

# L'avenir de la prévision d'ensemble

**T. N. Palmer, J. Barkmeijer, R. Buizza, E. Klinker et D. Richardson**

Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT)

Shinfield Park, Reading

Berkshire, RG2 9AX

ROYAUME-UNI

Courrier électronique : nez@ecmwf.int

Ndlr : Cet article est paru initialement en anglais dans le bulletin *ECMWF Newsletter*, n° 88, Summer-Autumn 2000, p. 2-8. Nous remercions le CEPMMT de nous avoir autorisés à le publier en français. Les encadrés ont été ajoutés par la rédaction de *La Météorologie*.

## Résumé

Dans cet article, on montre que la prévision d'ensemble est plus apte à prévoir les phénomènes météorologiques dangereux que la prévision déterministe classique. De plus, la possibilité de formuler les prévisions du temps de façon probabiliste fait de la prévision d'ensemble un outil d'aide à la décision bien adapté aux activités économiques ou sociales sensibles aux conditions météorologiques. Bien que gourmande en calcul, cette technique de prévision du temps pourrait donc devenir un excellent outil de gestion du risque météorologique.

## Abstract

### The future of ensemble prediction

In this paper, ensemble prediction is shown to be more suitable for predicting severe weather events than standard deterministic forecasting. Moreover, as ensemble prediction leads to a probabilistic formulation of weather forecasts, it is a valuable decision-making tool for weather-sensitive economic or social activities. Although computationally demanding, this weather forecasting technique could therefore become a useful quantitative tool for meteorological risk management.



La prévision d'ensemble est une technique de prévision météorologique dans laquelle on fait tourner un modèle numérique de prévision plusieurs fois, pour une même situation à prévoir, à partir de conditions initiales différant entre elles par de petites quantités (appelées ici **perturbations initiales**) compatibles avec les incertitudes existant sur la connaissance de l'état initial de l'atmosphère.

Depuis ses débuts en 1992 (Palmer et al., 1993), le système de prévision d'ensemble du CEPMMT est devenu partie intégrante du dispositif de prévision opérationnelle du Centre. À l'origine de son développement, figure l'idée que faire une prévision déterministe unique n'est pas conforme à la « méthode scientifique », dans le sens où les résultats de toute prévision scientifique sont incomplets sans une estimation de l'erreur dont ils sont entachés suite aux incertitudes affectant certains éléments du processus de prévision (Tennekes, 1991). Il pourrait sembler facile d'estimer l'erreur associée à une prévision numérique du temps en utilisant une erreur moyenne déduite du

traitement d'un grand nombre de cas du passé ; cependant, l'atmosphère est chaotique, ce qui implique, non seulement que la précision de la prévision peut être sensible à de petites incertitudes dans les conditions initiales, mais aussi que l'amplification de l'erreur initiale dépend elle-même de l'état initial de l'atmosphère (Palmer, 2000).

Après une brève description de la configuration actuelle<sup>(1)</sup> du système de prévision d'ensemble du CEPMMT, on montrera à l'aide d'exemples l'aptitude de ce système à quantifier le risque de phénomènes météorologiques dangereux à moyenne échéance, dans des circonstances où échouent les prévisions déterministes ; cette aptitude implique que la valeur économique potentielle de la prévision d'ensemble est très supérieure à celle de la prévision déterministe.

Le système de prévision d'ensemble du CEPMMT est maintenant entré dans une phase de maturité et il existe désormais un objectif pratique important pour guider son développement : la gestion quantitative du risque dans les activités sociales ou économiques sensibles aux conditions météorologiques. Cette maturité est aussi l'occasion de considérer des liens plus directs entre le système de prévision d'ensemble et les modèles d'application d'utilisateurs spécifiques, ce qui facilitera à l'avenir l'évaluation quantitative des développements envisagés.

## Brève description de la prévision d'ensemble au CEPMMT

Au milieu de l'année 2000, le système de prévision d'ensemble du CEPMMT est constitué de 50+1 intégrations du modèle opérationnel du Centre à la résolution T159L40, soit une maille équivalente de 120 km (Buizza et al., 1998). Les perturbations initiales proviennent d'une technique dite « des vecteurs singuliers dominants du propagateur tangent en avant entre les jours 0 et 2 » (Buizza et Palmer, 1995). Les vecteurs singuliers sont combinés linéairement en prenant en compte l'amplitude attendue de l'erreur d'analyse (Molteni et al., 1996). Cette utilisation des vecteurs singuliers vise surtout à contourner deux problèmes. En premier lieu, il y a beaucoup d'hypothèses non quantifiées dans l'assimilation de données et la véritable fonction de densité de probabilité de l'erreur d'analyse n'est en pratique pas bien connue ; cela signifie qu'un véritable échantillonnage aléatoire construit selon la fonction de densité de probabilité initiale est impossible. En second lieu, le nombre possible d'échantillons est très inférieur au nombre de choix possibles pour les perturbations initiales ; or un échantillonnage inapproprié conduira en général à une estimation trop optimiste de la fiabilité de la prévision.

### Troncature et résolution horizontale

Dans un **modèle numérique spectral** de prévision du temps, une partie des calculs s'effectue en décomposant les champs météorologiques sous forme d'une combinaison linéaire de fonctions connues. Les coefficients de cette décomposition, appelés **coefficients spectraux**, jouent alors le même rôle que les valeurs en points de grille pour représenter les champs météorologiques.

En pratique, on n'utilise qu'un nombre fini de fonctions pour représenter les champs météorologiques ; ce nombre fini correspond à la **troncature**. En d'autres termes, la troncature est le nombre d'onde de la plus petite longueur d'onde traitée par le modèle spectral. Plus la troncature est élevée, plus le modèle est capable de décrire des phénomènes de petite échelle.

Il existe un lien entre la troncature et la **résolution horizontale** du modèle. Soit  $T$  la troncature du modèle, la plus petite longueur d'onde traitée  $\lambda_{\min}$  s'obtient en divisant la longueur de la circonférence terrestre par  $T$  :

$$\lambda_{\min} \text{ (km)} = 40\,000 / T$$

Ainsi, pour un modèle de troncature T159, on obtient  $\lambda_{\min} \approx 250$  km. Dans cet article, la résolution horizontale (**maille équivalente**)  $R$  est obtenue en considérant qu'un modèle spectral de troncature  $T$  est capable de distinguer deux points distants de  $\lambda_{\min}/2$  :

$$R \text{ (km)} = 20\,000 / T$$

Ainsi, pour un modèle de troncature T159, on obtient une maille équivalente  $R \approx 120$  km.

Il faut encore signaler que l'on ne perturbe pas seulement l'état initial de la prévision d'ensemble, mais aussi les équations du modèle pour tenir compte de l'incertitude sur la représentation des phénomènes physiques réels par ces équations : dans le schéma physique stochastique adopté à cette fin (Buizza et al., 1999), les tendances physiques – c'est-à-dire la contribution des phénomènes physiques à l'évolution des paramètres météorologiques calculés par le modèle – sont perturbées à chaque pas de temps et en chaque point de grille.

Enfin, compte tenu de l'augmentation programmée pour la fin de l'année 2000 de la résolution horizontale du système opérationnel de prévision d'ensemble à T255, soit une maille équivalente de 80 km, certains des résultats présentés ci-dessous sont relatifs à cette résolution plus haute.

(1) Cet article a été rédigé au milieu de l'année 2000. Depuis, la configuration du système de prévision d'ensemble du CEPMMT a été modifiée : le 21 novembre 2000, le modèle numérique utilisé pour la prévision d'ensemble est passé à la résolution T255, soit une maille équivalente de 80 km (Buizza et al., 2001), sans changement du nombre de niveaux verticaux. (Ndlr)

## La prévision d'ensemble des phénomènes météorologiques dangereux

Nul doute que les Services météorologiques nationaux sont principalement jugés par le public sur leur capacité à signaler en temps voulu le risque de phénomènes météorologiques dangereux. Par leur nature, de tels phénomènes sont souvent associés à des développements atmosphériques intenses à assez petite échelle. De tels développements se produisent en général dans des conditions de forte instabilité de l'écoulement, ce qui suggère que leur prévision, plus que d'autres, sera sensible aux petites incertitudes affectant la connaissance de l'état initial.

Dans de telles situations, s'appuyer sur une unique prévision déterministe risque de ne pas être fiable, ce que manifeste souvent l'incohérence d'un jour à l'autre de telles prévisions (Atger, 2000). Dans cette section, on présente trois cas d'études démontrant la valeur de l'estimation du risque reposant sur la prévision d'ensemble.

La figure 1 montre les prévisions individuelles d'une prévision d'ensemble à échéance 42 heures, effectuée à l'aide du modèle T255, pour la tempête du 26 décembre 1999 sur la France. Aussi bien la prévision opérationnelle T319 que la prévision de contrôle T159 ont échoué à prévoir la tempête à cette échéance (les prévisions déterministes furent toutefois plus réussies à plus courte et à plus longue échéance), illustrant bien le manque de fiabilité des prévisions déterministes uniques dans le cas de phénomènes extrêmes. En revanche, on peut voir que beaucoup de prévisions de l'ensemble ont bien simulé la tempête ; de la sorte, le risque d'une telle tempête était ainsi prévu avec une probabilité dépassant largement sa probabilité climatologique.

Comme exemple de produit possible de cette prévision, la figure 2 présente la probabilité<sup>(1)</sup> de rafales dépassant 40 m/s (144 km/h), obtenue à partir d'une représentation simple des rafales (le mélange de l'air provenant de l'altitude 850 hPa, communication personnelle d'Ernst Klinker, 2000). Cette paramétrisation,

(1) Pour une discussion plus approfondie de la notion de prévision probabiliste du temps et de la liaison entre prévision d'ensemble et probabilités prévues, le lecteur pourra se reporter aux explications fournies par Atger (2000). (Ndlr)

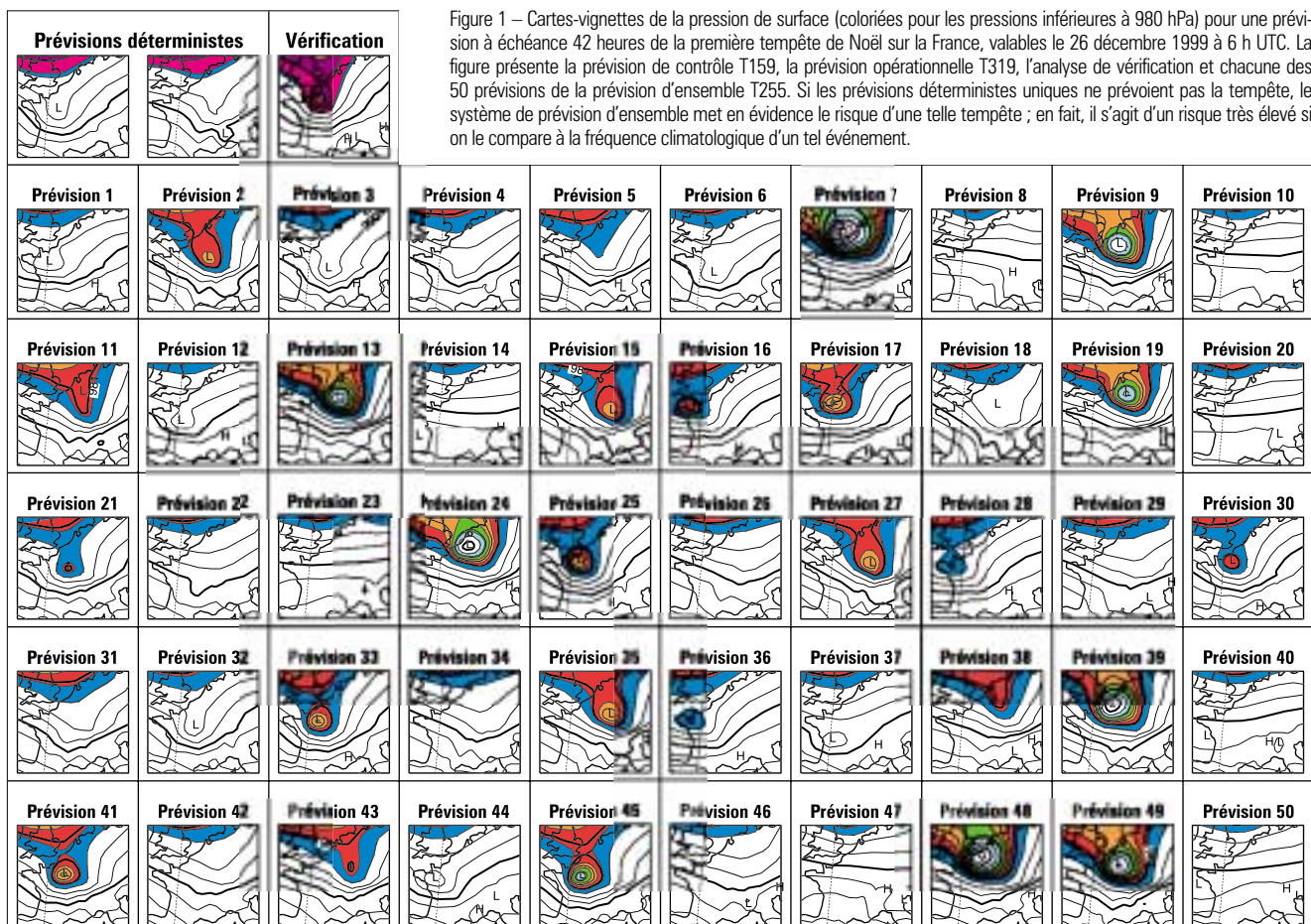
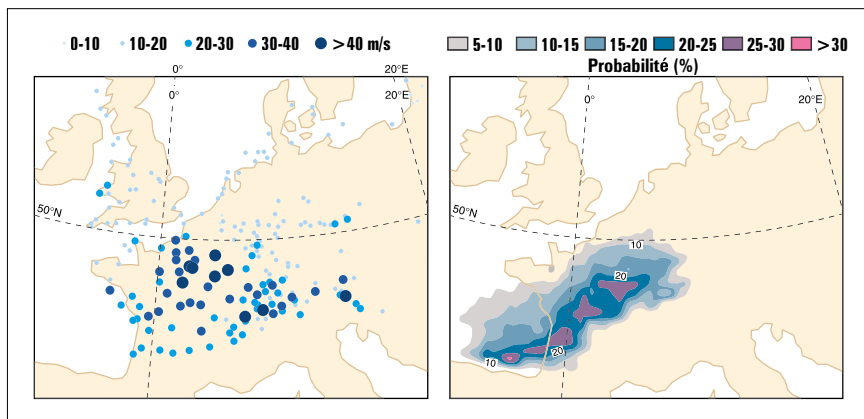


Figure 1 – Cartes-vignettes de la pression de surface (coloriées pour les pressions inférieures à 980 hPa) pour une prévision à échéance 42 heures de la première tempête de Noël sur la France, valables le 26 décembre 1999 à 6 h UTC. La figure présente la prévision de contrôle T159, la prévision opérationnelle T319, l'analyse de vérification et chacune des 50 prévisions de la prévision d'ensemble T255. Si les prévisions déterministes uniques ne prévoient pas la tempête, le système de prévision d'ensemble met en évidence le risque d'une telle tempête ; en fait, il s'agit d'un risque très élevé si on le compare à la fréquence climatologique d'un tel événement.

Figure 2 - Rafales observées (à gauche) et prévision d'ensemble T255 à échéance 42 heures de la probabilité de rafales dépassant 40 m/s (à droite), calculée à partir du vent à 850 hPa.



## Prévision opérationnelle, prévision de contrôle, analyse de vérification

Dans cet article, la **prévision opérationnelle** désigne la prévision déterministe unique à moyenne échéance élaborée en permanence par le CEPMMT et fournie aux prévisionnistes des États membres. Sa résolution horizontale est très bonne : au milieu de l'année 2000 (date de la rédaction de l'article), cette prévision était obtenue avec un modèle spectral de troncature T319, soit une maille équivalente d'environ 60 km. Depuis le 21 novembre 2000, le modèle spectral utilisé a une troncature de T511, soit une maille équivalente d'environ 40 km. Cette prévision opérationnelle est obtenue à partir d'un état initial résultant de l'assimilation des observations disponibles dans le modèle spectral T511. Cet état initial est encore appelé **analyse initiale**.

La prévision d'ensemble fait appel à un modèle spectral de moins bonne résolution (pour économiser du temps de calcul) : T159 (120 km) au milieu de l'année 2000, T255 (80 km) depuis le 21 novembre 2000. Parmi les prévisions de l'ensemble ainsi calculées, la **prévision de contrôle** est une prévision particulière : celle obtenue à partir d'un état initial fourni par l'analyse initiale tronquée à T159 ou T255. Les 50 autres prévisions de l'ensemble sont obtenues en « perturbant » cet état initial. C'est pour cela que l'on parle de 50+1 prévisions de l'ensemble.

Le CEPMMT fonctionnant de façon permanente, il produit chaque jour une analyse initiale (et, bien sûr, les prévisions correspondantes). Ainsi, les analyses servent, non seulement à produire des états initiaux pour les modèles, mais aussi à vérifier les prévisions des modèles. L'analyse qui est valable pour un instant correspondant à l'échéance d'une prévision particulière est appelée **analyse de vérification** (ou, parfois, analyse vérifiante) pour cette prévision particulière. Bien évidemment, au moment où cette prévision particulière est produite, l'analyse de vérification n'est pas encore connue.

appliquée à l'ensemble des prévisions, donne une probabilité allant jusqu'à 30 % de telles rafales génératrices de dégâts sur une vaste partie du nord de la France. Six heures plus tard (illustration non présentée), la zone de probabilité maximale de telles rafales s'est déplacée sur l'Allemagne. Cette prévision d'ensemble, prolongée à 96 heures, donne aussi une probabilité significative pour l'apparition

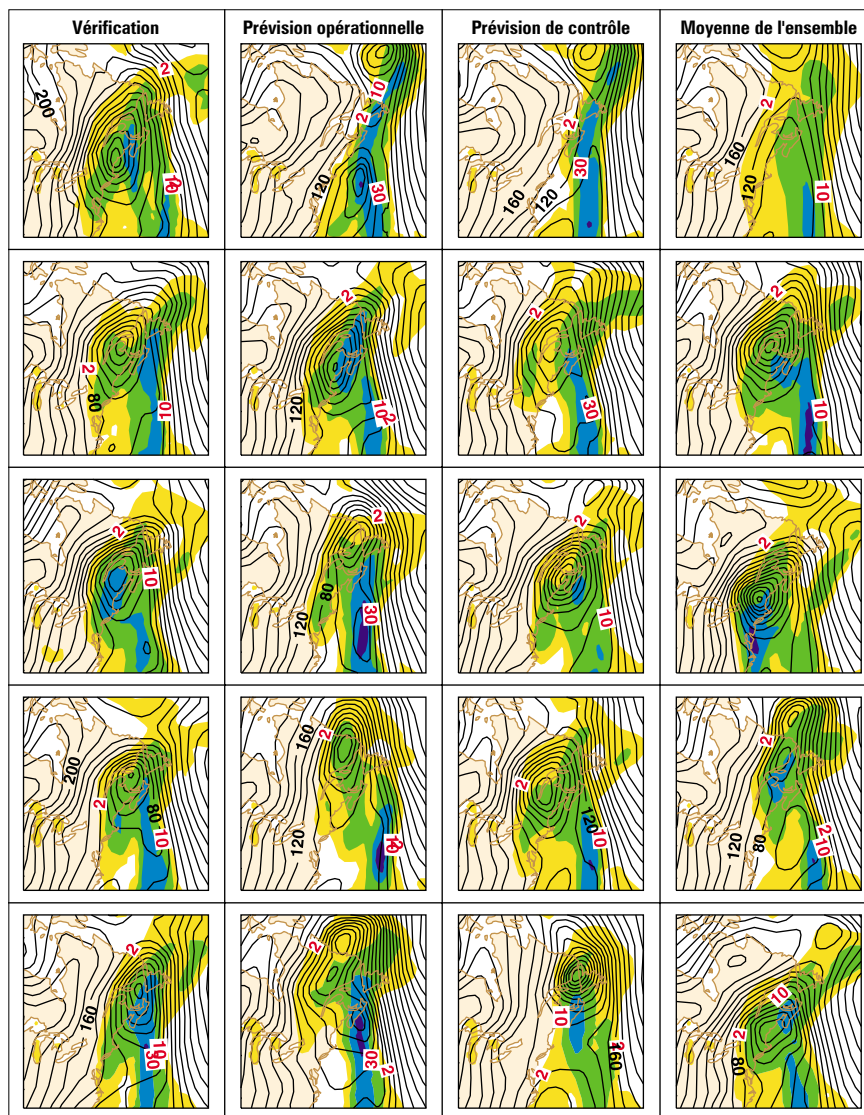
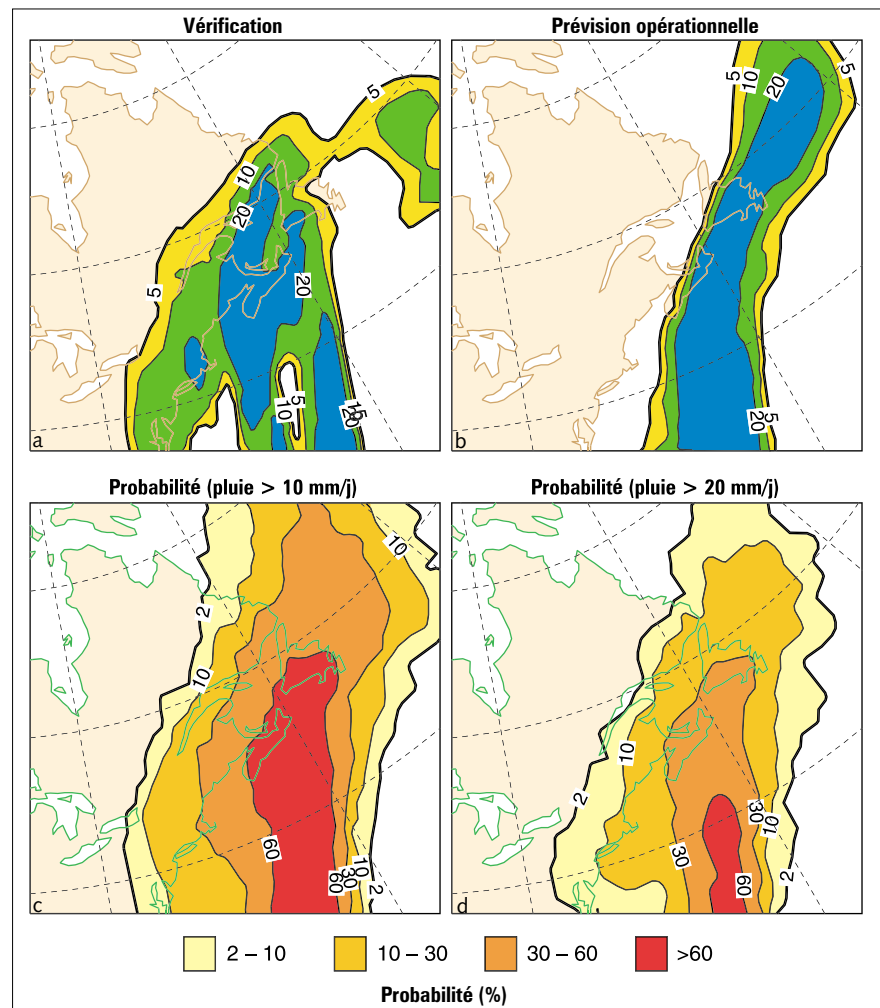


Figure 3 - Le 26 janvier 2000 à 12 h UTC. Cartes-vignettes de la hauteur de géopotential à 1 000 hPa et des précipitations pour l'analyse de vérification (première image supérieure), les prévisions à échéance 72 heures lancées le 23 janvier 2000 à 12 h UTC pour le modèle à haute résolution (deuxième image supérieure), le contrôle du système de prévision d'ensemble (troisième image supérieure), la moyenne de l'ensemble (quatrième image supérieure) et les 16 premières prévisions de la prévision d'ensemble (images suivantes) possédant la plus petite erreur quadratique moyenne sur le géopotential à l'intérieur d'une région centrée sur la dépression observée. L'intervalle entre isohyètes est de 20 mètres pour le géopotential et les isohyètes correspondent à 2, 10, 30 et 60 mm pour les précipitations.

d'une seconde tempête sur la France (illustration non présentée). Le système de prévision d'ensemble opérationnel à T159 (illustration non présentée) a aussi prévu un risque de tempête, mais le produit « rafales » a été plus faible et moins bien positionné à cette résolution plus basse.

Un deuxième exemple est présenté sur les figures 3 et 4. La violente tempête de neige des 25 et 26 janvier 2000 sur la côte est des États-Unis a été « manquée » par les principaux modèles opérationnels de prévision et l'absence de bulletins d'avertissement pour ce phénomène dangereux a été critiquée par les médias. Cette tempête a été à l'origine de dégâts importants et a coûté la vie à plusieurs personnes, principalement à cause des importantes chutes de neige associées à son passage.

Figure 4 – Le 26 janvier 2000 à 12 h UTC.  
 (a) : champ de vérification pour les précipitations, défini comme la prévision à haute résolution et à échéance 24 heures lancée le 25 janvier 2000 à 12 h UTC.  
 (b) : prévision à 72 heures des précipitations du modèle à haute résolution.  
 (c) : prévision d'ensemble à 72 heures de la probabilité de recevoir plus de 10 mm de précipitations par jour.  
 (d) : prévision d'ensemble à 72 heures de la probabilité de recevoir plus de 20 mm de précipitations par jour.  
 Les isolignes correspondent à 5, 10 et 20 mm pour les précipitations et à 2, 10, 30 et 60 % pour les probabilités.



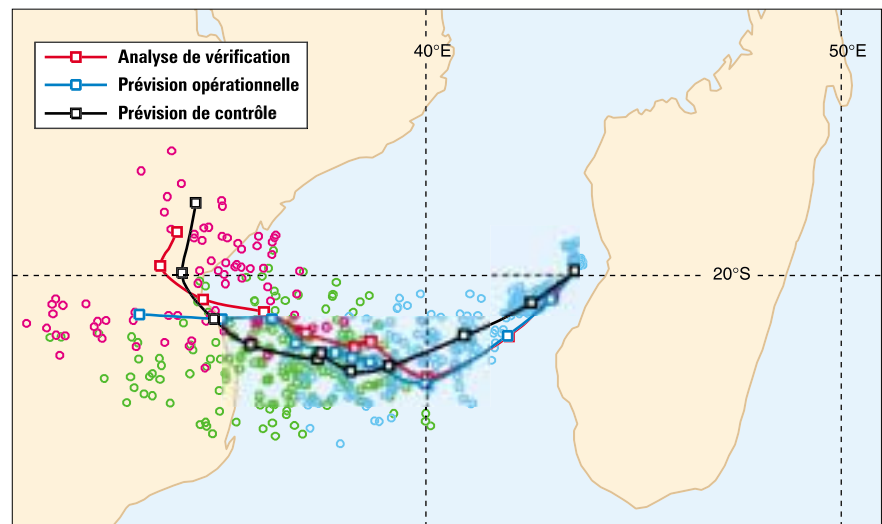
La figure 3 montre quelques-unes des prévisions individuelles de la prévision d'ensemble pour cette situation. On peut voir que, si la prévision opérationnelle place les bandes de précipitations sur la mer, certaines prévisions de la prévision d'ensemble développent correctement un système intense de basses pressions sur le continent avec les précipitations associées. On peut noter, cependant, que la prévision moyenne de l'ensemble pour cet événement n'est pas réussie. Cela doit être compris comme une leçon : essayer d'utiliser la prévision d'ensemble pour fournir une prévision déterministe modifiée n'est pas une bonne stratégie.

La figure 4 présente la prévision opérationnelle à 24 heures réalisée par le CEPMMT à partir du 25 janvier à 12 h UTC, qui peut être considérée comme une bonne approximation du champ observé de précipitations (1 mm d'eau est équivalent à 1 cm de neige). La prévision à échéance 72 heures du modèle opérationnel du CEPMMT a échoué à prévoir les chutes de neige intenses sur terre. En revanche, la prévision d'ensemble à 72 heures prévoyait une probabilité comprise entre 10 et 60 % (selon la localisation géographique le long de la côte est des États-Unis) de recevoir plus de 10 mm par jour de précipitations et

une probabilité comprise entre 2 et 30 % d'en recevoir plus de 20 mm par jour. La prévision d'ensemble indiquait aussi une probabilité significative de renforcement du vent à 10 mètres par rapport aux prévisions déterministes (illustration non présentée).

La figure 5 montre un exemple de prévision d'ensemble (jusqu'à cinq jours d'échéance à partir du 18 février 2000) de la position du cyclone tropical Eline, qui dévasta le Mozambique en février 2000. Dans cet exemple, les perturbations initiales ont été constituées en utilisant les « vecteurs singuliers diabatiques tropicaux » (Barkmeijer et al., 2001 ; Puri et al., 2001). De telles perturbations ne sont pas encore calculées opérationnellement, mais leur introduction dans le système opérationnel de prévision d'ensemble est espérée pour 2001. La prévision d'ensemble met en évidence une forte probabilité que le cyclone frappe le Mozambique, bien qu'à échéance de cinq jours la position précise de l'arrivée sur le continent soit incertaine ; on note avec intérêt que la prévision d'ensemble révèle une distribution bimodale de probabilité d'arrivée sur le continent, l'analyse de vérification et la prévision opérationnelle à haute résolution suivant chacune un mode différent.

Figure 5 - Prévision d'ensemble expérimentale jusqu'à 5 jours d'échéance des positions du cyclone tropical Eline, qui dévasta le Mozambique en février 2000 : en bleu, échéance de 0 à 24 heures ; en vert, échéance de 48 à 72 heures ; en violet, échéance de 96 à 120 heures. La ligne rouge indique la trajectoire observée (les carrés identifiant les positions toutes les 12 heures), la ligne bleue la trajectoire prévue par le modèle à haute résolution, la ligne noire la trajectoire prévue par la prévision de contrôle de la prévision d'ensemble.



## La valeur économique potentielle des prévisions probabilistes

On a montré que les prévisions déterministes uniques sont, par nature, vraisemblablement peu fiables pour les phénomènes météorologiques dangereux. À l'opposé, les prévisions d'ensemble semblent capables d'estimer de manière plus fiable le risque de tels événements. Comment quantifier cette idée ? Considérons un modèle décisionnel simple utilisé pour estimer la valeur économique potentielle des prévisions météorologiques (Murphy, 1977 ; Richardson, 1998 ; Richardson, 2000). Un usager peut subir une perte  $L$  si un événement météorologique  $E$  se produit et si aucune action préventive n'est menée. La perte est évitée si une action préventive de coût  $C$  est menée. Les prévisions météorologiques sont utilisées pour décider à quel moment il faudrait mener une action préventive.

La figure 6 montre la valeur de la prévision d'ensemble en fonction du rapport  $C/L$  de l'usager pour l'événement  $E$  « précipitations (ou équivalent en eau) supérieures à 10 mm par jour ». On montre aussi, à fin de comparaison, la valeur de deux prévisions déterministes – le contrôle T159 et la moyenne de l'ensemble. Une valeur nulle signifie que la prévision n'apporte pas plus d'informations que la simple connaissance de la fréquence climatologique de  $E$ . Une valeur de 1 impliquerait un système de prévision déterministe parfaite. Chacune des prévisions déterministes fournit un critère simple, mais peu fiable, pour décider de mener une action préventive : la mener quand  $E$  est prévu et ne pas le faire quand  $E$  n'est pas prévu. Pour la prévision d'ensemble, une stratégie de décision plus sophistiquée, utilisant la distribution de probabilité de la prévision, peut être adoptée : un usager à faible  $C/L$  doit toujours décider de mener l'action préventive, sauf si la probabilité de  $E$  est suffisamment petite ; en revanche, un usager à  $C/L$  voisin de l'unité doit mener une



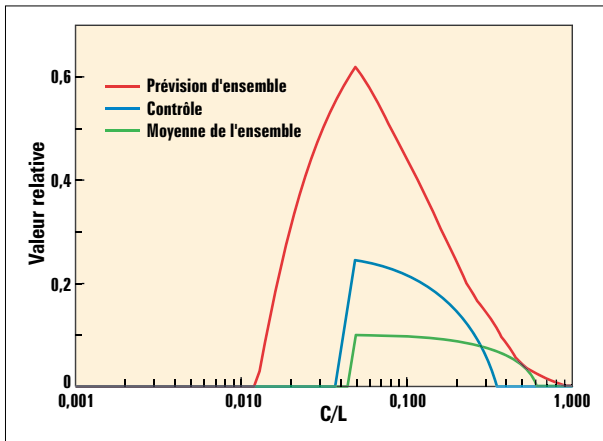


Figure 6 - Valeur économique potentielle (Richardson, 2000) de prévisions de précipitations de 10 mm par jour, pour différents rapports coût/perte (C/L). Cette valeur s'échelonne de 0 pour une prévision n'apportant aucune information utile à 1 pour une prévision parfaite. En rouge, système de prévision d'ensemble ; en bleu, prévision de contrôle ; en vert, moyenne de l'ensemble.

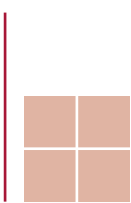
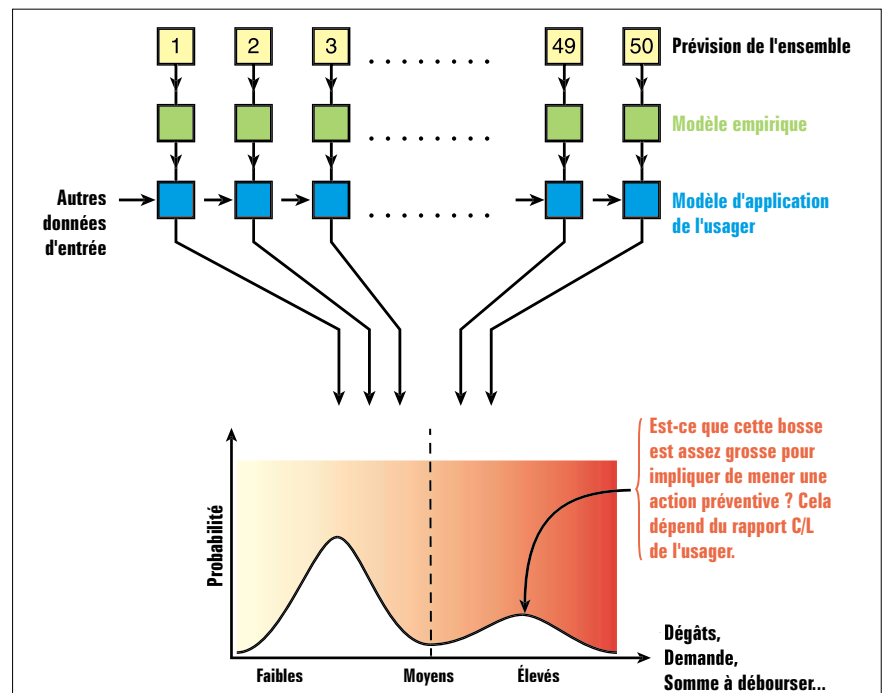
action préventive uniquement lorsque la probabilité de E est suffisamment grande. En règle générale, l'utilisateur doit mener une action préventive quand la probabilité de E est supérieure à C/L.

La moyenne de l'ensemble des prévisions possède une faible valeur, moins bonne que celle du contrôle, alors que la valeur de l'ensemble complet est élevée. La raison à cela est évidente : la prévision moyenne de l'ensemble est une prévision « lisse », qui sous-estime en conséquence les types d'événements les plus extrêmes. Les prévisions probabilistes obtenues en utilisant la distribution de probabilité de l'ensemble se révèlent bien plus à même de prévoir le risque de cet événement de précipitations.

## La prévision d'ensemble, un outil pour la gestion du risque

La section précédente a illustré la valeur de la prévision d'ensemble en tant qu'outil quantitatif pour la gestion du risque. À l'opposé, on a montré la moindre valeur, de ce point de vue, des prévisions déterministes uniques. Afin d'approfondir cette notion de valeur, il faut pouvoir coupler les sorties de la prévision d'ensemble avec les modèles d'application d'utilisateurs spécifiques. On peut envisager de nombreux exemples de tels modèles d'application : prévision des dégâts dus à des inondations, à des tempêtes ou à des sécheresses, prévision de la demande en électricité, prévision de la somme à déboursier pour un contrat financier indexé sur le temps qu'il fait. Le schéma de la figure 7 illustre ce couplage prévision d'ensemble-modèle d'application. Les sorties de chaque prévision individuelle sont d'abord soumises au traitement d'un modèle empirique, afin de corriger les biais du modèle numérique et de fournir des valeurs appropriées à des endroits géographiques précis. Pour chaque prévision individuelle, la donnée prévue ainsi corrigée sert de donnée d'entrée au modèle d'application de l'utilisateur. Le résultat final sera une distribution de probabilité des dégâts (resp. de la demande, de la somme à déboursier). Si la probabilité est forte d'avoir des dégâts (resp. une demande, une somme à déboursier) anormalement élevés, l'utilisateur pourra décider d'entreprendre une action adéquate. Le seuil de déclenchement d'une telle action dépendra de l'utilisateur : en cas de perte potentielle très importante, le seuil pour « anormalement élevés » pourrait être assez bas. En procédant ainsi, on se dispense du

Figure 7 - Diagramme schématique montrant que, pour l'estimation quantitative du risque, les sorties du système de prévision d'ensemble doivent être directement couplées aux modèles d'application des utilisateurs. Le résultat d'un tel couplage sera une prévision probabiliste des variables spécifiques à l'utilisateur (dégâts, demande, somme à déboursier, etc.). L'utilisateur peut alors déterminer directement si le risque d'une situation anormale est tel qu'il justifie une action préventive.



besoin de prévisions probabilistes directes des paramètres du temps qu'il fait et des questions telles que « comment les clients vont-ils utiliser les prévisions probabilistes ? » n'ont plus de raison d'être.

Donnons un exemple d'une telle procédure. Hoffschildt et al. (2000) se sont intéressés à la question du routage des navires : pour une saison complète de prévision d'ensemble, ils ont calculé la série des routes optimales pour les navires allant de Brest à New York, à partir des prévisions individuelles de l'ensemble (voir aussi Janssen, 2000). Dans les situations où l'ensemble des routes calculées est cohérent, le capitaine du navire peut choisir sa route en toute confiance. Par contre, dans les situations où l'ensemble des routes est plus dispersé, il y a incertitude sur la route optimale et, s'il en a la possibilité, le capitaine peut judicieusement décider de rester au port jusqu'à ce qu'une option plus nette se présente. S'il n'en a pas la possibilité, il peut choisir la meilleure route déterminée à partir de la prévision d'ensemble, comme l'ont montré Hoffschildt et al. (2000). À cause de la non-linéarité du processus de prévision météorologique, cette « meilleure route » peut différer de la route optimale déduite de chacune des prévisions déterministes. En règle générale, Hoffschildt et al. (2000) ont trouvé qu'une économie substantielle de carburant est réalisée en suivant la meilleure route proposée par la prévision d'ensemble plutôt que la route optimale déduite de la prévision déterministe unique à haute résolution T319.

Ce type d'analyse « orientée client » de la prévision d'ensemble en est encore à ses balbutiements. On ne connaîtra la valeur réelle de la prévision d'ensemble que lorsqu'elle deviendra une procédure couramment utilisée. Cela pourrait nécessiter un changement radical de la façon dont les Services météorologiques nationaux des pays membres du CEPMMT se servent des résultats de la prévision d'ensemble.

## Les besoins en calcul de la prévision d'ensemble

La prévision d'ensemble est gourmande en calcul ; en revanche, c'est une application parfaitement adaptée aux supercalculateurs multiprocesseurs. Il y a quatre composantes principales qui contribuent au coût de calcul de la prévision d'ensemble :

- la construction des perturbations initiales ;
- la résolution du modèle d'intégration ;
- la taille (nombre de prévisions) de l'ensemble ;
- la longueur de l'intégration.

La construction des perturbations initiales implique le calcul des vecteurs singuliers et cela représente à peu près 10 % du coût total de calcul de la prévision d'ensemble. La détermination de vecteurs singuliers diabatiques, en utilisant le Hessien de la fonction de coût d'analyse comme métrique initiale, augmentera le coût de calcul des vecteurs singuliers d'un facteur d'environ 4. L'ajout du calcul de vecteurs singuliers tropicaux conduira à un accroissement supplémentaire du coût de calcul. Cependant, si l'on considère les accroissements planifiés de la résolution du modèle et de la taille de l'ensemble, il n'y a pas de raison de penser que le coût de calcul des perturbations initiales représentera une proportion plus grande du coût total ; cette première composante n'est donc pas prédominante lorsque l'on considère les coûts de calcul.

Il n'est pas facile de choisir entre le besoin d'avoir la meilleure résolution possible pour le modèle de prévision et la nécessité d'avoir une taille suffisante pour l'ensemble. Actuellement, la prévision d'ensemble fonctionne à une résolution qui est à peu près la moitié de celle du modèle déterministe unique à haute résolution. Cependant, pour fournir un outil de gestion quantitative du risque de phénomènes météorologiques dangereux, il est clairement souhaitable que le modèle utilisé pour la prévision d'ensemble ait une résolution capable de simuler les phénomènes dangereux, sans quoi la prévision d'ensemble sous-estimera systématiquement la probabilité de tels phénomènes. Puisque les modèles T319 et T511 montrent que la simulation des phénomènes dangereux est sensible à la résolution, ces résolutions doivent être considérées comme des objectifs pour la prévision d'ensemble. Un accroissement intermédiaire (jusqu'à T255L60) est prévu pour la fin de l'année 2000 ; une étude de l'amélioration que procurera la prévision d'ensemble T255 par rapport à la prévision d'ensemble T159 est actuellement en cours.

Par ailleurs, il est aussi indispensable que l'ensemble comporte un nombre suffisant de prévisions. Pour illustrer et quantifier cette assertion, supposons (même si la connaissance de celle-ci est en pratique problématique !) que la



véritable fonction de densité de probabilité de la prévision accorde un risque de 10 % à l'occurrence de quelque événement météorologique dangereux (de probabilité climatologique très inférieure, quant à elle, à 10 %), comme la tempête de Noël évoquée plus haut. Si l'ensemble de prévisions échantillonne réellement au hasard, comme il se doit, cette distribution de probabilité de la prévision, on s'attend, sur un ensemble de 50 prévisions, à ce que 5 d'entre elles prévoient l'événement ; or, si aucune ne le fait, le test du  $\chi^2$  avec un seuil de confiance de 1 % ne permettrait pas de rejeter l'hypothèse qu'un tel ensemble ne résulte pas d'un vrai tirage au hasard des prévisions, et cela est une indication du fait que la taille de l'ensemble n'est pas suffisante. Par contre, si l'événement n'est pas du tout prévu dans un ensemble de 100 prévisions, le test du  $\chi^2$  indiquerait clairement que l'ensemble ne résulte pas d'un tirage au hasard des prévisions.

Une méthode possible pour accroître la taille de l'ensemble est de faire tourner la prévision d'ensemble plus fréquemment : par exemple, deux fois par jour au lieu d'une. Une prévision probabiliste optimale pourrait alors être obtenue en combinant les deux ensembles qui en résultent.

Enfin, se pose la question de la longueur d'intégration. En principe, si l'on admet que l'ensemble est capable de produire des probabilités fiables, on peut étendre la prévision d'ensemble bien au-delà de dix jours d'échéance. En pratique cependant, la mise en place d'une telle stratégie suppose d'abord que l'on soit capable de mieux simuler les modes dominants de la variabilité intrasaisonnière de l'atmosphère dans le modèle ; il semblerait que la représentation de ces modes puisse être notablement améliorée par le recours à un « océan interactif ». Cela dit, accroître l'échéance de prévision jusqu'à vingt jours conduit approximativement à doubler le coût de calcul de la prévision d'ensemble ; et à plus encore que doubler si l'on introduit un océan interactif.

La prévision d'ensemble est coûteuse en calcul et les facteurs qui viennent d'être discutés augmentent tous sensiblement ce coût de calcul. La question cruciale est de savoir si cette augmentation peut être justifiée. Cela dépend en fait de la valeur réelle de la prévision d'ensemble pour les États membres du CEPMMT. On a montré que, si l'on développait l'usage du couplage entre les sorties de la prévision d'ensemble et l'entrée de modèles d'application, on se rendrait compte de la véritable valeur de la prévision d'ensemble en tant qu'outil de gestion du risque. Le développement de cette façon de faire sera donc la clé du développement de la prévision d'ensemble elle-même.

Traduit de l'anglais par G. De Moor et D. Renaut

## Bibliographie

- **Atger F.**, 2000 : La prévision du temps à moyenne échéance en France. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, 30, 61-86.
- **Barkmeijer J., R. Buizza, T. N. Palmer, K. Puri et J.-F. Mahfouf**, 2001 : Tropical singular vectors computed with linearized diabatic physics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127, 685-708.
- **Buizza R. et T. N. Palmer**, 1995 : The singular vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, 52, 1434-1456.
- **Buizza R., T. Petroligis, T. N. Palmer, J. Barkmeijer, M. Hamrud, A. Hollingsworth, A. Simmons et N. Wedi**, 1998 : The impact of model resolution and ensemble size on the performance of an ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 1935-1960.
- **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.
- **Buizza R., D. S. Richardson et T. N. Palmer**, 2001 : The new 80-km high-resolution ECMWF EPS. *ECMWF Newsletter*, 90, 2-9.
- **Hoffschmidt M., J.-R. Bidot, B. Hansen et P. A. E. M. Janssen**, 2000 : Potential benefit of ensemble forecasts for ship routing. ECMWF Technical Memorandum n° 287, ECMWF, Shinfield Park, Reading, Royaume-Uni.
- **Janssen P. A. E. M.**, 2000 : Potential benefits of ensemble prediction of waves. *ECMWF Newsletter* n° 86.
- **Molteni F., R. Buizza, T. N. Palmer et T. Petroligis**, 1996 : The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122, 73-119.
- **Murphy A. H.**, 1977 : The value of climatological, categorical and probabilistic forecasts in the cost-loss ratio situation. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 803-816.
- **Palmer T. N., F. Molteni, R. Mureau, R. Buizza, P. Chapelet et J. Tribbia**, 1993 : Ensemble Prediction. 1992 ECMWF Seminar Proceedings, ECMWF, Shinfield Park, Reading, Royaume-Uni.
- **Palmer T. N.**, 2000 : The prediction of uncertainty in weather and climate forecasting. *Rep. Prog. Phys.*, 63, 71-116.
- **Puri K., J. Barkmeijer et T. N. Palmer**, 2001 : Ensemble prediction of tropical cyclones using targeted diabatic singular vectors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127, 709-730.
- **Richardson D.**, 1998 : Obtaining economic value from the EPS. *ECMWF Newsletter* n° 80.
- **Richardson D.**, 2000 : Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 649-667.
- **Tennekes H.**, 1991 : Karl Popper and the accountability of numerical forecasting. In "New developments in Predictability", ECMWF Workshop Proceedings, ECMWF, Shinfield Park, Reading, Royaume-Uni.