
Revue des sciences de l'eau

La prévision des crues du bassin versant de l'Oued Dis (Sebaou) par la méthode DPFT

N. Dechemi et H. Chambaz

Volume 7, numéro 4, 1994

URI : id.erudit.org/iderudit/705204ar
<https://doi.org/10.7202/705204ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN 0992-7158 (imprimé)
1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Dechemi, N. & Chambaz, H. (1994). La prévision des crues du bassin versant de l'Oued Dis (Sebaou) par la méthode DPFT. *Revue des sciences de l'eau*, 7(4), 331–342. <https://doi.org/10.7202/705204ar>

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau, 1994

Résumé de l'article

La modélisation pluie-débit dans le cas de la prévision des crues peut être étudiée par la méthode DPFT (différence première de la fonction de transfert) qui est une extension de la méthode de l'hydrogramme unitaire. Contrairement aux autres méthodes, la méthode DPFT permet d'obtenir à la fois la fonction de transfert à travers sa différence première (DPFT) et une série des pluies efficaces. L'avantage principal de la formulation en différences est la diminution de l'auto corrélation des débits successifs et des coefficients de la fonction de transfert.

L'algorithme de calcul procède par itérations en résolvant alternativement un système multi-événements qui identifie la fonction de transfert et un système de déconvolution qui estime une série de pluies efficaces, cette fois-ci crue par crue. L'initialisation se fait à l'aide des pluies brutes comme première approximation des pluies efficaces puisque les résultats ne dépendent que des variations des débits. La convergence de l'algorithme est établie aisément lorsqu'on applique les différentes contraintes (positivité des ordonnées de la fonction de transfert et des pluies efficaces; normalisation de la fonction de transfert).

La méthode DPFT ne nécessite donc que les mesures des pluies brutes et les débits pour effectuer les identifications de la fonction de transfert et des pluies efficaces. Elle n'impose pas de préciser la fonction de production. Une fois la fonction de transfert calée et les pluies efficaces estimées par la DPFT, l'ajustement de la fonction de production se fait par la suite en résolvant un problème du type entrée-sortie.

Une application de la méthode DPFT est faite sur le bassin versant de Oued Dis (Sebaou) dans le but de tester les performances de cette méthode sur des données réelles, sachant qu'on a obtenu une confirmation assez rigoureuse de ces propriétés sur des données synthétiques générées. Les résultats de l'identification de la fonction de transfert sont satisfaisants tandis que ceux de l'ajustement de la

Ce document est protégé par le droit d'auteur. L'utilisation de ce document (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne. [<https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-d-utilisation/>]



Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. www.erudit.org

La prévision des crues du bassin versant de l'Oued Dis (Sebaou) par la méthode DPFT

Flood forecasting in the watershed of Oued Dis (Sebaou)
using the FDFT method

N. DECHEMI et H. CHAMBAZI¹

Reçu le 27 mai 1993, accepté le 8 juin 1994*.

SUMMARY

Rainfall-runoff modelling in the case of flood forecasting may be studied by the first difference of the transfer function (FDTF) method, which is an extension of the unit hydrograph approach. In contrast to other methods, the FDFT method simultaneously provides both the transfer model by its first difference and an excess precipitation series. The principal advantage of the difference formulation is the diminution of the autocorrelation between successive flow data and the transfer function coefficients.

The compilation algorithm proceeds iteratively by resolving alternately a multi-event system which identifies the transfer function, and a deconvolution system which assesses the excess precipitation series event by event. The initialization is done with the total precipitation as a first approximation of the excess precipitations, since the results are only dependent on flood variations. The algorithm convergence is easily established if the various constraints are applied (positive values for the transfer function coefficients and the excess precipitations; normalization of the transfer function).

Thus, the FDTF method only requires total precipitation and flood data in order to generate the transfer function and quantify the excess precipitation. It doesn't require that the production function be specified. Once the transfer function is calibrated and the excess precipitation estimated, the production function adjustment is carried out by resolving an input-output model type.

The FDTF method has previously been applied successfully to simulated data. In the present study, the method has been applied to the Oued Dis watershed (Sebaou, Algeria) in order to test its performance using real data. The transfer function identification results proved satisfactory, but those related to the production function adjustment were less satisfactory and degraded the overall quality of the validation results.

Key-words : *FDTF, Oued Dis, flood prevision, rainfall-runoff, model.*

1. École Nationale Polytechnique d'Alger, Département d'Hydraulique, 10 avenue Pasteur, Belfort, Alger.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 juillet 1995.

RÉSUMÉ

La modélisation pluie-débit dans le cas de la prévision des crues peut être étudiée par la méthode DPFT (différence première de la fonction de transfert) qui est une extension de la méthode de l'hydrogramme unitaire. Contrairement aux autres méthodes, la méthode DPFT permet d'obtenir à la fois la fonction de transfert à travers sa différence première (DPFT) et une série des pluies efficaces. L'avantage principal de la formulation en différences est la diminution de l'auto corrélation des débits successifs et des coefficients de la fonction de transfert.

L'algorithme de calcul procède par itérations en résolvant alternativement un système multi-événements qui identifie la fonction de transfert et un système de déconvolution qui estime une série de pluies efficaces, cette fois-ci crue par crue. L'initialisation se fait à l'aide des pluies brutes comme première approximation des pluies efficaces puisque les résultats ne dépendent que des variations des débits. La convergence de l'algorithme est établie aisément lorsqu'on applique les différentes contraintes (positivité des ordonnées de la fonction de transfert et des pluies efficaces ; normalisation de la fonction de transfert).

La méthode DPFT ne nécessite donc que les mesures des pluies brutes et les débits pour effectuer les identifications de la fonction de transfert et des pluies efficaces. Elle n'impose pas de préciser la fonction de production. Une fois la fonction de transfert calée et les pluies efficaces estimées par la DPFT, l'ajustement de la fonction de production se fait par la suite en résolvant un problème du type entrée-sortie.

Une application de la méthode DPFT est faite sur le bassin versant de Oued Dis (Sebaou) dans le but de tester les performances de cette méthode sur des données réelles, sachant qu'on a obtenu une confirmation assez rigoureuse de ces propriétés sur des données synthétiques générées. Les résultats de l'identification de la fonction de transfert sont satisfaisants tandis que ceux de l'ajustement de la fonction de production sont moins satisfaisants, ce qui a influencé directement la qualité des résultats de validation.

Mots clés : DPFT, Oued Dis, prévision, débit, modèle.

1 - INTRODUCTION

Les phénomènes naturels qui se produisent dans un bassin versant sont si complexes que la modélisation représente dans bien des cas l'unique outil d'analyse et de déduction. En cas de prévision, les modèles pluies-débits sont utilisés pour la représentation schématisée du phénomène réel qui est la dynamique du transfert de l'eau précipitée en eau ruisselée dans un système d'annonce de crues.

Lors de la modélisation de la relation pluie-débit, on se heurte à la non linéarité de cette dernière, et on se restreint à une approche globale sans considérer une variabilité spatiale de la pluie.

Le modèle permettant d'établir une liaison entre la pluie et le débit ruisselé devra s'accommoder à la non linéarité du processus, modéliser les pertes en volume entre la pluie et le débit et traiter l'aspect composite des hydrogrammes mesurés sous forme de réponses rapides, lentes lentes ou intermédiaires.

La méthode DPFT est une extension de la méthode classique de l'hydrogramme unitaire et par conséquent décompose le processus global pluie-débit en deux modèles distincts par leurs structures, un modèle de production qui transforme la pluie brute précipitée en pluie efficace ruisselée, et une fonction de transfert permettant le passage de la pluie efficace en débit de ruissellement relevé à l'exutoire du bassin versant.

Le bassin versant de Oued Dis (Sebaou) a fait l'objet d'une application de la méthode DPFT pour le cas de prévision de crue.

2 - ÉVOLUTION DE LA MÉTHODE DPFT

La méthode DPFT s'inspire des travaux effectués par NEWTON et VINYARD (1967) qui ont proposé un algorithme itératif et alterné permettant l'identification simultanée de la fonction de transfert moyenne et la déconvolution des pluies efficaces.

DUBAND (1978), GUILLOT et DUBAND (1980) reprenaient cet algorithme pour l'identification de la fonction de transfert moyenne sur un système multi-événements de 15 à 20 épisodes averses-crues, ainsi que la déconvolution des pluies efficaces, mais cette fois-ci crue par crue. Le système d'équations permettant d'aboutir à ces résultats s'écrit sous ces deux formes équivalentes :

$$q_j^L = \sum_{i=1}^K a_i PE_{(j-i+1)}$$

$$q_j^L = \sum_{i=1}^m PE_i a_{(j-i+1)}$$

avec : $j - i + 1 > 0$ ($q_1^L = a_1 \cdot PE_1$ pour $j = 1$ de la crue d'index L).

Les avantages de cette nouvelle formulation se traduisent par l'augmentation de degrés de liberté lors de la résolution, d'où une robustesse bien plus importante que celle tirée d'une moyenne ou d'une médiane de solutions obtenues événement par événement. De plus les calculs effectués sur les variations des débits (BOX et JENKINS 1970) ont pour but la diminution de l'auto corrélation des débits successifs, l'augmentation de la stationnarité de la variable à expliquer, une meilleure stabilité des coefficients de la DPFT, et la négligence de la variation du débit de base en permettant ainsi de s'affranchir de la séparation des hydrogrammes et ne considérer que la variation de la réponse rapide.

VERSIANI (1983) a utilisé la méthode des moindres carrés et la ridge régression pour l'identification de la fonction de transfert et la deconvolution des pluies efficaces.

NALBANTIS (1987) a travaillé sur des données synthétiques pour tester la validité de cette méthode, il a montré que :

- La méthode a tendance à donner des résultats d'autant plus mauvais que le coefficient de ruissellement est élevé.
- Dans le cas des crues à un seul pic ou multipics, on constate une performance de la méthode équivalente dans les deux cas.
- La méthode semble avoir d'autant plus de difficultés à identifier la fonction de transfert et les pluies efficaces que la non linéarité de la relation pluie brute-pluie efficace est manifeste.
- Un nombre d'épisodes égal à vingt semble suffire pour obtenir des résultats stables, si les données sont erronées, il est préférable de privilégier les épisodes qui correspondent à une pluie brute assez variable dans le temps.

DUBAND, OBLED et RODRIGUEZ (1993) après avoir passé en revue les méthodes proposées précédemment, insistent sur les hypothèses supplémentaires qu'elles requièrent. Ils ont présenté les choix retenus dans la méthode DPFT-ERUHDT, notamment l'identification conjointe de l'hydrogramme unitaire et des pluies efficaces sans imposer de structures supplémentaires.

3 - APPLICATION DE LA MÉTHODE DPFT AU BASSIN VERSANT DE OUED-DIS (SEBAOU)

3.1 Présentation du bassin versant

L'Oued-Dis est un affluent du Sebaou dont le bassin versant a une superficie de 100 km² caractérisé par un climat tempéré et par une topographie assez accidentée.

Il est situé dans la grande Kabylie, à une centaine de kilomètres d'Alger.

Le bassin versant (*fig. 1*) est équipé de trois (03) pluviomètres dont un (01) couplé à un pluviographe (station d'Azzazga), et d'un limnigraphe à la station de Fréha.

Les données de pluies journalières historiques existent depuis l'année hydrologique 1921/1922, pour les stations de Azzazga et Aghrib, la station de Fréha a été mise en service en 1973.

3.2 Choix des épisodes pluies-débits

Vingt deux (22) épisodes pluies-débits ont été pris en considération dans cette étude sur un échantillon d'une cinquantaine d'épisodes. Les autres ont été éliminés du fait des décalages considérables entre les pluies et les débits correspondants ou encore des épisodes mal configurés.

Pour augmenter la taille de l'échantillon, on a été contraint de décomposer les crues complexes en crues simples et cela en procédant à l'annulation des faibles pluies en fin et début d'épisode avant le démarrage de la crue (CHAMBAZ, 1990). Les pluies utilisées en entrée sont au pas de temps horaire, relatives aux événements averses-crues sélectionnés ; elles sont obtenues

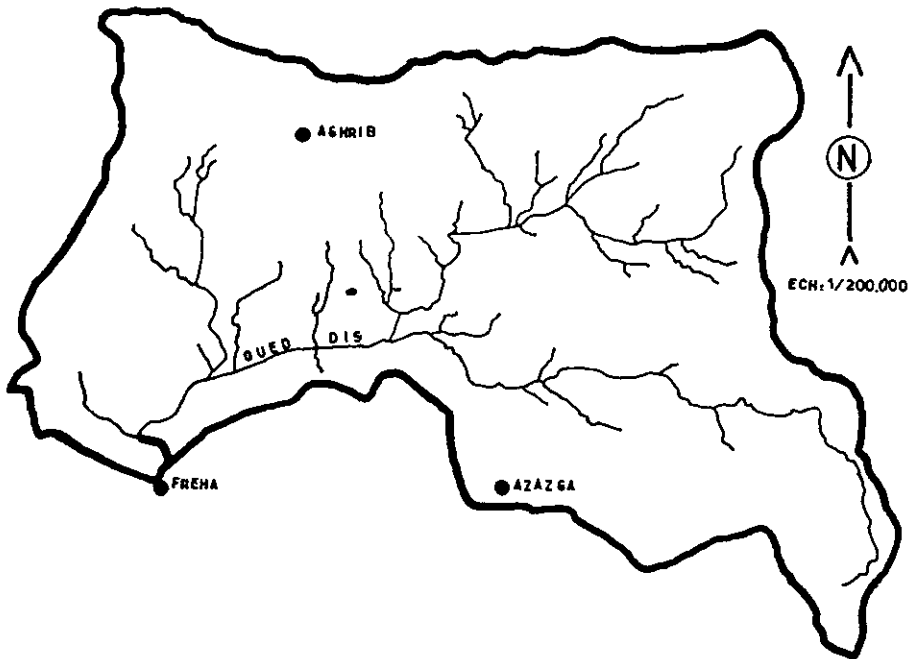


Figure 1 Présentation du bassin versant de l'Oued Dis.
 Presentation of Oued Dis watershed.

par moyenne spatiale des pluviométries journalières, et désagrégées temporellement au pas horaire selon la chronologie du seul pluviographe disponible.

3.3 Calcul de la fonction de transfert

L'identification de la fonction de transfert s'est faite sur un nombre de quinze (15) épisodes pluies-débits, ce qui constitue un échantillon relativement faible selon les recommandations concernant la mise en œuvre de la méthode DPFT (20 à 50 épisodes). Néanmoins les épisodes utilisés sont convenablement choisis et représentatifs de la réalité physique du phénomène étudié.

Les contraintes imposées pour cette identification sont les suivantes :

- Les termes de la fonction de transfert doivent être positifs ou nuls.
- La somme des termes de la fonction de transfert doit être égale à l'unité.
- La fonction de transfert retenue (fig. 2) a été calculée en tenant compte des paramètres suivants :
 - La mémoire d'identification doit satisfaire la contrainte : $n^L = m^L + K - 1$. Elle a été prise à : $K = 13$ pas de temps. Cette mémoire est supérieure ou égale à trois fois le nombre de pas de temps nécessaire pour décrire la montée de l'hydrogramme unitaire (fonction de transfert).

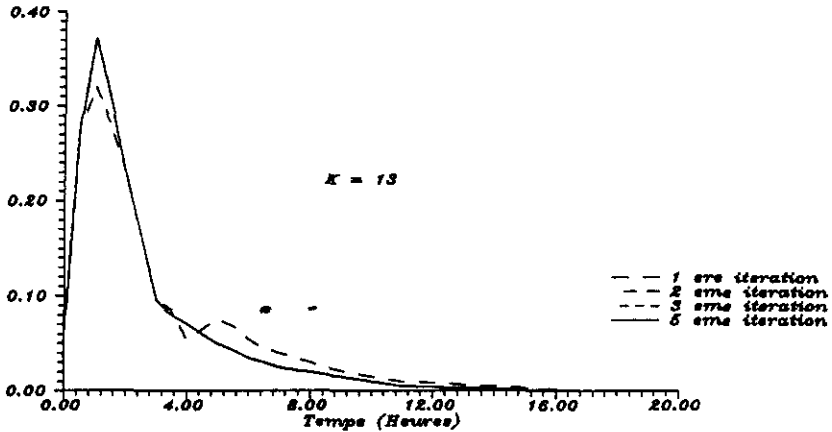


Figure 2 Fonction de transfert.
Transfert function.

– Lissage à partir du douzième point utilisant l'intervalle de la sixième à la douzième ordonnée pour caler l'exponentielle décroissante, le coefficient de lissage exponentiel choisi est de 0,35.

Le tableau 1 donne à chaque itération la somme des coefficients de la fonction de transfert.

Tableau 1 Coefficients de la fonction de transfert.

Table 1 Transfert function coefficients

Itération	1	2	3	4	5
Σ FT lissée	0,561	0,970	0,969	0,969	0,969

3.4 Calcul des pluies efficaces déconvoluées

La déconvolution des pluies efficaces s'est faite avec un coefficient de ridge régression égale à 10^{-1} . Pour des coefficients inférieurs à cette valeur, la ridge régression est sans effet sur le système de déconvolution, par contre pour des valeurs supérieures à 10^{-1} , le système de déconvolution est perturbé, et par conséquent la corrélation entre les débits calculés et observés diminue considérablement.

On notera qu'à chaque itération et pour chaque crue, on calcule les débits à partir de la fonction de transfert identifiée et les pluies efficaces déconvoluées. Le critère de Nash a été pris en considération pour la comparaison des débits observés et calculés (la méthode n'optimise pas ce critère) :

$$T(\%) = 100 \left[1 - \frac{\sum (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \right]$$

T est d'autant plus proche de 100 que la différence entre les débits calculés et observés est faible.

Les figures 3 et 4 illustrent la reconstitution des débits de crue à partir de la fonction de transfert et des pluies efficaces déconvoluées, les hyétogrammes des pluies brutes et des pluies efficaces issues de la DPFT correspondant aux hydrogrammes de crues sont également représentées sur ces figures.

3.5 Calcul des indices de précipitations antérieures (IPA)

L'humidité du sol conditionne aussi bien la capacité d'absorption que le coefficient de ruissellement. De ce fait, toute utilisation d'un modèle de ruissellement nécessite la connaissance de l'humidité du sol avant la précipitation ou tout au moins celle d'un indice représentatif de cette humidité.

L'intérêt du calcul des indices d'humidité interviendra lors de la modélisation de la fonction de production.

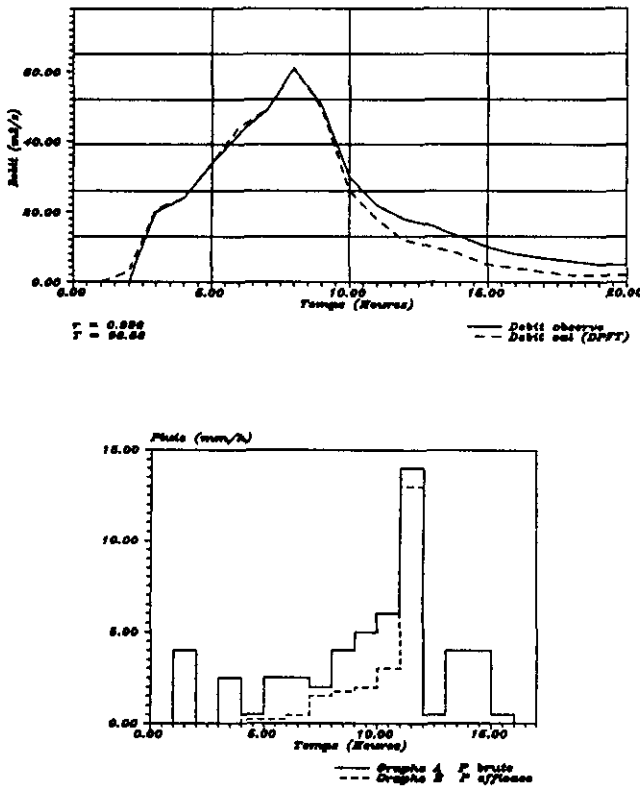


Figure 3 Reconstitution des crues (pluies efficaces déconvoluées). Crue du 30/12/1980.
 Flood reconstitution (deconvoluted effective precipitations).

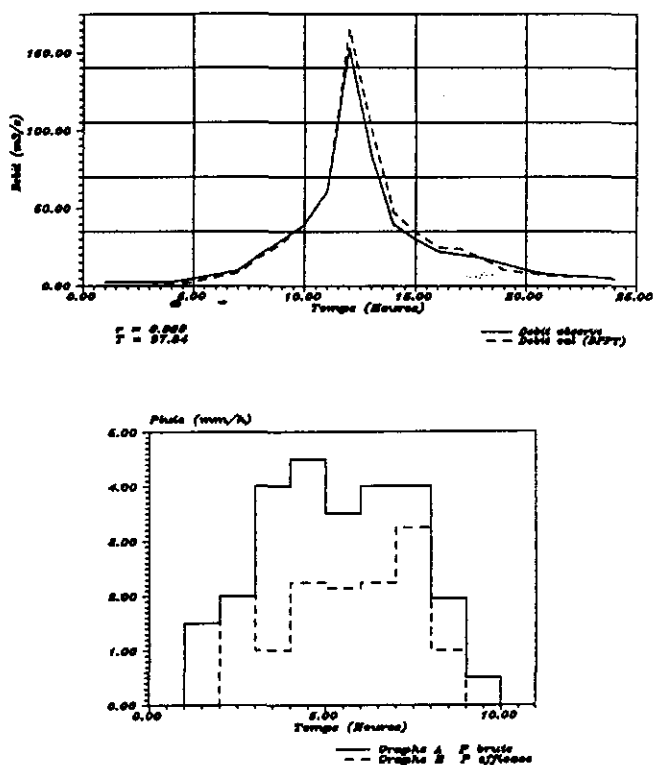


Figure 4 Reconstitution des crues (pluies efficaces déconvoluées). Crue du 15-16/11/1982.

Flood reconstitution (deconvoluted effective precipitations).

Deux indices de précipitations antérieures ont été pris en considération (NOURI, 1986), le premier prend en compte les pluies de cinq (05) à dix (10) jours antérieurs à l'averse qui a provoquée la crue :

$$IPA_1 = \sum_{j=1}^n P_{t-j} \quad n=5, \dots, 10 \text{ jours}$$

Le second fait intervenir les pluies du mois précédent l'averse étudiée avec cependant un coefficient de pondération $k < 1$ variable avec le temps :

$$IPA_2 = P_{t-1} + K_4 X_4 + K_9 X_9 + K_{14} X_{14} + K_{30} X_{30}$$

avec :

$$X_4 = \sum_{k=2}^4 P_{t-k} \quad \text{et} \quad K_4 = 0,7$$

$$X_9 = \sum_{k=5}^9 P_{i-k} \quad \text{et} \quad K_9 = 0,5$$

$$X_{14} = \sum_{k=10}^{14} P_{i-k} \quad \text{et} \quad K_{14} = 0,3$$

$$X_{30} = \sum_{k=15}^{30} P_{i-k} \quad \text{et} \quad K_{30} = 0,2$$

Une étude comparative sur le bassin versant de l'Oued Dis (NOURI, 1986) a montré que l'indice IPA_1 est le plus fiable des deux indices considérés.

3.6 Modèle de production

Le modèle de production utilisé comporte deux paramètres à caler qui ne nécessitent pas une initialisation à chaque épisode.

Il fait intervenir le débit de base (Q), ainsi que l'indice des pluies antérieures (IPA_1) à l'épisode pluvieux considéré, et l'indice des pluies antérieures à l'heure courante de ce même épisode pluvieux (SPBA), afin de suivre l'évolution de l'humidité du sol pendant l'averse prise en considération.

Ce modèle est couplé à la fonction de transfert obtenue par la méthode DPFT. Le calcul des pluies efficaces est donné par les relations suivantes :

$$PE(t) = \frac{[PB(t)]^2}{PB(t) + A(t)}$$

$$A(t) = \frac{B}{FS(t)}$$

$$FS(t) = [C \cdot PB(t) + (1-C)(IPA_1(t) + SPBA(t))] Q_0(t)$$

Le calage des paramètres B et C du modèle de production a donné les résultats suivants :

$$B = 5,159 \quad ; \quad C = 0,908$$

3.7 Calcul des débits modélisés

Le modèle de production est utilisé pour le calcul des pluies efficaces modélisées à partir des différentes séries des pluies brutes. Ces pluies efficaces modélisées sont ensuite convoluées avec la fonction de transfert issue de la méthode DPFT pour fournir les débits calculés. La reconstitution des crues test à partir de la fonction de transfert issue de la DPFT et les pluies efficaces modélisées est illustrée par la figure 5.

4 - INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

- L'aspect lisse de la fonction de transfert et la satisfaction de la constante de conservation de masse ($\sum A_i = 0,95$), conduit à conclure au bon choix de la fonction de transfert.

- La déconvolution des pluies efficaces avec la fonction de transfert choisie a donné des débits calculés très proches des débits observés, le coefficient de corrélation multiple pour l'échantillon de calage est de 0,987.

Le critère utilisé pour juger les performances de calage du modèle de production est le coefficient de Nash entre les pluies efficaces modélisées (fournies par le modèle) et les pluies efficaces déconvoluées (obtenues par la DPFT).

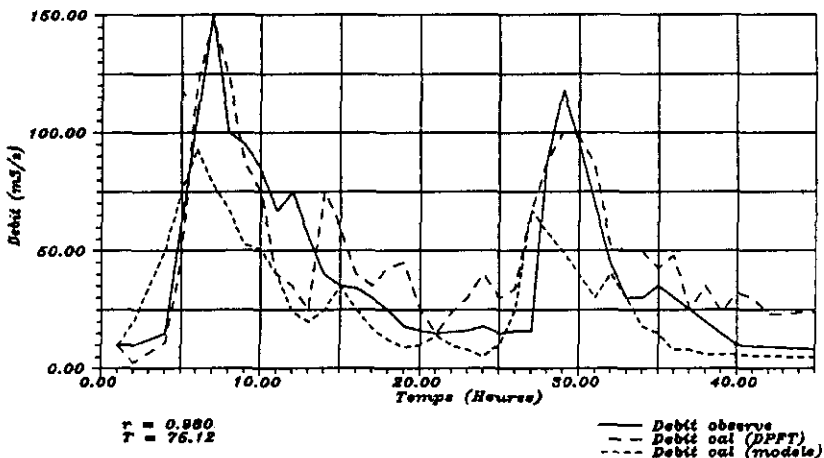


Figure 5 Reconstitution des crues (pluies efficaces modélisées).
Flood reconstitution (modelised effective precipitations).

Le modèle de production est calé en utilisant comme entrée la série des pluies brutes et comme sortie la série des pluies efficaces correspondantes d'un échantillon test composé de huit (08) épisodes pluies-débits (environ 1/3 de l'échantillon global). Ce dernier échantillon n'a pas servi au calage de la fonction de transfert afin de réduire les risques d'interaction entre le calage de la fonction de transfert et du modèle de production.

- Les pluies efficaces déconvoluées sont en général bonnes, elles sont faibles en début d'épisode et tendent à égaler les pluies brutes en fin d'épisode.

- La reconstitution des crues tests à partir de la fonction de transfert issue de la DPFT et des pluies efficaces modélisées s'est faite de façon satisfaisante.

Néanmoins, la faible qualité de quelques résultats de validation peut être due à une initialisation inadéquate du modèle de production via ses indices de précipitations antérieures. Une éventuelle approche pour pallier cet effet consisterait à utiliser, en mode opérationnelle, les différences des débits modélisés venant s'ajouter à un débit antérieur mesuré.

Enfin, nous pensons qu'un effort important devra être désormais réalisé dans la recherche des fonctions de production pour qu'elles s'adaptent mieux aux pluies efficaces déconvoluées par la méthode DPFT.

5 – CONCLUSION

La méthode DPFT est une extension de la méthode de l'hydrogramme unitaire, son originalité réside dans le fait qu'à partir des seules mesures des débits et des pluies brutes, elle est capable de fournir à la fois la fonction de transfert à travers sa différence première, et une série de pluies efficaces robustes.

Contrairement aux autres méthodes, la méthode DPFT n'impose pas de fonction de production, l'initialisation de l'algorithme se fait avec des valeurs arbitraires (pluies brutes).

Elle repose sur trois principes de base :

- La formulation en différence,
- les pluies efficaces sont considérées comme inconnues du problème,
- elles sont obtenues grâce à une solution alternative itérée.

Seulement le rôle des contraintes est capital pour la convergence de la méthode.

L'application de cette méthode au bassin versant d'Oued-Dis, a confirmé la robustesse et l'efficacité de cette dernière pour la prévision des crues.

DÉFINITION DES TERMES

- A_i : coefficient de la fonction de transfert au pas i
- a_i : coefficient de la différence première de la fonction de transfert au pas i
- B, C : paramètres à caler de la fonction de production
- DPFT : différence première de la fonction de transfert
- FT : fonction de transfert
- IPA : indice des pluies antérieures à l'épisode pluvieux considérée (mm/h)

- K : mémoire d'identification ou longueur de la fonction de transfert
- m : longueur des pluies efficaces de l'épisode considéré
- n : longueur des débits de l'épisode considéré
- PB : pluie brute (mm/h)
- PE : pluie efficace (mm/h)
- Q_0 : débit de base initial de la crue considérée (m^3/s)
- \bar{Q} : débit moyen de la crue considérée (m^3/s)
- \hat{Q} : débit estimé de la crue considérée (m^3/s)
- Q_i : débit au pas i de la crue considérée (m^3/s)
- q_j^L : différence de débit : $Q_i - Q_{i-1}$ de la crue d'index L (mm/h)
- r : coefficient de corrélation (%)
- SPBA (t) : indice des pluies antérieures à la pluie efficace à calculer (mm/h)
- T : coefficient de Nash (%)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOX G.E.P., JENKINS G.M., 1970. Time series analysis, forecasting and control. HOLDEN DAY, SAN FRANCISCO, 578.
- CHAMBAZ H., 1990. Contribution à l'étude de la méthode DPFT - différence première de la fonction de transfert - Application au bassin versant de l'Oued Dis (Sebaou). Thèse de Magister ENP Alger.
- DUBAND D., 1978. Fonctions de transfert pluie-débit sur des bassins versants de l'ordre de 1 000 km². Note interne, EDF-DTG, Grenoble.
- DUBAND D., OBLED Ch., RODRIGUEZ J.Y., 1993. Unit hydrograph revisited: An alternate iterative approach to UH and effective precipitation identification. *Journal of Hydrology*, 150, 115-149.
- GUILLOT P., DUBAND D., 1980. Fonctions de transfert pluie-débit sur des bassins versants de l'ordre de 1 000 km². *La houille blanche*, 4/5.
- NALBANTIS I., 1987. Identification de modèles pluie-débit du type hydrogramme unitaire : développements de la méthode DPFT et validation sur données générées avec et sans erreur. Thèse de doctorat. I.N.P. Grenoble, 492.
- NEWTON D.W., VINYARD J.W. 1967. Computer determined unit hydrographs from floods. *Journal of hydraulic division*, ASCE, vol 93, n° HY5 Proc. Paper 5449, 219-234.
- NOURI I., 1986. Relation précipitation-ruissellement-saturation. Diplôme d'ingénieur ENP Alger.
- VERSIANI B., 1983. Modélisation pluie-débit pour la prévision des crues. Thèse de Docteur-ingénieur. I.N.P. Grenoble.