

Procédure de décision multimodèle pour une prévision des crues en temps réel application au bassin supérieur de la Garonne

A multimodel weighting decision process for real time
flood forecasting application to the upper
Garonne watershed

C. LOUMAGNE¹, J.J. VIDAL², C. FELIU², J.P. TORTEROTOT³ et P.A. ROCHE⁴

Reçu le 24 avril 1995, accepté le 25 août 1995*.

SUMMARY

This article describes a decision process for real-time flood forecasting. A method is presented which combines the results of different models with weights adapted to the state of the flood forecasting system. Each model has specific performances when it is calibrated, and has a specific sensitivity to each perturbation that can occur. The results (forecasts) of all of these models are cross-correlated. For a wide class of adequacy criteria, the best estimate of the variable to be predicted is a linear combination of these results. In that combination the weight of each model forecast is strongly linked to the model's relative performance. For a specific perturbed environment (we will call it a state of the hydrologic-hydrometric system) the performance of some sensitive models decreases but others may remain stable. Optimal weights are therefore specific for each state of the system.

When states can be pre-specified, the decision process splits into two different steps: diagnostic and prognostic. During a first diagnostic step, using various coherence tests among all collected data and possible external information that is not used in the model, the probability of being in each state is estimated. This step may include expert judgement as is the case in practice. During the second prognostic step, optimal weights of the model are computed, using the error covariance matrix for all models in each state of the system and the estimated probabilities of being in each state as determined during the previous diagnostic step.

Such a complete decision rule needs a detailed study that cannot be done for each case, and which is based on the assumption that all perturbations can be described and modelled. A simplified procedure has thus been developed based on the basic

1. CEMAGREF, Parc de Tourvoie, BP 121, 92185 Antony Cedex (France).
2. DIREN SHMA, 2 port St Etienne, 31079 Toulouse Cedex (France).
3. CERGRENE, ENPC-ENGREF, La Courtine, 93167 Noisy-Le-Grand Cedex (France).
4. DDE de l'Aube, 1 bd Jules Guesdes BP 769, 10026 Troyes Cedex (France).

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 15 juillet 1996.

idea that only the normal state can be easily identified. Instead of estimating state probabilities, this procedure relies on weights that evolve according to recent errors. The results of this procedure as applied to the Vézère catchment, have been quite as good as those obtained with the complete pond.

These weighting decision procedures have also proven in this case to be much more effective than any attempt to choose the best model at each time step. This very elementary result is in contradiction with classical approach of switching among multiple models. Switching procedures are in fact designed to estimate the state of the system, assuming that one must decide what is the state. For operational purpose such decisions are useless and switching procedures appear to be sub-optimal, as they lead to a discontinuous forecast decision. The interest of the multimodel approach is confirmed even if uncontrollable perturbations occur in real-time. The performances obtained since the implementation of this decision process in the flood forecasting system of the upper Garonne watershed are presented.

Key-words : flood forecasting system, real time, multimodel weighting, decision process, uncontrollable perturbation.

RÉSUMÉ

Cet article décrit une procédure de décision destinée à la prévision des crues en temps réel. La méthode proposée permet de combiner les résultats de différents modèles avec une pondération adaptée aux conditions de fonctionnement du système de prévision.

Chaque modèle a lors du calage des performances qui lui sont propres ainsi qu'une sensibilité particulière aux différentes perturbations. Les résultats de ces modèles étant corrélés, la décision optimale est par conséquence une combinaison linéaire de la décision qui peut être prise dans chaque état du système pondérée par la probabilité de se trouver dans une configuration donnée.

Dans le cadre d'un système de prévision exploitant le résultat de plusieurs modèles, la procédure se décompose en deux étapes. Pendant la première étape, après analyse de l'ensemble des informations collectées on détermine les états possibles du système. La deuxième étape établit une prévision en calculant des poids optimaux accordés à chaque modèle en fonction des différentes configurations du système.

Un tel système de décision nécessite une étude complète afin de décrire et modéliser toutes les perturbations et situations hydrologiques possibles. Une procédure simplifiée a donc été développée identifiant seulement deux états du système : le premier où tout fonctionne correctement et le deuxième déterminé à partir des derniers pas de temps connus.

Comparativement à des méthodes de changement de modèles, cette méthode simplifiée a montré sur la Vézère de meilleurs résultats.

L'intérêt de cette approche est confirmé même dans le cas où des erreurs accidentelles interviennent en temps réel. On présente les performances de cette procédure, observées depuis son implantation sur le système d'annonce de crues du bassin supérieur de la Garonne.

Mots clés : système de prévision de crues, temps réel, pondération multimodèles, procédure de décision, erreurs accidentelles.

INTRODUCTION

La prévision des crues bénéficie aujourd'hui des progrès effectués sur les systèmes de collecte de données ainsi que des améliorations apportées aux méthodes de prévision, même si en temps réel, le prévisionniste n'a que peu de temps pour analyser une situation, traiter les informations et mettre en œuvre les modèles.

De nombreuses procédures automatiques de traitement d'erreur ont été développées pour lui venir en aide. Ces procédures, très performantes lorsqu'il s'agit de corriger des erreurs persistantes et régulières, sont souvent mises à défaut pour des erreurs accidentelles, comme l'absence de données, les erreurs de mesure ou la prise en compte d'une situation hydrologique particulière.

Le prévisionniste est donc conduit à effectuer lui même des corrections en temps réel, souvent guidé par sa seule expérience. Pour essayer de prendre en compte ces erreurs accidentelles, différentes approches ont été proposées :

- KITANIDIS et BRAS (1980) ont élaboré une procédure de branchement et de débranchement d'un filtrage de KALMAN pour éviter les perturbations exceptionnelles.

- LEBOSSÉ et MIQUEL (1985) ont présenté une procédure empirique fondée sur une démarche hiérarchique et sur une décision automatique de changement de modèle.

Dans un autre domaine que la prévision, VERNOS (1982) a développé une approche bayésienne pour passer d'un modèle à l'autre et CAVADIAS et MORIN (1985) ont cherché la meilleure combinaison linéaire d'un ensemble de modèles.

Cet article présente une procédure de décision mieux adaptée aux contraintes du temps réel. Elle s'appuie sur une combinaison de plusieurs modèles de prévision en attribuant un poids différent à chaque modèle. Les poids évoluent en fonction de l'état du système de prévision et des performances récentes des modèles. Un état (ou configuration) du système est défini par une situation hydrologique (typologie des crues, cohérence des hydrogrammes entre différents sous-bassins...) et par un mode de fonctionnement du système de mesure et de collecte des données (absences, perturbations de données...).

Cette procédure a été développée au CERGNE et testée sur le bassin de la Vézère (ROCHE et TAMIN, 1987), puis a été transposée et implantée depuis 1989 dans le système de prévision en temps réel du bassin supérieur de la Garonne.

Comparativement à des méthodes de changement de modèle telles que le choix bayésien d'un modèle (VERNOS, 1992) ou la meilleure combinaison des modèles (CAVADIAS et MORIN, 1985), elle avait en effet montré sur la Vézère de meilleurs résultats. Ces méthodes peuvent par exemple conduire à des changements brutaux de modèle de prévision, et par conséquent à des discontinuités qualitatives et quantitatives de la prévision.

Après une description du système opérationnel de la Garonne, nous présentons le principe de la méthode et les résultats obtenus par la procédure de décision multimodèle fonctionnant en temps réel.

1 - LE SYSTÈME DE PRÉVISION DE CRUES

Le bassin hydrologique de la Garonne, bordé sur toute sa frontière sud par la chaîne des Pyrénées et au nord et nord-est par les contreforts du Massif Central et des Grands Causses, couvre près de 60 000 km², soit plus du dixième du territoire français. Ces hauteurs délimitent une vaste cuvette où convergent les eaux de ruissellement qui en sont issues. La forme du bassin en éventail favorise les phénomènes de concomitance des crues des divers affluents (fig. 1).

La formation et l'évolution des crues de la Garonne sont brutales, violentes et rapides. Selon les conditions météorologiques, on en distingue trois types :

- les crues océaniques pyrénéennes, les plus violentes, qui peuvent se produire en toute saison ;
- les crues océaniques classiques, qui ont lieu principalement en hiver et au printemps ;
- les crues méditerranéennes qui ont pour origine des pluies torrentielles localisées dans la partie orientale du bassin.

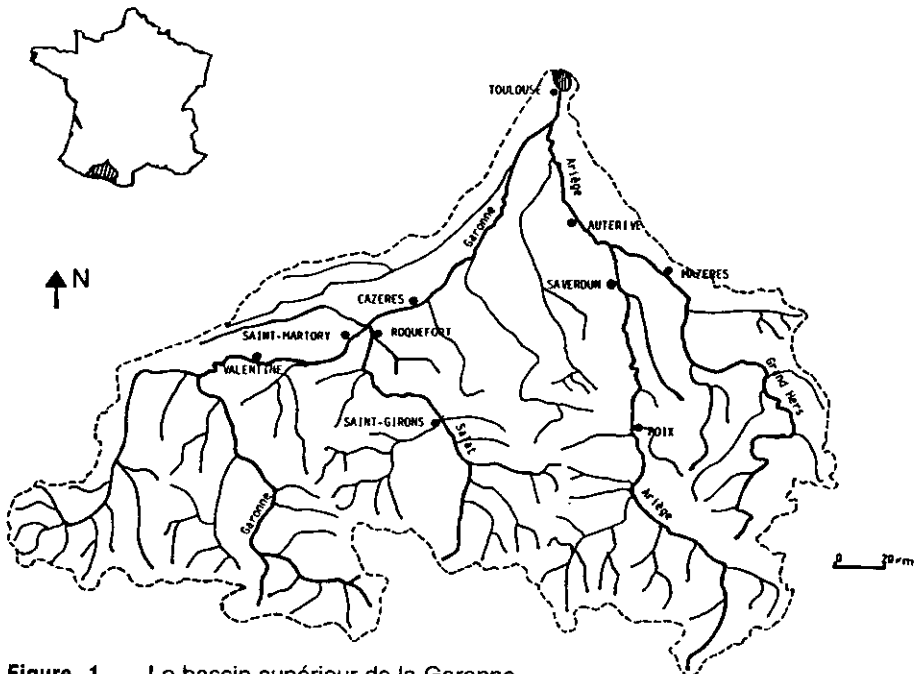


Figure 1 Le bassin supérieur de la Garonne.
The upper Garonne catchment area.

L'analyse des besoins en période de crise a amené la DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) à mettre en place des outils d'aide à la décision que l'on peut classer en trois types :

- les outils de collecte et d'observation ;
- les outils d'analyse ;
- les outils de prévision.

1.1 Les outils de collecte et d'observation

La DIREN dispose d'un réseau radio de télémesures réparti sur l'ensemble du bassin de la Garonne. Ce réseau comprend un centre situé à Toulouse, 100 stations d'observations, 5 terminaux implantés dans 5 services qui assurent l'annonce des crues sur l'ensemble du bassin de la Garonne.

1.2 Les outils d'analyse

Le bassin supérieur de la Garonne est couvert par 33 stations dont 14 stations d'alarme intégrées dans le règlement d'annonce des crues.

Lors d'une crue, l'analyse des informations collectées par le réseau radio de télémesures durant une journée correspond pour une trentaine de stations à plus de 2 000 données (hauteurs d'eau, pluies horaires et paramètres de fonctionnement des stations). Avec un tel volume d'informations, la mise en évidence des données critiques, qui évoluent dans le temps, devient très délicate.

Pour cela un logiciel a été mis en place afin de visualiser les informations sous forme de synoptiques mis à jour en temps réel. Ces représentations permettent de réaliser des constats à partir d'informations observées pour une analyse rapide et le déclenchement d'alarmes avec la détection de seuils hydrométriques et pluviométriques ou la détection de défauts de fonctionnement des stations.

1.3 Les outils de prévision

Depuis 15 ans, la mise en œuvre de modèles de prévision est automatisée dans le bassin supérieur de la Garonne. En 1982, une procédure a été développée pour introduire automatiquement les données des stations d'annonce de crue dans les modèles, grâce à une liaison entre le central de collecte du réseau radio de télémesures et le calculateur de prévision des crues. Une première étude a été réalisée par P. TASSERY en 1988 dans le but de les insérer dans une procédure de décision multimodèle.

Ces différents modèles, appliqués à 7 stations de prévision parmi les 10 stations (*fig. 2*), qui contrôlent des bassins versants de superficies comprises entre 1 100 et 10 000 kilomètres carrés, sont basés sur des relations linéaires utilisant comme variables les variations de débit (et éventuellement les précipitations). Les échéances de prévision varient de 3 heures à 6 heures. Pour chaque station il existe plusieurs modèles linéaires qui utilisent des variables explicatives différentes, ceci pour assurer une certaine pérennité de la prévision en cas d'absence de données. Les modèles sont de

plusieurs types, que l'on peut ranger en trois classes. Ces classes sont illustrées ici pour le cas de Toulouse où l'échéance de prévision est de 6 heures :

- classe I : les modèles autorégressifs (modèle n° 35)

$$Q_{(t+\Delta t)} = Q_{(t)} + \alpha \Delta Q_{(t, t-\Delta t)}$$

- classe II : les modèles amont-aval (modèles n° 36, 39, 40, 41)

$$Q_{(t+\Delta t)} = Q_{(t)} + \sum_{n=1}^s \alpha_n \Delta Q_{n(t, t-\Delta t)}$$

- classe III : les modèles amont-aval avec prise en compte de la pluie (modèles n° 37, 38)

$$Q_{(t+\Delta t)} = Q_{(t)} + \sum_{n=1}^s \alpha_n \Delta Q_{n(t, t-\Delta t)} + \beta \sum_{m=1}^p \pi_{m(t-\tau)}$$

avec :

Q = débit d'une station en m^3/s , $\Delta Q_{(t, t-\Delta t)}$ = variations de débit entre t et $t - \Delta t$,

t = variable temps pouvant être décalée pour tenir compte des temps de propagation,

$\Delta t = 6$ heures,

α = coefficient calculé lors du calage des modèles,

β = constante calculée ici pour la station de Toulouse,

n, m = indice des stations limnimétriques (1, ... s) et pluviométriques (1, ... p),

π = cumuls horaires de pluie en mm, $\tau = 1, \dots 8$.

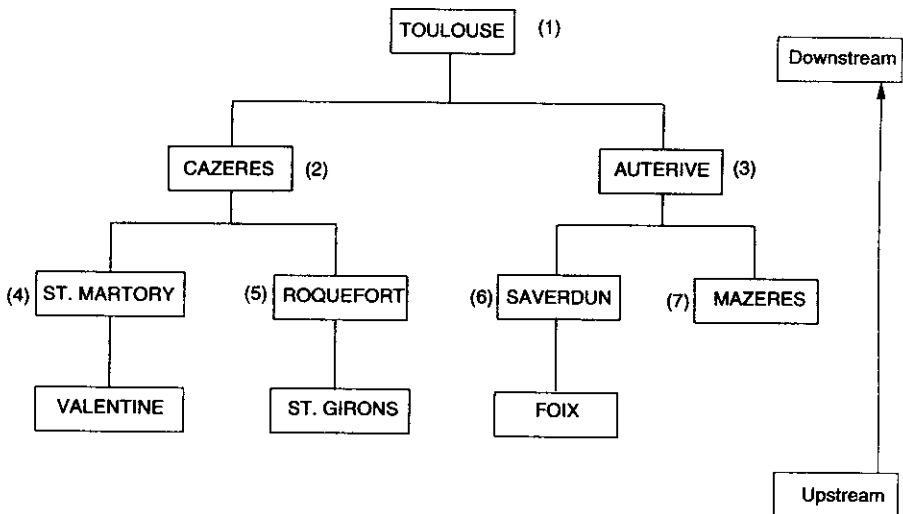


Figure 2 Les stations de prévisions.
Flood forecasting stations.

() Forecast stations

L'efficacité du système repose sur sa simplicité d'utilisation et sur une grande souplesse. Si toutes les procédures nécessaires sont automatiques (mise à jour et critique des données, calcul des prévisions, représentations graphiques..) elles peuvent aussi être activées par le prévisionniste qui maîtrise ainsi l'exécution de toutes les tâches ainsi que l'instant précis où il peut disposer des résultats. Cela étant, le prévisionniste ne dispose pas forcément du temps nécessaire à une analyse complète des conditions hydrologiques, des données collectées et des performances des modèles de prévision.

2 – PRINCIPE DE LA MÉTHODE MULTIMODÈLE

En prévision de crue, la démarche la plus simple consiste à appliquer un modèle préalablement calé et qui utilise les données brutes recueillies si celles-ci sont disponibles. Parmi les sources d'erreurs qui sont susceptibles d'affecter la prévision résultante au-delà de sa performance moyenne, figurent bien évidemment les différentes perturbations sur les données d'entrée (non représentativité de la mesure de la cote, détarage d'une station hydrométrique, erreur de mesure...). Mais il faut également considérer la plus ou moins grande adéquation du modèle de prévision à chaque événement de crue particulier (répartition spatiale des précipitations entre sous-bassins, temps de transferts variables des différents hydrogrammes...).

Pour tenter de remédier à cela, et selon les situations rencontrées, on cherchera par exemple à critiquer les données d'entrée, à adapter un modèle ou à choisir entre plusieurs modèles.

Dans le cadre d'un système de prévision en temps réel exploitant le résultat de plusieurs modèles, la procédure de décision se décompose en deux étapes : le diagnostic et le pronostic.

Pendant la première étape, après analyse de l'ensemble des informations collectées, on détermine les états possibles du système. Un état du système ou configuration correspond à une situation hydrologique et à un ensemble de perturbations sur les données collectées, par exemple : précipitation concentrée sur une partie du bassin et embâcle locale. S'il n'est pas possible de déterminer avec certitude que l'on se trouve dans une configuration donnée, on peut chercher à estimer les probabilités de se trouver dans différentes configurations (parmi un ensemble de configurations discrètes). Un exemple d'une telle analyse a été réalisé par ROCHE et TAMIN (1986) sur le bassin de la Vézère en France.

La deuxième étape établit, à partir de cette analyse, une prévision, en calculant les poids optimaux accordés à chaque modèle en fonction des différentes configurations possibles du système.

Ce système de décision nécessite une étude complète afin de spécifier de façon détaillée les différentes hypothèses envisageables pour l'état du

système, ce qui suppose que toutes les perturbations, et les situations hydrologiques puissent être décrites et modélisées.

Une procédure simplifiée a été développée, ne nécessitant que peu d'ajustement et qui a montré par rapport à la procédure complète des résultats tout à fait comparables (ROCHE et TAMIN, 1987). Une brève description de ces deux approches est faite ci-dessous. On présente d'abord la procédure « complète », dans la mesure où celle-ci intègre un ensemble cohérent de principes, puis la procédure simplifiée dans laquelle la traduction de ces principes est « dégradée ».

2.1 La procédure complète

Le système de prévision peut se trouver dans différentes configurations ou hypothèses de fonctionnement. Nous présentons successivement comment s'établit la prévision à partir d'une configuration déterminée et à partir de plusieurs configurations dont on connaît les probabilités après une étude complète du système de prévision (ROCHE et TAMIN, 1986).

2.1.1 Prévision pour une configuration déterminée

La méthode utilisée a été proposée pour la prévision économique par NEWBOLD et GRANGER (1974). Chaque « modèle » est dans ce cas la prévision émise par un expert. Il s'agit essentiellement d'une combinaison des valeurs prévues par ces divers modèles en utilisant la covariance des écarts de prévision supposée connue.

Soit y , la variable à prévoir et y_k les prévisions fournies par les différents modèles M_k avec $k = 1 \dots m$.

On suppose que les écarts $e_k = y_k - y$ suivent une loi normale de moyenne 0 et de covariance V .

L'estimation optimale de y est la décision d_{opt} qui minimise un critère de proximité à y pris sous forme quadratique et s'écrit :

$$d_{opt} = E(y|y_k) \dots \quad (1.1)$$

(E est l'espérance conditionnelle de y , étant connu l'ensemble des prévisions $\{y_k\}$).

L'application du théorème de BAYES (WINKLER, 1981), en supposant que la loi de distribution de y est diffuse, montre que y suit une loi normale de moyenne M et de variance U .

$$M = \frac{n^t \cdot V^{-1} \cdot Y}{n^t \cdot V^{-1} \cdot n}$$

$$U = \frac{1}{n^t \cdot V^{-1} \cdot n}$$

avec : $n = (1 \dots 1)^t$ et $Y = (y_1 \dots y_m)^t$. On observe que dans tous les cas la variance U est inférieure à la variance du meilleur modèle.

Dans le cas particulier où la matrice de covariance $V = [V_{kl}]$ est diagonale (erreurs non corrélées entre les modèles, V_{kk} étant la variance des erreurs du modèle k), on obtient :

$$U^{-1} = n^t \cdot V^{-1} \cdot n = \sum_{k=1}^m V_{kk}^{-1}$$

soit, pour tout modèle k : $U^{-1} > V_{kk}^{-1}$, ou encore $U < V_{kk}$.

Nous pouvons réécrire l'équation (1.1) sous la forme :

$$d\text{opt}(\{y_k\}) = \sum_{k=1}^m w_k \cdot y_k \tag{1.2}$$

avec :

$$w_k = \frac{\sum_{kl} \alpha_{kl}}{\sum_{kl} \alpha_{kl}}$$

$$\text{et } \{\alpha_{kl}\} = V^{-1}$$

w_k est le poids accordé au modèle k . Le poids dépend non seulement des performances potentielles du modèle k par rapport aux autres modèles, mais aussi des corrélations de ses erreurs avec celles des autres modèles. Ce poids n'est pas a priori borné. On a pu montrer (ROCHE et TAMIN, 1987), que l'on évitait des instabilités numériques sans perte sensible d'optimalité, en limitant V à ses termes diagonaux, c'est à dire en négligeant les corrélations pour ne se consacrer qu'aux variances. Dans ce cas, w_k est bien un terme compris entre 0 et 1.

2.1.2 Prévision pour des configurations de probabilités connues

Soit $p(H_i)$ la probabilité d'être dans une configuration H_i , valeur connue pour toute configuration à un pas de temps donné. On suppose également connues les matrices de covariance V_i . L'estimation de y est représentée par la probabilité composée :

$$p(y / p(H_i), \{y_k\}) = \sum_i p(H_i) \cdot p(y / H_i, \{y_k\})$$

La décision optimale devient alors :

$$d\text{opt} = E(y\{y_k\}, p(H_i)) = \sum_{k=1}^m w_k \cdot y_k \tag{1.3}$$

avec : $w_k = \sum_i p(H_i) \cdot w_k^i$

où w_k^i est le poids qu'aurait le modèle k dans la configuration H_i .

On remarquera que la décision optimale est une combinaison linéaire des décisions prises dans chaque configuration, pondérées par la probabilité de chaque configuration, et non la décision optimale correspondant à la configuration la plus probable. ROCHE et TAMIN (1986,1987) présentent des approfondissements sur l'identification de probabilités attachées à des configurations.

Tout le problème repose sur la détermination des probabilités $p(H_i)$ et l'identification des différentes configurations ; pour répondre aux cas où cette identification n'est pas possible, une procédure simplifiée a été utilisée.

2.2 La procédure simplifiée

Confrontés au problème de pondérer des méthodes de prévision en ignorant la matrice de covariance de leurs écarts, NEWBOLD et GRANGER (1974), MAKRIDAKIS et WINKLER (1983), ont proposé plusieurs procédures empiriques pour estimer de façon récursive les poids accordés aux différentes méthodes. Ces procédures sont basées sur une estimation de la covariance des écarts des modèles durant les derniers pas de temps de façon à réduire au fur et à mesure les poids des modèles dont la qualité se dégrade. Le poids du modèle k à la date t prend alors l'expression suivante, en limitant la matrice de covariance à ses termes diagonaux :

$$w_{kt} = \frac{\left(\sum_{s=t-v}^{t-1} (e_s^k)^2 \right)^{-1}}{\sum_{j=1}^m \left(\sum_{s=t-v}^{t-1} (e_s^j)^2 \right)^{-1}} \quad (1.4)$$

avec : e_s^k : erreur du modèle k à la date s .

v : durée prise en compte pour analyser les écarts de prévision précédents.

Ainsi, le poids de chaque modèle est inversement proportionnel à sa variance d'erreurs, estimée sur les v derniers pas de temps (les poids sont normés, leur somme est égale à 1). Le poids évolue donc bien en fonction de la performance observée sur le modèle, diminuant lorsque cette performance se dégrade. Pour éviter une trop grande sensibilité des poids, qui serait préjudiciable à la continuité de la prévision, l'expression suivante a été retenue pour réactualiser le poids :

$$\hat{w}_{kt} = \beta \cdot \hat{w}_{k, t-1} + (1-\beta) \cdot w_{kt} \quad (1.5)$$

avec β : pourcentage accordé aux poids trouvés au pas de temps précédent.

La transposition au problème posé a été faite en identifiant deux états du système, le premier où tout fonctionne correctement (état normal) qui a servi au calage des modèles et le deuxième alternatif au premier, identifié à partir des derniers pas de temps connus significativement différents de l'état normal. Cette identification de base uniquement sur la performance des modèles et non sur une analyse spécifique de configurations. L'expression (1.5) se réécrit sous la forme :

$$\hat{w}_{kt} = \beta \cdot w_{k,0} + (1-\beta)w_{k,t} \quad (1.6)$$

avec $w_{k,0}$: poids stationnaire (état normal).

$w_{k,t}$: poids évolutif (état alternatif).

β : constante.

Cette relation diffère de l'équation (1.5) dans la mesure où les poids de chaque relation vont se recalculer sur les poids initiaux, c'est-à-dire que l'on accepte que l'influence des données récentes écarte temporairement les poids de leurs valeurs normales.

Pour stabiliser le calcul du poids évolutif, un lissage de l'ensemble des erreurs antérieures et de l'erreur au pas de temps t a été effectué :

$$V_{k,t} = \alpha V_{k,t-1} + (1 - \alpha) e_{k,t}^2 \quad (1.7)$$

avec $V_{k,t}$: variance lissée des erreurs du modèle au temps t .

$e_{k,t}$: erreur du modèle au temps t .

α : constante.

Des valeurs moyennes de α et β ont été adoptées (α et $\beta = 0,5$) car la prévision est peu influencée par la variation de ces valeurs (ROCHE et TAMIN, 1986), (LOUMAGNE *et al.*, 1990).

La prévision finale sera issue de la meilleure combinaison possible des modèles confrontés aussi bien à une information historique que récente.

Par rapport à la procédure complète présentée en 2.1, il y a eu non seulement simplification de la procédure de calcul (matrice de covariance V supposée diagonale...), mais également adaptation empirique des principes initiaux : au lieu de considérer des poids fixes correspondant à des configurations dont la probabilité évolue dans le temps, on considère un poids évolutif pour l'une des configurations (état observé), et un poids fixe pour l'autre configuration (état normal) ; le pourcentage accordé à chacun des poids étant fixé. Ceci résulte de la difficulté qu'il y a à identifier les probabilités de configurations pour lesquelles on appliquerait un poids fixe : en effet, cela nécessite des indicateurs permettant de caractériser l'état du système (hydrologie de la crue et mesure - collecte), mais également des échantillons de données suffisants pour caler la pondération de modèles propre à chaque configuration.

La démarche simplifiée a les avantages suivants (ROCHE et TORTEROTOT, 1988) : elle utilise des modèles de structures variées et qui ne sont pas modifiés, elle valorise les performances des modèles et elle possède un potentiel de réaction à tout type de perturbation instantanée.

Cette démarche ne nécessitant que peu d'ajustements et en tout cas pas la connaissance de tous les types de perturbations, c'est celle que nous avons retenue pour son application au système de prévision en temps réel du bassin supérieur de la Garonne.

3 - ANALYSE DES RÉSULTATS

3.1 Calage de la procédure multimodèle

Pour la mise au point de la méthode nous disposons d'un échantillon de 15 crues historiques (tabl. 1).

Tableau 1 Crues historiques à Toulouse.**Table 1** Historical Floods at Toulouse.

Crue n°	Date	Durée h	Débit max m ³ /s	Cote max m
1	20.05.77	71	3 500	4,32
2	26.05.77	60	1 890	2,99
3	08.07.77	44	1 620	2,72
4	01.02.78	42	2 200	3,27
5	11.06.78	29	1 650	2,75
6	11.01.79	23	1 340	2,43
7	02.01.80	24	1 290	2,38
8	20.12.80	41	1 800	2,90
9	16.01.81	35	2 410	3,46
10	22.01.81	36	1 750	2,85
11	14.12.81	59	1 300	2,39
12	22.03.82	35	1 770	2,87
13	08.11.82	39	1 500	2,60
14	30.09.84	25	1 200	2,27
15	08.05.85	59	1 700	2,80

Dans une étude préliminaire (ROCHE et TORTEROTOT, 1987), les données manquantes avaient été complétées et les données erronées corrigées.

C'est donc tout d'abord sur un échantillon de données critiquées que nous avons appliqué la méthode de pondération multimodèle et calé les différents modèles linéaires élaborés (TASSERY, 1988). Le calage de chaque modèle a été réalisé sur l'ensemble des crues pour lesquelles les données d'entrée nécessaires à ce modèle étaient disponibles. La validation a porté sur les crues survenues depuis l'implantation de la procédure sur le système d'annonce de crues utilisé en temps réel.

C'est ce que nous avons appelé fonctionnement en mode « normal ». Pour vérifier les performances de la procédure face à différentes perturbations caractérisant le fonctionnement hydrologique du bassin supérieur de la Garonne, nous avons utilisé dans un deuxième temps un échantillon simulant des données perturbées.

C'est ce que nous avons appelé fonctionnement en mode « dégradé ». Le calage des modèles et de la méthode de pondération a été effectuée sur l'ensemble des 10 stations de prévision (fig. 2), mais nous ne présentons ici que les résultats de la station aval, la station de Toulouse.

3.1.1 Fonctionnement en mode « normal »

Les résultats des différents modèles et ceux de la méthode de pondération ont été comparés pour les 15 crues historiques. Le tableau 2 présente les écarts quadratiques moyens (en m et m³/s) entre les cotes observées et les cotes prévues à la station de Toulouse, ainsi qu'entre les débits observés et prévus ($\Delta t = 6$ heures). Sur ce tableau, il apparaît que les différents modèles élaborés ont des performances modestes, les résultats les moins bons étant ceux du modèle autorégressif (35) de la classe I.

Tableau 2 Prévision à Toulouse en mode normal - Calage.
 Table 2 Flood forecasting at Toulouse in normal state - Calibration.

Crue	35 Cl. I		36 Cl. II		37 Cl. III		38 Cl. III		39 Cl. II		40 Cl. II		41 Cl. II		Pondération	
	m ³ /s	m	m ³ /s	m	m ³ /s	m	m ³ /s	m	m ³ /s	m	m ³ /s	m	m ³ /s	m	m ³ /s	m
1	504	0,60	270	0,32	-	-	-	-	459	0,54	326	0,39	370	0,44	305	0,36
2	271	0,32	150	0,18	-	-	-	-	127	0,15	187	0,22	196	0,23	151	0,18
3	183	0,22	148	0,18	-	-	-	-	79	0,09	121	0,14	86	0,10	82	0,10
4	431	0,51	198	0,23	-	-	489	0,58	134	0,16	101	0,12	92	0,11	112	0,13
5	367	0,44	158	0,19	212	0,25	192	0,23	132	0,16	169	0,20	153	0,18	167	0,20
6	517	0,61	154	0,18	-	-	138	0,16	116	0,14	184	0,22	143	0,17	121	0,14
7	363	0,43	182	0,19	31	0,04	119	0,14	134	0,16	472	0,56	202	0,24	149	0,18
8	330	0,39	122	0,14	-	-	-	-	77	0,09	122	0,14	71	0,08	283	0,34
9	384	0,46	276	0,33	293	0,35	261	0,31	221	0,26	249	0,30	233	0,28	254	0,30
10	237	0,28	154	0,18	135	0,16	156	0,18	132	0,16	150	0,18	136	0,16	135	0,16
11	178	0,21	56	0,07	117	0,14	64	0,08	40	0,05	59	0,07	57	0,07	52	0,06
12	262	0,31	101	0,12	89	0,11	90	0,11	81	0,10	93	0,11	92	0,11	80	0,09
13	331	0,39	163	0,19	-	-	-	-	238	0,28	267	0,32	164	0,19	123	0,15
14	336	0,40	106	0,13	-	-	105	0,12	101	0,12	123	0,15	166	0,20	187	0,22
15	178	0,21	118	0,14	117	0,14	167	0,20	105	0,12	128	0,15	144	0,17	109	0,13
ECM*	325	0,39	156	0,18	142	0,17	172	0,20	145	0,17	169	0,20	154	0,18	154	0,18

* ECM = Ecart quadratiques entre débits et cotes observés et calculés.

Cl. I = autorégressif.

Cl. II = amont-aval.

Cl. III = amont-aval + pluies.

Pour la classe II (modèles 36, 39, 40 et 41) et pour la classe III (modèles 37, 38), les résultats sont à peu près équivalents. Nous remarquons toutefois que le modèle 39 réalise les meilleures prévisions pour l'ensemble des crues simulées.

L'objectif n'étant pas de mettre au point des modèles de prévision mais une procédure de décision qui sélectionne le ou les meilleurs modèles, nous avons conservé tous ces modèles élémentaires mais satisfaisants pour la mise au point de la méthode de pondération.

En ce qui concerne les résultats de la procédure multimodèle, on remarque (tabl. 2) que les écarts quadratiques sont égaux ou inférieurs aux résultats obtenus par le meilleur modèle (modèle 39) et cela pour presque toutes les crues.

On peut vérifier, que la procédure fait bien une sélection entre les différents modèles en comparant les résultats et en modifiant la confiance (le poids) accordée à chacun d'eux selon la façon dont ceux-ci réagissent. On obtient ainsi la meilleure estimation de la valeur prévue.

3.1.2 Fonctionnement en mode « dégradé »

La pondération multimodèle a été testée face à deux types de perturbations susceptibles d'intervenir en temps réel : les absences de données et les erreurs de mesure.

Les perturbations simulées sont a priori plus fortes que celles auxquelles le système peut être soumis et ne peuvent être traitées que partiellement par des moyens classiques de correction d'écarts. Le tableau 3 donne les résultats, en mode « dégradé », de la comparaison entre le meilleur modèle (le modèle 39) et la méthode de pondération.

La simulation des données manquantes et erronées sur 1/3 de la durée de la crue a été faite aux stations de prévision utilisées par le meilleur modèle (cas a) et aux stations de prévision utilisées par les autres modèles (cas b). Dans le cas a, la pondération confronte le meilleur modèle perturbé aux modèles habituellement moins performants.

Les simulations effectuées avec des données perturbées montrent pour le modèle 39 une dégradation de la prévision de 45 % alors que pour la pondération elle n'atteint que 25 % dans le pire des cas (données erronées cas a). Lorsque la perturbation porte sur les données utilisées par le meilleur modèle, la procédure multimodèle permet de réduire de 50 % la dégradation de la prévision. Les résultats se rapprochent alors des résultats obtenus par les autres modèles.

Dans le cas où la perturbation affecte les autres modèles il n'y a pas de dégradation significative de la prévision. Les résultats en mode « dégradé » montrent l'intérêt de la méthode de pondération face aux erreurs accidentelles qui ne peuvent être corrigées par un traitement d'écarts réglé sur des erreurs régulières et persistantes. En effet, la correction effectuée alors ne correspondrait pas à la cause de l'écart et l'erreur initiale pourrait même être aggravée, en introduisant des oscillations dans la prévision.

Grâce à sa composante stationnaire et à sa composante évolutive, la procédure peut faire face non seulement aux erreurs persistantes et régulières mais aussi aux erreurs accidentelles.

Tableau 3 Prévision à Toulouse en mode dégradé - Calage.

Table 3 Flood forecasting at Toulouse with data perturbation - Calibration.

Modèle		Pondération								
39 Cl. II		Données erronées					Données manquantes			
Crue	D. erronées		a		b		a		b	
n°	m ³ /s	m	m ³ /s	m	m ³ /s	m	m ³ /s	m	m ³ /s	m
1	746	0,88	350	0,41	248	0,29	261	0,31	342	0,41
2	303	0,36	231	0,27	172	0,20	177	0,21	154	0,18
3	106	0,13	96	0,11	100	0,12	79	0,09	92	0,11
4	143	0,17	117	0,14	118	0,14	116	0,14	108	0,13
5	351	0,42	257	0,30	165	0,20	176	0,21	167	0,20
6	130	0,15	122	0,14	127	0,15	121	0,14	119	0,14
7	260	0,31	213	0,25	150	0,18	146	0,17	146	0,17
8	270	0,32	291	0,34	288	0,34	287	0,34	283	0,34
9	344	0,41	310	0,37	249	0,30	270	0,32	234	0,28
10	241	0,29	194	0,23	143	0,17	142	0,17	153	0,18
11	120	0,14	83	0,10	56	0,07	55	0,07	52	0,06
12	182	0,22	129	0,15	93	0,11	85	0,10	77	0,09
13	327	0,39	174	0,21	172	0,20	120	0,14	218	0,26
14	247	0,30	234	0,28	194	0,23	233	0,28	191	0,23
15	180	0,21	126	0,15	106	0,13	115	0,14	97	0,11
EOM*	264	0,31	195	0,23	158	0,19	159	0,19	162	0,19

* EOM : écart quadratique moyen entre débits et cotes observés et calculés.

D'autre part, en accordant autant d'importance à la dernière erreur du modèle qu'aux erreurs antérieures, la procédure présente une certaine inertie évitant ainsi les oscillations.

Soulignons que la procédure multimodèle ne peut présenter un intérêt réel que si les différents modèles considérés utilisent des ensembles différents de données d'entrée, et s'ils réagissent de façons différentes à différentes situations hydrologiques. L'adaptabilité de la procédure repose sur la diversité de ses modèles.

3.2 Validation de la procédure

Depuis sa mise en place en 1989, la procédure multimodèle a pu être testée sur plusieurs crues, ce qui a permis de vérifier ses bonnes performances sur les événements suivants :

- 1) crue de février 90 1,71 m à Toulouse
- 2) crue de mai 90 2,17 m à Toulouse
- 3) crue de mai 91 3,10 m à Toulouse
- 4) crue de juin 92 3,00 m à Toulouse

- 5) crue d'octobre 92 3,57 m à Toulouse
- 6) crue de novembre 92 2,37 m à Toulouse

Cet échantillon est compris entre une période de retour annuelle pour la plus faible et une période de retour de 8 à 10 ans pour la plus forte.

3.2.1 Fonctionnement en mode « normal »

Pour l'ensemble des crues chaque modèle a donné des écarts quadratiques moyens entre cotes observées et prévues (en m) qui sont reportés sur le tableau 4. L'analyse des écarts quadratiques a été faite sur l'ensemble des observations (entre 150^{es} et 180 heures) comprenant la phase de crue et de décrue et sur l'hydrogramme de crue correspondant à la période de variation forte des débits. Le tableau 4 montre bien la performance des modèles dans la phase de crue.

Tableau 4 Prévision à Toulouse en mode normal - Validation.

Table 4 Flood forecasting at Toulouse in normal state - Validation.

Modèles	Crue de mai 91		Crue de juin 92		Crue d'octobre 92		Crue de novembre 92	
	Ens. échant.	Hydr. crue	Ens. échant.	Hydr. crue	Ens. échant.	Hydr. crue	Ens. échant.	Hydr. crue
35 Cl. I	0,19	0,25	0,18	0,26	0,17	0,40	0,12	0,12
36 Cl. II	0,10	0,13	0,10	0,14	0,11	0,11	0,06	0,06
37 Cl. III	0,09	0,09	0,15	0,18	0,10	0,10	0,05	0,05
38 Cl. III	0,08	0,09	0,12	0,15	0,08	0,09	0,05	0,05
39 Cl. II	0,12	0,16	0,10	0,14	0,11	0,14	0,04	0,06
40 Cl. II	0,10	0,13	0,10	0,14	0,11	0,12	0,06	0,06
41 Cl. II	0,10	0,13	0,11	0,15	0,10	0,11	0,05	0,06
Pondér.	0,09	0,12	0,09	0,12	0,09	0,10	0,05	0,05

Ecarts quadratiques entre cotes observées et calculées :

- Cl. I = autorégressif ;

- Cl. II = amont-aval ;

- Cl. III = amont-aval + pluies ;

- Pondération : méthode de pondération multimodèle.

a) Performance des modèles :

Le modèle autorégressif (classe I) est performant tant qu'il n'y a pas de variation sensible de la courbure de l'hydrogramme. Dans ces zones les poids de ce modèle rivalisent avec les poids des modèles ayant plus de variables explicatives (classe II). Les autres modèles sont beaucoup plus performants dès que l'on tente de prévoir l'hydrogramme de crue. Dans le domaine de l'annonce des crues il est important de disposer de modèles prenant bien en compte les variations rapides de montée des eaux et les changements de courbure de l'hydrogramme.

Les performances des modèles des classes II et III sont très proches, sauf quand la crue est caractérisée par des forts apports intermédiaires, dans ces cas-là les modèles de la classe III participent pour une large part à la

détermination de la prévision pondérée. En effet ce sont les seuls modèles à utiliser des informations pluviométriques sur la partie aval du bassin.

b) Performance de la procédure multimodèle :

Sur le tableau 4 on peut également constater que la procédure multimodèle donne de meilleures prévisions que celles obtenues avec le meilleur modèle. L'analyse graphique de la crue d'octobre 92 (fig. 3) vient confirmer ces résultats. Ceci met en évidence la performance du processus de pondération des modèles et l'amélioration apportée par la critique des données en temps réel.

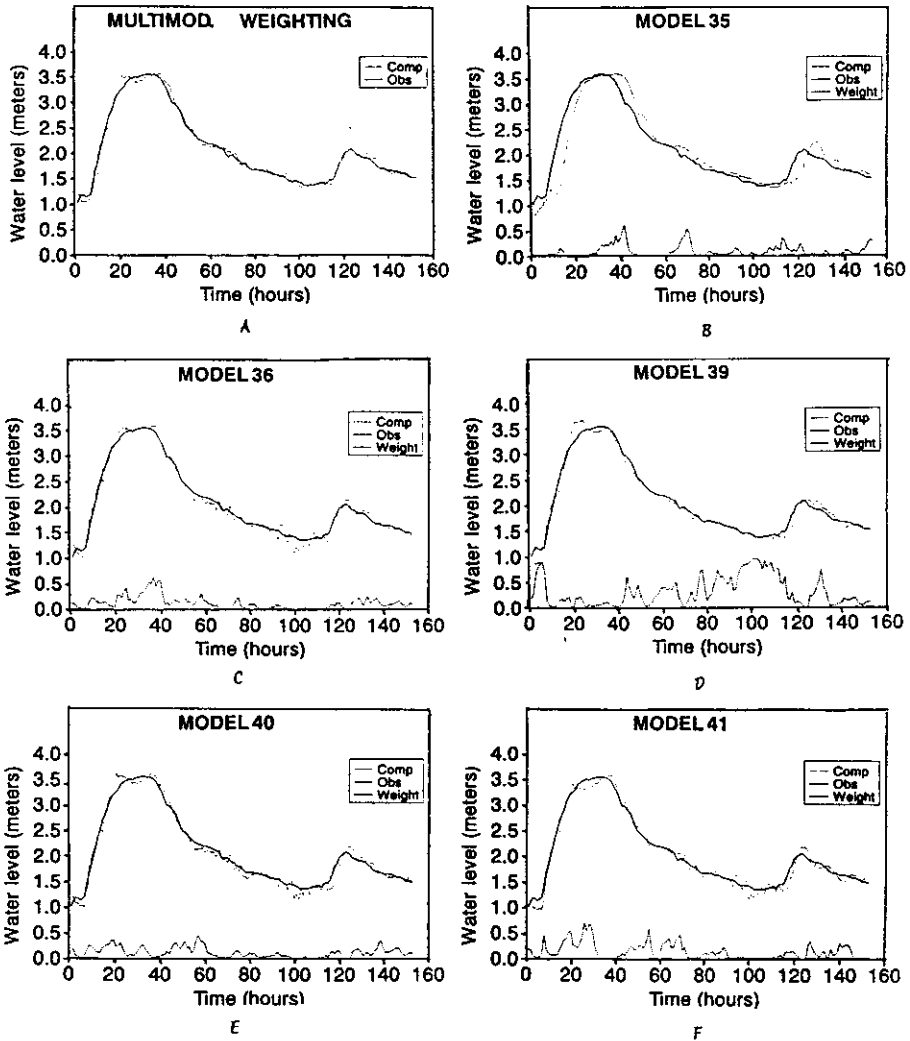


Figure 3 Prévision à Toulouse. Crue d'octobre 92.
Flood forecasting at Toulouse. Flood of october 92.

Sur la crue d'octobre 92 par exemple (*fig. 3d*) le poids accordé au modèle 39 chute dès que l'on se trouve dans la phase de montée de crue ou au débit de pointe, alors que les prévisions faites par ce modèle sont pourtant très correctes quoique moins bonnes cependant que celles du modèle 41 qui donne d'excellents résultats pendant ces deux phases. Ce point met en évidence la performance de la procédure et sa finesse de sélection entre chacun des modèles par les poids évolutifs.

Par ailleurs, pour ce même épisode, les résultats du modèle 35 (*fig. 3b*) présentent un décalage dans le temps important par rapport aux observations. Ce modèle participe pourtant au calcul de la prévision pondérée et ce n'est que tardivement que le poids accordé à ce modèle diminue. Cette inertie présente l'avantage d'éviter une nervosité trop grande du système. En effet, la procédure combinant poids évolutif et stationnaire pour chaque modèle intègre autant l'information historique que récente et présente donc l'avantage de ne pas surestimer des inadéquations du modèle liées à un seul événement ou à une seule phase de crue.

Enfin les phénomènes d'oscillation numérique constatés généralement avec des procédures de correction en temps réel ne sont pas observés ici. La figure 3a confirme ceci : les oscillations observées sur la prévision des modèles 36, 40, 41 principalement durant la décrue (*fig. 3c, e, f*) sont uniquement liées aux manœuvres de barrages situés à l'amont de la station de Cazères. Les modèles 35 et 39 ne présentent pas ce type d'oscillations car ils n'utilisent pas l'information de cette station. La procédure multimodèle tient compte de ces perturbations en donnant aux poids évolutifs des modèles 35 et 39 plus d'importance qu'à ceux des autres modèles.

3.2.2 Fonctionnement en mode « dégradé »

La majorité des anomalies auxquelles devait faire face la procédure multimodèle ont été observées durant ces crues : absence de données et inadéquation des modèles pour une situation hydrologique particulière (manœuvre de barrage par exemple). Face à ces perturbations la procédure multimodèle n'a pas été mise en défaut. Par contre des erreurs de mesure n'ont pas été observées.

Afin de tester la perturbation apportée par une anomalie de mesure de la station amont, nous avons introduit un décalage de 1 mètre sur les hauteurs d'eau durant 5 heures à la station amont de Cazères au début du temps de montée de la crue. La figure 4 et le tableau 5 (cas n° 1) montrent les résultats obtenus : la prévision pondérée s'écarte de la réalité, dans une proportion bien inférieure à l'erreur engendrée. Mais au bout de 8 heures, l'écart est réduit, d'autres modèles n'utilisant pas Cazères (modèles 35 et 39) prennent le relais. La répartition des poids est très explicite (*tabl. 5 et fig. 4b,d*).

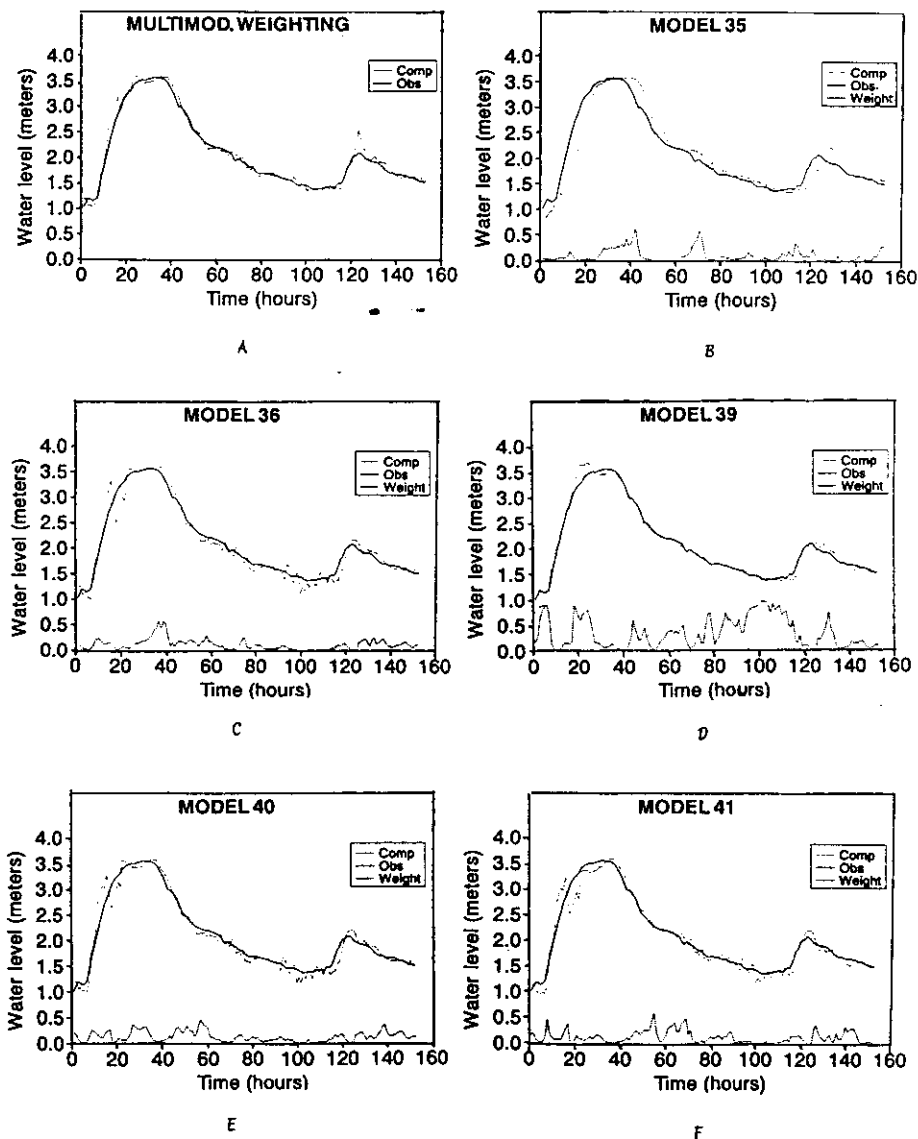


Figure 4 Prévision à Toulouse en mode dégradé 1. Crue d'octobre 92.

Flood forecasting at Toulouse with data perturbation 1. Flood of october 92.

Un deuxième test (*tabl. 5 cas n° 2*) a consisté à simuler le blocage d'un capteur de mesure en début de crue sur une station en amont de Cazères. La figure 5 confirme le bon fonctionnement de la procédure multimodèle. En effet, l'écart entre la cote observée et la cote erronée dépasse 2,50 m alors que l'écart entre cote observée et prévue par la pondération est seulement de 0,50 m. On peut espérer qu'en période de crise, un prévisionniste

expérimenté effectuerait des corrections permettant de réduire l'erreur de prévision à une valeur inférieure à 0,50 m mais, on estime qu'avec un système de prévision traditionnel, plusieurs heures se seraient écoulées avant que le prévisionniste ait pu réagir. L'alerte aurait été lancée avec beaucoup de retard.

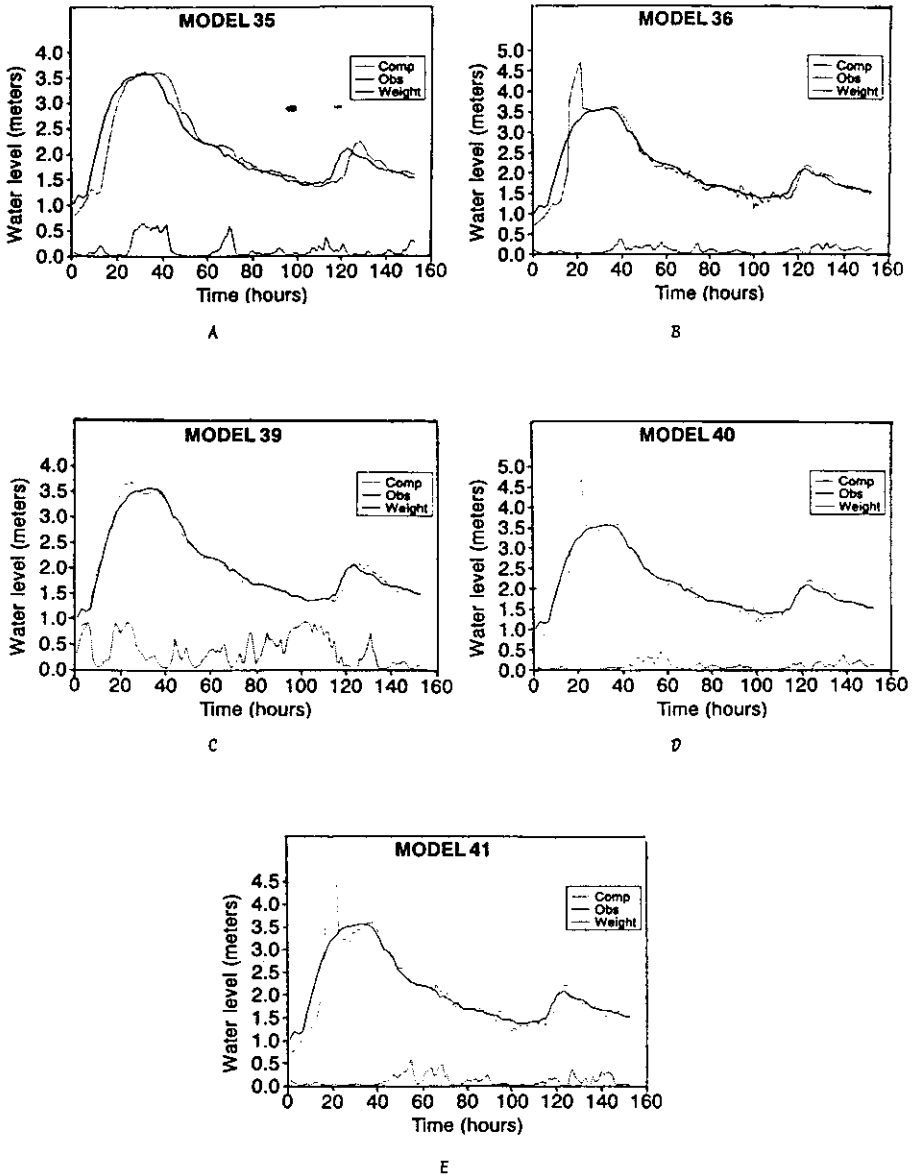


Figure 5 Prévision à Toulouse en mode dégradé 2. Crue d'octobre 92.

Flood forecasting at Toulouse with data perturbation 2. Flood of october 92.

Tableau 5 Prévision à Toulouse en mode dégradé - Validation.

Table 5 Flood forecasting at Toulouse with data perturbation - Validation.

Crue d'octobre 92 avec simulation d'erreur				
Cas n° 1			Cas n° 2	
Modèles	Ensemble échantillon	Hydrogramme de crue	Ensemble échantillon	Hydrogramme de crue
35 Cl. I	0,27	0,40	0,23	0,40
36 Cl. II	0,17	0,24	0,27	0,51
37 Cl. III	0,14	0,18	0,24	0,55
38 Cl. III	0,13	0,16	0,45	0,37
39 Cl. II	0,11	0,14	0,19	0,34
40 Cl. II	0,14	0,20	0,27	0,50
41 Cl. II	0,15	0,22	0,24	0,44
Pondération	0,11	0,13	0,17	0,30

Cl. I = autorégressif.

Cl. II = amont-aval.

Cl. III = amont-aval + pluies.

Pondération : méthode de pondération multimodèle.

Ecart quadratique entre cotes observées et calculées.

CONCLUSION

Les résultats obtenus par la procédure de pondération multimodèle depuis son implantation dans un système de prévision montrent que c'est un outil privilégié de la décision en temps réel.

Le prévisionniste a maintenant à sa disposition une série de modèles de structures variées utilisés de façon optimale par la procédure et ceci à chaque nouveau pas de temps.

Cette méthode se contente de modifier la confiance accordée aux modèles selon la façon dont ceux-ci réagissent.

Par ailleurs, cette approche permet de traiter de façon très satisfaisante tout type de perturbation et notamment les erreurs accidentelles mettant en défaut les autres systèmes de prévision.

Du fait de sa composante évolutive, cette technique réagit rapidement aux aléas des mesures sans introduire les oscillations observées avec les traitements automatiques d'erreur.

Cette méthode peut s'appliquer à tout type de bassin à condition que soient exploités plusieurs modèles de prévision utilisant différentes combinaisons d'indicateurs télétransmis, afin d'assurer à la fois une certaine redondance et une certaine complémentarité entre les diverses sources de données.

Grâce à la simplicité de sa mise en œuvre et à son efficacité la procédure de pondération multimodèle est actuellement en cours d'adaptation à d'autres systèmes de prévision français. La généralisation des systèmes automatiques justifie la mise en place de ce type de procédure. Par ailleurs, la gestion de réseaux importants de collecte de données comme celui de la Garonne demande la mise en place d'outils d'aide à la décision très performants et fiables. Pour un prévisionniste expérimenté, la gestion de crue en période de crue s'en trouve très améliorée.

REMERCIEMENTS

Les différents travaux de recherche du CERGRENÉ présentés ici ont bénéficié de soutiens du Ministère délégué chargé de l'Environnement (Service de la Recherche, des Etudes et du Traitement de l'Information sur l'Environnement, Service de l'Eau) et de la DIREN Midi Pyrénées. Nous tenons à remercier les différentes personnes qui ont contribué à ces résultats, en particulier Claude MICHEL (mis à disposition par le CEMAGREF), Ricaurte LEONETT et Pascal TASSERY, ainsi que les relecteurs de cet article pour les améliorations qu'ils nous ont permis d'y apporter.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CAVADIAS G., MORIN G., 1985. « Amélioration des performances des modèles hydrologiques par combinaison des débits simulés ». *Rev. Int. Sci Eau*, 1, n° 1/4, 29-35.
- KITANIDIS P.K., BRAS R.L., 1980. Adaptive filtering through detection of isolated transient errors in rainfall-runoff models. *Wat. Res. Res.*, 16, 4, 740-748.
- LEBOSSÉ A., MIQUEL J., 1985. Annonce des crues du Cher. Mise au point des formules de prévision. Rapport EDF. E43/84.37, Chatou.
- LOUMAGNE C., LEONETT R., MICHEL C., VIDAL J.J., FELIU C., 1990. Mise en œuvre opérationnelle d'une prévision multimodèle de crue. Rapport CERGRENÉ, SHC GARONNE, 58p.
- MAKRIDAKIS S., WINKLER R.L., 1983. Averages of forecasts: Some empirical results, *Manag. Sci.*, 29.
- NEWBOLD P., GRANGER C.W.J., 1974. Experience with forecasting univariate time series and the combination of forecasts. *J.R. Statist. soc. A.*, 137,131-165.
- ROCHE P.A., TAMIN R., 1986. Procédures de décision multi-modèles applicables à la prévision des crues en temps réel. CERGRENÉ, ENPC, Noisy-le-Grand, 86 p., ann.
- ROCHE P.A., TAMIN R., 1987. La combinaison de modèles : un moyen de limiter l'impact des perturbations en prévision des crues. *Rev. Inter. Sci. Eau*, 3, n° 2, p. 57-65.

- ROCHE P.A., TORTEROTOT J.P., 1987. Prévision des crues sur la Garonne supérieure : conception d'une procédure multimodèle. CERGRENE, ENPC, Noisy-le-Grand, 67 p., ann.
- ROCHE P.A., TORTEROTOT J.P., 1988. Les procédures de décision en temps réel pour la prévision des crues. La Houille Blanche, n° 5/6, 399-409.
- SERVICE HYDROLOGIQUE CENTRALISATEUR DE LA GARONNE, 1978. Étude de prévision des crues dans le bassin supérieur de la Garonne. Toulouse, 35 p.
- TASSERY P., 1988. Mise au point d'une procédure multi-modèle de prévision des crues sur le bassin supérieur de la Garonne. CERGRENE, ENPC, Noisy-le-Grand, 50 p.
- VERNOS D., 1982. Application des modèles stochastiques dynamiques linéaires à la description et à la simulation des processus de débits des rivières aux échelles saisonnières et journalières. Etude de leur utilisation en prévision de la gestion des ressources en eau. Thèse Doct. 3^e cycle, Université PARIS VI.
- WINKLER R.L., 1981. Combining probability distribution from dependent information sources. *Management Sciences*, 27, 479-488.