

Prévision de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H. Adaptabilité aux incertitudes sur la pluie

Flood forecasting with the GR3H conceptual rainfall-runoff model. Adaptability to rainfall uncertainties

P. FOURMIGUÉ*, J. LAVABRE

Reçu le 7 avril 2004, accepté le 27 septembre 2004**.

SUMMARY

Flood forecasting in small watersheds (some hundreds of km²) has to take into account rainfall. This is why the lumped conceptual rainfall-runoff GR3H model (Cemagref) has been adapted for the French flood forecasting services for operational use. However, the relevance of forecasting is strongly conditioned by the knowledge of real rainfall on the drainage basin. This information, estimated by rain gauge measurements or meteorological radar, contains numerous quantitative and sometimes temporal uncertainties. In this study, we tested the influence of these uncertainties on the behaviour of the GR3H forecasting model.

In the GR3H model, the input is the hourly rainfall on the watershed and the output is the hourly flow at the outlet. The production function uses one parameter (A), which represents the higher soil reservoir level. The transfer function uses two parameters: B (the maximal capacity of transfer reservoir) and C (the base time of unit hydrographs HU1 and HU2). In a discontinuous event mode, we have to add an additional parameter S0/A, the initial level of soil reservoir A. For each event, it represents the initial hydrological state of the basin. When used as a forecasting model, A, B and C values are fixed. Thus, to adapt the GR3H model for operational forecasting, we used an optimization process to select the S0/A value. At every moment, this process looks for the S0/A value that makes the calculated discharge equal to the known discharge.

To test the impact of rainfall signal perturbations on our forecasting process, we worked on a theoretical flood. Its hydrograph was simulated using the GR3H model from a basic rainfall signal with a constant intensity of 10 mm/h over 12 h. The parameters (A = 400 mm, B = 80 mm, C = 6 h) came from a study of 16 flood events, in a basin of 215 km², located in the French

Cemagref, Le Tholonet, BP 31, F-13612 Aix-en-Provence Cedex 1, France.

Téléphone : 04 42 66 99 10 - Télécopie : 04 42 66 88 65 - E-mail : patrick.fourmigue@cemagref.fr, jacques.lavabre@cemagref.fr

* Correspondance : patrick.fourmigue@cemagref.fr

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 28 février 2006.

Pyrenees. To initialize the reservoir levels, base runoff was $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (for reservoir B) and $S0/A$ was fixed at 0.65 (for reservoir A). As an operational scenario, we worked without a precipitation forecast (null future rainfall hypothesis); thus, the forecast time was limited to half the C value, i.e. 3 h, due to the parabolic pattern of the unit hydrograph HU1. To quantify forecast performances, we used the persistence index, which compares the studied model with an inert model (i.e., future is equal to present). We tested successively three kinds of perturbations on rainfall signal:

- 1) the variability (max 50%) of the hourly rainfall intensity, over 50 simulations, preserving the total sum of rainfall;
- 2) the variability (max 50%) of the total sum of rainfall, over 11 cases, preserving a constant intensity (from 5 to 15 mm/h) and
- 3) shifting the beginning time of rainfall, over 7 cases from -3 h to $+3 \text{ h}$.

For each kind of perturbation, we considered two forecasting protocols: first a non-operational protocol in which the initial state is known *a priori* (fixing $S0/A$); and second as in operational situations, in which the initial state is unknown (optimizing $S0/A$). We demonstrated that our optimization updating process was rather well adapted to balance the quantitative variability of rainfall. On the other hand, it was not effective to balance an important temporal shift in rainfall. Indeed, in the GR3H model, the temporal parameter (C) is independent from production parameters (A, B and $S0/A$). To solve this problem we used a multi-model procedure (PMM), i.e., a linear weighting method of results from different forecasting models. The weight of each variable depends on the relevance of the past forecast. We combined three different GR3H models with the same A and B values and different C values (4 h, 6 h and 8 h). This method gave better results but we observed some forecasting instabilities. To solve this problem, we used a multi-time PMM. To improve the 3 h time forecast, we also considered the performances of short-term forecasts (1 h and 2 h). We tested GR3H forecasting over ten French watersheds, using from 12 to 25 events. Results were rather interesting, except when the rainfall signal was not representative of the real spatio-temporal variability (e.g., thunderstorms or basins that were too large). In these cases, semi-distributed models should be useful.

A priori, our conclusions were focused on the GR3H model and our updating procedure. However, we propose that they could be similar for other hydrological global models, which use reservoirs and few parameters, offering some inertia and stability to the system. To conclude, when the GR3H was able to model the hydrological behaviour of a small watershed, forecasts were not strongly influenced by quantitative imprecision in the rainfall signal, as long as this imprecision did not greatly affect the beginning and, mainly, the end of the rainy episode.

Keywords: flood forecasting, GR3H rainfall-runoff model, rainfall, uncertainty, variability, multi-models procedure.

RÉSUMÉ

La prévision des crues des petits bassins versants, avec un modèle pluie-débit, est fortement conditionnée par la connaissance de la pluie. Cette information, estimée par des mesures de pluviographes ou de radar, est entachée de nombreuses incertitudes.

Les services français de prévision des crues disposent maintenant d'une version du modèle conceptuel pluie-débit GR3H, adaptée à la prévision opérationnelle. Il utilise une procédure d'optimisation d'un seul paramètre, le niveau initial du réservoir-sol.

On a voulu tester le comportement de ce modèle, face à différentes perturbations du signal pluie de base. L'hydrogramme de notre crue de référence a été préalablement simulé avec GR3H.

On a montré que le modèle est capable d'absorber d'importantes variations du signal pluie, mais seulement si l'origine et la fin de l'épisode pluvieux sont respectés. Sinon, pour compenser un décalage temporel entre pluie et débit, on a combiné plusieurs modèles GR3H à temps de réaction différents, avec une procédure multimodèles simplifiée. Enfin, pour éviter quelques instabilités, on a testé une variante baptisée « multidélaïs » qui a permis d'apporter un gain supplémentaire sur la qualité de la prévision.

Mots clés : prévision des crues, modèle pluie-débit GR3H, pluie, incertitude, variabilité, procédure multimodèles.

1 - INTRODUCTION

Sur les bassins versants d'une superficie inférieure à quelques centaines de km², l'utilisation de l'information pluie et d'un modèle de transformation en débit s'impose pour faire des prévisions de crue. L'essentiel de l'information qui va permettre d'anticiper les débits repose sur la connaissance de la pluie sur le bassin versant. Cependant, cette information issue d'une moyenne des mesures de pluviographes ou d'une estimation radar est entachée d'incertitudes (ANDRIEU *et al.*, 1997 ; MIMOUNI *et al.*, 2001). Cette mesure est souvent bruitée, sur ou sous-estimée (appareil mal situé ou mal calé), décalée temporellement (répartition spatio-temporelle, voire de banals problèmes d'horodatage entre les enregistrements de pluie et de débit). Quant à la pluie future, elle reste encore très mal approchée.

Le modèle conceptuel pluie-débit GR3 du Cemagref (EDIJATNO & MICHEL, 1989) est largement reconnu, notamment en reconstitution d'événements en temps différé. Une adaptation pour la prévision opérationnelle, au pas de temps horaire, vient d'être mise à disposition des services de prévision des crues en France sur la plate-forme logicielle SOPHIE.

On s'interroge dans cet article sur la capacité du modèle de prévision à gérer ces incertitudes du signal pluie. Le travail a consisté à tester le comportement du modèle en prévision, face à différentes perturbations du signal pluie, sur la base d'une crue de référence simple. On s'est placé en situation « temps réel » pour utiliser le modèle. Ainsi, à chaque instant de prévision, l'adaptation du modèle est effectuée selon différentes modalités. On s'est d'abord limité à l'optimisation d'un seul paramètre puis on a introduit la procédure multimodèle (ROCHE & TAMIN, 1986), outil déjà disponible sur SOPHIE. Une variante « multi-délaïs » lui a enfin été apportée pour valoriser les prévisions fournies à plusieurs échéances.

2 – LE MODÈLE PLUIE-DÉBIT ET LES HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

2.1 Le modèle GR3H

Le modèle pluie-débit GR3H (GR pour Génie Rural, 3 pour son nombre de paramètres, H pour Horaire) développé au Cemagref est de type conceptuel (ARNAUD, 1997). Le signal d'entrée est la pluie horaire sur le bassin et le signal de sortie le débit horaire à l'exutoire (figure 1). Il dérive directement du modèle GR3J, fonctionnant au pas de temps journalier (EDIJATNO *et al.*, 1999).

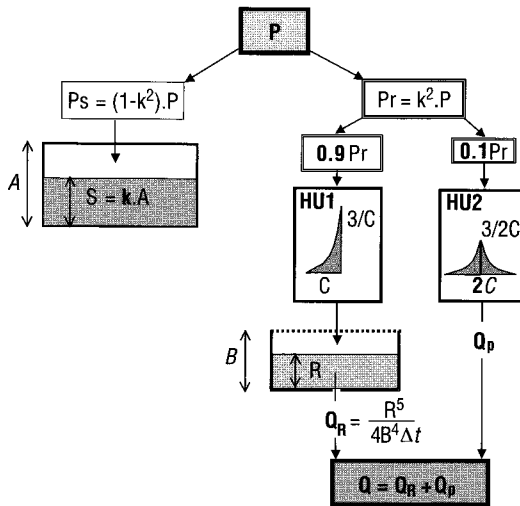


Figure 1 Schéma du modèle pluie-débit GR3H.
Diagram of the GR3H rainfall-runoff model.

Le fonctionnement du bassin versant est décrit par :

- une fonction de production à un paramètre A (niveau maximal du «réservoir-sol»). Cette fonction assure la transformation de la pluie brute P en pluie nette P_r . La différence P_s est stockée définitivement dans le réservoir A et ne participe pas à l'écoulement (en mode continu, un terme d'évapotranspiration permet sa vidange). Le niveau du réservoir est noté S ;

- une fonction de transfert définie par deux paramètres : B (capacité maximale d'un réservoir de routage, dont le niveau est noté R) et C (temps de montée des hydrogrammes unitaires HU1 et HU2). Cette fonction de transfert assure la transformation de la pluie nette P_r en débit Q à l'exutoire, avec un retard (apporté par C) et un étalement dans le temps (assuré par le réservoir B, dont le rôle de stockage permet d'assurer la décrue).

Le fonctionnement du modèle GR3H en mode événementiel (i.e. discontinu dans le temps) nécessite l'initialisation, en début de crue, des niveaux des réservoirs A et B :

- pour B : le niveau R0 est directement déduit de la valeur du débit initial Q0 ;
- pour A : le niveau S0 est un paramètre supplémentaire propre à chaque événement, théoriquement fonction des antécédents pluviométriques. On l'utilisera par la suite sous la forme d'un taux de remplissage noté $S0/A \in [0;1]$. Il représente l'état hydrique du bassin avant la crue. Enfin, l'évapotranspiration est négligée en mode événementiel.

Pour l'utilisation en prévision, on a fait le choix de garder constants les paramètres A, B et C, issus d'un calage préalable sur un échantillon de crues observées et considérés comme représentatifs d'un bassin versant donné. Ainsi, l'adaptation du modèle GR3H à la prévision « mode opérationnel » ne repose que sur le seul paramètre S0/A.

2.2 La crue de référence

Pour confronter notre procédure de prévision des crues à des perturbations du signal pluie, nous avons préféré travailler sur une crue théorique de référence, générée au préalable par le modèle GR3H. Ceci est justifié par le fait que nous ne cherchons pas à reproduire une crue réelle (ce que le modèle fait généralement très correctement) mais à tester les capacités du modèle à compenser les perturbations du signal pluie.

Notre hydrogramme de référence est obtenu par la transformation d'un signal pluie de base, dont l'intensité est constante à 10 mm/h pendant 12 heures. Le modèle GR3H est paramétré avec $A = 400$ mm, $B = 80$ mm et $C = 6$ h et initialisé par un débit de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ et $S0/A = 0,65$. Ces valeurs sont reprises d'un calage effectué sur 16 crues de l'Arize à Mas d'Azil, un bassin pyrénéen de 215 km^2 (FOURMIGUÉ & LAVABRE, 2001).

La crue, ainsi générée (figure 2) par la modélisation GR3H avec ce paramétrage, a les caractéristiques suivantes :

- 63 mm de pluie nette pour 120 mm de pluie brute ;
- 39 mm de lame d'eau écoulée durant la crue, le surplus de 24 mm de pluie nette restant stocké dans le réservoir B en fin de crue ;
- débits horaires : $245 \text{ m}^3/\text{s}$ en pointe et $58 \text{ m}^3/\text{s}$ en fin de crue.

2.3 Le délai de prévision et le critère de persistance

On se place en situation « sans prévision de pluie », cas le plus courant en opérationnel. L'utilisation de scénarios de pluie future (DATIN, 1998 ; LARDET & OBLED, 1994) reste encore délicate car elle conduit à un trop large éventail des possibles. On a donc préféré travailler avec une pluie à venir nulle et le délai de prévision est alors limité par le temps de réaction du bassin. Ceci apparaît clairement figure 2-a, où les courbes de débits « prévus » sont obtenues avec l'hypothèse de pluie à venir nulle et en supposant S0/A connu a priori (situation de « prévision » non opérationnelle). Pour les délais de prévision de plus de 4 heures, l'écart entre les débits prévu et de référence devient notable.

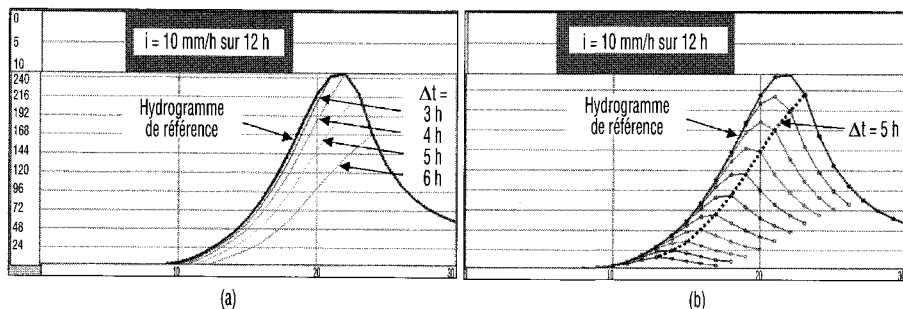


Figure 2 Crue de référence et prévisions avec tous paramètres connus et pluie à venir nulle :
 (a) courbes de débits prévus à des délais de 3, 4, 5, 6 h ;
 (b) traces de prévision à des délais de 1 h à 9 h.
Reference flood and forecasts with all known parameters and null future rainfall:
 (a) forecasted discharges curves for times of 3, 4, 5, 6 h ;
 (b) forecasted hydrographs for times from 1 h to 9 h.

On note figure 2-b, que l'hydrogramme prévu ne croît que pendant les 4 heures à venir. Aussi, pour des délais supérieurs à 3 h, le débit prévu devient nettement inférieur au débit de référence. En effet, la fonction analytique parabolique adoptée pour l'hydrogramme unitaire HU1 du modèle GR3H (cumul de $q(t) = t^3/C^3$) est telle que 12,5 % de la pluie nette horaire sont reportés sur les C/2 premières heures et 87,5 % sur les C/2 heures suivantes, comme le montre la figure 3 établie pour une valeur de C de 6 h. Ainsi, en sortie de l'hydrogramme unitaire, le débit futur à 3 h est expliqué à 87,5 % par de la pluie connue à l'instant de prévision et à 12,5 % par de la pluie à venir. Au-delà du délai C/2, le poids de la pluie à venir croît rapidement (30 % à 4 h) pour devenir prépondérant (58 % à 5 h).

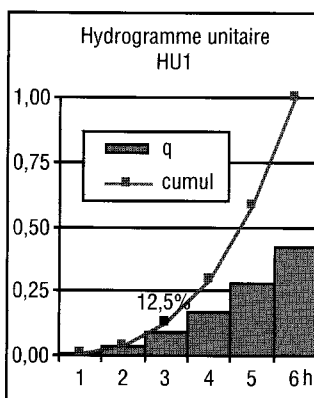


Figure 3 Hydrogramme unitaire de GR3H pour C = 6 h (histogramme et cumul).
GR3H unit hydrograph for C = 6 h (histogram and integral).

On mesure ici tout l'intérêt d'une prévision fiable de pluie à courte échéance, qui permettrait d'augmenter d'autant le délai de prévision.

Pour quantifier la qualité d'une prévision au délai Δt , on utilise le Critère de Persistance (KITADINIS & BRAS, 1980). Noté $CP_{\Delta t}$, il est calculé comme suit :

$$CP_{\Delta t} (\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\sum [Q_{\text{Prévu}}(t + \Delta t) - Q(t + \Delta t)]^2}{\sum [Q(t) - Q(t + \Delta t)]^2} \right) \quad (1)$$

où :

- les sommes sont calculées sur tous les instants de prévision t ;
- $Q(t)$ est le débit de référence, aux instants t et $t + \Delta t$;
- $Q_{\text{Prévu}}(t + \Delta t)$ est le débit prévu, à l'instant t , pour le temps $t + \Delta t$;

Ce critère compare l'erreur de prévision avec l'accroissement du débit. S'il est positif, le modèle testé est meilleur que le modèle « inerte » ou « naïf » (W.M.O., 1983 ; YANG, 1993) qui prévoit que « le débit à venir dans un délai Δt est égal au débit observé à l'instant présent ». Si la courbe de débit prévu est une simple translation de Δt de l'hydrogramme de référence, alors $CP = 0$.

Pour notre crue de référence, les valeurs des critères de persistance $CP_{\Delta t}$ (tableau 1) confirment que la non connaissance de la pluie future a un faible impact sur les prévisions, jusqu'à un délai de 3 h, et que la qualité de la prévision se dégrade rapidement au-delà de 4 heures de délai.

Tableau 1 Crue de référence : critères de persistance ($CP_{\Delta t}$ en %), pour un délai de prévision $\Delta t = 1$ à 9 h, sur tous paramètres connus et pluie à venir nulle.

Reference flood: persistence criteria $CP_{\Delta t}$ (%), forecasting ($\Delta t = 1$ to 9 h) with all known parameters and null future rainfall.

CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
100	100	99	97	89	72	57	44	32

Remarquons que ces valeurs de $CP_{\Delta t}$ sont optimales, car elles sont basées sur la connaissance a priori de l'état initial (S0/A), ce qui n'est bien sûr pas le cas en situation opérationnelle.

Le délai de prévision retenu par la suite est de 3 h (soit C/2) et les critères de persistance sont donc notés CP3.

2.4 Les perturbations imposées à la pluie

Trois sortes de perturbation ont été imposées au signal pluie de base :

- variabilité de l'intensité horaire de la pluie. Ce bruitage est simulé par multiplication de chaque pluie horaire par une valeur aléatoire comprise entre 0,5 et 1,5, avec une correction pour respecter le cumul de 120 mm en 12 heures (en appliquant un coefficient multiplicatif global). Sur les 50 simulations effectuées, la pluie d'une heure donnée présentait ainsi un coefficient de variation de 27 % ;

- variabilité du cumul de pluie, jusqu'à $\pm 50\%$, mais en conservant une intensité constante. Onze cas ont été testés, d'intensité 5, 6, 7, ..., 15 mm/h ;
- décalage de l'origine temporelle de la pluie, avec conservation de sa durée totale de 12 h. Sept cas de décalage ont été testés : - 3, - 2, - 1, 0, + 1, + 2, + 3 h.

Pour chaque perturbation imposée, deux modes de prévision ont été examinés, selon que l'état initial est supposé connu ou inconnu :

- connu, ce qui n'a de sens qu'en temps différé. S0/A est alors fixé et on mesure ainsi directement l'impact de la variation du signal pluie sur les « prévisions » ;
- inconnu, ce qui est le cas en situation opérationnelle. Pour rendre le modèle auto-adaptatif (O'CONNELL & CLARKE, 1981), à chaque instant de prévision, une procédure d'optimisation du paramètre S0/A (FOURMIGUÉ & LAVABRE, 2001) permet de trouver la valeur pour laquelle le débit calculé par le modèle GR3H égale le débit de référence.

2.5 La procédure multimodèles simplifiée

La procédure multimodèles (notée PMM par la suite) est une méthode de pondération linéaire des résultats de différents modèles de prévision, dont les poids, stationnaires ou évolutifs, dépendent des performances des prévisions antérieures (ROCHE & TAMIN, 1986).

Vu que nous travaillons sur une crue unique, nous avons retenu une version simplifiée n'utilisant que les poids dits évolutifs. L'expression du poids évolutif $W_{i,t}$ du modèle i à l'instant t est :

$$W_{i,t} = \frac{V_{i,t}^{-1}}{\sum_{i=1}^n V_{i,t}^{-1}} \quad \text{avec} \quad V_{i,t} = \alpha V_{i,t-1} + (1-\alpha)e_{i,t}^2 \quad (2)$$

où $V_{i,t}$ est la variance lissée des erreurs de prévision $e_{i,t}$ du modèle i au temps t (LOUMAGNE *et al.*, 1995). La valeur de α est prise égale à 0,5.

La prévision finale est donc la moyenne, des débits prévus par chacun des n modèles, pondérée par leur poids respectif $W_{i,t}$.

Dans les tests présentés par la suite, cette procédure n'a été utilisée que pour tenter de compenser la troisième perturbation (décalage temporel). La PMM a combiné trois modèles GR3H utilisés en prévision, avec optimisation de S0/A. Ils ont été paramétrés avec les mêmes valeurs de réservoirs (A et B) mais des temps de montée (C) différents, soit 4, 6 et 8 heures.

2.6 L'introduction d'une variante « multidélais »

La procédure multimodèles est conçue pour un unique délai de prévision Δt . À l'instant t , on ne peut comparer le débit de référence qu'avec une seule prévision réalisée, celle effectuée à l'instant $t-\Delta t$. Or, le modèle de prévision GR3H permet de fournir des prévisions de débit pour tout délai inférieur à la moitié du paramètre C. Pour valoriser ces informations « multidélais », on compare également le débit de référence à l'instant t avec les débits qui ont

été prévus pour ce même instant, avec des délais de 1 h, 2 h, ... et $(\Delta t-1)$, c'est-à-dire avec des prévisions faites respectivement aux instants $t-1$ h, $t-2$ h, ... et $(t-\Delta t + 1)$. On utilise ainsi les informations les plus récentes sur la qualité en prévision des différents modèles.

Dans notre exemple, les débits prévus à 3 h avec la PMM « multidélais » ont donc été calculés avec, pour chacun des trois modèles, un poids évolutif égal à la moyenne des poids évolutifs des prévisions à 3 h, 2 h et 1 h.

3 – RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 L'optimisation est bien adaptée à la variabilité de la pluie horaire ...

En « prévision » avec $S0/A$ connu et donc fixé à la valeur de base de 0,65, les résultats sur les 50 simulations (bruitage) ont permis de calculer, à chaque heure, le coefficient de variation des débits prévus au délai de 3 h. Il atteint seulement 6 % en pointe mais 20 % en début de montée de crue. Les critères de persistance sont globalement très bons, supérieurs à 96 % pour 3/4 des épisodes (médiane à 98 % et un minimum à 84 % pour la simulation 47).

Pour la prévision « mode opérationnel » (à savoir, $S0/A$ inconnu et optimisé en cours de crue), on a calculé à chaque heure l'écart-type des débits prévus sur les 50 simulations. La figure 4 montre que la majorité des prévisions n'est pas très éloignée de l'hydrogramme de référence. On y a aussi reporté les résultats des deux simulations 34 et 47, conduisant aux plus mauvaises prévisions. Pour ces deux cas, on note que les courbes d'évolution de la valeur du paramètre optimisé $S0/A$ ne présentent pas de variations brutales en cours de crue.

On note que :

- en début de montée de crue, la procédure utilisée parvient à compenser partiellement le bruitage de la pluie : le coefficient de variation n'est que de 10 % (contre 20 % en mode à $S0/A$ fixé) ;
- à la pointe de crue, par contre, la procédure a tendance à accentuer les écarts de prévision : le coefficient de variation des débits prévus y est plus élevé (11 %) qu'en mode à $S0/A$ fixé (6 %). La figure 5-a compare, selon les deux modes, les ratios des débits de pointe (Q_{\max} prévu/ Q_{\max} référence). On y visualise la dégradation de la prévision des pointes de crue.

Sur l'ensemble de la crue, ces écarts se traduisent, figure 5-b, par une baisse des critères de persistance CP3, entre les deux modes.

Notons enfin la mauvaise performance des prévisions pour la pluie n° 47 : le CP3 n'est que de 71 % en « mode opérationnel », et le débit de pointe est sur-estimé de 42 %.

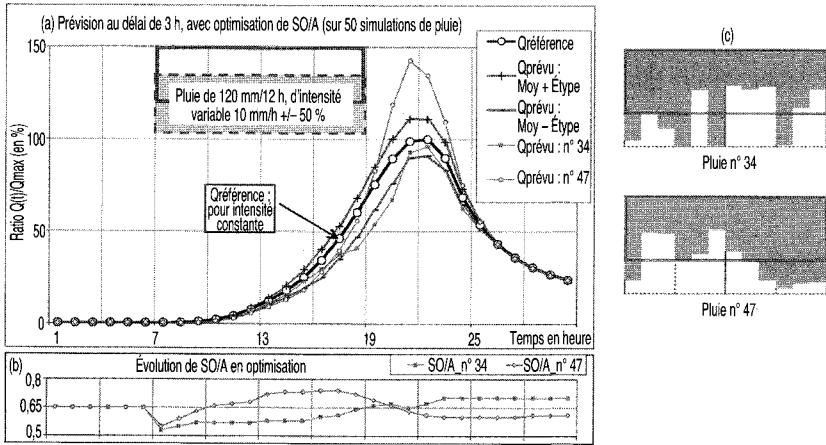


Figure 4 Prévision à 3 h, avec variabilité de la pluie horaire: (a) débits prévus (b) évolution de S0/A en optimisation (c) les deux simulations de pluie.

Forecasting for 3 h time, with variability of hourly rainfall: (a) forecasted discharge (b) optimized S0/A evolution (c) two rainfall simulations.

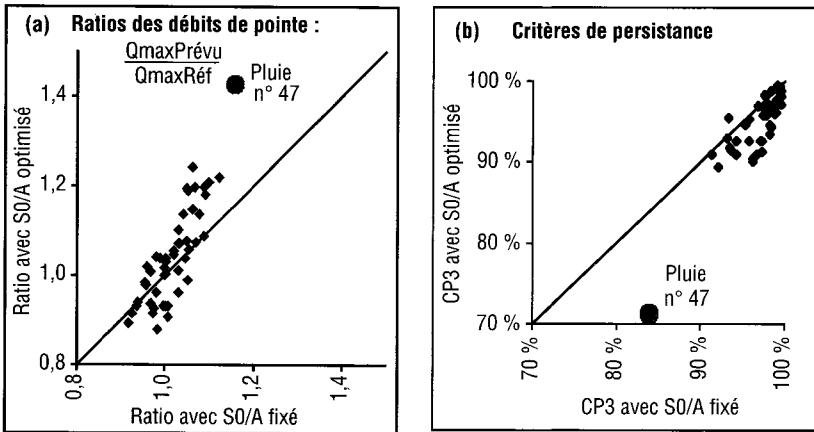


Figure 5 Comparaison entre les deux modes (S0/A fixé ou optimisé): (a) sur les débits de pointe (b) sur les critères de persistance CP3.

Comparison between two forecasting protocols (S0/A fixed or optimized): (a) peak discharge (b) CP3 persistence criteria.

3.2 ... encore mieux à la variabilité du cumul de pluie ...

En «prévision» avec état initial connu a priori, on a d'abord cherché, pour chacune des 11 pluies (d'intensité entre 5 à 15 mm/h), la valeur fixe de $S0/A$ capable de produire la pluie nette nécessaire à la reconstitution de l'hydrogramme de référence: les valeurs de $S0/A$ croissent de 0,42 à 1 quand l'intensité décroît. Avec cette valeur d'initialisation adéquate, les prévisions simulées sont logiquement bonnes ($CP3 > 94\%$), hormis pour le test avec la pluie d'intensité de 5 mm/h ($CP3 = 58\%$), insuffisante pour produire le volume de l'hydrogramme de référence.

En prévision «mode opérationnel», la figure 6 montre que la procédure d'optimisation de $S0/A$ compense très bien la variation imposée au cumul de la pluie, adaptant ainsi la production du modèle à l'intensité de la pluie. Les écarts de prévision en pointe restent inférieurs à 17 % et les critères de persistance supérieurs à 96 % pour 9 tests sur 11.

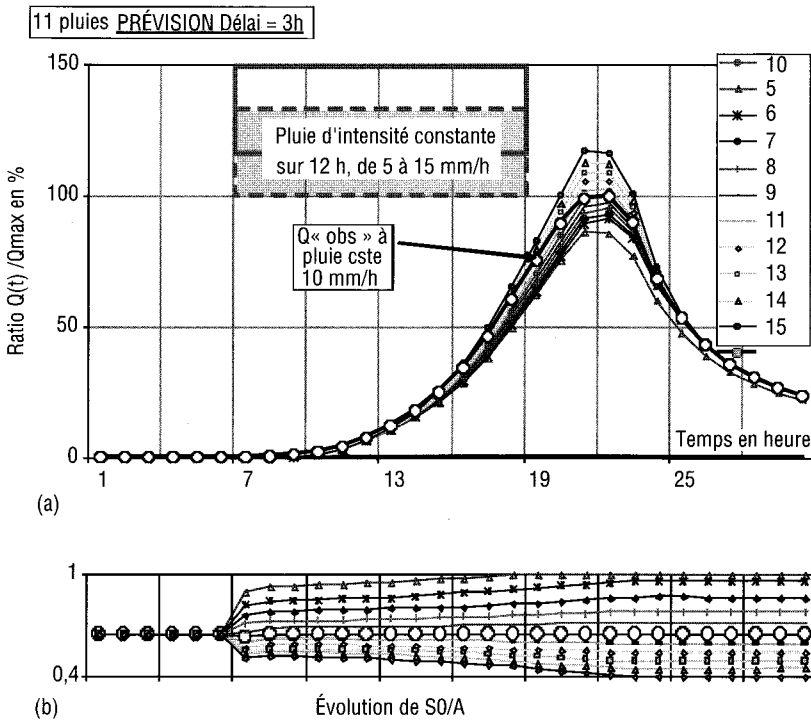


Figure 6 Prévision à 3 h, avec variabilité du cumul de pluie: (a) débits prévus (b) évolution de $S0/A$ en optimisation.

Forecasting for 3 h time, with variability of total cumulated rainfall: (a) forecasted discharges (b) optimized $S0/A$ evolution.

3.3 ... mais impuissante face au décalage temporel de la pluie

Avec la valeur de $S0/A$ fixée à celle de base (0,65), les «prévisions» faites sur les 7 tests (décalage D de l'origine des pluies en h : -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3) ont logiquement reproduit, avec une translation de D , les débits prévus sans décalage (résultats de CP3 en % : 8, 58, 90, 99, 83, 44, -10).

En prévision «mode opérationnel», figure 7, la procédure d'optimisation de $S0/A$ ne parvient pas à compenser le décalage (résultats de CP3 en % : 32, 62, 87, 99, 83, 34, -34).

En début de pluie, la procédure d'optimisation limite les écarts de prévision en portant la production à des valeurs extrêmes ($S0/A = 0$ quand $D < 0$ ou $S0/A = 1$ quand $D > 0$). Vers la pointe, elle surestime d'autant plus que le décalage est important et positif, ce qui est logique, la pluie arrivant alors après la crue!

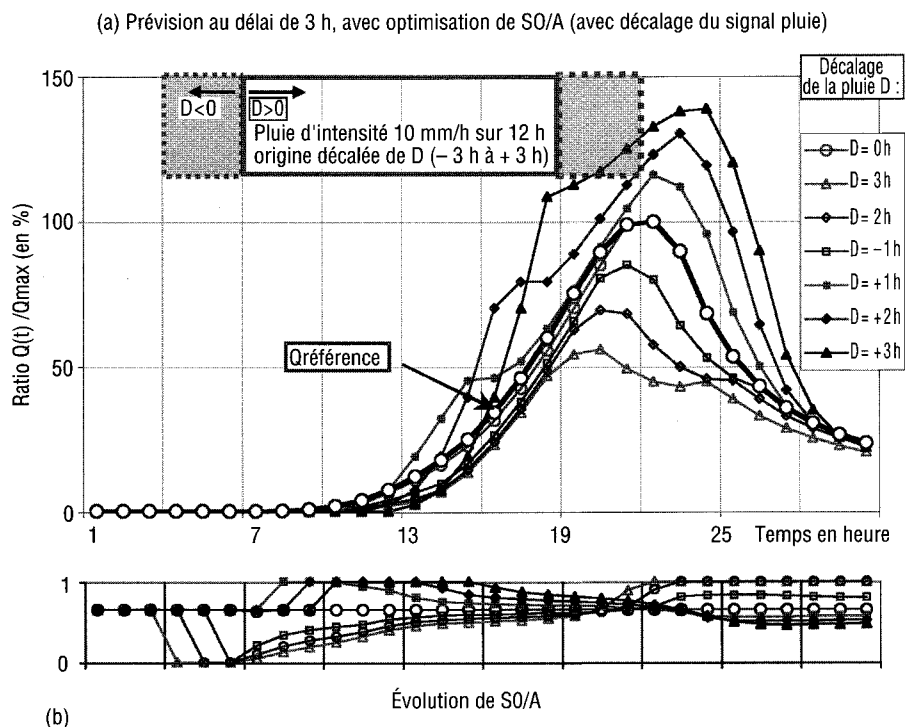


Figure 7 Prévision à 3 h, avec décalage de l'origine de la pluie (a) débits prévus (b) évolution de $S0/A$ en optimisation.

Forecasting for 3 h time, shifting the beginning time of rainfall: (a) forecasted discharges (b) optimized $S0/A$ evolution.

3.4 Discussion sur la procédure d'optimisation de S0/A

Dans le modèle GR3H, la production de pluie nette est réglée par le niveau initial du réservoir A et le réservoir B de la fonction de transfert participe aussi à la production de débit à cause son effet capacitif. La procédure d'optimisation de S0/A en prévision, en n'intervenant que sur le paramètre S0/A (initialisation du réservoir A), parvient quand même à compenser partiellement l'inadéquation entre pluie et débit, mais sous réserve expresse du respect des instants de début et fin de l'épisode pluvieux.

En effet, l'optimisation de S0/A ne parvient pas à compenser un fort décalage temporel de la pluie. Dans le modèle GR3H, c'est le paramètre C du modèle qui introduit le retard entre débit et pluie et seule sa modification pourrait permettre d'apporter une compensation efficace. Aussi, nous abordons, au chapitre suivant, l'utilisation de la procédure multimodèles (PMM) pour apprécier son adaptabilité au décalage temporel imposé au signal pluie.

3.5 Apport de la procédure multimodèles et du multidélais

Les résultats de la PMM ont été obtenus en combinant trois modèles de prévision à 3 h (avec optimisation de S0/A), de mêmes paramètres A et B, mais à temps de montée C différents (4, 6 et 8 h). Sur les 6 crues comportant un décalage de l'origine de la pluie, la PMM apporte un gain moyen de 30 points sur les critères de persistance CP3 (figure 8), par rapport au seul modèle avec C = 6 h.

Cependant, cette procédure conduit à des instabilités de prévision sur certains tests (notamment pour un décalage positif de la pluie), par basculement brusque d'un modèle à un autre, malgré le «lissage» de la variance. En effet, il se peut que ponctuellement, à un instant t donné, le débit prévu par le modèle i à l'instant t- Δt , soit presque égal au débit de référence. De ce fait, la variance de ce modèle i sera alors bien inférieure à celles des autres modèles et son poids évolutif prépondérant dans la prévision à t + Δt . Ce phénomène est d'autant plus net que l'on n'a pas utilisé de poids stationnaires.

Comparaison de trois modalités de prévision (modèles GR avec optimisation de S0/A)

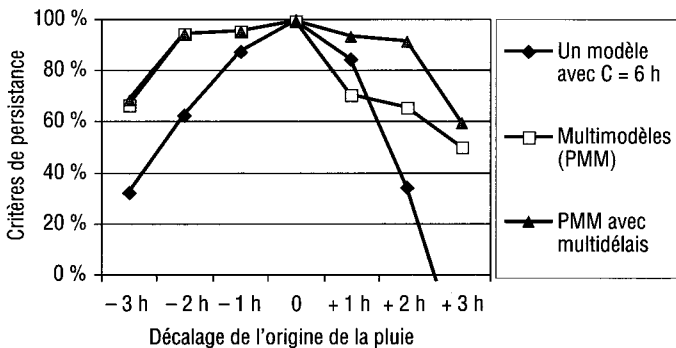


Figure 8 Critères de persistance CP3, en fonction du décalage de l'origine de la pluie, selon trois modalités de prévision.

CP3 persistence criteria as a function of the shift of the beginning time of rainfall, for three forecasting methods.

L'introduction de la variante « multidélais » (décrite au § 2.5) a permis un gain appréciable sur les critères de persistance (figure 8), notamment pour les épisodes à décalage positif, en limitant le phénomène d'instabilité. Ceci est clairement mis en évidence, figure 9, pour le décalage positif de 2 h.

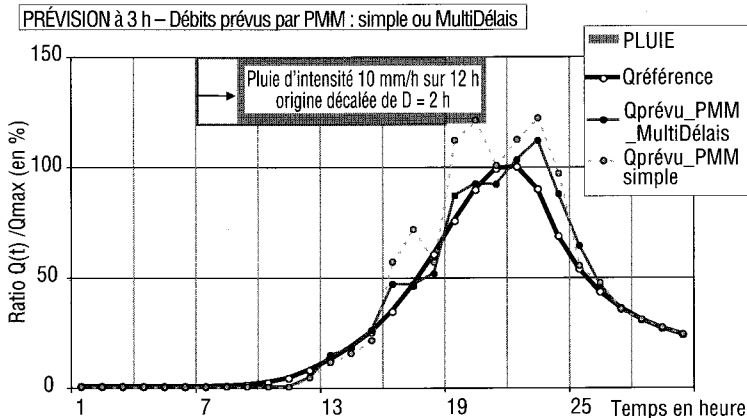


Figure 9 Débits prévus avec la procédure multimodèles (PMM), simple et multidélais (MD), pour un décalage $D = + 2$ h.

Forecasted discharges with multi-models procedure (PMM), single and multi-times, for a temporal shift of rainfall $D = + 2$ h.

3.6 Considérations sur la portée de ce travail

L'exercice présenté dans cet article ne porte effectivement que sur une crue théorique construite avec GR3H. Cependant, dans le cadre d'études pour des services opérationnels, (JAFFRAY *et al.*, 2003; FOURMIGUÉ *et al.*, 2001-2004), nous avons testé le modèle GR3H en prévision, avec cette procédure de mise à jour, sur une dizaine de bassins versants français, à raison de 12 à 25 crues par bassin, sur une dizaine d'années environ. Les résultats sont intéressants, du moins tant que la pluie de bassin utilisée peut être considérée comme représentative de la réalité. En effet, pour les phénomènes à caractère orageux ou pour les bassins de plus de quelques centaines de km^2 , il n'est plus possible d'ignorer la variabilité spatio-temporelle de la pluie, ce qui rend incontournable l'utilisation de modèles au moins semi-distribués.

À priori, nos conclusions se limitent au modèle utilisé, à savoir GR3H. Néanmoins, on peut penser qu'on aboutirait à des conclusions comparables avec un autre modèle hydrologique global, pour autant qu'il soit (i) faiblement paramétré ou sensible à un nombre réduit de paramètres (ANDRÉASSIAN *et al.*, 2001), (ii) à base de réservoirs, pour garantir une certaine inertie au système. Nous sommes plus nuancés pour des modèles qui utiliseraient une fonction de production de type additive (HORTON R.E., 1933) par exemple, plus sensibles à l'intensité horaire des pluies.

Remarquons aussi que la procédure de mise à jour utilisée ne concerne pas la fonction de transfert du modèle GR3H, ce qui contribue aussi à le rendre moins «vulnérable» aux incertitudes sur le signal pluie, mais présente l'inconvénient de s'adapter plus difficilement à un décalage temporel «anormal» entre pluie et débit.

4 – CONCLUSION

On a montré que le modèle conceptuel pluie-débit GR3H, utilisé en prévision avec une procédure d'optimisation d'un seul paramètre, était capable d'absorber d'importantes variations du signal pluie, pour autant que l'origine et la fin de l'épisode pluvieux soient respectées. Pour compenser un décalage temporel anormal entre pluie et débit, on a eu recours à plusieurs modèles GR3H à temps de réaction différents, combinés par une procédure multimodèles simplifiée. L'utilisation des prévisions «multidélais» a permis de lui apporter un gain supplémentaire, évitant certaines instabilités.

En conclusion, on estime que pour les bassins dont le comportement hydrologique est modélisable de façon stable avec un modèle GR, les prévisions devraient être peu sensibles à l'imprécision quantitative de l'estimation de la pluie de bassin, du moins tant que ses bornes temporelles restent cohérentes avec l'hydrogramme observé.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRÉASSIAN V., PERRIN C., MICHEL C., USART-SANCHEZ I., LAVABRE J., 2001. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models, *Journal of Hydrology*, **250**, 206-223.
- ANDRIEU H., CREUTIN JD., DELRIEU G., FAURE D., 1997. Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part I: radar measurement interpretation, *Journal of Hydrology*, **193**, 1-25.
- ARNAUD P., 1997. Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation stochastique des pluies horaires. Th. Doct. Univ. Montpellier II, 285 p.
- DATIN R., 1998. Outils opérationnels pour la prévision des crues rapides: traitements des incertitudes et intégration des prévisions météorologiques. Th. Doct. INPG Grenoble, 369 p.
- EDIJATNO, MICHEL C., 1989. Un modèle de pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*. N° 2-1989, 113-121.
- EDIJATNO, NASCIMENTO N.D.O., YANG X., MAKHLLOUF Z., MICHEL C. 1999. GR3J: a daily watershed model with three free parameters, *Hydrol. Sci. J.*, **44**, 263-277.
- FOURMIGUÉ P., LAVABRE J., 2001. Prévision des crues sur le bassin de l'Arize avec le modèle pluie-débit GR3H. Rapport d'étude. Cemagref, 36 p.
- FOURMIGUÉ P., JAFFRAY R., 2004. Prévision des crues sur les bassins de la Cesse et de l'Orbieu, avec le modèle pluie-débit GR3H. Rapport d'étude. CETE Méditerranée, 48 p.

- HORTON R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union* **14**, 446-460.
- JAFFRAY R., FOURMIGUÉ P., LAVABRE J., 2003. Prédiction des crues de la Savoureuse à Belfort. Rapport d'étude. Cemagref & CETE Méditerranée, 52 p.
- KITADINIS P.K., BRAS R.L., 1980. Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model: 2 applications and results. *Water Resour. Res.* **16**, 1034-1044.
- LARDET P., OBLED C., 1994. Real-time flood forecasting using a stochastic rainfall generator. *Journal of Hydrology*, **162**, 391-408.
- LOUMAGNE C., VIDAL J.J., FELIU C., TERTOTOT J.P., ROCHE P.A., 1995. Procédure de décision multimodèle pour une prédiction des crues en temps réel - Application au bassin supérieur de la Garonne. *Rev. des Sciences de l'Eau*, 539-561.
- MIMOUNI A., CORNUAU P., VIDAL J.-J., FOURMIGUÉ P., LAVABRE J., Pertinence des lames d'eau radar dans la modélisation pluie débit pour la prédiction des crues - exemple du bassin versant du Mas d'Azil. *Atelier Utilisation des Radars Météorologiques pour l'Annonce des Crues et la Gestion des Réseaux d'Assainissement*. Météopôle Toulouse, 15-16 mars 2001, 29-39.
- O'CONNELL, CLARKE, 1981. Adaptive Hydrological Forecasting - A Review. *Hydrol. Sci. Bull.*, 179-205.
- ROCHE P.A., TAMIN R., 1986. Procédures de décision multi-modèles applicables à la prédiction des crues en temps réel. Rapport d'étude. CERGRENE-ENPC, 86 p.
- W.M.O., 1983. Guide to hydrological practice, Vol. II : Analysis, Forecasting and others applications, WMO - n° 168, Geneva.
- YANG X., 1993. Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prédiction des crues en temps réel. Th. Doct. ENPC-CERGRENE, 205 p.