

Prévision quantitative des précipitations journalières par une technique de recherche de journées antérieures analogues : optimisation du critère d'analogie

Daily quantitative precipitation forecast by an analogue technique: optimisation of the analogy criterion

Sophie Guilbaud, Charles Obled

Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, UMR 5564 (CNRS–INPG–Orstom–UJF), B.P. 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

Abstract—For quantitative precipitation forecasting, model output statistics (MOS) are very useful. We have tried to improve a MOS based on a selection of analogue and past situations. Our study concerns the analogue criterion: its form, what variables to introduce (predictors), among those available (700 and 1 000 hPa geopotential fields) and their format (principal components or PCs, gridded data, etc.). Initially, an Euclidean distance using predictors as PCs was used. Its replacement by the Teweles–Wobus score, with predictors known in grid format, gave significantly improved results. (©Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

quantitative forecast / daily precipitation / analogue / Teweles–Wobus score

Résumé — Pour la prévision quantitative des précipitations journalières, les adaptations statistiques en sortie de modèle météorologique permettent des gains intéressants. Aussi avons-nous cherché à améliorer une méthode de prévision de ce type, basée sur l'utilisation de situations météorologiques passées et analogues. L'étude a porté sur l'amélioration du critère de sélection : sa forme, les variables à y introduire (prédicteurs), parmi celles disponibles (champs de géopotentiels 700 et 1 000 hPa), et leur format (composantes principales ou CP, grille...). Une distance euclidienne utilisant les prédicteurs sous forme de CP a été utilisée jusqu'ici. Son remplacement par le score de Teweles–Wobus, avec les prédicteurs connus en points de grille, a sensiblement amélioré les performances. (©Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

prévision quantitative / précipitation journalière / analogue / score de Teweles–Wobus

Abridged version

Introduction

Because of the economic importance of precipitation forecasts over 2 or 3 days, this type of forecast attracts particular attention. However, the process is very complex, as many phenomena come into play. Therefore, classical meteorological models can be of help by providing a statistical adaptation

of model output, e.g. the model output statistics (MOS) (Glawin and Lowry, 1972).

Our rainfall forecasting method is a type of MOS, based on an analogue technique: meteorological situations similar or analogous to the current one are extracted from a historical data file (1953–1993).

Note présentée par Ghislain de Marsily.

Note remise le 29 avril 1998, acceptée après révision le 5 mai 1998.

The selection is made by using the 700 and 1 000 hPa geopotential fields (altitude where 700 and 1 000 hPa pressure isobars are located) at 0 h, known to 37 European radiosounding stations (*figure 1*). Some of these stations have disappeared but they are reconstituted by interpolation from an analysed grid of a meteorological model. For any catchment, the precipitation forecast is expressed in quantiles (20, 60 and 90 %) by fitting the empirical cumulated distribution function, derived from the precipitation observed on this specific catchment for the set of analogues.

This method, which is currently used every morning in the Water Resources Department of Électricité de France, was built about 30 years ago (Duband, 1980) to improve management of hydropower and risk prevention in 33 French mountain catchments (*figure 2*).

For our study, because there is no simple score by which to measure the performance of a quantile forecast, this one was divided into eight probability classes: if N_i out of N analogues are in class i , the probability of being in class i is N_i/N . Performance is then measured with the ranked probability score (RPS) (Epstein, 1969).

The analogue selection

The analogue selection of the initial or reference method is explained in detail by Guilbaud et al. (1998). Briefly, each day is represented by its six first principal components (PCs) of the 700 hPa geopotential field. A set of analogues is selected with an Euclidean distance between the current day, C , and any past situation, J [equation (1)].

At first, the PCs calculated by a classical principal component analysis are replaced by empirical orthogonal functions (EOFs) (Braud et al., 1993) which are more suited to continuous fields. Moreover, an automatic screening was made of the available variables (the first 12 EOFs of the 700 and 1 000 hPa geopotential fields at 0 and 24 h—0 h the next day) to be entered into the criterion [equation (2)], for every catchment, by cross-validation on autumns from 1953 to 1993.

For every day, 50 analogue situations, J , are selected and weighted by their distance to the current day, C , $1/D(J,C)$, to favour the best analogues (smallest Euclidean distance) in the calculation of the precipitation forecasts (an analogue with a weight of 3 is repeated three times in the empirical distribution).

Optimised and significant results were found for the selection of 12 variables (D-12CP method). The use of 12 selected raw data (RadioSounding data instead of PCs) in the similarity criterion (D-12RS method) gave approximately the same results.

Another method was to work with the geopotential fields—at 0 and 24 h—known at gridded points (*figure 1*). They were obtained by interpolation of the radiosounding data with a

spline function. In this case, the analogue selection is made with the Teweles–Wobus score (Teweles and Wobus, 1954), specially designed for gridded data. The grid on which the score is calculated is optimised (*figure 1*) because it influences the quality of the forecast. Finally, better results than with the previously optimised Euclidean distance were obtained (TW–GR method).

Results

Quantitative results are shown in the *table*. The RPS are averaged over the 33 French catchments and over the autumns from 1953 to 1993 (cross-validation). The better forecasting method has the smallest RPS. Some comparisons were made with standard forecasts: persistence, climatology, random analogue selection and the reference method.

As a qualitative validation, a comparison between observed precipitations and the quantile forecast, obtained by the reference and the TW–GR methods is given for October and November 1994 and two different catchments: Loire supérieure, a Cévennes catchment (*figure 3*) and Var-Tinée-Roya, close to the Italian border (*figure 4*).

Both types of results, quantitative and qualitative, show that the TW–GR method is an improvement. Even if heavy rainfall is yet underestimated by the 90 % quantile, this quantile is a very good indicator for previsionists using this method.

Nevertheless, results of the cross-validation were obtained with observed fields at 24 h (0 h the next day) in the similarity criterion. Thus, it was verified, during autumns 1995 and 1996, that the use of the predicted fields at 24 h (obtained by the meteorological model), instead of observed ones, does not significantly decrease the performance of the TW–GR method, i.e. the RPS ($\times 100$) goes from 48.7 to 49.4.

Conclusion

The TW–GR method, with the two geopotential fields at 700 and 1 000 hPa at 0 and 24 h—calculated on an optimised grid—as predictors and the Teweles–Wobus score as a similarity criterion, is currently being installed at the Water Resources Department of Électricité de France. Our partners in INTERREG II, in the Piedmont and Liguria regions in Italy, are also interested.

The main drawback of this kind of method, i.e. the need for a consequent and homogeneous historical data file, is being resolved with the NCEP/NCAR program. Forty years (1955–1995) of synoptic data were reanalysed with the same model. We can thus replace the grid data from Électricité de France (obtained by an interpolation without any meteorological basis) by the NCEP data. Then, new predictors, such as humidity at low levels, higher geopotential fields or potential vorticity, will be introduced and tested.

1. Introduction

Les prévisions de précipitations à échéance de deux ou trois jours correspondent à des besoins socio-

économiques importants. En particulier, la prévision des fortes pluies potentiellement génératrices de catastrophes suscite une attention particulière. Or, cette prévision est particulièrement difficile à élaborer à l'aide de modèles

météorologiques, en raison de la complexité et du nombre de processus mis en jeu. Ceci explique les performances relativement décevantes de ces modèles, dont tout le monde reconnaît, par ailleurs, les progrès dans le domaine de la prévision de la circulation générale (champs de pression, vent, température).

C'est pourquoi, pour la prévision quantitative des précipitations, une adaptation statistique en sortie de modèle météorologique est intéressante. C'est le cas des *Model Output Statistics* ou MOS (Glawn et Lowry, 1972), qui relie la variable à prévoir ou *prédicand* aux prédicteurs issus d'un modèle météorologique.

La méthode de prévision quantitative de pluie journalière étudiée ici repose sur ce principe. Elle est fondée sur un traitement statistique des observations passées et revient à formaliser la démarche naturelle du prévisionniste : sélectionner dans l'historique des situations météorologiques *analogues* à une situation en cours appelée C — analogue, car l'identité stricte n'existe pas (Lorenz, 1969). On en déduit alors, à partir des effets observés pour ces situations analogues, les effets potentiels pour la situation en cours C.

Cette approche subjective du prévisionniste a été transposée dans une procédure numérique reproductible qui consiste à : *i) sélectionner*, dans un fichier historique, les situations analogues grâce à un critère de similitude ; *ii) calculer une prévision* de pluie à partir des précipitations observées lors de ces situations analogues.

Cette méthode, utilisée de façon opérationnelle depuis 1980 à Électricité de France, a été élaborée par Duband (1980) pour répondre aux préoccupations de la production hydraulique. En effet, pour mieux gérer à court terme les ressources en eau et anticiper les risques de crue sur des bassins français montagneux équipés d'aménagements hydroélectriques, une prévision quantitative des précipitations pour les 96 h à venir, par tranches de 24 h, était utile.

Notre objectif était donc d'améliorer cette méthode et de l'adapter à la nouvelle forme des données météorologiques, les grilles.

2. Les données

2.1. Les prédicteurs (variables explicatives)

Le choix des paramètres décrivant la circulation atmosphérique à court terme a été fait en fonction de : *i) la disponibilité des données*, car la méthode utilisée nécessite une période d'archivage des paramètres la plus longue possible ; *ii) l'objectif à atteindre*, la prévision quantitative des précipitations sur des bassins d'environ 1 000 km² pour les 96 h à venir.

C'est pourquoi les altitudes des surfaces (ou géopotentiels) 700 et 1 000 hPa, mesurées à 0 h en 37 stations de radiosondage réparties sur l'Europe (*figure 1*) ont été choisies. Or, ce réseau de mesure a évolué avec le temps et, en particulier, certaines stations ont disparu (points bateaux). C'est pourquoi, depuis quelques années déjà, les valeurs

des champs en ces stations sont reconstituées par interpolation des champs analysés par un modèle météorologique sur une grille. Enfin, comme on le verra plus loin, les géopotentiels prévus à 24 h par un modèle météorologique seront aussi utilisés.

Ces données, archivées par EDF de 1953 à 1993, ont été utilisées, jusqu'à présent, après transformation par *analyse en composantes principales classique* (ACP), afin de condenser l'information. Cependant, on a envisagé d'autres types de traitements, peut-être plus appropriés : *i) l'analyse en composantes principales de processus* (Braud et al., 1993), qui permet de mieux condenser les variables continues dans l'espace et dans le temps que l'ACP classique ; *ii) une interpolation aux nœuds d'un réseau régulier* (*figure 1*), qui rend les données homogènes avec celles couramment fournies par les modèles météorologiques et résout le problème des radiosondages supprimés.

2.2. Les prédicands (variables à prévoir)

Ce sont les lames d'eau journalières attendues en 24 heures (7h–7h) sur 33 bassins hydrologiques de 200 à 2 000 km², situés sur les massifs montagneux français (*figure 2*). Ceux-ci ont été choisis pour leur intérêt hydrologique dans le cadre de la production d'énergie hydroélectrique et/ou comme témoins de régions climatologiquement homogènes.

2.3. L'expression de la prévision. Évaluation des performances

Pour un jour et un bassin donné, 50 situations analogues sélectionnées fournissent des valeurs de précipitations observées, sur lesquelles une distribution statistique peut être ajustée.

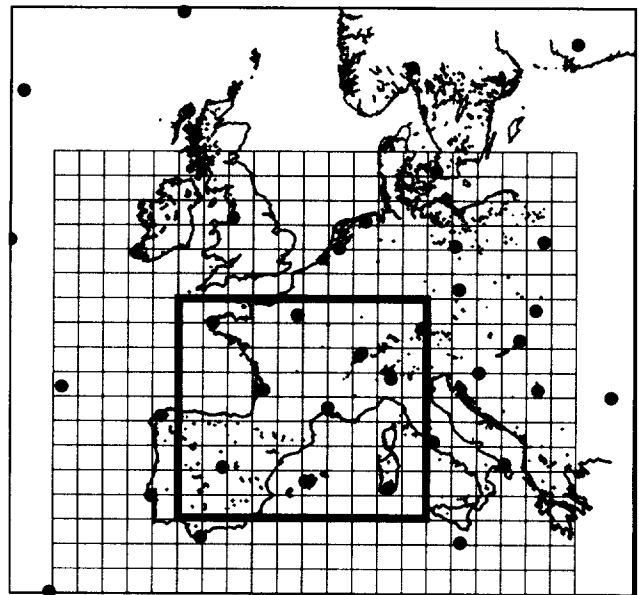


Figure 1. Les prédicteurs (la grille centrale est la grille optimisée pour la prévision sur les 33 bassins de la *figure 2*).

Predictors (the central grid is the optimised grid for the forecast on the 33 catchments of *figure 2*).

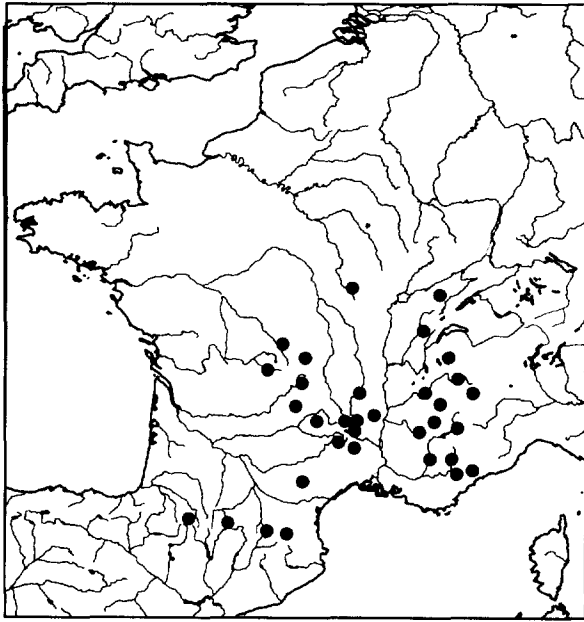


Figure 2. Les prédicteurs.

Predictands.

Actuellement, la prévision de pluie est donnée sous forme de quantiles (20, 60 et 90 %), calculés à partir de cette distribution empirique cumulée. Or, il n'existe pas de scores évidents pour évaluer les performances d'une prévision exprimée de la sorte. C'est pourquoi la prévision a été reformulée en une prévision probabiliste en huit classes de pluie (0, 0-1, 1-5, 5-10, 10-25, 25-50, 50-100, > 100 mm) : si, sur N analogues sélectionnés, N_i sont dans la classe i , la méthode prévoit une probabilité N_i / N d'être dans la classe i .

Pour évaluer les performances d'une telle prévision, le *ranked probability score* RPS d'Epstein (1969), s'est révélé tout à fait adapté.

3. La sélection des analogues

Plusieurs critères d'analogie peuvent être envisagés pour quantifier la similitude entre deux situations.

3.1. La distance euclidienne

La sélection des analogues effectuée dans la méthode initiale d'EDF (référence) est détaillée dans Guilbaud et al. (1998). En résumé, chaque jour est représenté par les six premières composantes principales (CP) du champ de géopotential 700 hPa, Z_1^{700} à Z_6^{700} . Puis, un ensemble d'analogues est sélectionné grâce à une distance euclidienne entre la journée en cours C et la situation analogue J du passé :

$$D^2(J, C) = \sum_{i=1}^6 [Z_i^{700}(J) - Z_i^{700}(C)]^2 \quad (1)$$

Mais le choix d'utiliser toutes les CP jusqu'à la sixième et d'ignorer les autres était un peu arbitraire.

Dans un premier temps, nous avons repris la condensation des champs de prédicteurs (géopotentials 700 et 1 000 hPa). Celle-ci a été effectuée par une analyse en composantes principales de processus ou ACP (Braud et al., 1993), qui est le pendant de l'ACP classique pour des champs continus. En effet, elle prend en compte la densité et l'organisation géographique du réseau de mesure qui, dans notre cas, est loin d'être régulier. Chaque station est alors affectée d'un poids qui correspond à sa surface d'influence, dont la taille est inversement proportionnelle à la densité locale du réseau.

Et, cette fois, 12 nouvelles CP ont été retenues pour chaque champ. Cela permet d'expliquer environ 99 % de la variance. Cependant, cette orthogonalisation ne prenant pas en compte le prédicteur qu'est la pluie, une sélection était nécessaire pour détecter, parmi ces variables indépendantes, les plus informatives pour la pluie journalière.

À la suite de cela, une sélection ascendante des CP à introduire dans la distance euclidienne a été effectuée pour améliorer les performances en prévision de la méthode. C'est-à-dire que, pour chaque nouvelle variable introduite, une calibration croisée a été faite sur les automnes de la période 1953-1993 : chaque jour, la prévision est calculée en cherchant des analogues dans toute la période sauf dans l'année du jour considéré, et un *ranked probability score* RPS lui correspond. Il est ensuite moyenné sur l'ensemble des prévisions. La distance euclidienne retenue est alors celle qui donne un RPS moyen minimal. Elle est de la forme :

$$D^2(J, C) = \sum_{k=1}^{K_{\max}} [Z_k(J) - Z_k(C)]^2 \quad (2)$$

où les variables Z ont été sélectionnées de manière ascendante, parmi les 48 proposées à savoir les 12 premières CP (normées et calculées par ACP) de chacun des champs de géopotential à 1 000 et 700 hPa à 0 h les jours C et J , mais aussi celles à 0 h les jours $C+1$ et $J+1$, soit à 24 h. En effet, ces dernières ciblent mieux la pluie à prévoir de 07 h (C) à 07 h ($C+1$).

Les meilleurs résultats ont été obtenus en sélectionnant $K_{\max} = 12$ CP (sur les 48 disponibles).

Il faut noter qu'en calibration croisée, les champs de géopotentials à 24 h sont connus, ce qui ne sera pas le cas lors d'une utilisation opérationnelle de la méthode. Des champs de géopotentials prévus à 24 h, issus de modèles météorologiques, seront alors utilisés (cf. §4).

Pour chacune de ces journées, 50 situations analogues sont retenues. Elles sont ensuite pondérées par leur distance D_i au jour de référence C , de manière à privilégier les meilleurs analogues : l'analogue le plus éloigné, avec une distance D_{\max} , est affecté d'un poids de 1 et les autres d'un poids $pd_i = D_{\max}/D_i$. Chaque analogue est alors « répété » un nombre de fois égal à son poids (nombre entier le plus proche), sachant que la distance D_i peut varier de 1 à 10. Le nombre total d'analogues devient alors $N' = \sum_{i=1}^N pd_i$, au lieu de $N = 50$. Et la prévision de pluie est faite avec ce nouvel ensemble de N' analogues.

Cependant, l'information originale réside en fait dans les données brutes de radiosondage (74 valeurs par jour : 2 niveaux à 37 stations, donc 148 pour 0 et 24 h). Elle était trop importante, et donc impossible à traiter, à l'époque du développement de la méthode, d'où le passage préalable en données condensées. Mais les moyens actuels nous ont permis de l'utiliser dans la distance euclidienne, après sélection ascendante de ces variables brutes (méthode désignée ci-après par D-12RS). Cependant, compte tenu de l'intercorrélation spatiale de ces variables (proximité des radiosondages), elle ne sont plus statistiquement orthogonales et la distance euclidienne est un peu moins optimale. En fait, après sélection, les résultats obtenus sont assez voisins de ceux obtenus sur les variables orthogonalisées (*tableau*).

Enfin, un dernier traitement a consisté à interpoler ces données sur une grille régulière, format actuellement le plus répandu. Comme il n'était pas possible de récupérer les grilles analysées issues d'un modèle sur les 41 années, nous avons fait, dans un premier temps, une interpolation simple avec une fonction spline, même si cela ne nous satisfait pas complètement (cf. §5). À cette occasion, la pertinence de la distance euclidienne comme critère de sélection a été remise en cause. En effet, si elle traduit bien la distance absolue, elle caractérise assez mal la forme du champ. Par exemple, deux champs peuvent être déclarés « proches », tout en ondulant quasiment en opposition de phase, ce qui localise les centres d'action en des endroits très différents. D'autre part, l'analogie recherchée est plutôt une analogie de circulation, donc de champ de vents. Or, ces derniers sont liés aux gradients de géopotentiels.

3.2. Le score de Teweles-Wobus

Cette conclusion suggère la recherche d'un critère plus adapté à l'analogie « globale » de circulation. Le critère de Teweles-Wobus (Teweles-Wobus, 1954), déjà proposé dans la littérature pour sélectionner les analogues dans le cadre d'une prévision de température (Woodcock, 1980), remplit ces conditions.

Mis au point dans les années 50 pour juger de la qualité des prévisions, il met l'accent sur la circulation, donc plutôt sur les champs de vents que sur les champs de géopotentiel, en considérant en chaque point de grille, non pas le géopotentiel, mais ses deux gradients sud-nord et est-ouest :

$$TW = 100 \times \frac{\sum_i |e_G^i| + \sum_j |e_G^j|}{\sum_i |G_L^i| + \sum_j |G_L^j|} \quad (3)$$

où e_G est l'écart entre les gradients de géopotentiel prévu et observé, entre deux points de grille adjacents et G_L le maximum de ces deux gradients. La sommation se fait sur tous les couples de points adjacents d'un domaine prédéfini (ici la grille où les champs ont été calculés par interpolation des données de radiosondages) dans les directions nord-sud (indice i) et est-ouest (indice j).

Utilisé pour sélectionner les situations analogues, ce critère a permis d'améliorer les performances de la méthode (*tableau*), ce qui est probablement dû à une meilleure adéquation du critère d'analogie. Par contre, la pondération des analogues par l'inverse du critère a été abandonnée, car les résultats obtenus, avec ou sans, étaient équivalents. Cependant, il a fallu tout d'abord optimiser le domaine sur lequel ce critère est calculé, car cela influe sur la qualité des prévisions. Ainsi, le domaine optimal est celui qui donne la meilleure prévision moyenne (i.e. le RPS moyen minimal) en calibration croisée sur la période 1953–1993 et sur les 33 bassins français. Des essais systématiques, avec des grilles de taille et de localisation différentes, ont permis de définir une grille optimale, de taille intermédiaire, légèrement décalée vers le sud-ouest pour la période d'automne considérée (*figure 1*).

4. Résultats

L'objectif initial de cette étude était d'essayer d'améliorer les performances de la méthode de référence (utilisée à EDF) avec les données disponibles. Ces performances, en calibration croisée sur les automnes 1953–1993, sont données dans le *tableau* par l'intermédiaire du RPS (plus le RPS est proche de 0, meilleure est la prévision). Celui-ci a été moyenné sur les 33 bassins français et les journées d'automne de 1953 à 1993. On y compare les méthodes suivantes :

- D-12CP : sélection des analogues avec une distance euclidienne utilisant 12 CP ;
- D-12RS : sélection avec une distance euclidienne utilisant 12 données de radiosondage ;
- TW-GR : sélection grâce au critère de Teweles-Wobus calculé sur la grille optimale.

Pour comparaison, des méthodes de prévision classiques ont été ajoutées :

- la climatologie (la prévision de la classe i est la même chaque jour : c'est le rapport entre le nombre de journées où la classe i a été observée dans le fichier historique et le nombre de journées de ce fichier) ;
- la persistance (situation de la veille = prévision pour le lendemain) ;
- la sélection des analogues au hasard.

Un net gain est donc à noter avec la dernière méthode utilisant le critère de Teweles-Wobus pour sélectionner les analogues (méthode TW-GR).

Cependant, pour un prévisionniste, plus que des indices statistiques, c'est la façon dont réagit la méthode face à un événement qui est essentielle. Un exemple de prévision de fortes pluies est présenté sur la *figure 3* : c'est l'épisode de novembre 1994 sur le bassin de la Loire supérieure dans les Cévennes. La prévision quantile, d'abord donnée par la méthode de référence, puis par la méthode TW-GR, est comparée aux précipitations observées. Si la méthode de référence avait prévu, et même anticipé, le pic du 4 novembre, la méthode TW-GR l'a mieux ciblé.

Tableau. Comparaison des performances des différentes méthodes de prévision.

Performance comparison between different forecasting methods.

	Prévision en classes RPS × 100
Climatologie	75,4
Persistence	98,6
Hasard	76,6
Référence EDF	59,7
D-12CP	49,0
D-12RS	47,2
TW-GR	45,1

Des résultats aussi intéressants ont été obtenus dans le cas de pluies moins importantes, comme par exemple sur le groupement Var-Tinee-Roya en octobre 1994 (figure 4). La prévision par la méthode TW-GR est, quel que soit le quantile, plus proche de l'observation.

Néanmoins, ces premiers résultats exploitent les champs de géopotential observés à 0 h et 24 h. Ces derniers ne sont évidemment pas disponibles lors de l'élaboration de la prévision à 7 h. C'est pourquoi nous avons vérifié, lors de la validation sur les automnes 1995 et 1996, que l'utilisation des champs prévus à 24 h par un modèle météorologique, au lieu de ceux observés, ne dégradait pas la prévision de manière significative. En effet, sur ces deux automnes, le *ranked probability score* ($\times 100$), moyenné sur tous les bassins, passe de 48,7 (champs à 24 h observés) à 49,4 lorsqu'ils sont prévus. Cette conclusion ne nous surprend pas, au vu des très bonnes corrélations existant entre les champs de géopotential observés et prévus à 24 h ($R^2 > 0,95$).

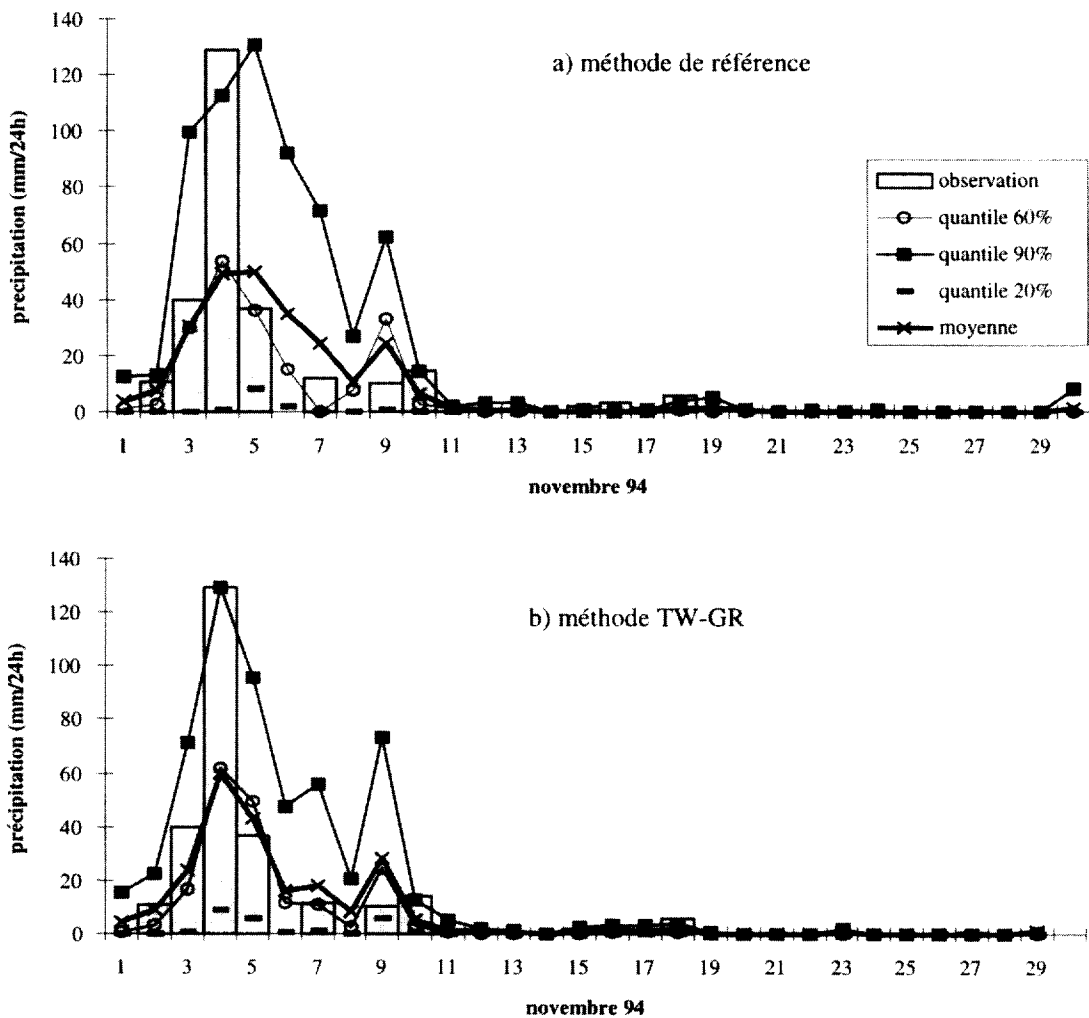


Figure 3. Novembre 1994, Loire supérieure.

November 1994, upper Loire river.

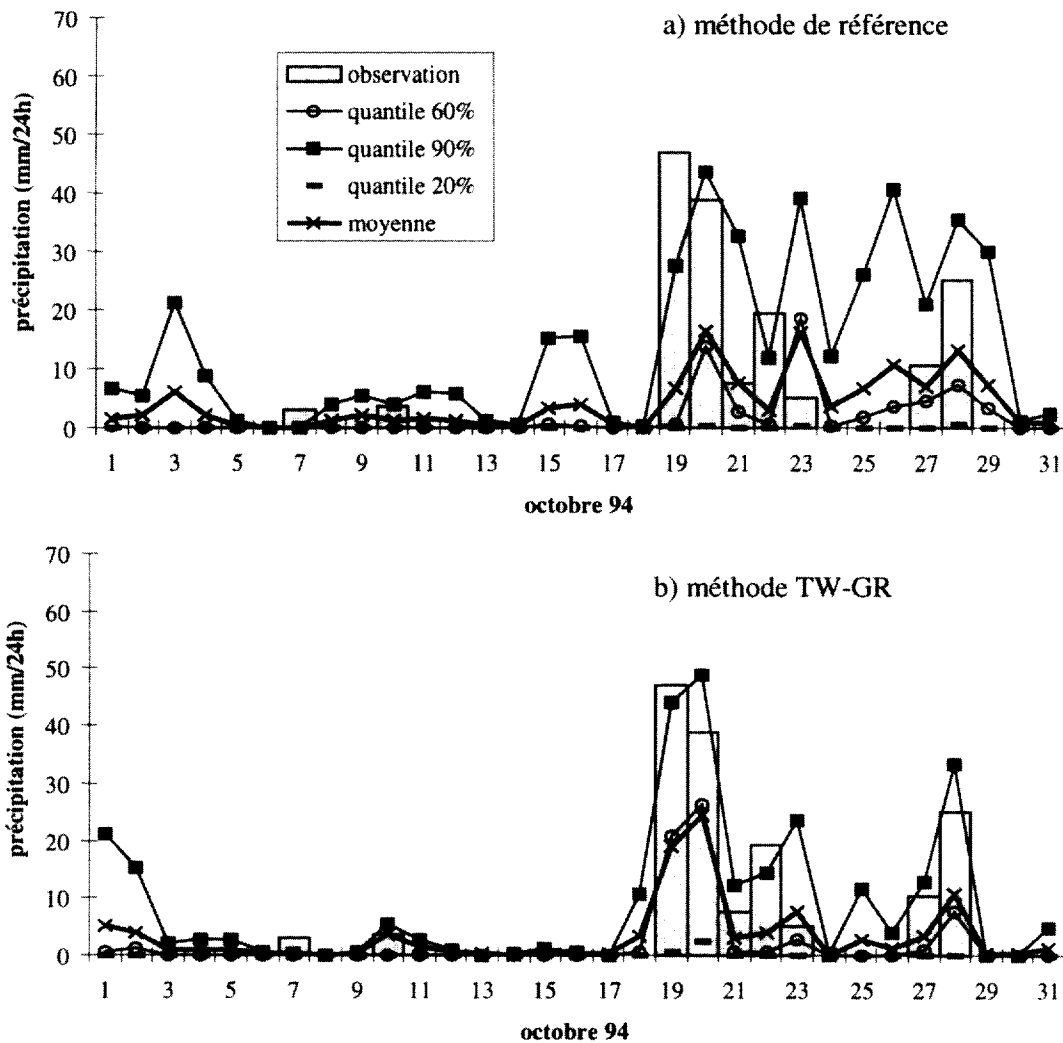


Figure 4. Octobre 1994, Var-Tinee-Roya.

October 1994, Var-Tinee-Roya.

5. Conclusions et perspectives

5.1. Conclusions

Finalement, une nouvelle méthode s'est imposée, la *méthode TW-GR*. Elle utilise comme prédictors les *champs de géopotentiels* 700 et 1 000 hPa observés à 0 h et prévus à 24 h, fournis aux points d'une *grille optimisée*, et sélectionne les analogues avec *le score de Teweles-Wobus*.

Ses qualités prévisionnelles, pressenties au calage (1953–1993), n'ont pas été démenties à la validation, puisque l'on constate *une nette baisse des fausses alertes et des défauts d'alerte* par rapport à la méthode de référence : les épisodes intenses ont tous été prévus, même s'ils sont parfois encore un peu sous-estimés.

Actuellement, cette méthode largement rénovée est en cours d'implantation à EDF pour une utilisation opérationnelle la plus rapide possible sur les bassins français.

5.2. Perspectives d'amélioration

En fait, l'objection principale mise en avant pour l'utilisation de ce type de méthode est la nécessité de constituer, ou d'acquérir, un *fichier historique* de situations d'au moins 40 ans, le plus homogène possible.

Ce handicap est en passe d'être résolu puisque le NCEP et le NCAR (*National Center for Environmental Prediction* et *National Center for Atmospheric Research*) ont réanalysé, avec le même modèle, 40 années de données synoptiques à tous les niveaux. Notre premier travail sera donc de remplacer les champs que nous avons interpolés en une grille (*figure 1*) par ceux du NCEP. Les résultats en prévision devraient être au moins équivalents et on sup-

pose même qu'ils seront supérieurs, puisque les valeurs des champs du NCEP sont issues d'un modèle et non pas d'une interpolation faite sans fondement météorologique.

On envisage aussi de tester de nouveaux prédictors, comme l'humidité en basses couches (tests prometteurs, cf. Guilbaud, 1997) et des champs de géopotentiels à plus haute altitude (500 à 200 hPa).

Tout ceci en fait une approche pragmatique, fédérant les points forts des modèles à la fois statistiques et déter-

ministes, et susceptible d'assurer un progrès réel et une transition améliorée dans l'attente de modèles plus performants.

De plus, elle est aisément généralisable à de nouveaux bassins, et tire même avantage d'une certaine « continuité » géographique. Il serait donc souhaitable qu'elle se diffuse plus largement et que les gestionnaires des grands systèmes d'annonce de crue l'inscrivent parmi leurs outils opérationnels.

6. Références

Braud I., Obled Ch. et Pham Dinh T. 1993. Empirical Orthogonal Functions (EOF) analysis of spatial random fields: theory, accuracy of the numerical approximations and sampling effects, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 7, 146–160

Duband D. 1980. Dynamic selection of analogue flow patterns to produce quantitative precipitation forecasts, *WMO Symp. on Probabilistic and Statistical Methods in Weather Forecasting*, Nice, France, September 1980, 487–492

Epstein E.S. 1969. A scoring system for probability forecasts of ranked categories, *J. Appl. Meteor.*, 8, 985–987

Glahn H.R. et Lowry D.A. 1972. The use of model output statistics

(MOS) in objective weather forecasting, *J. Appl. Meteor.*, 11, 1203–1211

Guilbaud S. 1997. Préviation quantitative des précipitations journalières par une méthode statistico-dynamique de recherche d'analogues. Application à des bassins du pourtour méditerranéen, *Thèse*, INPC, 258 p.

Guilbaud S., Obled C. et Rodriguez J.-Y. 1998. Utilisation des techniques de recherche d'analogues pour la préviation quantitative des précipitations journalières, in : Parent E., Hubert P., Bobée B. et Miquel J. (éds), *Méthodes statistiques et approches bayésiennes en hydrologie*, Unesco, Paris, PHI series, 399–414

Lorenz E. 1969. Atmospheric predictability as revealed by natural occurring analogues, *J. Atmos. Sc.*, 26, 636–646

Teweles J. et Wobus H. 1954. Verification of prognosis charts, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 35, 10, 455–463