou *NWP* en anglais) est une discipline très jeune puisqu'elle s'est essentiellement développée au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, bénéficiant de façon continue des progrès en matière d'outils de calcul automatique. Les techniques mises en œuvre permettent de résoudre, avec les méthodes du calcul numérique, les équations décrivant le comportement de l'atmosphère, c'est-à-dire de déterminer les valeurs futures de ses grandeurs caractéristiques en partant de valeurs initiales connues grâce aux observations météorologiques. Les **modèles numériques**

d'atmosphère construits sur ce principe sont ainsi devenus les outils indispensables de la prévision du temps, supplantant progressivement les méthodes fondées sur l'application de règles de déplacement et d'évolution de structures atmosphériques identifiables (les centres d'action et les fronts).



Vilhelm Bjerknes (1862-1951). (Photo Météo-France)

Les équations utilisées sont les équations générales de la mécanique des fluides, bien établies déjà au début du xx<sup>e</sup> siècle, auxquelles on applique un certain nombre de simplifications qui se justifient par l'analyse des ordres de grandeur des divers termes dans le cas particulier de l'atmosphère terrestre et selon les échelles à décrire. Le recours au calcul numérique est indispensable pour résoudre ces systèmes d'**équations non linéaires** dont les solutions ne peuvent pas être déterminées analytiquement dans le cas général.

La construction d'un modèle numérique d'atmosphère comprend deux étapes distinctes : la première consiste à établir un système d'équations, alors que la seconde, dite « numérisation », consiste à remplacer les équations portant sur des variables continues par des équations portant sur des variables discrètes et dont les solutions sont obtenues au moyen d'un algorithme approprié. Les résultats d'une prévision numérique dépendent donc des propriétés générales des solutions des équations, qui relèvent de la météorologie dynamique, ainsi que des effets de la numérisation adoptée, qui doivent être examinés de façon détaillée.

La mise en œuvre de l'algorithme implique de disposer d'un outil de calcul qui soit suffisamment puissant, tout en restant simple d'utilisation. C'est la raison pour laquelle les progrès de la prévision numérique du temps ont été étroitement liés au fantastique développement des ordinateurs, depuis leur naissance à la fin de la deuxième guerre mondiale.

Enfin, il faut souligner que la prévision météorologique, réalisée par les prévisionnistes avec l'aide des modèles numériques, doit également ses succès à la mise en œuvre et au fonctionnement du Système mondial d'observation météorologique, qui repose à la fois sur des mesures conventionnelles et sur des mesures satellitaires et permet d'obtenir, de façon perfectible certes mais néanmoins efficace, une description de l'atmosphère à un instant initial donné.

## LE TEMPS DES DÉFRICHEURS

L'histoire de la prévision numérique du temps a été jalonnée par un certain nombre d'étapes qui se sont révélées décisives pour l'évolution de cette discipline.

Dès 1904, le Norvégien Vilhelm Bjerknes reconnaît que la prévision du temps est fondamentalement un problème déterministe à valeurs initiales au sens mathématique du terme (Bjerknes, 1904) : « *Si, comme le pense chaque homme raisonnant scientifiquement, les phénomènes atmosphériques se développent à partir de ceux qui les précèdent suivant des lois précises, on peut en déduire que les conditions nécessaires et suffisantes pour une solution rationnelle de la prévision en météorologie sont les suivantes :*

- *on doit connaître avec une précision suffisante l'état de l'atmosphère à un instant donné ;*
- *on doit connaître avec une précision suffisante les lois selon lesquelles un état de l'atmosphère se développe à partir de l'état précédent. »*

Cependant, Bjerknes réalise que la difficulté du problème vient de la nécessité de résoudre un système d'équations aux dérivées partielles non linéaires pour lesquelles on ne dispose pas, dans le cas général, de solutions analytiques.

Entre 1916 et 1922, le Britannique Lewis Fry Richardson essaie de résoudre les équations de la prévision du temps de façon approchée avec les outils du calcul numérique. Il réalise même une prévision à six heures d'**échec** qui se révèle complètement irréaliste. Sans se décourager, il cherche à expliquer les raisons de son échec. Ses travaux ont été publiés en 1922 dans un livre resté célèbre, intitulé *Weather Prediction by Numerical Process*, qui contient une vision à caractère réellement prémonitoire (Richardson, 1922). Notant que « *64 000 calculateurs seraient nécessaires pour prendre de vitesse l'évolution du temps sur l'ensemble du globe* », Richardson imagine une usine à prévisions météorologiques, constituée par une myriade de calculateurs humains effectuant les calculs de façon synchronisée sous la direction d'un responsable chargé de la bonne marche des opérations (figure 1).



Lewis Fry Richardson (1881-1953). (Photo National Meteorological Library, Lafayette)



Jule Charney (1917-1981). (©Nasa/ESDC)

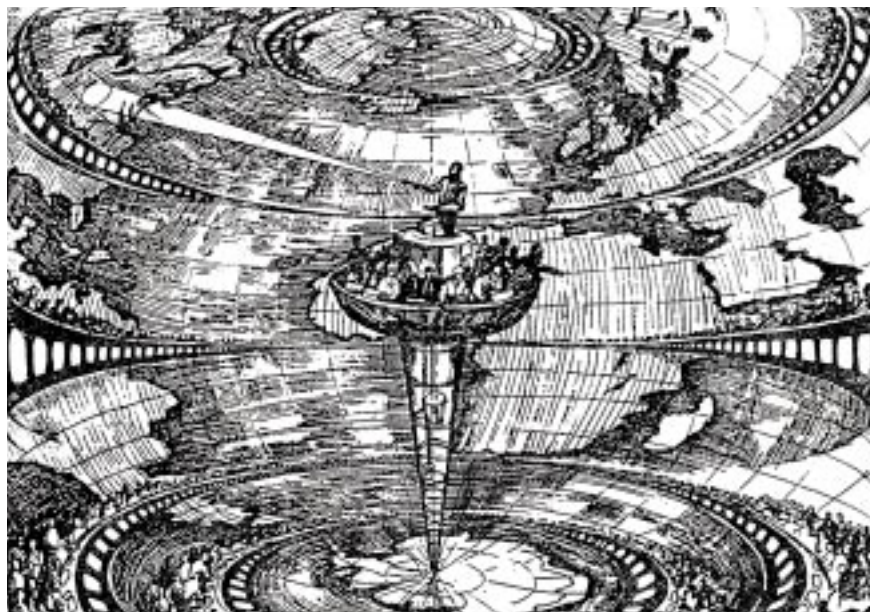


Figure 1 - Le « rêve » de Richardson vu par deux artistes.  
 En haut, dessin d'Alf Lannerbaeck, publié par le journal suédois *Dagens Nyheter* le 22 septembre 1984.  
 En bas, dessin de François Schuiten. (© F. Schuiten, 2000)



John von Neumann (1903-1957). (Courtesy of the Archives of the Institute for Advanced Study, Alan Richards)

En 1928, les mathématiciens allemands Courant, Friedrichs et Lewy étudient de façon systématique la manière de résoudre les équations aux dérivées partielles à l'aide des « différences finies » et précisent les contraintes à respecter lors de la numérisation (Courant et al., 1928).

En 1939, le Suédois Carl-Gustav Rossby montre que l'équation de conservation du tourbillon absolu permet d'interpréter correctement le déplacement observé des centres d'action atmosphériques (Rossby et al., 1939).

En 1946, le premier ordinateur électronique, l'Eniac (*Electronic Numerical Integrator Analyser and Computer*), voit le jour à l'université de Pennsylvanie située à Philadelphie (États-Unis), grâce à l'impulsion déterminante du mathématicien américain d'origine hongroise John von Neumann.



C'est à partir du 5 mars 1950 qu'une équipe composée de Jule Charney, Ragnar Fjörtoft, Joseph Smagorinsky, Georges Platzmann et John Freeman entreprend la mise en œuvre des calculs sur la machine Eniac installée à Aberdeen. Sur ce « monstre » comprenant 42 armoires bourrées de près de 6 000 relais, de 18 000 tubes électroniques et de bien d'autres composants, la programmation nécessite de manipuler une multitude d'interrupteurs répartis sur divers panneaux de contrôle. Dans ces conditions, pas moins de trente-trois jours et trente-trois nuits sont nécessaires aux membres de l'équipe, se relayant pratiquement sans interruption, pour effectuer trois prévisions à 24 heures d'échéance à l'aide du modèle simplifié d'atmosphère. Dans une lettre datée du 10 avril 1950 et adressée à Georges Platzmann, Jule Charney écrit : « [...] La dernière semaine [...] nous avons fait une prévision à 24 heures pour le 31 janvier 1949 et une autre pour le 14 février 1949 durant laquelle deux cut-off ont eu lieu. Les résultats ont montré qu'avec certaines exceptions bien marquées, les caractéristiques de grande échelle de l'écoulement sur la surface 500 hPa pouvaient être prévues de façon barotrope » (Platzmann, 1979). Le coup d'envoi de l'aventure de la prévision numérique vient d'être donné, donnant ainsi réalité au rêve prémonitoire de Richardson.

### L'expérience historique de 1950



La partie gauche de l'ordinateur Eniac lorsqu'il était installé au Ballistic Research Laboratory de l'armée américaine. (US Army photo)

En 1948, l'Américain Jule Charney propose une simplification du système général d'équations, connue sous le nom d'« approximation quasi **géostrophique** », et retrouve comme cas particulier l'équation étudiée par Rossby (Charney, 1948).

Enfin, en 1950, J. Charney, le Norvégien R. Fjörtoft et J. von Neumann réalisent la première prévision numérique du temps (Charney et al., 1950) : ils utilisent pour cette expérience l'équation de conservation du tourbillon absolu et effectuent les calculs numériques sur le calculateur électronique Eniac, installé à Aberdeen (Maryland, États-Unis). Les résultats obtenus pour la prévision de l'altitude géopotentielle de la surface isobare 500 hPa, caractéristique de l'atmosphère moyenne, sont tout à fait encourageants et cette expérience historique marque ainsi le point de départ de la prévision numérique moderne (Platzmann, 1979). En réponse à Charney, qui lui avait fait parvenir l'article décrivant l'expérience, Richardson écrit en 1952 : « *Permettez-moi de vous féliciter ainsi que vos collaborateurs pour le remarquable succès que vous avez obtenu à Princeton et pour les perspectives d'amélioration que vous indiquez* » (Ashford, 1985).

## UN DEMI-SIÈCLE DE PROGRÈS CONTINUS

### La nécessité d'allier précision et rapidité

Le succès de l'expérience de Charney, Fjörtoft et von Neumann allait entraîner, à partir du milieu des années cinquante, le développement et la mise en œuvre à des fins opérationnelles d'un grand nombre de modèles numériques de prévision du temps, de complexité croissante et de **résolution spatiale** sans cesse accrue, permettant ainsi de traiter des échelles d'espace et de temps de plus en plus fines.

Richardson avait parfaitement compris que la prévision météorologique numérique est une course de vitesse entre le processus de calcul et l'évolution réelle de l'atmosphère. La rapidité du calcul dépend des diverses caractéristiques du modèle de prévision et de la vitesse du calculateur utilisé, sous une forme que l'on se propose d'examiner en détail. Supposons que la numérisation des équations est effectuée en divisant l'espace au moyen de boîtes définies par une grille horizontale et par un certain nombre de niveaux verticaux (figure 2). Dans chaque boîte, l'atmosphère est supposée homogène et il suffit donc de connaître les valeurs des diverses grandeurs atmosphériques en un point de cette boîte. Dans ce cas, on parle d'un **modèle en points de grille**. On peut alors calculer :



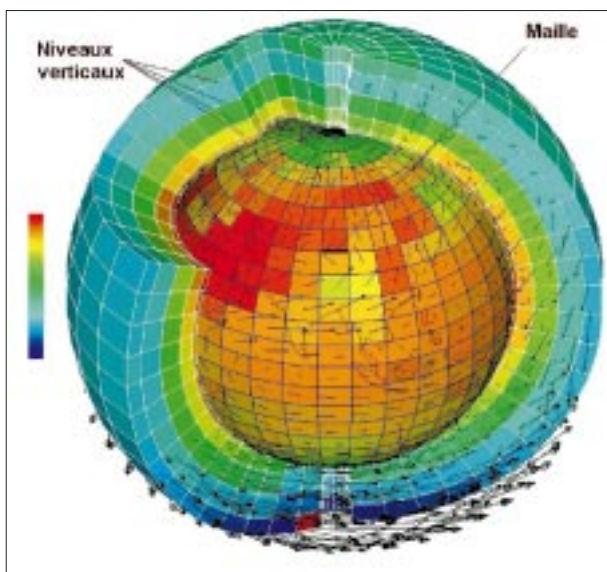


Figure 2 - Représentation stylisée d'un modèle numérique planétaire en points de grille, montrant le découpage en « boîtes élémentaires » dans lesquelles sont effectués les calculs. Deux grandeurs atmosphériques y sont portées : la température (échelle de couleurs à gauche) et le vecteur vent. (© Laurent Fairhead, Laboratoire de météorologie dynamique du CNRS)

- Le nombre total  $N_v$  de variables à traiter : l'état de l'atmosphère étant décrit par un nombre restreint de grandeurs (les deux composantes du vent horizontal, la température, l'humidité spécifique et la pression de surface), le nombre de variables est égal au produit du nombre de grandeurs par le nombre de points traités, qui dépend de la taille du domaine géographique et de la résolution spatiale adoptées, tant sur l'horizontale que sur la verticale.

- Le nombre  $N_c$  de calculs à effectuer par variable pour un **pas de temps**  $\Delta t$  : ce nombre d'opérations arithmétiques élémentaires dépend de la complexité du modèle, une prise en compte plus détaillée des interactions entre variables se traduisant par une augmentation du nombre de calculs.

- Le nombre  $N_t$  de pas de temps nécessaires pour atteindre une échéance donnée  $H$ , à savoir  $N_t = H/\Delta t$ . Le pas de temps  $\Delta t$  dépend de la résolution spatiale, caractérisée par la **maille**  $\Delta x$ , car il doit satisfaire la condition de Courant, Friedrichs et Lewy, en abrégé condition CFL, qui s'exprime sous la forme :

$$U \cdot \Delta t / \Delta x < C$$

où  $U$  est la vitesse de propagation des ondes les plus rapides décrites par les équations et  $C$  un nombre sans dimensions dépendant de la géométrie du problème et de la numérisation choisie. Si certains algorithmes, dont il sera question plus loin, permettent de dépasser cette limite, il n'en reste pas moins vrai qu'il est nécessaire de diminuer le pas de temps  $\Delta t$  en même temps que la maille  $\Delta x$  pour traiter avec une précision homogène les échelles spatiales et temporelles des phénomènes atmosphériques de mésoéchelle, comme le montre l'examen de la figure 3.

	Temps	Échelle climatologique	Échelles planétaire et synoptique	Méso-échelle	Microéchelle		
Longueur	L	T	1 mois	1 jour	1 heure	1 minute	1 s
Macroéchelle $\alpha$	10 000 km		Ondes stationnaires	Ondes très longues	Ondes de marée		
Macroéchelle $\beta$	2 000 km			Ondes baroclines			
Mésoéchelle $\alpha$	200 km			Fronts Cyclones tropicaux			
Mésoéchelle $\beta$	20 km			Jet de basse couche nocturne Lignes de grain Ondes d'inertie Amas de nuages Ondes de relief			
Mésoéchelle $\gamma$	2 km				Orages Ondes de gravité internes Turbulence en ciel clair Effets urbains		
Microéchelle $\alpha$	200 m					Tornades Convection profonde Ondes de gravité	
Microéchelle $\beta$	20 m						Tourbillons secs Thermiques Sillages
Microéchelle $\gamma$							Panaches Turbulence Frottement au sol (rugosité)

Figure 3 - Les diverses échelles de mouvement et les phénomènes météorologiques associés avec leurs échelles de temps et d'espace. (D'après Orlandi, 1975, traduit par Juvanon du Vachat, 1994)

- La vitesse de calcul  $R$  de l'ordinateur : elle s'exprime en nombre d'opérations élémentaires en virgule flottante par seconde, ou flops, ces opérations pouvant être effectuées par un ou plusieurs calculateurs en parallèle.

Le temps  $T$  nécessaire pour effectuer une prévision à une échéance donnée  $H$  est fourni par le rapport :

$$T = N_v \cdot N_c \cdot N_t / R$$

En prenant l'exemple du modèle opérationnel Arpège (Pailleux et al., 2000), tel qu'il fonctionnait à Météo-France en 1998, le nombre de variables à traiter est  $N_v \approx 2,3 \cdot 10^7$  (quatre variables à trois dimensions  $\times$  31 niveaux  $\times$  600  $\times$  300 points sur l'horizontale et une variable à deux dimensions  $\times$  600  $\times$  300 points sur l'horizontale), le nombre de calculs à effectuer pour une variable est  $N_c \approx 7 \cdot 10^3$  et le nombre de pas de temps pour réaliser une prévision à 24 heures d'échéance est  $N_t = 96$  (pas de temps de 15 minutes). Les calculs étant effectués sur l'ordinateur Fujitsu VPP700 crédité d'une vitesse de calcul  $R$  atteignant 20 gigaflops (20 milliards d'opérations flottantes par seconde), le temps  $T$  nécessaire pour obtenir une prévision à 24 heures d'échéance est un peu inférieur à un quart d'heure.

Le temps  $T$  étant imposé par les contraintes opérationnelles, tout accroissement de la vitesse de l'ordinateur disponible permet d'augmenter la résolution spatiale du modèle (diminution de la maille horizontale et augmentation du nombre de niveaux sur la verticale) ainsi que le nombre de calculs effectués pour chacune des variables. Cette évolution vers une plus haute résolution et une complexité accrue a été de règle au cours des dernières décennies ; elle a également été facilitée par la mise au point de nouveaux algorithmes permettant d'augmenter le pas de temps au-delà des limites imposées par la condition CFL.

## L'utilisation des équations filtrées

Les premiers modèles numériques utilisés de façon opérationnelle reposaient sur l'approximation quasi géostrophique qui impose une relation **diagnostique** – c'est-à-dire indépendante du temps – entre le champ de pression et le champ de vent, ce qui diminue le nombre de degrés de liberté du modèle. Cette approximation a également pour effet de ne conserver comme solutions que les ondes lentes, dites **ondes de Rossby**, et de supprimer les **ondes d'inertie-gravité** à propagation rapide ; elle permet ainsi d'utiliser un pas de temps relativement grand, compatible avec la condition CFL. En raison de l'effet de filtrage ainsi obtenu, les équations simplifiées ont pris le nom d'**équations filtrées**. C'est en mai 1955 qu'un tel modèle à trois niveaux (Charney, 1954) a été mis en service pour la prévision opérationnelle par l'*US Weather Bureau* aux États-Unis. Il a cependant fallu attendre les améliorations apportées par Cressman (1963) pour que cet outil soit réellement utilisé par les prévisionnistes (Shuman, 1989). Dans les années soixante et jusqu'au milieu des années soixante-dix, les modèles reposant sur les équations filtrées ont été largement employés par les services météorologiques les plus développés (Bushby, 1987 ; Pône, 1993 ; Cressman, 1996). L'amélioration des performances des calculateurs a été alors mise à profit pour étendre le domaine et accroître la résolution horizontale et le nombre de niveaux verticaux – augmentant ainsi le nombre de variables  $N_v$  – afin de mieux décrire la dynamique de l'atmosphère.

## Le retour aux équations primitives et l'initialisation

La vitesse de calcul croissante des calculateurs a ensuite permis de revenir aux équations plus générales d'évolution d'un fluide en équilibre **hydrostatique**, utilisées auparavant par Richardson, celles-ci prenant désormais le nom d'**équations primitives**. Elles admettent comme solutions les ondes d'inertie-gravité à propagation rapide et imposent pour respecter la condition CFL le choix d'un pas de temps environ six fois plus faible qu'avec les équations filtrées, augmentant par là-même le nombre de pas de temps  $N_t$ . Les travaux sur les équations primitives, lancés par Eliassen (1956), ont débouché sur des essais positifs en Allemagne (Hinkelmann, 1959). Aux États-Unis, le modèle en équations primitives à six niveaux verticaux, mis au point par Shuman et utilisant une grille à maille de 381 km sur un domaine octogonal couvrant la majeure partie de l'hémisphère nord (Schuman et Hovermale, 1968), a commencé sa carrière opérationnelle le 6 juin 1966, ouvrant ainsi la voie à l'emploi de modèles de ce type par de nombreux services météorologiques.



L'utilisation des équations primitives, assez simple à mettre en œuvre, nécessite cependant de résoudre le problème de l'**initialisation**. En effet, les champs de pression et de vent, couplés au travers des équations d'évolution, doivent respecter, dès l'état initial, un certain équilibre appelé **équilibre masse-vent**, sous peine d'engendrer de fortes oscillations dues à la propagation d'ondes de gravité d'amplitude irréaliste (Hinkelmann, 1951). La difficulté d'obtenir un bon équilibre masse-vent dans l'état initial à partir des observations de pression et de vent est d'ailleurs à l'origine du résultat irréaliste obtenu par Richardson au cours de la première tentative de prévision numérique (Lynch, 1994).

Les méthodes d'initialisation statique, consistant à déduire le champ de vent du champ de pression en utilisant une **équation linéaire** ou non linéaire d'équilibre, se sont révélées relativement inefficaces ; de plus, les observations de vent ne servaient alors que de façon marginale (pour ajuster le gradient de pression) dans la définition de l'état initial. C'est à la fin des années soixante-dix qu'une solution élégante au problème de l'initialisation des champs à l'échelle planétaire a été trouvée de façon indépendante par Baer et Tribbia (1977) et par Machenhauer (1977). L'idée consiste à effectuer une décomposition de l'état initial de l'atmosphère en **modes normaux** – c'est-à-dire en solutions d'une version linéarisée du modèle –, puis à corriger dans l'état initial les modes correspondant aux ondes de gravité de façon à les rendre stationnaires lors de l'évolution du modèle. Cette technique, dite d'**initialisation non linéaire par modes normaux**, a réellement permis d'utiliser efficacement les modèles à équations primitives en tirant le meilleur parti des données initiales de pression et de vent.

## Le traitement planétaire et la méthode spectrale

Un raisonnement élémentaire s'appuyant sur la vitesse de déplacement des perturbations montre qu'il est nécessaire d'élargir le domaine géographique du modèle, et donc d'augmenter le nombre de points  $N_v$ , lorsque l'on veut réaliser des prévisions à des échéances de plus en plus lointaines (figure 4).

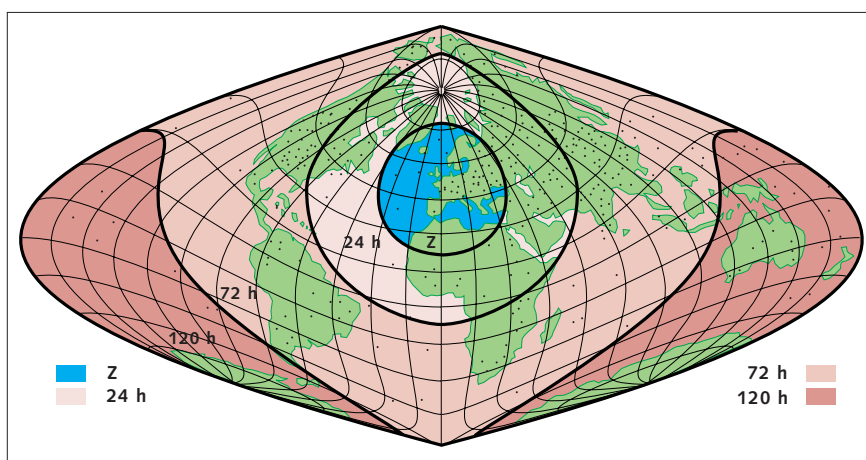


Figure 4 - Répartition mondiale des stations de radiosondage et indication des régions sur lesquelles des observations sont nécessaires pour réaliser des prévisions à échéance de 1, 3 et 5 jours sur la zone centrale Z. (Document CEPMMT)

Aux modèles fonctionnant sur des domaines géographiques restreints ont donc succédé les modèles hémisphériques, puis enfin les **modèles planétaires** permettant de traiter correctement les interactions entre les deux hémisphères. Pour cela, il a été nécessaire de définir des grilles de calcul sur la sphère et de remédier au problème d'instabilité venant du rétrécissement de la maille près des pôles.

Concurremment aux modèles en points de grille utilisant la méthode des différences finies pour le calcul des dérivées partielles, s'est développé l'usage des **modèles spectraux**, dans lesquels on représente les champs définis sur la sphère au moyen d'une décomposition sur une base de fonctions orthonormées, les harmoniques sphériques de surface. Cette méthode, qui permet une meilleure évaluation des vitesses de déplacement de certaines ondes que la méthode des différences finies, avait longtemps été réservée à des modèles à faible nombre de



degrés de liberté, en raison du coût élevé du calcul des coefficients de la décomposition pour les termes non linéaires. Avec l'avènement de l'algorithme de transformation de Fourier discrète rapide (Cooley et Tuckey, 1965), il s'est avéré beaucoup plus avantageux d'utiliser la méthode, dite de transformation, consistant à calculer les termes non linéaires aux nœuds d'une grille intermédiaire (Orszag, 1970 ; Eliassen et al., 1970). Cette technique a rendu la méthode spectrale tout à fait compétitive (Bourke, 1972), puisqu'elle a supplanté presque partout la méthode en points de grille pour la mise au point des modèles planétaires dans le cours des années quatre-vingt.

## L'utilisation des modèles à domaine limité

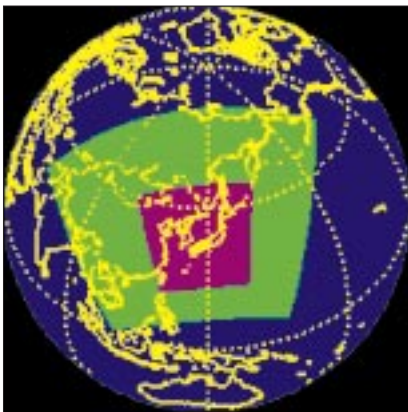


Figure 5 - Exemple de modèles emboîtés. Les trois modèles utilisés pour la prévision opérationnelle par l'Agence météorologique japonaise. En bleu, modèle planétaire. En vert, modèle Asie. En mauve, modèle Japon. (© Japan Meteorological Agency)

Parallèlement à l'extension du domaine géographique, nécessaire pour prolonger l'échéance des prévisions, il s'est révélé avantageux, pour la prévision à courte échéance (à 1 ou 2 jours), de continuer à travailler sur un domaine restreint en utilisant une grille à maille suffisamment fine pour simuler correctement les petites échelles de mouvement, en particulier celles qui sont induites par le relief. C'est ainsi que l'on a vu se développer des **modèles à domaine limité** (*Limited Area Model* ou *LAM* en anglais) permettant de fournir des prévisions à petite échelle pour la courte échéance. Il est alors nécessaire de spécifier les valeurs des champs sur la frontière du domaine à chaque pas de temps ; celles-ci peuvent être obtenues à partir des champs prévus par un modèle de plus grande échelle. Cependant, il est nécessaire d'introduire dans le modèle à domaine limité un terme de dissipation, destiné à atténuer les perturbations engendrées par le forçage sur la frontière, perturbations qui se propagent vers l'intérieur du domaine (Davies, 1976). On aboutit ainsi aux **modèles emboîtés** qui constituent la base des systèmes opérationnels de prévision dans la plupart des services météorologiques (figure 5).

La méthode spectrale et l'initialisation non linéaire par modes normaux ayant fait la preuve de leur efficacité pour les modèles planétaires, il était tentant d'appliquer ces techniques aux modèles à domaine limité. Parmi les diverses approches qui ont été proposées, on peut mentionner celle de Machenhauer et Haugen (1987), consistant à prolonger les champs sur un domaine plus vaste de façon à les rendre bipériodiques ; cet artifice permet alors d'utiliser la méthode spectrale sur un domaine limité en effectuant la décomposition sur une base de fonctions trigonométriques.

En ce qui concerne la méthode d'initialisation non linéaire par modes normaux, il est possible, moyennant certaines hypothèses sur la définition de la partie linéarisée du modèle, d'effectuer dans l'espace physique la stationnarisation des modes de gravité (Brière, 1982 ; Juvanon du Vachat, 1986). Ce procédé a pu être appliqué efficacement pour initialiser les modèles en équations primitives à domaine limité. Plus récemment, une méthode utilisant un filtrage numérique des fréquences élevées – correspondant aux ondes d'inertie-gravité – a été proposée par Lynch et Huang (1992). Cette méthode est généralement appelée **initialisation par filtres numériques**. Elle permet de résoudre de façon satisfaisante le problème de l'initialisation pour les modèles à domaine limité ainsi que pour les modèles dont la géométrie rend la détermination des modes normaux impossible.

## Les algorithmes permettant d'augmenter le pas de temps

L'emploi des **schémas temporels explicites** avec les équations primitives impose d'utiliser des pas de temps six fois inférieurs à ceux des modèles filtrés, uniquement pour satisfaire la condition CFL. Une alternative a été fournie par Robert (1969), qui a proposé de traiter de façon implicite les termes responsables de la propagation des ondes de gravité. On obtient avec cet algorithme dit **schéma temporel semi-implicite** une nouvelle condition CFL beaucoup moins contraignante, puisqu'elle ne fait intervenir que la vitesse maximale du vent synoptique. Cette possibilité d'augmenter le pas de temps a sa contrepartie, car il faut alors résoudre un système d'équations linéaires. Malgré cela, l'avantage va nettement à l'algorithme semi-implicite qui permet de diviser par un facteur 4 la durée d'exécution pour les modèles en points de grille, et plus encore pour les modèles spectraux. Cela explique la popularité de cette formulation qui s'est largement développée à partir des années soixante-dix.

Le traitement lagrangien de l'advection a été utilisé initialement par Fjörtoft (1952) pour résoudre un modèle simple de façon graphique, méthode dont s'est inspiré ultérieurement Lepas (1963) pour construire un modèle de prévision





André Robert (1929-1993). (© Société canadienne de météorologie et d'océanographie)

### Schéma explicite - Schéma implicite

Un schéma d'avance temporelle – ou **schéma temporel** – pour une variable X est dit « explicite » lorsque les valeurs  $X(x_0, t + \Delta t)$  à déterminer à l'instant  $t + \Delta t$  s'expriment simplement en fonction des valeurs connues à l'instant  $t$  au point  $x_0$  considéré ainsi qu'aux points voisins  $x_0 + \Delta x$  et  $x_0 - \Delta x$ .

$$X(x_0, t + \Delta t) = f [X(x_0, t), X(x_0 + \Delta x, t), X(x_0 - \Delta x, t)]$$

Il est dit « implicite » s'il existe simplement une relation entre les variables à déterminer à l'instant  $t + \Delta t$  et les variables connues à l'instant  $t$ .

$$F [X(x_0, t + \Delta t), X(x_0 + \Delta x, t + \Delta t), X(x_0 - \Delta x, t + \Delta t), X(x_0, t), X(x_0 + \Delta x, t), X(x_0 - \Delta x, t)] = 0$$

Un algorithme approprié est alors nécessaire pour extraire l'ensemble des valeurs de X qui satisfont cette relation.

numérique. L'emploi de cette technique a également été proposé par Krishnamurti (1962) et Sawyer (1963), dans le but d'améliorer la précision des schémas numériques d'advection. C'est cependant encore à Robert (1981) que revient le mérite d'avoir montré que son utilisation combinée au schéma semi-implicite permet de s'affranchir de la condition CFL. La discrétisation temporelle s'effectue sur la dérivée totale (ou dérivée lagrangienne) et oblige à interpoler les variables du modèle aux points de départ des particules aboutissant aux points de grille. On obtient ainsi l'algorithme dit **schéma temporel semi-lagrangien semi-implicite**, qui permet d'augmenter encore le pas de temps – donc de diminuer le nombre de pas de temps  $N_t$  –, dans les limites compatibles avec la précision recherchée pour la représentation des échelles de temps pertinentes.

### Dérivée eulérienne - Dérivée lagrangienne

La « dérivée temporelle eulérienne » d'une variable  $X(x, t)$  en un point donné  $x_0$  représente le taux de variation de cette variable au point  $x_0$  et peut se calculer de façon approchée à l'aide de la formule :

$$\frac{\partial X}{\partial t} \approx \frac{X(x_0, t + \Delta t) - X(x_0, t)}{\Delta t}$$

La « dérivée lagrangienne » représente le taux de variation de la variable  $X(x, t)$  attachée à une particule lors de son déplacement et peut se calculer de façon approchée à l'aide de la formule :

$$\frac{dX}{dt} \approx \frac{X(x_0, t + \Delta t) - X(x_i, t)}{\Delta t}$$

où le point  $x_i$  désigne la position, à l'instant initial  $t$ , de la particule arrivant en  $x_0$  à  $t + \Delta t$ .

On doit souligner que l'utilisation de cet algorithme performant a également rendu compétitif l'emploi des modèles à **maille variable** – c'est-à-dire à résolution spatiale accrue sur une zone choisie – comme alternative au système de modèles emboîtés, dès lors que le pas de temps n'est plus tributaire de la maille la plus petite sur le domaine de travail (Courtier et Geleyn, 1988 ; Côté et al., 1993).

Le schéma temporel semi-lagrangien semi-implicite a ouvert de nouveaux horizons pour élaborer des modèles non hydrostatiques opérationnels. La résolution des équations non hydrostatiques, indispensable pour traiter correctement les échelles spatiales de l'ordre du kilomètre, se heurtait jusque-là, pour un fonctionnement opérationnel, au problème du pas de temps très faible nécessaire pour respecter la condition CFL relative à la propagation des **ondes acoustiques** suivant la verticale. Cependant, le traitement lagrangien de l'advection, conjugué au traitement implicite des termes responsables de la propagation des ondes de gravité et des ondes acoustiques, fournit un algorithme inconditionnellement stable,

## Le passage aux équations non hydrostatiques



de telle sorte qu'il est désormais possible d'envisager d'utiliser les modèles non hydrostatiques (Tangay et al., 1990 ; Laprise, 1992 ; Bubnova et al., 1995) pour simuler les mouvements de l'atmosphère en allant de l'échelle planétaire jusqu'à la mésoéchelle (figure 3).

## La prise en compte des processus physiques

Il s'est rapidement révélé nécessaire d'évaluer les termes de sources et de puits de quantité de mouvement, de chaleur et de vapeur d'eau résultant de processus physiques plus ou moins complexes, termes qui doivent être introduits dans les équations pour reproduire de façon réaliste l'évolution de l'atmosphère. Comme les échelles à prendre en compte pour simuler avec précision les processus physiques pertinents (figure 6) sont généralement inférieures aux échelles décrites par les variables du modèle (ces échelles à prendre en compte sont dites parfois **sous-maille**), ces processus physiques doivent faire l'objet de **paramétrisations** : on cherche seulement à déterminer leur effet moyen sur les variables du modèle. Ces calculs supplémentaires forment la partie **physique** du modèle et viennent se greffer sur le traitement numérique des équations qui en constitue la partie **dynamique**.

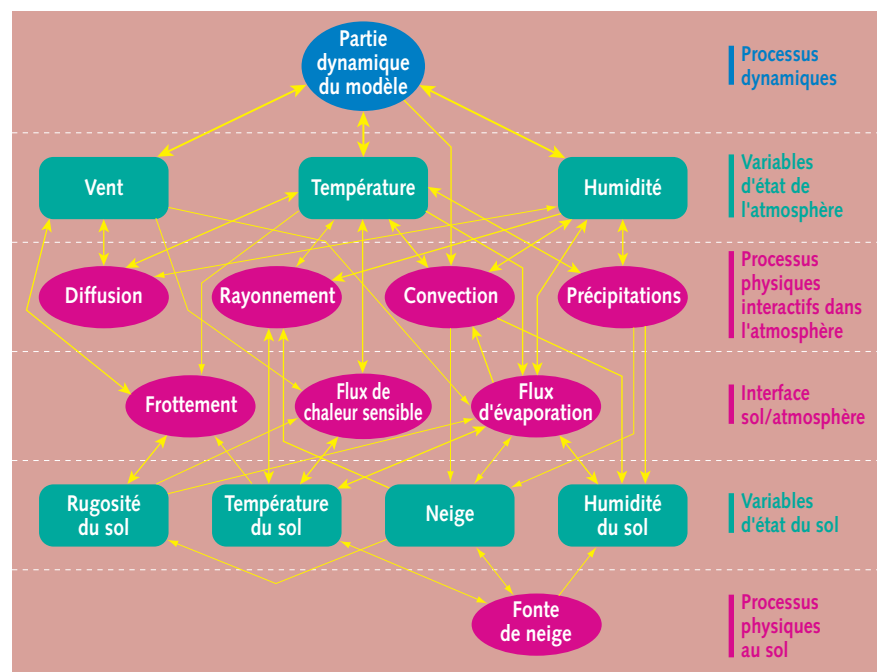


Figure 6 - Schéma conceptuel des processus physiques qui doivent être introduits dans les modèles numériques de prévision du temps et des interactions qui les lient. (Document CEPMMT)

Après avoir pris en compte de façon simple les effets du frottement afin d'éviter le creusement excessif des dépressions, une amélioration importante a consisté à décrire le cycle de l'eau dans l'atmosphère et les échanges énergétiques associés. L'ajout d'une équation décrivant le transport de la vapeur d'eau est nécessaire pour disposer des éléments permettant de traiter les effets des changements de phase de l'eau et de calculer les précipitations (Smagorinsky, 1962).

Une description correcte des mécanismes de transfert par turbulence entre le sol et l'atmosphère, non seulement pour la quantité de mouvement, mais aussi pour la chaleur sensible et la vapeur d'eau, implique le calcul des flux turbulents au voisinage de la surface (Businger et al., 1971 ; Deardorff, 1972 ; Louis, 1979). Ce calcul fait intervenir, outre les variables du modèle dynamique calculées pour le niveau le plus bas, des variables supplémentaires comme la température et l'humidité de surface, ainsi que des données caractérisant le sol comme la longueur de rugosité ou la proportion de végétation (Deardorff, 1978).

Il est évident que l'évolution des variables de surface est directement liée aux apports énergétiques dus au rayonnement, lui-même dépendant fortement de l'heure et de la nébulosité. C'est la raison pour laquelle il est indispensable de



calculer les effets des interactions entre le rayonnement et les divers constituants de l'atmosphère, en particulier l'eau. Il faut notamment calculer les effets d'absorption, de diffusion et de réémission du rayonnement, qui diffèrent notablement selon que l'atmosphère est claire ou nuageuse (Rodgers et Walshaw, 1966 ; Katayama, 1974).

En raison de l'hypothèse hydrostatique, les équations primitives ne sont pas aptes à traiter de façon explicite les mouvements convectifs qui résultent de l'instabilité verticale locale de l'atmosphère. Aux méthodes dites d'« ajustement convectif » (Manabe et Strickler, 1965), qui avaient pour but de redresser les profils verticaux pouvant conduire à des solutions instables pour le modèle, ont succédé des méthodes plus élaborées permettant de rendre compte des effets de l'interaction entre les nuages convectifs et leur environnement (Kuo, 1965 et 1974 ; Arakawa et Shubert, 1974).

La prise en compte, relativement récente, de la dissipation d'énergie résultant du déferlement à haute altitude des ondes de relief a également permis d'améliorer notablement la prévision de l'intensité des courants-jets au-dessus des zones montagneuses (Palmer et al., 1986).

Le traitement détaillé de la partie physique a pris de plus en plus d'importance au travers des générations successives de modèles et son coût est désormais équivalent ou supérieur à celui de la partie dynamique traitant les équations d'évolution. Si, initialement, l'introduction des premières paramétrisations avait pour but de pallier les carences des modèles purement dynamiques, une prise en compte de plus en plus détaillée des processus physiques permet maintenant de reproduire de façon satisfaisante les cycles énergétique et hydrologique et de retrouver des valeurs correctes pour les flux qui y participent. Cependant, en raison de la complexité des interactions, tant entre les divers processus physiques qu'entre la dynamique et la physique, la mise au point des paramétrisations nécessite de nombreux réglages. En effet, dans les modèles utilisés pour la prévision à courte échéance, les paramétrisations physiques doivent fournir des prévisions correctes des variables de surface servant à la détermination du **temps sensible**. Parallèlement, dans les modèles de circulation générale **intégrés** sur de très longues durées, elles doivent également être aptes à reproduire les caractéristiques générales du climat.

## L'analyse objective et l'assimilation des données

Parallèlement aux améliorations qui ont été introduites dans les modèles de prévision, un travail très important a également été effectué, tant sur le plan théorique que sur le plan pratique, pour déterminer avec précision un état donné de l'atmosphère en tenant compte des diverses observations météorologiques disponibles (Daley, 1980). Cette opération prend le nom d'**analyse objective** lorsqu'elle est destinée à définir l'état de l'atmosphère à un instant donné et **assimilation de données** lorsqu'elle est répétée pour fournir des états successifs sur une période fixée.

L'analyse objective a tout d'abord été réalisée à l'aide de méthodes d'interpolation géométrique (Gilchrist et Cressmann, 1954), puis avec des méthodes de corrections successives d'une **ébauche** fournie par un modèle de prévision (Bergthorsson et Döös, 1955). La prise en compte des propriétés statistiques des champs de variables météorologiques, fondement des méthodes d'**interpolation optimale**, a été une étape importante permettant de tenir compte des caractéristiques propres des diverses observations disponibles et de tirer avantage des liens existant entre les champs à analyser (Gandin, 1963 ; Lorenc, 1981). Au milieu des années quatre-vingt, a été proposée une formulation **variationnelle** (recherche du minimum d'une fonctionnelle) très générale de ce problème, dont la solution peut être obtenue à l'aide des méthodes du **contrôle optimal** (Talagrand et Courtier, 1987). On parle alors d'**assimilation variationnelle** des données d'observation.

Cette approche permet de prendre en compte l'information fournie par une grande variété de systèmes d'observation, en particulier les données télédéteectées par les systèmes satellitaires, qui sont liées aux variables du modèle par des relations non linéaires. De plus, la minimisation peut facilement être étendue à des données réparties dans l'espace et le temps : on parle alors d'**assimilation variationnelle quadridimensionnelle**, en abrégé **4D-VAR** (Rabier et al., 2000). Dans



ce cas, la contrainte de cohérence interne des champs est assurée par le modèle lui-même et il n'est pas nécessaire de recourir à une procédure d'initialisation. Le développement de ces méthodes a conduit à se doter de nouveaux outils dérivés du modèle de prévision, comme le **modèle linéaire tangent** et le **modèle adjoint**. Dans le cas du 4D-VAR, leur mise en application pratique requiert cependant une puissance de calcul très importante ; en effet, la minimisation s'obtient par itérations successives, chacune comprenant une intégration du modèle sur la période d'assimilation suivie d'une intégration en arrière du modèle adjoint.

L'impact de la précision de l'état initial sur la qualité des prévisions réalisées avec les modèles et les investissements importants nécessaires pour mettre en œuvre les systèmes de télédétection justifient amplement les ressources qui doivent être consacrées à l'assimilation des données météorologiques. Si le temps passé pour déterminer l'état initial était auparavant relativement faible comparé au temps nécessaire pour intégrer le modèle, la situation a désormais plutôt tendance à s'inverser.

### Au-delà de la prévision déterministe

En dépit de l'amélioration constante des prévisions météorologiques réalisées avec les modèles numériques, il a fallu se rendre à l'évidence de l'impossibilité de fournir des prévisions précises au-delà d'une certaine limite. Cette limite de prévisibilité pratique tient à plusieurs raisons : la nature non linéaire des équations d'évolution (Lorenz, 1969), les imperfections des modèles numériques censés simuler l'atmosphère réelle, enfin les incertitudes inhérentes aux mesures effectuées pour déterminer l'état initial. Les modèles numériques simulant l'atmosphère présentent en effet une forte sensibilité aux conditions initiales, en ce sens que deux états initiaux voisins peuvent conduire à des solutions divergentes au-delà d'une certaine échéance. Cette limite de prévisibilité est, de façon générale, d'autant plus lointaine que l'échelle des phénomènes météorologiques étudiés est grande ; avec les modèles actuels, elle est de l'ordre de quatre à cinq jours pour l'**échelle synoptique**. Aussi l'approche scientifique consiste-t-elle, compte tenu de notre connaissance de l'état initial et de ses incertitudes, à prévoir pour une échéance donnée la distribution des diverses valeurs prévues et les probabilités qui leur sont associées ; c'est donc une fonction de probabilité qui doit être calculée en chacun des points et pour chacune des grandeurs atmosphériques. On parle alors de **prévision probabiliste**.

L'emploi d'un système d'équations décrivant l'évolution des valeurs moyennes et des moments statistiques d'ordre supérieur des paramètres météorologiques, dite encore « prévision dynamique-stochastique », a été proposée par Epstein (1969). Ce système comprend une hiérarchie d'équations analogues à celles qui sont utilisées pour la modélisation de la turbulence et nécessite une hypothèse de fermeture. Dans la pratique, le nombre de variables augmente considérablement et le coût en temps de calcul devient exorbitant dès que l'on cherche à atteindre une résolution spatiale proche de celle de la **prévision déterministe**.

Une alternative pour accéder à la même information est fournie par la méthode dite de Monte-Carlo, proposée par Leith (1974) et consistant à effectuer un certain nombre de prévisions équiprobables, puis à calculer les valeurs des moyennes et des moments statistiques d'ordre supérieur à partir de l'ensemble des prévisions. Cette idée a été appliquée en effectuant plusieurs intégrations d'un même modèle à partir d'états initiaux obtenus en superposant à l'état initial de référence des petites modifications réparties de façon aléatoire et compatibles avec les erreurs de l'analyse (Hollingsworth, 1980) ; cependant, même en veillant à n'introduire que des modifications respectant l'équilibre hydrostatique et géostrophique, cette méthode ne parvient pas à fournir une distribution suffisamment réaliste des états prévus. Une expérience originale de prévision de Monte-Carlo a été réalisée en prenant comme ensemble les résultats fournis par divers systèmes opérationnels de prévision numérique de performances comparables (Rousseau et Chapelet, 1985) : en combinant les résultats des modèles opérationnels de cinq grands centres météorologiques, la moyenne de ces prévisions fait apparaître un gain notable de prévisibilité par rapport aux prévisions individuelles.

Le problème fondamental de la **prévision d'ensemble** consiste à effectuer un choix judicieux des situations initiales, de façon à pouvoir obtenir un maximum de solutions relativement éloignées les unes des autres avec un minimum d'états



initiaux. L'emploi du modèle adjoint permet de calculer les modifications de l'état initial qui subissent le plus d'amplification sur une période donnée, au sens d'une norme convenablement choisie (Buizza et al., 1990). Cette technique est utilisée par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), situé à Reading (Royaume-Uni), pour effectuer une cinquantaine de prévisions conduisant à des classes de prévisions pour lesquelles il est possible de calculer la moyenne et la variance des diverses grandeurs météorologiques. Une technique un peu différente a été développée aux États-Unis par le *National Center for Environmental Prediction (NCEP)* : les modifications initiales sont obtenues de façon itérative à partir d'une modification arbitraire, en réinjectant dans le modèle les modifications qui ont le taux de croissance le plus élevé (méthode « d'élevage » des modifications, dite encore méthode de *breeding* ; Toth et Kalnay, 1993).

La possibilité de faire fonctionner les modèles numériques d'atmosphère sur de très longues périodes permet également d'envisager leur emploi pour réaliser des prévisions à des échéances allant du mois à la saison. Dans ce type de prévision, il ne s'agit pas de prévoir l'occurrence ou la position de tel ou tel phénomène météorologique, mais plutôt de prévoir des écarts par rapport à une moyenne climatologique. Pour réaliser des prévisions à de telles échéances, l'atmosphère ne peut pas être considérée de façon isolée et l'évolution des conditions aux limites à la surface de la mer prend la plus grande importance. Il devient nécessaire de prévoir l'évolution de la température de surface de la mer ; celle-ci peut être prévue, soit à l'aide de méthodes statistiques, soit grâce à un modèle simulant la circulation océanique et couplé au modèle atmosphérique.

Ainsi, à côté des efforts déployés pour déterminer de la façon la plus précise possible l'état initial compte tenu des systèmes d'observation disponibles, les méthodes de prévision d'ensemble, rendues possibles par la puissance croissante des ordinateurs, permettent d'aller au-delà de la prévision déterministe toujours imparfaite et d'apporter une information plus riche. De plus, le problème de la sensibilité aux conditions initiales étant très général et concernant toutes les échelles de mouvement, il est tout à fait probable que les méthodes de la prévision d'ensemble, utilisées actuellement pour la prévision à moyenne échéance (Atger, 2000), voient bientôt leur champ d'application inclure également la prévision à courte échéance.

## ÉVOLUTION GÉNÉRALE DES OUTILS DE CALCUL

### La nécessité d'un ordinateur rapide

On ne peut pas parler de prévision numérique du temps sans évoquer les outils de calcul qui ont été mis à la disposition des météorologistes. Le rêve de Richardson (figure 1) est devenu réalité grâce à l'électronique et il est tout à fait symbolique que von Neumann, considéré comme l'un des pères du calcul automatique, ait été associé à la première expérience de prévision numérique du temps.

Les grands services météorologiques ont toujours recherché les machines les plus performantes existant sur le marché, en raison de l'intérêt vital pour le météorologiste de disposer des résultats de la meilleure prévision le plus vite possible.

La figure 7 permet d'apprécier l'augmentation régulière de la qualité – c'est-à-dire la diminution de l'erreur – des prévisions météorologiques réalisées aux États-Unis au cours des quarante dernières années à l'aide des modèles

Figure 7 - Évolution de la qualité des prévisions météorologiques réalisées aux États-Unis. Le score de succès (erreur quadratique moyenne normalisée) est calculé sur le gradient de géopotential au niveau 500 hPa à 36 heures d'échéance sur l'Amérique du Nord. (Document obtenu grâce à l'amabilité de C. Vlcek, NCEP)

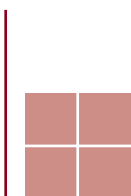
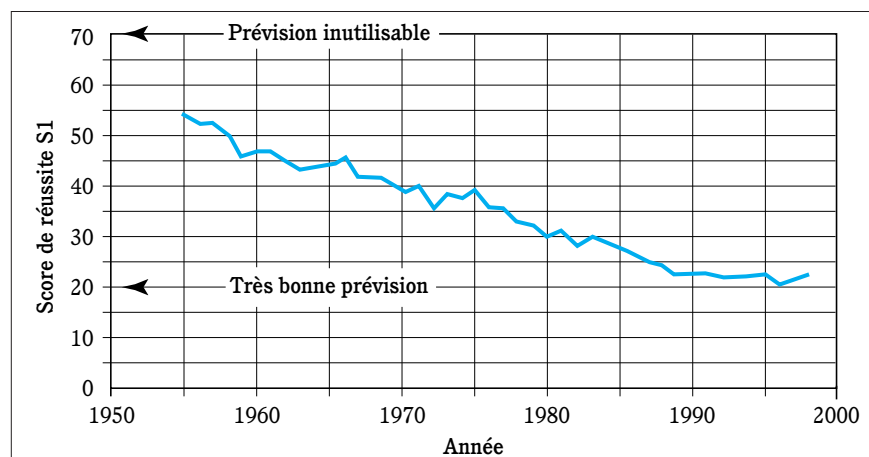
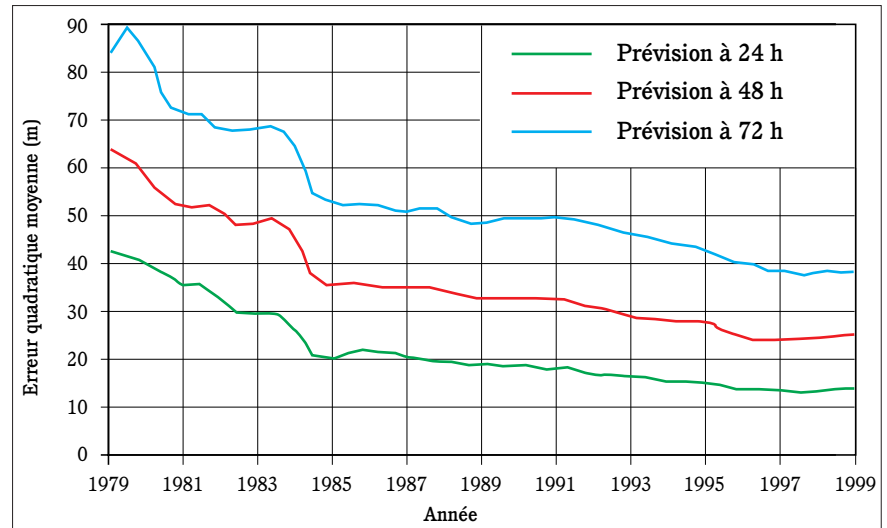


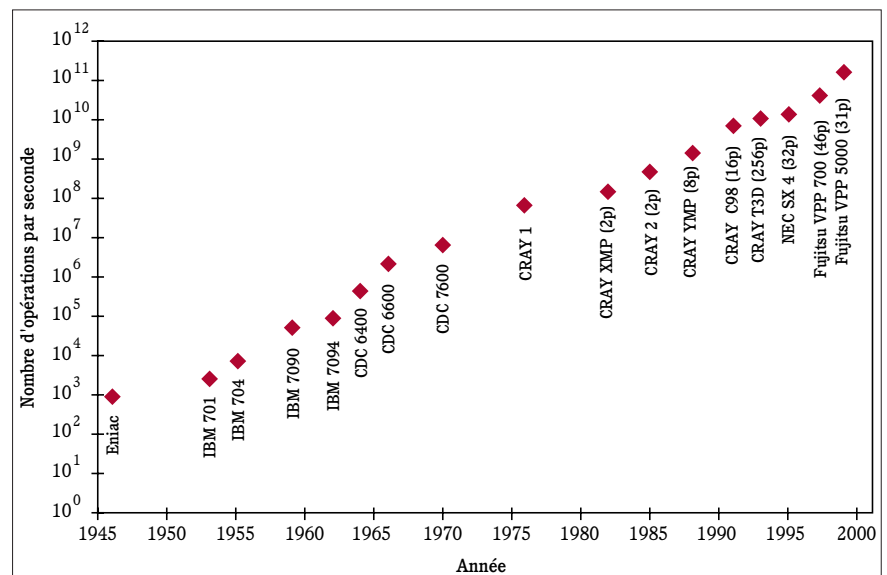
Figure 8 - Évolution de la qualité des prévisions météorologiques sur l'Europe et l'Atlantique nord fournies par les modèles opérationnels français. Les courbes représentent l'erreur quadratique moyenne (en moyenne glissante sur douze mois) de la prévision du géopotential au niveau 500 hPa.



numériques. Elle présente le **score** de succès proposé par Teweless et Wobus (1954), qui est une valeur normalisée de l'erreur quadratique moyenne obtenue sur le gradient de géopotential. Sur le plan pratique, la valeur 20 correspond à une très bonne prévision alors que la valeur 70 correspond à une prévision inutilisable. Cette amélioration générale de la qualité apparaît également sur les courbes d'évolution des erreurs de prévision des modèles numériques français au cours des vingt dernières années (figure 8). Celles-ci indiquent clairement que la qualité de la prévision à 72 heures d'échéance en 1999 est supérieure à celle que l'on obtenait à 24 heures d'échéance en 1980.

Cette diminution régulière de l'erreur est le résultat logique de l'augmentation de la résolution spatiale des modèles, de la prise en compte plus réaliste des processus physiques et de l'efficacité accrue des algorithmes de calcul. Cette tendance a été assez générale et se retrouve sur les courbes d'évolution de la qualité des prévisions opérationnelles en France (Pailleux et al., 2000). Bien entendu, ces améliorations se sont traduites par une augmentation considérable du nombre de calculs, dont la mise en œuvre n'aurait pas été possible sans la disponibilité d'ordinateurs toujours plus puissants (figure 9).

Figure 9 - Évolution de la puissance de calcul des grands ordinateurs scientifiques. Il s'agit d'une vitesse de calcul soutenue, évaluée en nombre d'opérations arithmétiques en virgule flottante par seconde (en abrégé flops). Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de processeurs lorsqu'il y en a plusieurs.



## De l'Eniac aux grands ordinateurs scientifiques

Très tôt, le service météorologique américain a mis à profit la puissance des premiers ordinateurs scientifiques commercialisés par la compagnie International Business Machines (IBM) : une machine IBM 701, capable d'effectuer  $3.10^3$  opérations par seconde, a été installée en 1955 au *Weather Bureau* pour les besoins de la prévision numérique. Aux machines IBM 701 et IBM 704 reposant sur une technologie à tubes électroniques, ont succédé vers 1960 les machines IBM 7090



et IBM 7094 utilisant la technologie des semi-conducteurs et les mémoires à tores de ferrite, ce qui leur permettait d'effectuer  $10^5$  opérations par seconde.

À partir du milieu des années soixante, ce sont les machines proposées par la compagnie Control Data Corporation (CDC) qui ont eu les faveurs des grands centres de calcul scientifique, en particulier ceux des services météorologiques. Sortie en 1966, la machine CDC 6600 conçue par Seymour Cray, l'un des fondateurs de Control Data Corporation, permettait d'atteindre  $2,5 \cdot 10^6$  opérations par seconde ; elle fut supplantée en 1970 par la machine CDC 7600 allant jusqu'à  $7 \cdot 10^6$  opérations par seconde.

### Les machines vectorielles



C'est en 1976 que Seymour Cray (décédé en 1996) présenta, après avoir quitté CDC pour fonder sa propre compagnie Cray Research Inc., le premier exemplaire du superordinateur Cray 1. Cette machine monoprocesseur, capable d'effectuer de façon soutenue  $7 \cdot 10^7$  opérations par seconde, utilisait une unité vectorielle de calcul lui permettant d'exécuter simultanément diverses phases d'un calcul arithmétique sur des suites d'opérandes – appelés vecteurs – pour fournir un résultat à chaque cycle de l'horloge interne. Ce type de machine s'est rapidement imposé comme un standard pour le calcul scientifique en raison de son efficacité et de sa facilité de programmation. La compagnie Cray Research Inc. a ensuite proposé des machines pourvues d'une grande mémoire centrale partagée par un petit nombre de processeurs vectoriels travaillant en parallèle pour contribuer au même processus de calcul. Ainsi, on a vu se succéder dans les grands services météorologiques au cours des années quatre-vingt des machines multiprocesseurs de type Cray XMP, Cray 2 et Cray YMP, pour aboutir en 1991 à la machine Cray C98 capable d'effectuer  $7 \cdot 10^9$  opérations par seconde.

Seymour Cray (1925-1996). (© Gordon Bell)

La salle de calcul de Météo-France,  
à Toulouse, en 1993.  
Au premier plan, l'ordinateur Cray 2.  
Au second plan, l'ordinateur Cray C98.  
(Photo Météo-France, Jean-Marc Destruel)



## Les ordinateurs massivement parallèles

Les années quatre-vingt-dix ont également vu l'émergence des machines massivement parallèles. Ce type d'organisation s'est imposé en raison de l'impossibilité de diminuer au-delà d'un certain seuil les temps de commutation des circuits électroniques, mais aussi de la baisse des coûts de fabrication des processeurs performants. Le principe est de faire travailler en parallèle de nombreux processeurs pour réaliser une même tâche segmentée au préalable. Cependant, au contraire des machines de la génération précédente, dont la mémoire était partagée par les processeurs, cette architecture utilise une mémoire distribuée, chaque processeur possédant sa mémoire propre ; le transfert des données entre les divers processeurs est alors assuré par un autocommutateur extrêmement rapide. Dans la gamme des systèmes massivement parallèles pouvant dépasser les  $10^{10}$  opérations par seconde, les machines T3D puis T3E fabriquées par Cray Research Inc., avant qu'elle ne soit rachetée par la compagnie américaine Silicon Graphics Inc., se sont vues sérieusement concurrencées par les machines japonaises telles que le SX 4 de la compagnie NEC ou encore le VPP 5000 de la compagnie Fujitsu, installé fin 1999 à Météo-France.

## Les évolutions du logiciel



L'évolution constante des matériels a obligé les modélisateurs chargés de la conception et de l'écriture des programmes de prévision numérique à s'adapter aux caractéristiques techniques des machines disponibles. Avec les premiers ordinateurs scientifiques, le problème principal venait de l'impossibilité de faire résider toutes les données dans la mémoire centrale ; le programme devait donc être structuré pour effectuer les calculs sur des tranches d'atmosphère et sauvegarder les données intermédiaires sur tambour ou sur disque magnétique à chaque pas de temps. L'arrivée des ordinateurs vectoriels a obligé les programmeurs à privilégier les procédures, dites vectorisables, effectuant des calculs en boucle sur des suites d'opérandes en évitant les ruptures de séquence. Avec les machines multiprocesseurs, il a fallu restructurer les programmes et les découper en tâches indépendantes pouvant être exécutées en parallèle de façon synchronisée sur les processeurs disponibles. Le Cray 2 a apporté une certaine révolution dans la façon de programmer, puisque la grande taille de sa mémoire (2 gigaoctets contre 64 mégaoctets sur les machines précédentes) rendait superflu le stockage des données intermédiaires. Cependant, l'arrivée des machines à parallélisme massif et leur mémoire distribuée ont de nouveau compliqué le travail des programmeurs : les calculs doivent être partagés en modules indépendants fonctionnant sur divers processeurs, la synchronisation entre processeurs étant effectuée au travers d'un système d'échange de messages.

L'ordinateur actuel de Météo-France, le Fujitsu VPP 5000, fournit une puissance de calcul de quelque  $10^{11}$  opérations par seconde. (Photo Météo-France, Jean-Marc Destruel)

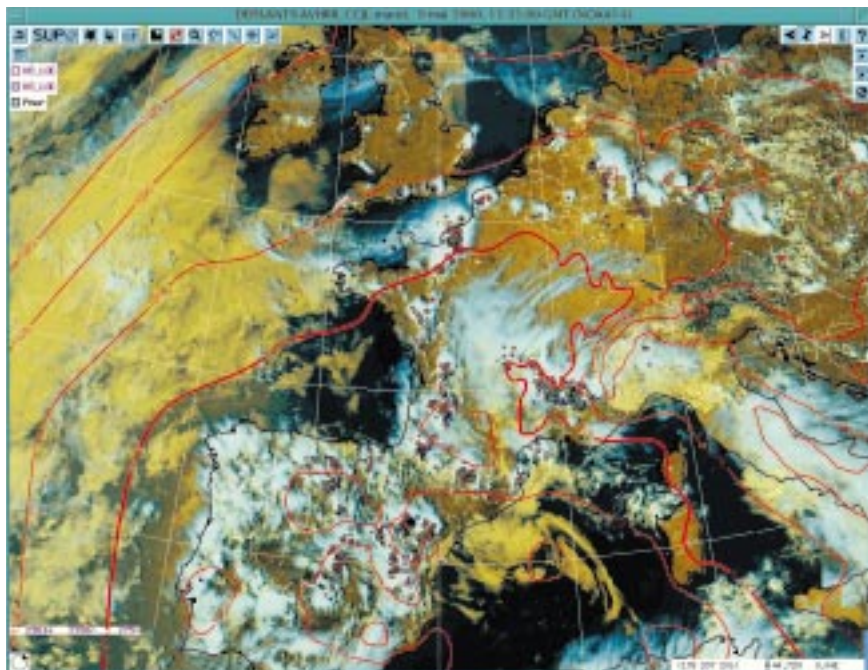


Deux prévisionnistes de Météo-France devant leur station de travail Synergie. (Photo Météo-France, Jean-Marc Destruel)

## De nouveaux outils pour exploiter la prévision numérique

Parallèlement au développement des superordinateurs, il est important d'insister sur la multiplication récente des petites machines, dites encore stations de travail, dotées d'un processeur rapide, d'une mémoire de taille notable et d'un écran de visualisation en couleurs. Elles permettent d'avoir sur son bureau et pour un coût réduit une puissance tout à fait comparable à celle du superordinateur de référence il y a une vingtaine d'années, le Cray 1.

Ces stations de travail ont une puissance suffisante pour faire fonctionner des modèles de prévision numérique relativement sophistiqués pour les besoins de la recherche et pour ceux de la prévision opérationnelle à courte échéance sur un



Exemple de situation météorologique apparaissant sur l'écran de la station de travail Synergie. Situation orageuse du 9 mai 2000 à 15 h 35 UTC sur l'Europe de l'Ouest. En superposition :  
 - les isobares en surface prévues par le modèle Arpège et tracées de 2,5 en 2,5 hPa (traits rouges) ;  
 - une composition colorée obtenue à partir des canaux visible et infrarouge du satellite défilant NOAA (nuages bas en jaune, nuages épais en blanc, cirrus en bleu) ;  
 - les impacts de foudre enregistrés par le réseau Météorage pendant l'heure qui a précédé (carrés de couleur).



domaine restreint, dans la mesure où les conditions aux limites peuvent être obtenues à partir des résultats d'un autre modèle fonctionnant sur un ordinateur plus puissant.

Les stations de travail ont également profondément modifié la façon pratique de se servir des résultats de la prévision numérique. Comme elles permettent de stocker pratiquement l'intégralité des sorties des modèles de prévision, elles offrent aux prévisionnistes les moyens (coupes horizontales et verticales) d'examiner en détail la structure tridimensionnelle de l'atmosphère ; de plus, l'animation des champs prévus pour des échéances successives permet d'appréhender concrètement la dynamique de l'atmosphère ; enfin, les possibilités de superposition facilitent les comparaisons entre l'évolution de l'atmosphère simulée par les modèles et son évolution réelle, telle qu'elle se manifeste au travers du réseau d'observations ou sur les images satellitales.

## L'INDISPENSABLE COOPÉRATION SCIENTIFIQUE

La complexité croissante des modèles de prévision numérique et les difficultés rencontrées pour mettre au point des programmes vraiment efficaces sur les superordinateurs scientifiques ont fortement contribué à passer du stade du travail artisanal individuel à celui de grand projet scientifique impliquant des équipes spécialisées. En effet, si les premiers modèles de prévision numérique ont pu être conçus, développés et testés par une seule personne, qui y attachait en général son nom, la mise au point des modèles actuels implique une coopération de nombreuses équipes dépassant les disponibilités des seuls services nationaux. C'est ainsi que l'on a assisté, principalement en Europe, à la réalisation de « modèles unifiés » ou de « modèles communautaires » destinés à plusieurs catégories d'utilisateurs dans divers services météorologiques ; cette voie a été adoptée dans les années quatre-vingt-dix en Allemagne, au Canada, en France, au Royaume-Uni et dans les pays scandinaves. Cette nouvelle forme d'organisation a également nécessité de développer une véritable ingénierie des modèles imposant le respect de normes dans l'écriture des logiciels et une discipline très stricte pour leur mise à jour.

Cette indispensable coopération va du simple échange d'idées et de méthodes à la réalisation de modèles communs, déclinés sous diverses formes dans chacun des services nationaux participant au projet, ou même jusqu'à l'installation de centres communs de production de prévisions météorologiques.

Parmi les réalisations de modèles communs à divers services météorologiques, on peut citer en particulier (Pailleux et al., 2000) :

- le modèle Hirlam (*High Resolution Limited Area Model*), résultat du travail commun engagé depuis 1985 par les pays scandinaves, l'Irlande, les Pays-Bas et l'Espagne ;
- le modèle Arpège-IFS (*Integrated Forecast System*) développé par Météo-France et le CEPMMT depuis 1987 ;
- le modèle Aladin développé par Météo-France en collaboration avec des chercheurs d'Europe orientale à partir de 1992 et exploité depuis par certains pays d'Europe de l'Est, la France, le Maroc et la Belgique.

Deux centres météorologiques sont exploités en commun en Europe :

- Le CEPMMT, regroupant dix-huit pays d'Europe occidentale, a été créé en 1974 et est situé à Reading (Royaume-Uni) ; il fournit quotidiennement des prévisions à moyenne échéance (jusqu'à dix jours).
- Le centre RC LACE (*Regional Center for Limited Area Modelling in Central Europe*), regroupant six pays d'Europe centrale et orientale (Autriche, Croatie, Hongrie, République tchèque, Slovaquie, Slovénie), a été créé en 1994 ; il fait fonctionner deux fois par jour, sur un ordinateur installé à Prague, un modèle à domaine limité fournissant des prévisions à échelle fine jusqu'à deux jours d'échéance.

Il ne fait aucun doute que cette évolution ne doive se poursuivre dans les années à venir, en raison de la complexité croissante des outils nécessaires pour simuler l'évolution de notre environnement planétaire. Les prévisions à l'échéance du mois ou de la saison ne pourront être réalisées qu'en prenant en compte l'évolution de l'océan et son couplage avec l'atmosphère. La



détermination de l'état initial de tels modèles fera de plus en plus appel aux systèmes de télédétection qui fournissent les données de façon indirecte et nécessitent le recours aux outils de l'assimilation variationnelle. Enfin, il est probable que le principe de la prévision d'ensemble, utilisé avec quelque succès pour la moyenne échéance, doit être étendu à tous les systèmes de prévision pour fournir des prévisions probabilistes, permettant ainsi de quantifier l'incertitude des prévisions météorologiques.

## BIBLIOGRAPHIE

Arakawa A. et W. H. Shubert, 1974 : Interaction of cumulus cloud ensemble with the large scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, 31, 674-701.

Ashford O. M., 1985 : *Prophet or Professor? The life and work of Lewis Fry Richardson*. Adam Hilger Ltd., Bristol et Boston, 303 p.

Atger F., 2000 : La prévision du temps à moyenne échéance en France. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, 30, 61-86.

Baer F. et J. Tribbia, 1977 : On complete filtering of gravity modes through non-linear initialization. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 272-296.

Bergthorsson P. et B. Döös, 1955 : Numerical weather map analysis. *Tellus*, 7, 329-340.

Bjerknes V., 1904 : Das problem von der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik. *Meteor. Zeitschrift*, 21, 1-7. Le problème de la prévision du temps du point de vue de la mécanique et de la physique. Traduction en français par D. Gondouin, 1995, *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, 9, 55-62.

Bourke W., 1972 : An efficient one-level primitive-equation spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, 100, 687-701.

Brière S., 1982 : Nonlinear normal mode initialization of a limited area model. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 1166-1188.

Bubnova R., G. Hello, P. Bénard et J.-F. Geleyn, 1995 : Integration of the fully elastic equations cast in the hydrostatic pressure terrain-following coordinate in the framework of the Arpège/Aladin NWP System. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 515-535.

Buizza R., J. Tribbia, F. Molteni et T. N. Palmer, 1993 : Computation of optimal unstable structures for a numerical weather prediction model. *Tellus*, 45A, 388-407.

Bushby F. H., 1987 : A history of numerical weather prediction. Short- and medium-range numerical weather prediction. Collection of papers presented at the WMO/IUGG symposium, Tokyo, 4-6 August 1986. *Special volume of the Journal of the Met. Soc. of Japan*, 1-10.

Businger J. A., J. C. Wyngard, Y. Izumi et E. F. Bradley, 1971 : Flux profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, 28, 181-189.

Charney J. G., 1948 : On the scale of atmospheric motions. *Geofys. Publ.*, vol. 17, 2, Norske Videnskap-Akad., Oslo, 17 p.

Charney J. G., R. Fjørtoft et J. von Neumann, 1950 : Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2, 237-254.

Charney J. G., 1954 : Numerical prediction of cyclogenesis. *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S.*, 40, 99-110.

Cooley J. W. et J. W. Tuckey, 1965 : An algorithm for the machine computation of complex Fourier series. *Math. Comp.*, 19, 297-301.

Côté J., M. Roch, A. Staniforth et L. Fillon, 1993 : A variable resolution semi-Lagrangian finite-element global model of the shallow water equations. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 231-243.

Courant R., K. O. Friedrichs et H. Lewy, 1928 : Über die partiellen Differenzen-gleichungen der mathematischen Physik. *Math. Annalen*, 100, 32-74.

Courtier P. et J.-F. Geleyn, 1988 : A global numerical weather prediction model with variable resolution: Application to the shallow water equations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114, 1321-1346.

Cressman G. P., 1963 : A three-level model suitable for daily numerical forecasting. *NMC Tech. Memo.*, 22, Weather Bureau, ESSA, US Department of Commerce, 22 p.

Cressman G. P., 1996 : The origin and rise of numerical weather prediction. *Historical Essays on Meteorology 1910-1995*. American Meteorological Society, Boston, 21-39.

Daley R., 1980 : On the optimal specification of the initial state for deterministic forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1719-1735.



- Davies H. C., 1976 : A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 405-418.
- Deardorff J. W., 1972 : Parameterization of the planetary boundary layer for use in general circulation models. *Mon. Wea. Rev.*, 100, 93-106.
- Deardorff J. W., 1978 : Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation. *J. Geophys. Res.*, 83, 1889-1903.
- Eliassen A., 1956 : A procedure for numerical integration of the primitive equations of the two-parameter model of the atmosphere. Scientific Report n° 4, Department of Meteorology, UCLA, 53 p.
- Eliassen E., B. Machenhauer et E. Rasmussen, 1970 : On a numerical method for integration of the hydrodynamical equations with a spectral representation of the horizontal fields. Report n° 2, Institut für Teoretisk Meteorologi, Kobenhavns Universitet, Danemark, 35 p.
- Epstein E. S., 1969 : Stochastic dynamic predictions. *Tellus*, 21, 739-759.
- Fjörtoft R., 1952 : On a numerical method of integrating the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 4, 179-194.
- Gandin L. S., 1963 : *Objective analysis of meteorological fields*. Gidromet, Leningrad, Russie. Traduction anglaise, Jérusalem : Israel program for scientific translation, 1965, 242 p.
- Gilchrist B. et G. Cressman, 1954 : An experiment in objective analysis. *Tellus*, 8, 61-75.
- Hinkelmann K., 1951 : Der Mechanismus der meteorologischen Lärm. *Tellus*, 3, 285-296. The mechanism of meteorological noise, traduction en anglais par P. Rash, J. Kiehl et W. J. Wyman, 1983, NCAR Technical note n° 203, 27 p.
- Hinkelmann K., 1959 : Ein numerisches Experiment mit den primitiven Gleichungen. Dans *The Atmosphere and Sea in motion*, Rossby Memorial Volume, Rockefeller Institute Press, États-Unis, 486-500.
- Hollingsworth A., 1980 : An experiment in Monte-Carlo forecasting procedure. ECMWF workshop on stochastic dynamic forecasting, ECMWF, Grande-Bretagne, 65-97.
- Juvanon du Vachat R., 1986 : A general formulation of normal modes for limited-area models: Applications to initialization. *Mon. Wea. Rev.*, 114, 2478-2487.
- Juvanon du Vachat R., 1994 : Panorama de la prévision numérique à échelle fine ou à domaine limité. *La Météorologie 8<sup>e</sup> série*, 6, 31-47.
- Katayama A., 1974 : A simple scheme for computing radiative transfer in the troposphere. Tech. Rep. n° 6. Dept. Met., UCLA, États-Unis, 77 p.
- Krishnamurti T. N., 1962 : Numerical integration of primitive equations by a quasi-Lagrangian advective scheme. *J. Appl. Meteor.*, 1, 508-521.
- Kuo H. L., 1965 : A theory of parameterization of cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, 22, 40-43.
- Kuo H. L., 1974 : Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flows. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1232-1240.
- Laprise R., 1992 : The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as independent variable. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 197-207.
- Leith C. E., 1974 : Theoretical skill of Monte-Carlo forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 102, 409-418.
- Lepas J., 1963 : Prévision barotrope globale au niveau de pression 500 mb. *Journal de mécanique et de physique de l'atmosphère II*, 19, 97-104.
- Lorenç A., 1981 : A global three-dimensional multivariate statistical interpolation scheme. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 701-721.
- Lorenz E. N., 1969 : The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, 21, 289-307.
- Louis J. F., 1979 : A parametric model of vertical eddy fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 17, 187-202.
- Lynch P. et X. Y. Huang, 1992 : Initialization of the Hirlam model using a digital filter. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1019-1034.
- Lynch P., 1994 : The Richardson's marvelous forecast. *The life cycle of extratropical cyclones* Vol. I. Proceedings of an international symposium, Geophysical Institute, University of Bergen, 27 June - 1 July 1994, 38-48.



- Machenhauer B. et J. E. Haugen, 1987 : Test of a spectral limited area shallow water model with time dependent lateral boundary conditions and combined normal mode semi-Lagrangian time integration schemes. *Workshop Proceedings on techniques for horizontal discretization in numerical prediction models*. ECMWF, Reading, Royaume-Uni, 361-377.
- Machenhauer B., 1977 : On the dynamics of gravity oscillations in a shallow water model with applications to normal mode initialization. *Contrib. Atmos. Physics.*, 50, 253-271.
- Manabe S. et R. F. Strickler, 1965 : On the thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment. *J. Atmos. Sci.*, 21, 361-385.
- Orlanski I., 1975 : A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56, 527-530.
- Orszag S. A., 1970 : Transform method for the calculation of vector-coupled sums: Application to the spectral form of the vorticity equation. *J. Atmos. Sci.*, 27, 890-895.
- 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<sup>e</sup> série*, 30, 32-60.
- Palmer T. N., G. J. Shutts et R. Swinbank, 1986 : Alleviation of systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 2056-2066.
- Platzmann G., 1979 : The Eniac computation of 1950; Gateway to numerical weather prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 60, 302-312.
- Pône R., 1993 : Les débuts de l'informatique à la division « Prévision » de la Météorologie nationale. *La Météorologie 8<sup>e</sup> série*, 3, 36-43.
- Rabier F., J.-F. Mahfouf et E. Klinker, 2000 : Une nouvelle technique d'assimilation des données d'observation au CEPMMT : l'assimilation variationnelle quadridimensionnelle. *La Météorologie 8<sup>e</sup> série*, 30, 87-101.
- Richardson L. F., 1922 : *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge University Press, reprinted Dover, 1965, 236 p.
- Robert A. J., 1969 : The integration of a spectral model of the atmosphere by the implicit method. Proceedings WMO/IUGG Symposium on Numerical Weather Prediction. Meteorol. Soc. of Japan, Tokyo, VII.19-VII.24.
- Robert A. J., 1981 : A stable numerical integration scheme for the primitive meteorological equations. *Atmos. Ocean*, 19, 35-46.
- Rodgers C. D. et C. D. Walshaw, 1966 : The computation of infrared cooling rate in planetary atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 92, 67-92.
- Rossby C. G. et al., 1939 : Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J. Mar. Res.*, Sears Foundation, 38-55.
- Rousseau D. et P. Chapelet, 1985 : A test of the Monte-Carlo method using the WMO/CAS intercomparison Project Data. Report of the second session of the CAS working group on short-and-medium-range weather prediction research, Belgrade, 26-30 August 1985. PSMP Report Series n° 18, WMO/TD n° 91, 53-58.
- Sawyer J. S., 1963 : A semi-Lagrangian method of solving the vorticity equation. *Tellus*, 15, 336-342.
- Shuman F. G. et J. B. Hovermale, 1968 : An operational six-layer primitive equation model. *J. Appl. Meteor.*, 7, 525-547.
- Shuman F. G., 1989 : History of numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Mon. Wea. Rev.*, 4, 286-296.
- Smagorinsky J., 1962 : A primitive equation model including condensation processes. Proceedings of the International Symposium on Numerical Weather Prediction. *Special volume of the Journal of the Met. Soc. of Japan*, Tokyo.
- Talagrand O. et P. Courtier, 1987 : Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. I - Theory. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 113, 1311-1328.
- Tangay M., A. J. Robert et R. Laprise, 1990 : A semi-implicit fully compressible regional forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1970-1980.
- Teweless S. et H. Wobus, 1954 : Verification of prognostic charts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 35, 286-296.
- Toth Z. et E. Kalnay, 1993 : Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74, 2317-2230.

