

## **Modélisation de la prévision des crues éclair au niveau du bassin versant de la Medjerda**

MOHAMED GHARBI

Institut National Agronomique de Tunisie. Université de Carthage. Av, Charles Nicolle, Tunis

AMEL SOULAMIA

Institut National Agronomique de Tunisie. Université de Carthage. Av, Charles Nicolle, Tunis

### **Abstract**

In recent years, floods have become a real scourge, more and more frequent and devastating. Tunisia does not escape the problems of flooding, which can threaten our lives. The treatment requires a better understanding of the phenomenon (floodplain), and requires the use of prediction methods. In order to limit this risk, we were interested in modeling of Medjerda hydrodynamics. At first, several simulations were conducted by a hydraulic model. These simulations have concerned the recent floods for which data are available, in particular the spectacular flood of January 2003 and the most recent flooding occurred in February 2012. As a second step, we developed the flooding map by HEC-GeoRAS software, to predict and minimize the harmful effects of flooding in the Medjerda river. The analysis of the results shows a good correlation between simulated parameters and those measured. Finally we note that, there is a flood of the river when the flow rate exceeding  $250\text{m}^3/\text{s}$ , and for a flow rate of  $400\text{m}^3/\text{s}$  many overflowing sections are observed. These sections are concentrated in Medjez El Bech city and at the Andalous Bridge.

### **Résumé**

Les inondations sont devenues un véritable fléau ces dernières années, de plus en plus fréquentes et dévastatrices. La Tunisie n'échappe pas des problèmes d'inondation, qui peuvent menacer notre vie. Le traitement passe par une meilleure connaissance du phénomène (crue), et exige le recours à des méthodes de prévision. En effet, pour limiter ce risque, on s'est intéressé à la modélisation de l'hydrodynamique de la Medjerda. Dans un premier temps, on a réalisé des simulations avec un modèle hydraulique. Ces simulations ont concerné les crues récentes pour lesquelles on dispose de données, en particulier la crue spectaculaire de janvier 2003, et la crue la plus récente survenue en février 2012. Dans un second temps, on a élaboré la carte d'inondation par le logiciel HEC-GeoRAS, permettant de prévoir et de minimiser les effets néfastes des inondations au niveau de la Medjerda. L'analyse des résultats obtenus montre une bonne corrélation entre les paramètres simulés et ceux mesurés. On note un débordement de la rivière pour une valeur de débit dépassant  $250\text{m}^3/\text{s}$ , et pour un débit de  $400\text{m}^3/\text{s}$  on observe plusieurs sections débordantes. Ces sections se concentrent dans la ville de Medjez El Bech et au niveau du pont Andalous.

## **1. INTRODUCTION**

Les problèmes des inondations se posent sérieusement dans le bassin versant de la Medjerda, en effet les risques des inondations existent encore pour certaines villes. Les graves inondations qui ont frappé la région de Redeyef dans le sud Tunisien en septembre 2009, les crues spectaculaires de la Medjerda en 1973 et 2003 restent gravées dans la mémoire des Tunisiens [1], et récemment les inondations de février 2012. Pour limiter ce risque, on s'est ainsi intéressé à l'étude de la dynamique fluviale de l'Oued Medjerda, afin de délimiter les surfaces inondées, et de déterminer les zones à risque [2].

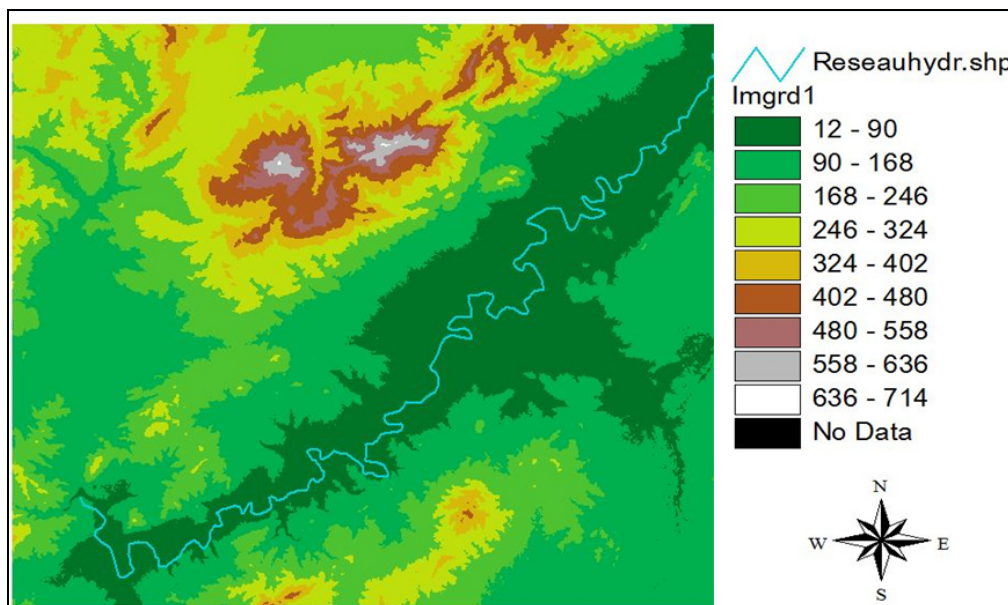
En effet, la présente contribution consiste à étudier l'hydrodynamique de la Medjerda en aval du barrage Sidi Salem. Ce barrage est le plus volumineux des ouvrages hydrauliques en Tunisie, possédant un volume de retenue qui dépasse 700 millions de m<sup>3</sup>. On s'est intéressé en particulier au comportement hydrodynamique de l'Oued se rapportant à la crue de janvier 2003, et celle de février 2012 (simulations par le code MIKE 11). D'autre part, on compte élaborer la carte d'inondation qui constitue un paramètre important dans le choix d'aménagement protecteur futur (simulations par le logiciel HEC-GeoRAS).

## 2. CONTEXTE ET ENJEUX

Les crues éclair sont dues à de violentes pluies localisées, dont l'évolution est soudaine et de courte durée, et dont les impacts humains et socio-économiques sont lourds de conséquences [3]. Les modalités de fonctionnement de ces «crues rapides» restent extrêmement difficiles à évaluer car les mesures et les observations sont rares [4]. La Tunisie, comme tous les pays du pourtour méditerranéen, n'échappe pas des problèmes d'inondation, en particulier, au niveau du bassin versant de la Medjerda. Pour ce faire, on a réalisé des simulations hydrauliques. En effet, dans un premier, on a considéré des modélisations hydrodynamiques unidimensionnelles en utilisant le code MIKE 11, afin de contrôler le comportement de la ligne d'eau lors de ces crues. Ce logiciel se base sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant, pour prédire la propagation des crues dans les cours d'eau. Dans un second temps, on s'est intéressé à la cartographie de l'extension des inondations moyennant le logiciel HEC-GeoRAS, lors des événements de crues pour la plaine de Medjez El Beb.

Le tronçon étudié s'étend sur une longueur de 85 km allant du barrage Sidi Salem jusqu'au barrage Laaroussia. On dispose d'une base de données nécessaire pour la mise en œuvre du modèle, telles que les sections transversales, les hydrogrammes de crues, la hauteur d'eau, et le modèle numérique de terrain (MNT) (figure1).

On présente ci-dessous le modèle numérique de terrain (établi à partir de l'assemblage de cartes topographiques 1/25 000) de la moyenne vallée de la Medjerda, ainsi que le tronçon principal de la rivière :



**Fig.1** : Modèle numérique de terrain de la moyenne vallée de la Medjerda (1/25000)

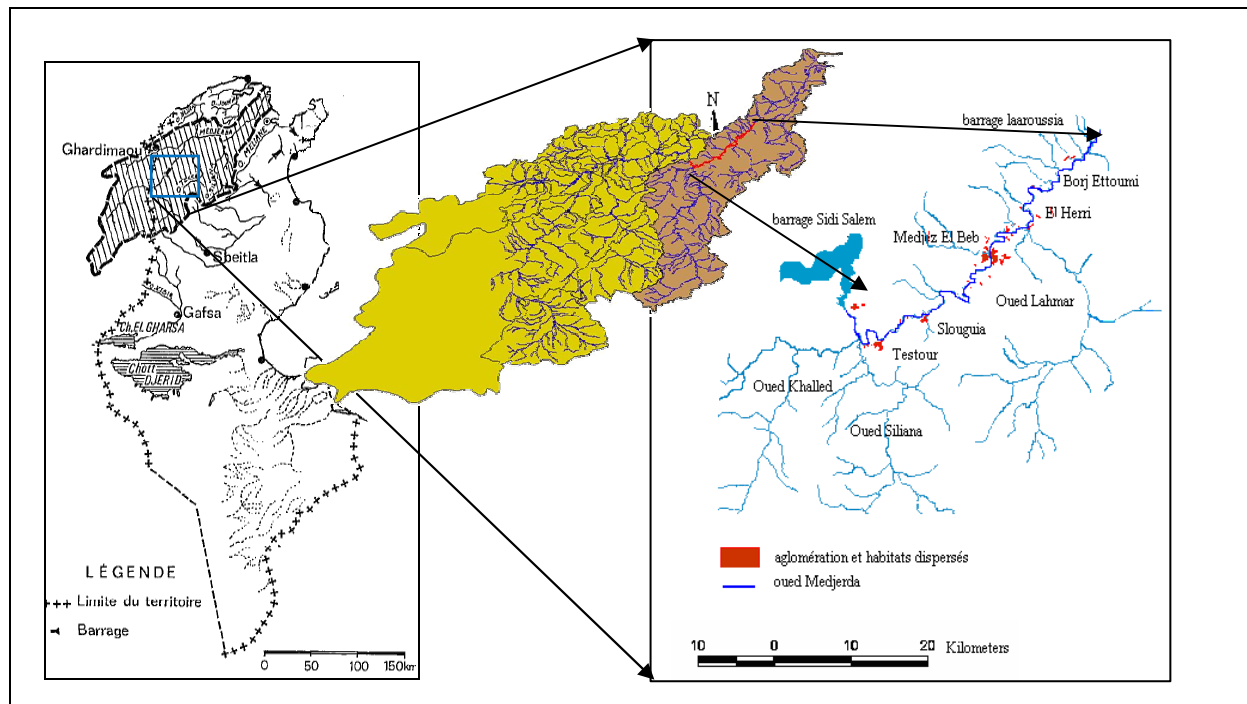
Par ailleurs, nous disposons aussi de données topographiques (les profils en travers, la carte des pentes, le modèle numérique de terrain, etc...) issues de la campagne topographique 2007 réalisée en collaboration avec le ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques. Pour la zone d'étude considérée, on dispose de 149 profils en travers distant en moyenne de 500 m, décrivant la géométrie de la rivière.

## 2.1. Présentation de la zone d'étude

La Medjerda est le plus important Oued en Tunisie, il prend sa source en Algérie puis coule vers l'Est avant de se jeter dans la Méditerranée [5]. Le cours principal de la Medjerda faisant lui 485 km, c'est le seul Oued permanent du pays [6]. Malgré les précipitations relativement faibles dans le bassin au printemps et en automne, de violentes inondations peuvent être observées au cours de ces saisons. Cela concerne les attributs des débits en provenance d'Algérie et les précipitations tels que les écoulements avec des pointes élevées provenant des affluents de la rive droite.

Pour notre cas d'étude, la zone retenue est la moyenne vallée ayant été envahie par les eaux, au moins trois fois au cours des dernières années. On s'intéressera en particulier au bief compris entre les deux barrages de Sidi Salem et Laâroussia [6].

La figure ci-dessous présente la localisation du bassin versant de la Medjerda, en particulier la zone d'étude considérée :



**Fig.2 :** Localisation du bassin versant de la Medjerda

Le dit tronçon est contrôlé par 6 stations hydrométriques qui font les mesures de débit, de la hauteur d'eau, de précipitations, de transport de sédiments, etc. Ce tronçon s'étend sur une longueur de 85 km, il est alimenté par 3 affluents : Oued Khaled et Oued Siliana au niveau de la rive gauche, et Oued Lahmar au niveau de la rive droite.

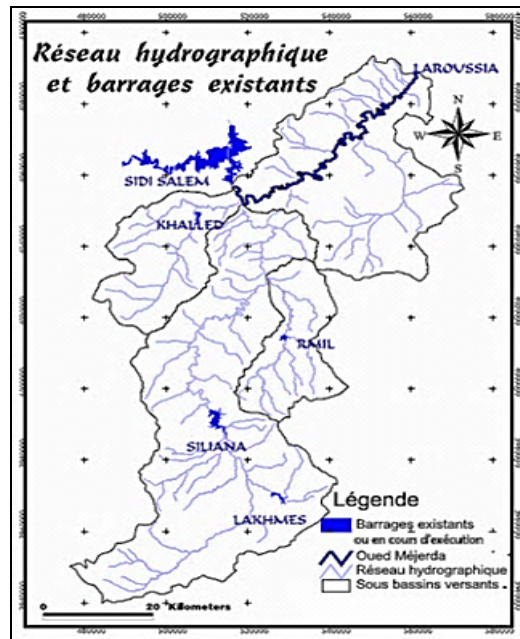


Fig.3 : Réseau hydrographique de l'Oued Medjerda [6]

### 3. MODELISATION ET SIMULATION

Pour mieux représenter les processus hydrologiques plus ou moins complexes se produisant sur un bassin versant, on présente ci-dessous, les différents modèles qui sont utilisés pour les simulations des crues en fonction des particularités des rivières, en particulier les modèles hydrauliques [7].

Les modèles hydrauliques (ou modèles de propagation de débit amont-aval), sont adaptés pour certaines rivières avec peu d'apport intermédiaire. Ils sont de puissants outils d'étude pour la construction et l'exploitation des aménagements fluviaux. Ils permettent l'analyse de l'évolution morphologique d'un cours d'eau, la correction des rivières, la mise au point de consignes de crue et de régulation des plans d'eau des retenues de barrages.

En effet tous les modèles de propagation, en particulier le code MIKE 11 utilisé pour les simulations réalisées dans cette étude, se basent sur la résolution des équations de Saint Venant unidimensionnel (1D) :

- *L'équation de continuité*

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

S : section mouillée

Q : débit

x : direction longitudinale de l'écoulement

t : temps

- *Equation de la dynamique*

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} = g (I - J) \quad (2)$$

U : vitesse longitudinale moyenne

H : tirant d'eau

I: pente du fond

J : pente de ligne d'énergie (traduisant les pertes de charges), pour laquelle la modélisation retenue dans le code MIKE 11, est la suivante :

$$J = \frac{U^2}{K_s^2 R_h^{4/3}}$$

où

$K_s$ : coefficient de Manning-Strickler

$R_h$ : rayon hydraulique

La formule de Manning-Strickler fait donc apparaître la rugosité du fond, à travers le coefficient  $K_s$  [8]. Ce coefficient de rugosité  $K_s$  nécessite donc une attention particulière, puisqu'il constituera un paramètre de calage. En effet, plus la rugosité est importante (plus  $K_s$  est petit), plus l'intensité des inondations est forte.

En ce qui concerne la résolution de ces équations de Saint Venant, elle peut être faite par différentes méthodes numériques [9], telle que la méthode des différences finies, comme celle utilisée par le code MIKE employé dans ces simulations, la méthode des éléments finis comme celle présente dans le code TELEMAC, et la méthode des volumes finis utilisée dans les codes TOPMODEL, MAGE.

Enfin, il faut noter que le système d'équations de Saint Venant n'a pas de solution analytique connue, de ce fait plusieurs essais de simplifications ont été effectués :

#### - *Onde Diffusante*

De l'équation de Saint Venant (1D), on obtient celle de l'onde diffusante en négligeant les termes d'inertie ( $\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x}$ ), ainsi on obtient une équation en hauteur ou en débit :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (3)$$

$$C = \frac{Q}{B \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial H} \quad (4)$$

$$D = \frac{Q}{2 JB} \quad (5)$$

Avec

C : célérité de l'onde

D : coefficient de diffusion

B : largeur de canal à surface libre

$\alpha$ : facteur d'atténuation

Dans ce modèle, l'écoulement se comporte comme une onde lente qui se propage de l'amont à l'aval avec un débit Q, et qui s'atténue sous l'influence des frottements, d'une façon analogue à une diffusion, d'où le nom de coefficient de diffusion [10].

#### - *Onde Cinématique*

Dans l'équation de Saint Venant (1D), en plus des termes d'inertie et de pression qui ont été négligés dans le cas de l'onde diffusante, on néglige aussi dans ce cas de l'onde cinématique, les forces de frottement et de gravité.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Avec

$$I = J \quad (7)$$

On peut ainsi obtenir l'équation de la propagation de l'onde cinématique :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + C \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

Il est à noter que dans les simulations réalisées, les apports intermédiaires provenant des affluents ont été négligés. Concernant les conditions initiales, on a introduit le débit moyen enregistré et la hauteur d'eau correspondante. Pour les conditions limites, on a considéré une condition limite amont de débit, en introduisant la courbe de variation de débit mesuré, et une condition limite aval de niveau d'eau en introduisant aussi la variation de la hauteur d'eau observée.

#### 4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce qui suit, on présente les différents résultats des simulations réalisées. En effet, une première partie est consacrée aux résultats des tests de simulation de la crue de janvier 2003, se rapportant au calage du modèle ; une deuxième partie est consacrée à la validation du modèle en s'appuyant sur les données de la crue survenue en février 2012 ; enfin une dernière partie s'intéressant à la carte d'inondation, a été réalisée par le logiciel HEC-GeoRAS et a mis en relief les zones inondables.

##### 4.1. Simulation de la crue de janvier 2003

Dans un premier temps, on commence par présenter les résultats simulés avec le code MIKE, basé sur la résolution des équations de Saint Venant. La figure 3 ci-dessous présente les débits simulés ainsi que les débits mesurés de la crue de janvier 2003 au niveau de la station Slouguia, située à 10 km de l'aval du barrage de Sidi Salem. Le calage a porté sur la rugosité du fond et des berges, représentée par le coefficient de Strickler ( $K_s$ ). Pour le cas de la zone d'étude considérée, ce calage a conduit à  $K_s=18$ , pour la crue de 2003.

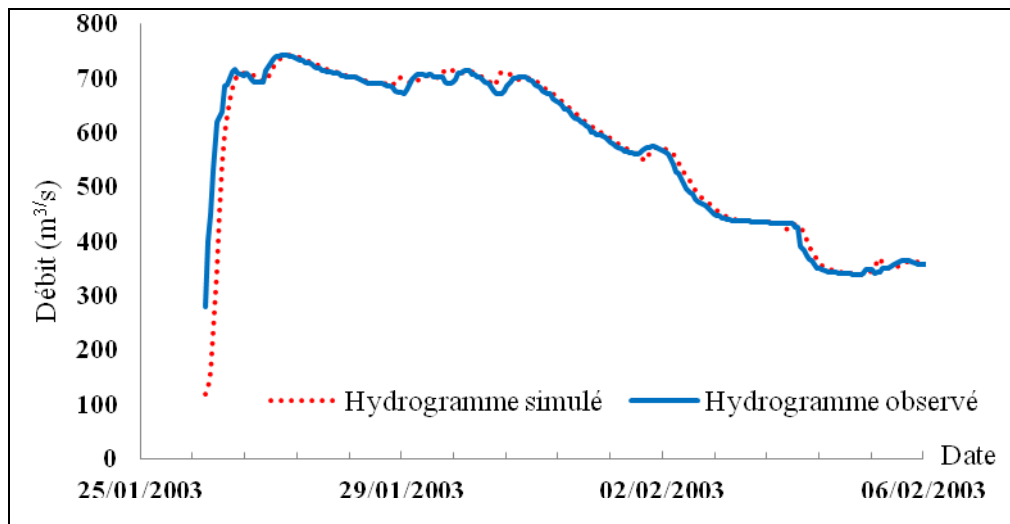


Fig.4 : Simulations de la crue 2003, par MIKE au niveau de la Station Slouguia

L'analyse montre des résultats satisfaisants, les débits simulés sont en accord avec ceux observés. En effet, le débit de pointe de l'ordre de  $740 \text{ m}^3/\text{s}$  est correctement reproduit par le modèle. D'autre part, le calcul de critère de Nash a donné une valeur très proche de 1, ce qui confirme la fiabilité de ce modèle dans la prévision des crues.

#### - Profils en long

Pour mieux contrôler le comportement de la ligne d'eau durant les périodes de crues, on a considéré le profil en long afin de limiter les sections débordantes. La figure ci-dessous montre le comportement de la ligne d'eau le long du cours d'eau, ainsi que la localisation des sections débordantes.

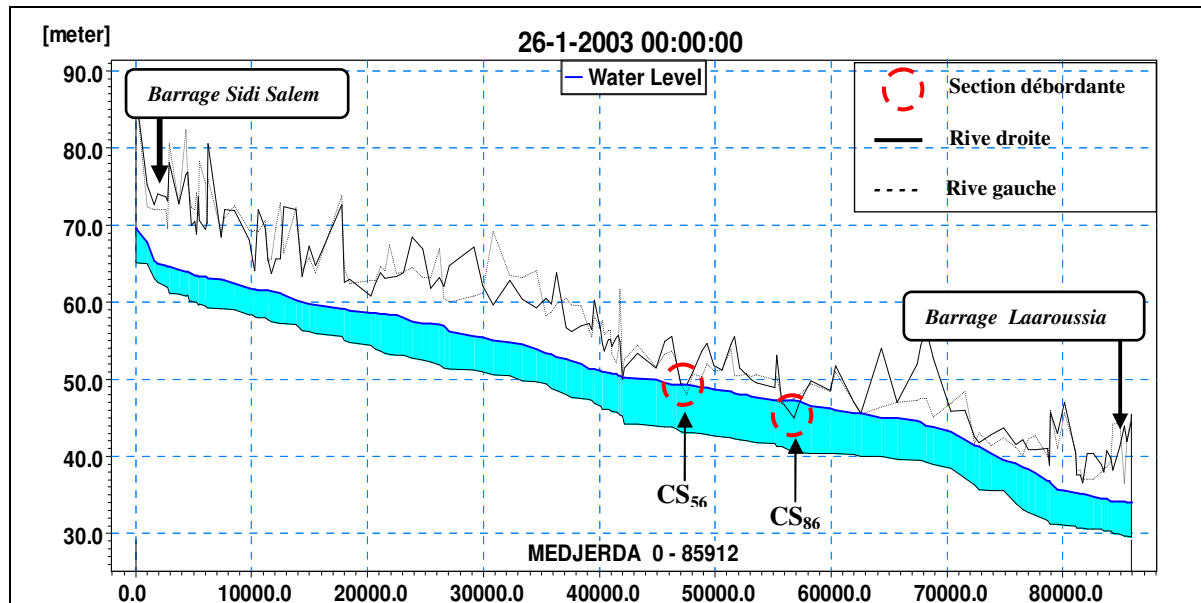


Fig.5 : Profil en long de la ligne d'eau, Crue 2003 (MIKE 11)

On observe un débordement au niveau de la région de Medjez El Beb. La hauteur d'eau atteint une valeur maximale de l'ordre de 5.83 m. L'inondation touche le méandre se trouvant dans la partie nord de la ville de Medjez El Beb, on constate que les deux sections transversales ( $CS_{56}$  et  $CS_{86}$ ) n'arrivent pas à transiter les débits.

#### 4.2. Simulation de la Crue 2012

Pour valider le modèle calé avec les données de la crue de janvier 2003, on a choisi l'événement récemment survenue en février 2012 au niveau de la Medjerda. Ainsi on a réalisé des simulations avec MIKE et une comparaison avec les mesurés au niveau de la station hydrométrique de Slouguia a été effectuée, les résultats obtenus sont satisfaisants (figure 6) :



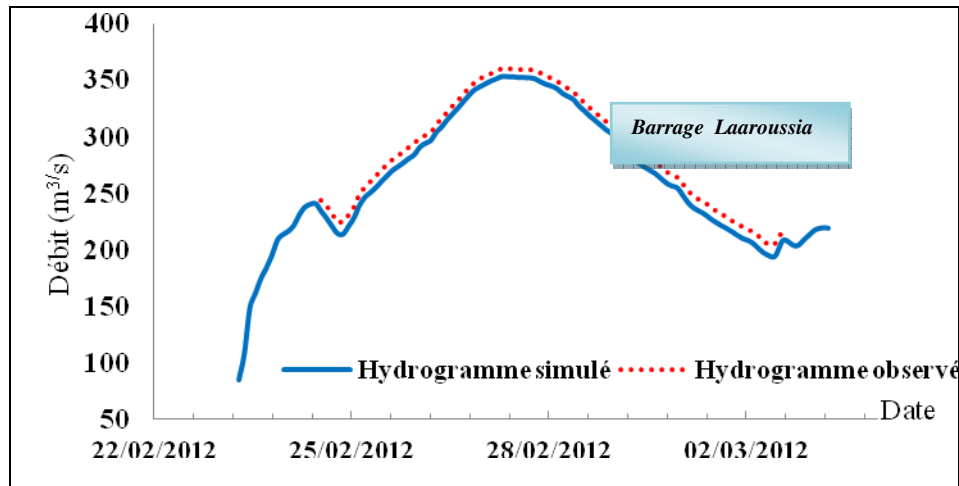


Fig.6 : Simulations de la crue 2012, par MIKE au niveau de la Station Slouguia

Concernant la crue de février 2012, un réajustement de la rugosité a été effectué afin de reproduire correctement les débits observés. Pour notre cas d'étude, on a considéré une valeur de la rugosité  $K_s=25$ . Cette valeur indique une rugosité assez élevée, ce qui est tout à fait attendu vu la composition des sols ainsi que la nature de la végétation existante au niveau de l'Oued Medjerda, conduisant à des rugosités importantes. Ainsi, on remarque que le débit observé est correctement reproduit par le modèle.

#### - Profils en long

Dans cette partie, on s'intéresse à l'étude du comportement de la ligne d'eau tout le long de la rivière, ainsi qu'à la localisation des sections débordantes pour la crue de février 2012. En effet, les hauteurs d'eau enregistrées varient entre une valeur minimale de 3,5 m, et une valeur maximale de 5.83 m provoquant le débordement de l'Oued au niveau de la région de la Medjerda.

Les tests de simulations réalisés par MIKE montrent une hauteur d'eau maximale simulée de l'ordre de 6.1 m, alors que celle mesurée est de l'ordre de 5.83 m. On remarque que l'écart entre ces valeurs maximales simulées et mesurées est acceptable, il est de l'ordre de moins de 0,5 m (figure 7).

On constate aussi que les résultats des simulations de la crue 2012 présentent un léger décalage par rapport aux données mesurées, ceci peut être lié au manque d'actualisation dans les données topographiques qui sont lourdes à réaliser et coûteuses. En effet, ces simulations ont été réalisées avec les mesures des sections transversales de 2003 (disponibles), alors qu'entre 2003 et 2012 il y a eu des crues intermédiaires en particulier celle d'avril 2009. Ces crues ont certainement modifié la forme et la topographie des sections. Pour remédier à ceci, un réajustement de la rugosité s'est avéré nécessaire, et donc le coefficient de Strickler a évolué de  $K_s=18$  en 2003, à  $K_s=25$  en 2012. Ainsi, on a obtenus des résultats corrects, qui peuvent être améliorés dans le cas d'obtention de données complémentaires et actualisées.



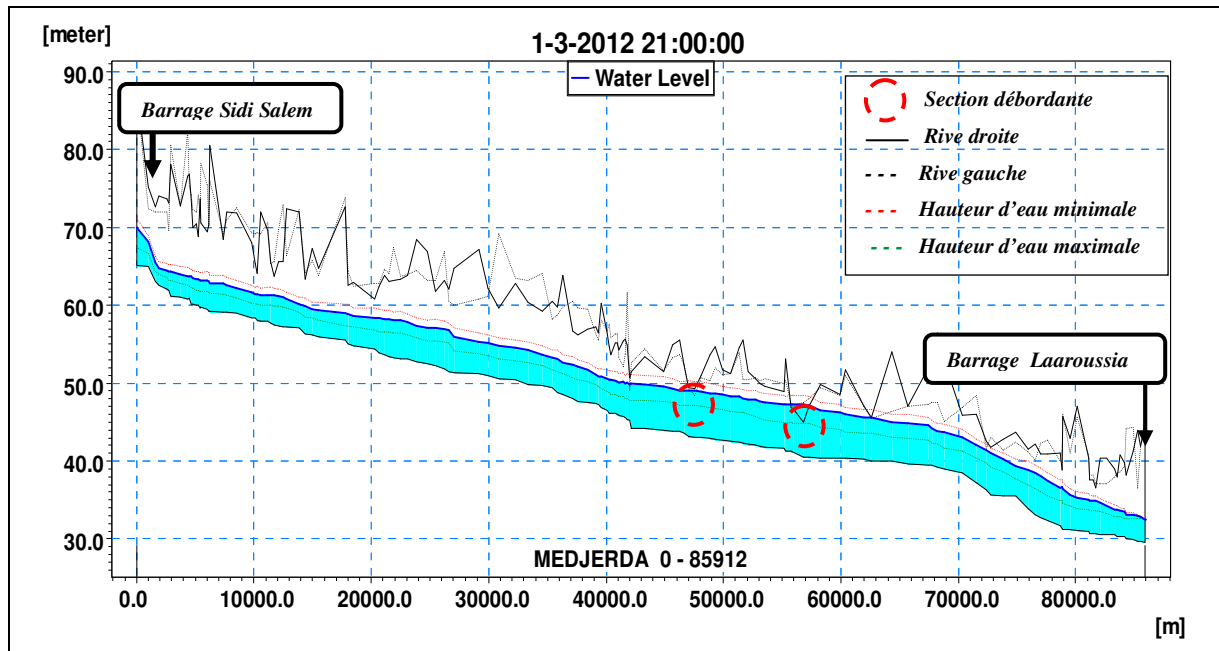


Fig.7 : Profil en long de la ligne d'eau, Crue 2012 (MIKE 11)

- Carte d'inondation

La figure 8 ci-dessous issue par traitement par le logiciel HEC-GeoRAS nous renseigne sur les limites des zones inondées, pour un débit de pointe enregistré au niveau de la ville de Medjez El Beb qui est de l'ordre de 353 m<sup>3</sup>/s, lors de la crue de février 2012. Ce logiciel constitue un système d'analyse cartographique de la rivière, développé en utilisant l'extension « 3D Analyst » du logiciel ArcGIS. HEC-GeoRAS prend en charge l'analyse de données spatiales pour la modélisation hydraulique et la cartographie des zones inondables.

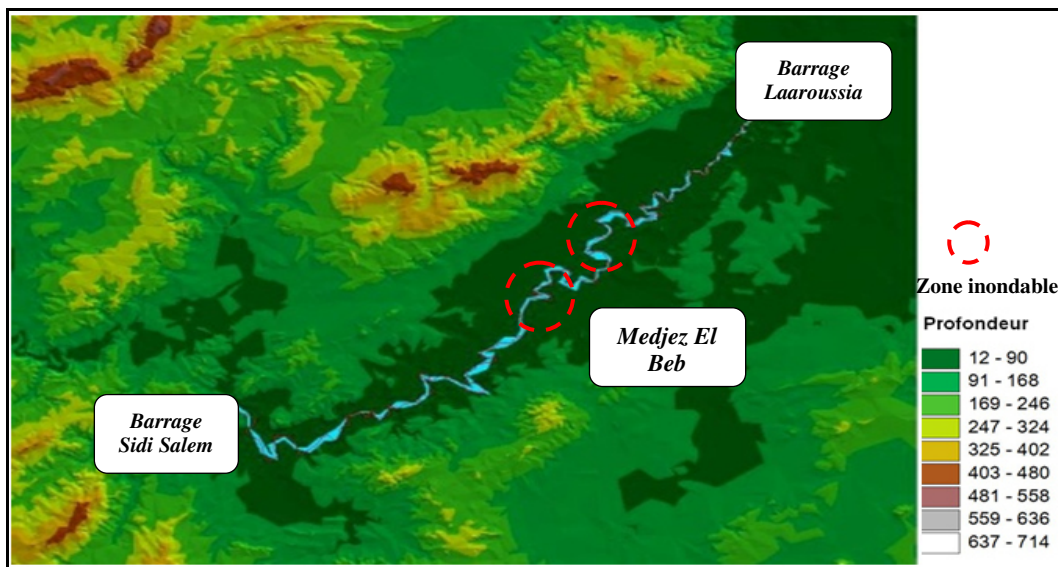


Fig.8 : Carte d'inondation de la Medjerda par HEC-GeoRAS, (Crue 2012)

Il est clair que l'effet de débordement s'accroît en allant de l'amont vers l'aval de la Medjerda, c'est-

à-dire de barrage de Sidi Salem vers celui de Laaroussia. La hauteur d'eau croit légèrement jusqu'à la ville de Medjez El Bebb, tandis qu'au niveau de station El Herri la hauteur commence à diminuer.

Les résultats obtenus montrent qu'on commence à observer le débordement à partir de 150m<sup>3</sup>/s, pour le débit 400m<sup>3</sup>/s on observe plusieurs sections débordantes. Ces sections se concentrent dans la ville de Medjez El Bebb, au niveau du pont Andalou et du méandre Matisse, d'El Herri et de Borj Ettoumi. Ceci revient à l'impact du développement de l'habitation anarchique accompagné des rejets urbains dans le lit majeur qui cause le rétrécissement de la section de l'Oued, et par suite la réduction de la capacité de transit du débit. D'autre part, les ponts qui coupent le tronçon d'étude sont responsables d'une grande perte de charge, causant ainsi une surélévation de la hauteur de l'eau.

## 5. CONCLUSION

La présente étude a permis de réaliser des modélisations et des simulations, conduisant à une première visualisation de l'étendue de la crue, et du comportement de la ligne d'eau au niveau de la Medjerda. Les résultats obtenus se rapportant aux différentes crues sont encourageantes. En effet, moyennant HEC-GeoRAS, on a pu identifier les sections débordantes, entre Sidi Salem et Medjez El Bebb ainsi que de délimiter les zones à risques. Toutefois, la mise en œuvre de ces modèles numériques est un travail fastidieux car il nécessite la collecte d'une énorme base de données spatio-temporelle multi-sources et multi-disciplines. D'un autre côté, la zone d'étude considérée présente de multitudes de contraintes de modélisation, car le réseau hydrographique présente plusieurs méandres avec des pentes très faibles (terrain plat), et des rugosités élevées.

En perspective et on prolongement à ce travail, on s'intéresse à l'étude du transport sédimentaire, phénomène de grande importance, et qui est en liaison étroite avec la compréhension et l'interprétation de l'évolution morphologique des rivières, en particulier de la Medjerda.

## 6. REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique en Tunisie pour le financement de cette étude. Nous remercions également Monsieur Denis DARTUS (Professeur à l'INP de Toulouse et Responsable du groupe HYDROECO de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse) et Monsieur Lucien MASBERNAT (Professeur à l'INP de Toulouse) pour leurs collaborations, et remarques pertinentes, ainsi que les membres du groupe HYDROECO de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse.

## 7. RÉFÉRENCES

1. Gharbi M. & Soulamia A., Simulations des crues éclair au niveau de la haute vallée de la Medjerda (Boussalem), Deuxième Congrès Tunisien de Mécanique COTUME 2012 Sousse, Tunisie (2012) 81-86.
2. Hammami S., Modélisation de la dynamique Fluviale de la Medjerda, Mémoire de Mastère, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), 90p. (2010).

3. Braud I, Roux H, Anquetin S, Maubourguet M.M, Manus C, Viallet P & Dartus D., The use of distributed hydrological models for the Gard 2002 flash flood event: Analysis of associated hydrological processes. *J. of. Hydrology*. Vol 394 (2010) 162–181.
4. Estupina B. V. Chorda J & Dartus D., Prévision des crues éclair. *Géosciences de surface (Hydrologie-Hydrogéologie)*, Science direct (2005) 1109.
5. Rodier A-J. Colombani J. Claude J & Kallel R., Monographie hydrologique du bassin de la Medjerda, ORSTOM, France (1981).
6. Gharbi M. & Soualmia A., Prévision des crues éclair au niveau du bassin versant de la Medjerda. 11ème congrès de mécanique, Agadir. Maroc, 378 (2013).
7. Ambroise B., Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: 1 Processus et facteurs. *Journal of Water Science*. 11(4) 471-496 (1998).
8. Roche P-A., Miquel J., Gaume E., *Hydrologie quantitative, Processus, modèles et aide à la décision*. Springer, France (2012).
9. Estupina B. V., *Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair – Application à de petits bassins du Sud de la France*. Thèse de doctorat de l’institut polytechnique de Toulouse, France, (2004).
10. Talbi S.H. Soualmia A. & Gharbi M., Prévision des débits de crues de l’Oued Medjerda à la station de Boussalem (Tunisie). *Congres international sur les risques naturels et géomantiques Hammamet, Tunisie* (2013).