

Application du modèle de Muskingum pour la prévision des crues de la Medjerda en Tunisie

ABIDI Sahar, HAJJI Olfa, HABAIEB Hamadi

Institut National Agronomique de Tunis (INAT).

Résumé - Cette étude a pour objectif la prévision des crues aux trois stations principales du cours d'eau de la Medjerda, à l'amont du barrage Sidi Salem: de l'amont à l'aval Ghardimaou, Jendouba et Bou Salem. 22 crues ont été sélectionnées pour faire de la prévision avec le modèle de Muskingum. Le délai de prévision a été varié de 2 heures à 8 heures avec un pas de 2. Deux scénarios ont été testés : avec et sans prise en compte des affluents. Pour juger de la qualité des modèles de prévision, trois critères de comparaison ont été choisis. Cette étude a montré que le modèle de Muskingum a donné des résultats satisfaisants pour la prévision des crues de la Medjerda. Cette satisfaction est d'autant plus fiable que le délai de prévision est faible. De plus, cette étude a dégagée que la prise en compte des affluents améliore les résultats des modèles de prévision en temps réel.

Mots-clés : Prévision des crues, Rivière de Medjerda, Muskingum, Affluents.

Abstract – Flow forecasting by Muskingum model of Medjerda River in Tunisia

This study aims to flood forecasting at the three main stations of the Medjerda River, located in the upstream of Sidi Salem dam, Ghardimaou, Jendouba and Bou Salem. 22 floods were selected for flood forecasting by Muskingum model. Time calculation was varied from 2 to 8 hours with a pitch of 2 hours. Two scenarios were tested; forecasting with and without consideration the tributaries. To judge the quality of the forecasting model, three optimization criteria were chosen. This study showed that the results of flood forecasting by Muskingum model were satisfactory and by considering tributaries it were more satisfactory.

Keywords: Flood forecasting, Medjerda River, Muskingum, Tributaries.

Introduction

Le problème des crues s'est imposé à l'homme depuis toujours. En Tunisie, depuis quelques années, les problèmes des risques liés aux eaux courantes sont devenus très préoccupants. Les inondations constituent le risque naturel le plus répandu dans le pays. Aujourd'hui, le problème se pose sérieusement dans le bassin versant de la Medjerda, particulièrement dans la plaine de Ghardimaou –Jendouba - Bou Salem. Ces crues ont rappelé l'acuité des dangers qui pèsent sur la société et l'environnement.

La gestion du risque d'inondation peut se décomposer en trois phases (Estupina, 2004): la phase de prévention, la phase de gestion de la crise et l'analyse post crise. En effet La phase de gestion de la crise consiste en la surveillance, l'annonce et la prévision d'un événement potentiel de crue afin de minimiser ses conséquences possibles, en agissant sur l'organisation des secours en particulier. Dans ce contexte s'inclut le présent travail de recherche.

Habaieb et al. (2013) ont montré, que le modèle de propagation de Muskingum convient mieux pour la reconstitution des hydrogrammes des débits dans le cas de la rivière de la

Medjerda (grand bassin versant). Dans cette étude on va appliquer ce modèle pour la prévision des crues sur cette même rivière.

25 crues ont été reconstruites, par le modèle propagation des crues de Muskingum, sur les trois tronçons de Ghardimaou, Jendouba et Bou Salem dans une étude antécédente (Abidi, 2011). Ces crues font l'objectif de prévision des hydrogrammes par l'intermédiaire du même modèle dans cette recherche.

Pour la reconstitution des hydrogrammes, nous avons trouvés que la prise des débits des affluents améliore les résultats (Abidi, 2014). Nous allons analyser le cas pour la prévision des débits.

Dans ce contexte, deux scénarios ont été testés ; la prévision sans et avec considération des affluents. Au niveau de la station de Bou Salem, les hydrogrammes des crues ont été prévus à partir des crues de Ghardimaou et de Jendouba.

1. Matériels & Méthodes

Ce papier analyse les résultats de prévision des crues avec le modèle de propagation de Muskingum.

1.1. Modèle de prévision

La prévision des débits pour ce travail est basée sur la reconstitution des débits par le modèle de propagation de Muskingum. Ce modèle fut développé en 1939 par McCarthy. Il est très utilisé en ingénierie hydrologique. Cunge (1969) a démontré que ce modèle est numériquement équivalent aux équations de Saint-Venant via l'équation de diffusion d'une onde. Ce modèle propose une relation entre le débit amont (Q_a) et le débit aval (Q_v) (Habaieb, 1992).

$$Q_v(t+d) = a_1 Q_a(t) + a_2 Q_a(t+d) + a_3 Q_v(t) \quad (\text{Eq.1})$$

Sachant que, a_1 , a_2 et a_3 sont les coefficients du modèle déterminer par la méthode des moindres carrés et d est le délai de reconstitution.

Pour la prévision d'une crue donnée, on choisit des coefficients reconstitués ceux d'une crue de même saison et indice d'humidité.

Dans cette étude, on a tenu compte des débits des affluents dans la prévision des débits de Jendouba et Ghardimaou.

L'analyse des résultats a été établit avec trois critères d'optimisation : Le coefficient de Nash et Sutcliffe (Eq.2), l'erreur relative de pointe (Eq.3) et le temps qui sépare les débits de pointes observés et calculés (Eq.4).

$$CNash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_m)^2} \quad (\text{Eq.2})$$

$$ERP = \frac{(Q_{op} - Q_{cp})}{Q_{op}} \quad (\text{Eq.3})$$

$$TP = \tau_{Q_p} - \tau_{Q_o} \quad (\text{Eq.4})$$

Avec Q_{omax} : débit observé du pic, Q_{cmax} : débit calculé du pic, Q_{oi} : débit observé, Q_{ci} : débit calculé, Q_m : débit moyen observé, τ_{Q_o} : temps du pic observé, τ_{Q_p} : temps du pic prévu.

1.2. Zone d'étude

La Medjerda est l'un des principaux oueds du Maghreb, tant par la longueur de son cours d'eau, la superficie de son bassin versant que par le volume d'eau qu'elle charrie. En effet la source de cet oued est située en Algérie et dont le lit est principalement sur le territoire de la Tunisie. S'écoulant sur plus de 460 kilomètres dont 350 en Tunisie, c'est le seul et le plus long cours d'eau pérenne de la Tunisie. Il a une superficie de bassin versant de l'ordre de 23 700 km² dont 16 100 en Tunisie.

La zone d'étude est située à la partie haute de la rivière, il s'étend entre la station hydrométrique de Ghardimaou et le barrage de Sidi Salem (figure 1).

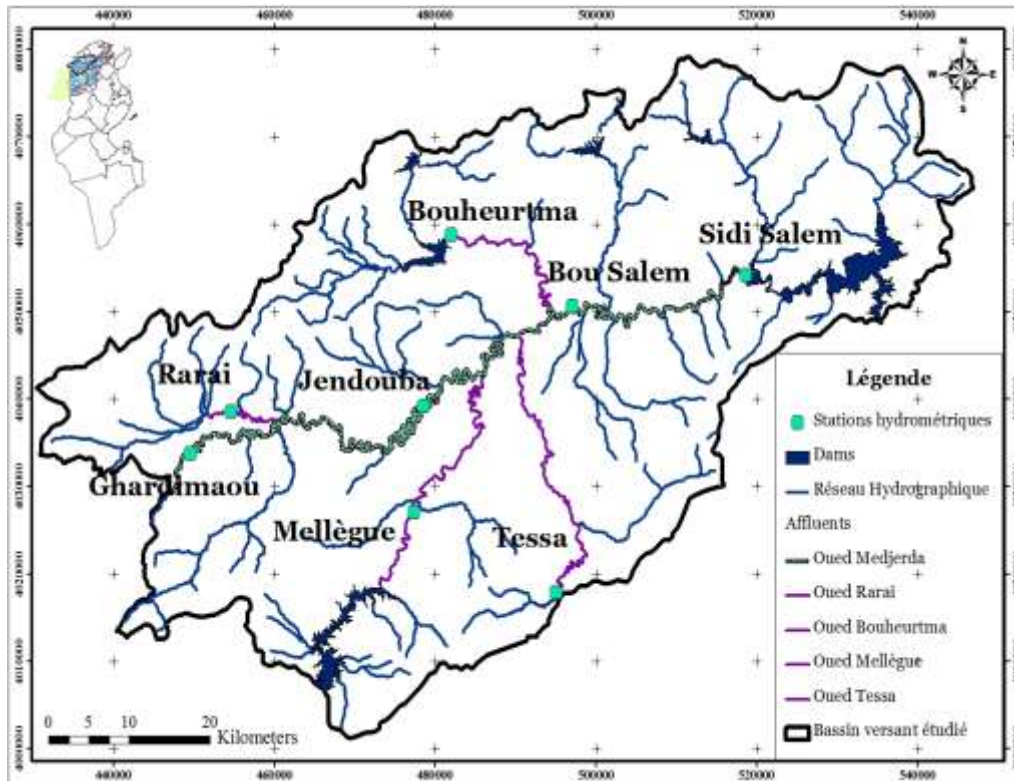


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

Les principaux affluents déversant dans ce bassin versant sont:

Au niveau de la Rive gauche:

- Oued Rarai : s'écoule sur 15 km et draine une superficie de 370 km².
- Oued Bouheurtma : déverse du barrage Bouheurtma, il conflue près Bou Salem avec l'oued Medjerda après un parcours de 64 km. Il draine un bassin versant de 390 Km².

Au niveau de la Rive droite

- Oued Mellègue : qui découle du barrage Mellègue, il parcourt une distance de 317 km avant de confluer près de Jendouba, avec l'oued Medjerda à 140 m d'altitude.
- Oued Tessa : Il se jette dans la Medjerda à quelques kilomètres en aval de l'oued Mellègue. Il conflue avec l'oued Medjerda dans la plaine de même nom à 133 m d'altitude après un parcours de 143 km.

Nous avons considéré que les distances entre les stations de Jendouba, Mellègue, Tessa et Bouheurtma et la station de Bou Salem sont égales. Les débits à la station de Bou Salem seront la somme des débits amont. De même les débits à Jendouba seront la somme des débits de Ghardimaou et Rarai.

Pour la partie amont de la haute vallée, en une journée pluvieuse, il pleut souvent entre 25 et 50 mm. La pluie annuelle minimale varie entre 107 mm (Oued Mellègue) et 430 mm (Barrage Kasseb). Tandis que les valeurs maximales de pluie peuvent atteindre 516 à

1380mm. La pluviométrie annuelle peut atteindre les 1380 mm, en fait c'est la zone la plus pluvieuse du bassin de la Medjerda où le relief est le plus accentué.

L'oued Medjerda a souvent connu des crues violentes et rapides. Nous avons pu collecter 25 crues qui s'étalent dans la période de 1973 à 2012. Ces crues sont caractérisées par un débit de pointe important.

2. Résultats et discussions

Les résultats de prévision dépendent du tronçon étudié et du délai appliqué. Pour analyser les résultats nous dressons les fonctions de répartitions des différents critères sur chaque tronçon.

2.1. Tronçon Ghardimaou – Jendouba

Les figures suivantes présentent la fonction de répartition du coefficient de Nash pour tous les délais:

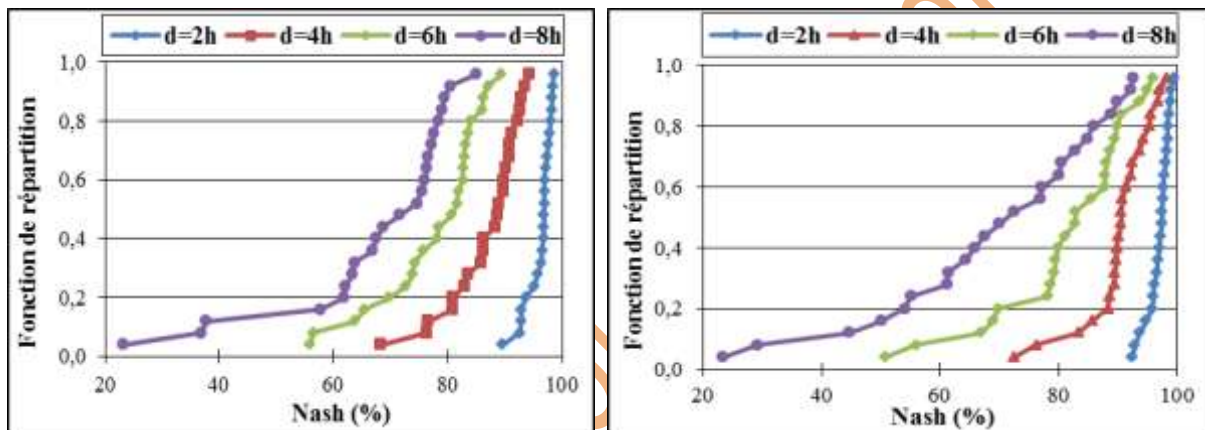


Figure 2. Fonction de répartition de l'erreur relative de pointe sans (à gauche) et avec (à droite) considération des débits des affluents sur le tronçon Ghardimaou – Jendouba

Le coefficient de Nash varie entre 23% et 98% pour la prévision des crues sans considération des débits des affluents entre 23% et 99.6% en considérant ces derniers. On conclut de ces graphes, que le coefficient de Nash est proportionnel au délai de prévision. Les valeurs les plus fortes sont trouvées par la prévision de 2 heures et en tenant compte des débits des affluents.

La fonction de répartition de l'erreur relative de pointe (ERP) est donnée par les figures ci-après :

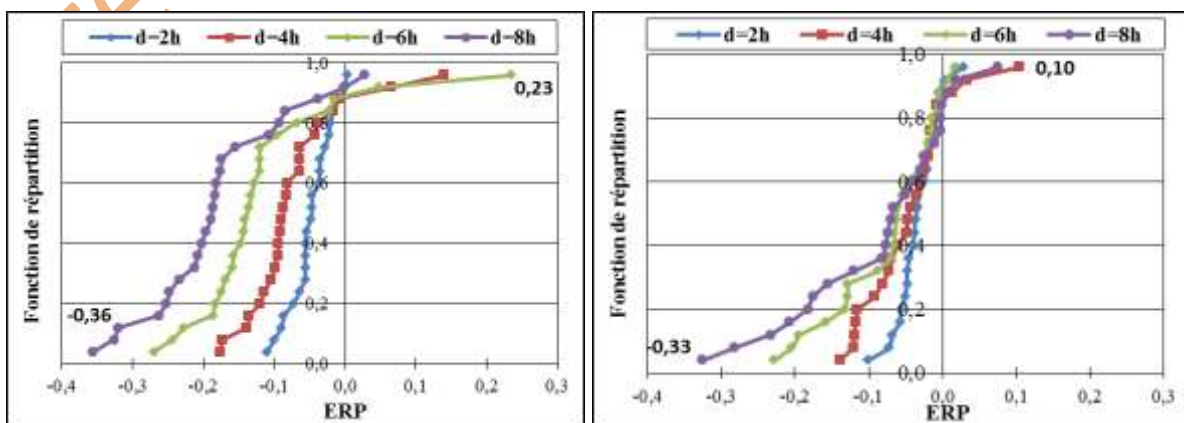


Figure 3. Fonction de répartition de l'erreur relative de pointe sans (à gauche) et avec (à droite) considération des débits des affluents sur le tronçon Ghardimaou - Jendouba

L'erreur relative de pointe varie de -36% à 23% pour la prévision des crues sans considération des affluents et de -33% à 10% en considérant ces derniers. Ces graphes montrent que pour un nombre important des crues, le modèle de Muskingum sous-estime la pointe de la crue. Pour le même signe, la variation de l'erreur relative de la pointe 'ERP' est proportionnelle au délai de prévision. Les valeurs d'ERP les plus faibles sont trouvées par la prévision de 2 heures et en considérant les débits des affluents.

Les valeurs de l'erreur du temps de pic sont variables pour les deux scénarios ; elles varient de 2 à 9 heures pour le 1^{er} scénario (sans affluents) et entre 1 et 8 heures pour le 2^{ème} scénario.

2.2. Tronçon Jendouba – Bou Salem

Nous analysons sur ce tronçon les résultats de prévision des débits de Bou Salem à partir des débits de Jendouba avec le modèle de Muskingum.

Les figures suivantes présentent la fonction de répartition du coefficient de Nash pour tous les délais :

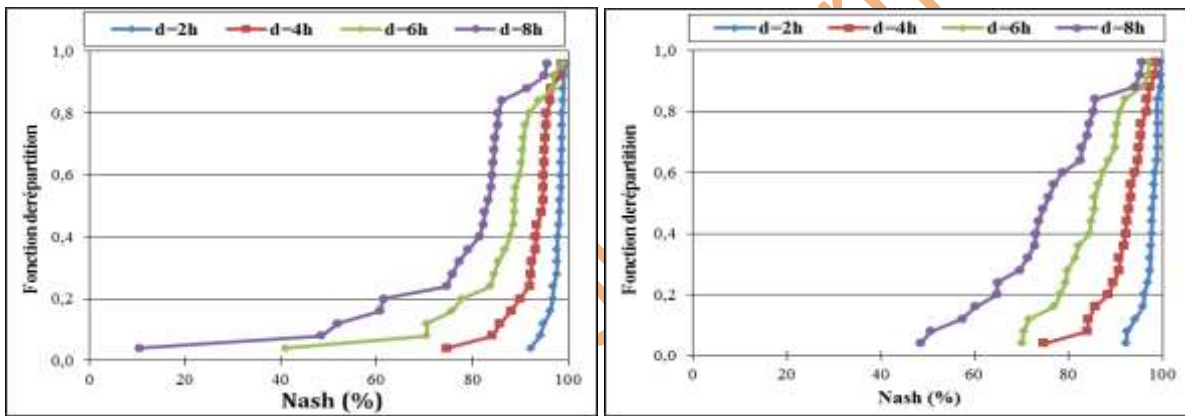


Figure 4. Fonction de répartition de l'erreur relative de pointe sans (à gauche) et avec (à droite) considération des débits des affluents sur le tronçon Jendouba – Bou Salem

Le coefficient de Nash varie proportionnellement au délai de prévision ; il est plus faible pour le délai de 8 heures pour les deux scénarios. Les valeurs du coefficient de Nash sont plus importantes pour le 2^{ème} scénario : elle est de 11% à 99% pour le 1^{er} scénario et de 48% à 99.6% pour le 2^{ème} scénario. On conclut de ces graphes, que le modèle de Muskingum répond à l'objectif attendu.

La fonction de répartition de l'erreur relative de pointe (ERP) est donnée par les figures ci-après :

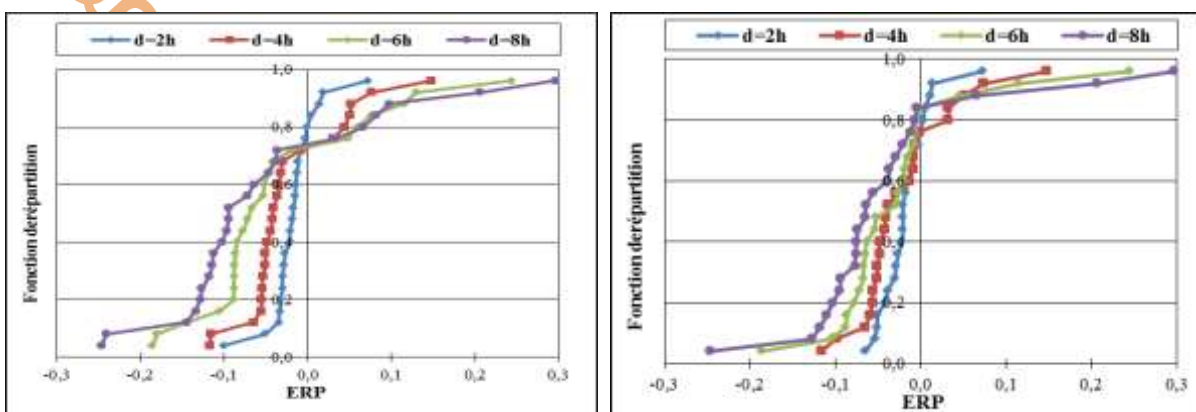


Figure 5. Fonction de répartition de l'erreur relative de pointe sans (à gauche) et avec (à droite) considération des débits des affluents sur le tronçon Jendouba – Bou Salem

De même que le coefficient de Nash, l'erreur relative de pointe (ERP) varie proportionnellement avec le délai de prévision. Elle est plus importante pour le 2^{ème} scénario (en considérant les débits) : elle est de -25% à 30%. Les valeurs les plus faibles sont données par la prévision des débits au délai de 2 heures. Le modèle de Muskingum sous-estime les pointes des crues.

Les valeurs de l'erreur du temps de pic sont très variables pour les deux scénarios ; mais en général les valeurs les plus faibles sont données pour le délai de prévision de 2 heures.

Pour mettre en évidence l'impact de considération des débits des affluents, on compare les moyennes et les écarts type des coefficients de Nash (tableau 1) et l'erreur relative de pointe (tableau 2) sur les deux tronçons et pour tous les délais :

Table 1. Comparaison des résultats avec le coefficient de Nash

	2 heures		4 heures		6 heures		8 heures	
	Moyenne (%)	Ecart type	Moyenne (%)	Ecart type	Moyenne (%)	Ecart type	Moyenne (%)	Ecart type
Ghardimaou-Jendouba								
Sans affluents	96	0,022	87	0,064	77	0,093	67	0,153
Avec affluents	97	0,019	90	0,060	81	0,116	69	0,190
Jendouba-Bou Salem								
Sans affluents	95	0,020	91	0,055	85	0,120	75	0,184
Avec affluents	98	0,017	93	0,052	85	0,077	76	0,128

Table 2. Comparaison des résultats pour l'erreur relative de pointe

	2 heures		4 heures		6 heures		8 heures	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Ghardimaou-Jendouba								
Sans affluents	0,048	0,030	0,091	0,046	0,144	0,070	0,184	0,097
Avec affluents	0,035	0,025	0,058	0,043	0,074	0,068	0,093	0,094
Jendouba-Bou Salem								
Sans affluents	0,026	0,022	0,053	0,032	0,088	0,054	0,116	0,069
Avec affluents	0,026	0,020	0,049	0,035	0,063	0,058	0,087	0,073

Les graphiques dressés des critères d'évaluation ainsi que les tableaux ci-dessus permettent d'établir les conclusions suivantes :

- Les trois critères varient proportionnellement aux délais de prévision,
- Concernant le coefficient de Nash, il est important pour les deux scénarios et pour tous les tronçons,
- En diminuant le délai de prévision, les résultats sont plus importants,
- La considération des débits des affluents améliore les résultats de prévision.

On présente comme exemple de prévision de l'hydrogramme de Jendouba à partir de Ghardimaou de la crue de Novembre 2010 en considérant l'affluent de Rarai. Cette crue est classée le 14^{ème} selon le coefficient de Nash et 12^{ème} selon l'erreur relative de pointe.

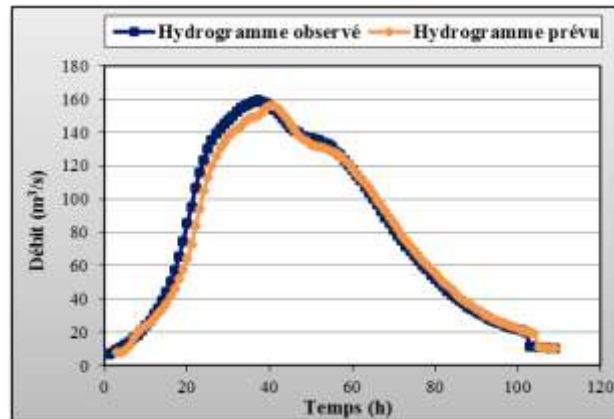


Figure 6. Prévision des débits de Jendouba à partir des débits de Ghardimaou avec le modèle de Muskingum au délai 2 heures en tenant compte des débits de Rarai

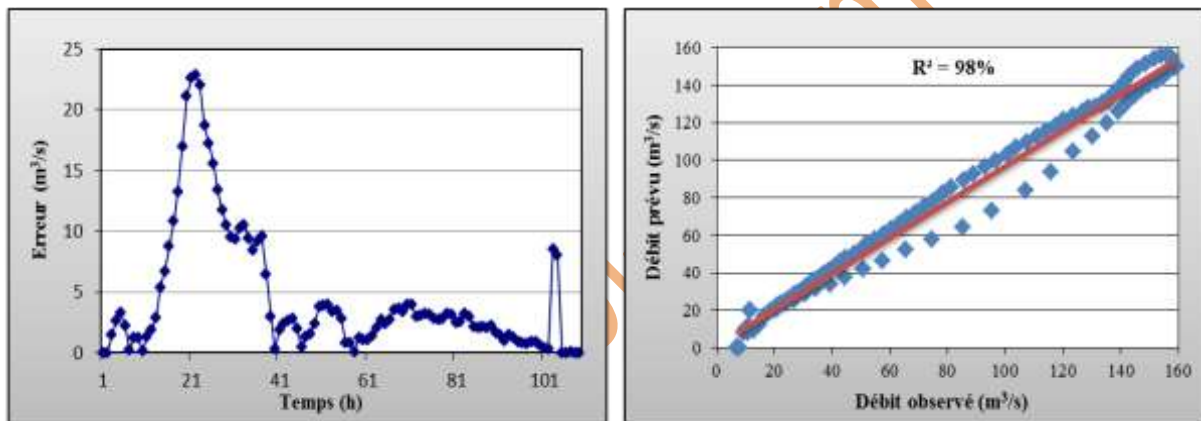


Figure 7. L'erreur et la corrélation entre les débits observés et prévus de Jendouba à partir des débits de Ghardimaou avec le modèle de Muskingum au délai 2 heures en tenant compte des débits de Rarai

On note de ces graphes que le modèle de Muskingum a reproduit la forme de l'hydrogramme ; la phase de montée est sous-estimé. La forme et la valeur de pic sont reproduites avec une erreur de pointe de 2%. Le pic est arrivé en retard de phase de 3 heures. Les nuages des points sont proches de la 1^{ère} bissectrice avec des erreurs sur les débits variant entre 0 et 24 m³/s. Avec un coefficient de Nash de 98%, on conclut que le modèle de Muskingum a permis une prévision fiable de cette crue.

On présente aussi les résultats de prévision de l'hydrogramme de Bou Salem à partir de Jendouba de la crue de Janvier 2003 en considérant les affluents de Mellègue, Tessa et Bouheurtma. Cette crue est classée le 22^{ème} selon le coefficient de Nash et l'erreur relative de pointe.

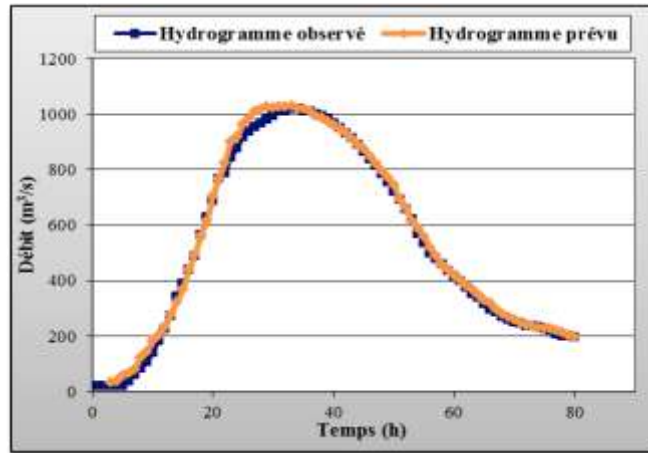


Figure 8. Prédiction des débits de Bou Salem à partir des débits de Jendouba avec le modèle de Muskingum au délai 2 heures en tenant compte des débits des affluents Mellègue, Tessa et Bouheurtma.

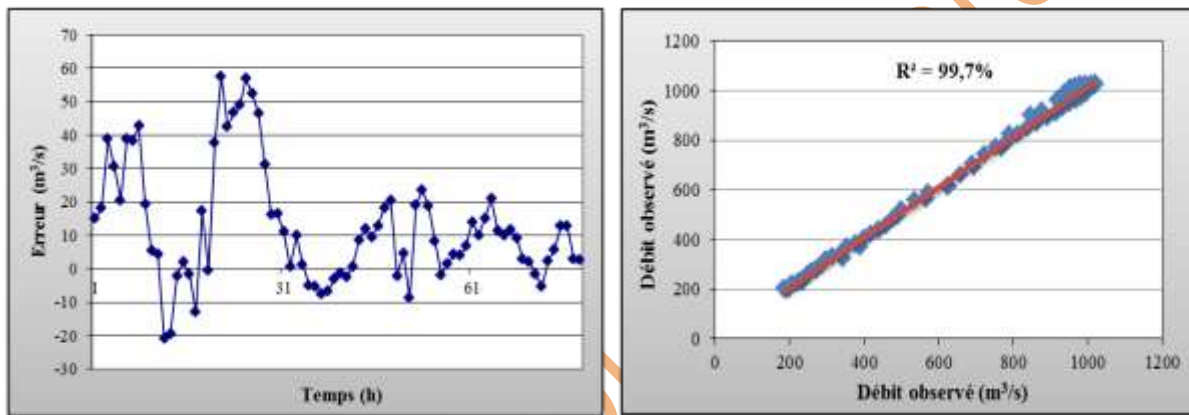


Figure 9. L'erreur et la corrélation entre les débits observés et prévus de Bou Salem à partir des débits de Jendouba avec le modèle de Muskingum au délai 2 heures en tenant compte des débits des Mellègue, Tessa et Bouheurtma.

Ces graphiques montrent que le modèle de Muskingum a reproduit la forme de l'hydrogramme et de pic. La valeur et le temps d'arrivée de pic sont aussi reproduits avec une erreur de pointe de 1%. Les nuages des points sont sur la bissectrice avec une corrélation de 99.7%. Les erreurs entre les débits observés et prévus sont faibles et varient entre -20 et 60 m³/s. Le modèle de Muskingum a donné une prévision fiable de cette crue.

Conclusion

L'objectif de cette étude consistait à prévoir les débits des stations principales d'oued Medjerda à l'amont du barrage Sidi Salem. L'étude est établie sur deux tronçons Ghardimaou-Jendouba et Jendouba-Bou Salem. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle de propagation des crues de Muskingum. 25 crues ont été prévues aux délais de calcul de 2 à 8 heures avec un pas de 2. Nous avons testé deux scénarios : à l'absence des affluents et en les considérant.

Les résultats étaient satisfaisants. En effet le modèle de Muskingum a reproduit la forme de l'hydrogramme, la forme et la valeur de pic. Les valeurs de l'erreur relative et de Nash étaient meilleures en considérant les débits des affluents.

Nous avons montré dans cette étude, qu'en plus de la reconstitution, le modèle de Muskingum donne des bons résultats.

En fin cette étude a montré que la prévision des crues avec le modèle de Muskingum était fiable. Des travaux futurs visent à tester la prévision des crues avec le modèle de Régression qui a donné des bons résultats dans la reconstitution des hydrogrammes dans la même zone de l'article.

Référence

Abidi S, 2011. Essai de reconstitution et de prévision des crues aux stations principales de la Medjerda à l'amont du barrage de Sidi Salem (Tronçon Ghardimaou – Jendouba – Bou Salem), Mastère de recherche, Ecole Supérieure des Ingénieurs de l'Équipement Rural de Medjez El Bab.

Abidi S., Hajji O., Hermassi T. et Habaieb H., 2014. Influence of considering tributaries to reconstruct flood hydrograph of an extreme event on the upstream portion of Medjerda River, International Research Journal of Public and Environmental Health Vol.1 (3),pp. 54-62.

Cunge J. A., 1969. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum Method), J. Hydraulic Res.

Estupina V, 2004. Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair Application à de petits bassins versants du sud de la France, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse.

Habaieb H., 1992. Comparaison Numérique des modèles de prévision des crues, application à des bassins versants Belge, Français et tunisien. Thèse de Doctorat à l'INP de Toulouse – France.

Habaieb, H. Abidi, S., Hermassi, T. 2013 Essai de reconstitution et de prévision des crues aux stations principales de la Medjerda (Tunisie). Communication orale au 5ème colloque international sur les ressources en eau et le développement durable. (CIRED). 24 et 25 février 2013; Alger- Algérie. Proceeding pp. 142,146. Alger- Algérie. Proceedings pp. 142-146.

McCarthy, G. T., 1939. The unit hydrograph and flood routing. U.S. Corps Eng., Providence, R.I.