République Algérienne Démocratique Populaire

Ministères de l'enseignement supérieurs de la recherche scientifique

UNIVERSITE BEDJI MOKHTAR ANNABA

Faculté des Sciences de l'Ingéniorat

Département d'Hydraulique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

Par

TACHI AMINA

BENTRAD MERIEM

Thème

Prédiction De Débit Solide Dans La Période De Crue Par l'Utilisation Des Réseaux De Neurones Artificiels : Étude De Cas De l'Oued Mekerra - Sidi Bel Abbes - Algérie.

Devant les jurys :

M. Boutaghane Hamouda	Président, M.C.A	Univ.Badji mokhtar-Annaba
M. Ouerdachi Lahbassi	Encadreur, Professeur	Univ.Badji mokhtar-Annaba
M. Lekehal Moussa	Examinateur, M.C.A	Univ.Badji mokhtar-Annaba
Mme Moussaoui Moufida	Examinateur, M.C.B	Univ.Badji mokhtar-Annaba
Mme Skhakhfa Imen	Examinateur, M.C.B	Univ.Badji mokhtar-Annaba

Promotion : Juin 2018

Remerciements

*On remercie **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer cette mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de monsieur **Pr.Lahbasi OUERDACHI,** on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de cette mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent aussi à **Dr. TACHI Salah Eddine** et **Mr BOUGGUERRA Hamza** pour leur aide pratique et leur soutien moral et ses encouragements.*

Nous remercions les jurés d'avoir donné de leur temps précieux et leur disponibilité et leur précieuse recommandation qu'ils nous ont prodigues ; enrichir ce travail que nous espérons apporteras une minime contribution à l'enseignement de la branche dont on a choisi pour notre étude.

*On remercie aussi **Dr Ghazi Sabri ; Dr BOULMAIZ Tayeb ; Mm BALLA Faiza** et **Dr DERDOUS Oussama** Pour leurs aides et leurs encouragements et pour leurs riches informations et leurs efforts avec nous.*

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve. Malgré leurs charges académiques et professionnelles.

*Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenue de près ou de loin principalement à le chef de département d'Hydrologie de l'**ANRH** d'Alger, Bir Mourad Raïs **Mr Ben CHABEKH Abed Allah** et tous les ingénieures de la direction régionale centre-sommâa BLIDA.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*A mes parents : **AHCENE et SAIDA**.Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie. Et Que dieu le garde dans son vaste paradis*

*La lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; Mon prince **Barhouma** et ma petite princesse **Selma**, les enfants de mon frèreque je les adore.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à mon frère **SALAH** et sa femme **ALEKSENDRA**, et mon frère **AHMED** et ca fiancée **KHANSSA**. Je dédie ceTravail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs encouragements.*

*Et qui m'ont accompagnaient durant monChemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude, **MERIOMA** ma binôme **AMEL, SANA et MAROUA.***

*Enfin ; mes remerciements à tous mes amis qui m'ont soutenu durant mon travail de mémoire ; **Ma chére Mouna Aliot, Rania Sebihi, Bissou Derdous, Naima Rouabhia, Imen Remdani, Kawther Kachout, Manel Houria, Maroua2.***

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Amina

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*A **mes parents** .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie. Et Que dieu le garde dans son vaste paradis*

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, Mon **MARI** que dieu te **protège**.*

*La lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; Mon prince et mon fils **RAID MED YAHIA** que j'adore.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à ma sœur, **sabrine** que le j'adore ; et mon frère **islem**. Je dédie ce*
Travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs encouragements.

A mon binôme AMINA : ce petit mot décerné à toi ma meilleure amie et tu est ce que j'ai de plus chère au monde.
Et qui m'ont accompagnaient durant mon
*Chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude, **AMEL SANA MAROUA***
Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Meriem

Résumé

La région de Sidi Bel Abbès est périodiquement affectée par des crues et des inondations. La ville de Sidi Bel Abbes est exposée à descrues très importantes et à répétition, ce qui provoque l'augmentation du transport solide avec une quantité importante à partir de l'érosion des terres agricoles.

La gestion des ressources en eau dans les différents systèmes hydrographiques inclut l'évaluation et la prédiction des quantités des sédiments transportés. La zone d'étude est l'oued Mekerra situé au niveau de la plaine de Sidi Bel Abbes (nord-ouest de l'Algérie). Son bassin versant fait partie du grand bassin versant de la Macta.L'objective de cette étude est l'évaluation et la prédictiondu débit de transport solide (Qs) dans la période de crue utilisant la méthode des RNA (Réseaux de Neurones artificiels) au niveau d'oued Mekerra. L'étude a été effectuée sur les données horaires de débit liquide et solide à l'échelle des crues sur une période de 11 ans (1989-2001) (les données utilisées dans cette étude proviennent d'ANRH).Les séries de données ont été divisée en deux, nous avons utilisées 80% pour l'apprentissage et 20% pour la validation avec différentes combinaisons d'entrée.L'apprentissage des modèles étudiés sont basés sur le système retro-propagation « The Back Propagation » utilisant les critères d'efficacités MSE (erreur carrée moyenne) et R^2 (coefficient de détermination).Notre modèle RNA a montré une meilleures performance utilisant le rejet de sédiment "Q_{s-1}" précédent comme entrée "Input". L'utilisation du réseau de neurones artificiel offre une alternative utile et puissante à la prédictionpour modéliser et quantifier la charge sédimentaire qui affecte négativement l'environnement.

Mots clés : Transport solide, Débit solide, Débit liquide, Réseaux de neurones artificiels, crue, oued Mekerra, érosion.

Abstract

The region of Sidi Bel Abbès is periodically affected by overflows and floods. This city is exposed to very large and repeated floods, which cause the solid transport to increase starting from the phenomenon of the erosion of the agricultural grounds.

The management of water resources in the different hydrographic systems includes the evaluation and prediction of the quantities of sediments transported. The study area is the Wadi Mekkera located in the plain of Sidi Bel Abbes (northwestern Algeria). Its watershed is part of the large Macta watershed. The objective of this study is the evaluation and prediction of the solid transport rate (Qs) in the flood period using the ANN (Artificial Neural Networks) method at level of Wadi Mekerra. The study was carried out on liquid and solid flow hourly data over a period of 11 years (1989-2001) (the data used in this study comes from ANRH). Dividing the data into two, we used 80% for learning and 20% for validation with different input combinations. The learning of the studied models are based on the "Back Propagation" system using the following criteria: MSE (mean square error) and R2 (coefficient of determination) efficiencies. Our ANN model showed better performance using the previous "Qs-1" sediment rejection as the input. The use of the artificial neural network provides a useful and powerful alternative to prediction for modeling and quantifying the sediment load that negatively affects the environment.

Key words: Solid transport, Solid flow, Liquid flow, artificial neural networks, flood, wadi Mekerra, erosion.

الملخص

الكلمات الدالة: النقل الصلب، التدفق الصلب، تدفق السائل، الشبكات العصبية الصناعية، الفيضانات، وادي ميكارا، التاكل

Sommaire

Introduction.....

I- Synthèse bibliographique……

I.1 Erosion des sols…….

I.1.1 Aperçu……..

I.1.2 Les type d'érosion…….

I.1.2.1 L'érosion en nappe (laminaire ou surface)……

I.1.2.2 L'érosion linéaire……..

a- Erosion en griffes et rigoles…….

b- Erosion en ravine……..

I.1.2.4 Mouvements de masse……..

a- écroulement et chute des pierres…….

b- éboulement…….

I.1.2.5 Le sapement des berges……

I.1.3 Les facteurs de l'érosion……..

I.1.3.1 Facteurs anthropiques……

I.1.3.1.1 Le pâturage……..

I.1.3.1.2 L'urbanisation……..

I.1.3.1.3 L'incendie…….

I.1.4 Les impacts de l'érosion sur l'environnement…….

I.1.4.1 Perte de sol arable……

I.1.4.2 Envasement des barrages……..

I.2 Transport solide…….

I.2.1 Aperçu…….

I.2.2 Les modes de transport solide……

I.2.2.1 Le transport solide par charriage…….

I.2.2.2 Le transport solide en suspension……

I.2.3 Aperçu sur le transport solide en Algérie…….

I.3 Etude des débits extrêmes……..

I.3.1 Les crues……

I.3.1.1 Définition de crue……..

I.3.1.2 Définition d'inondation……..

I.3.1.3 L'étude de crue…….

I.3.1.4 Genèse des crues……..

II. Caractéristique de la région……..

II.1. Aperçu…….

II.2. Présentation de la zone d'étude……

II.2.1. Situation géographique de bassin versant de Macta……

II.2.2.Situation géographique de bassin versant d'ouedMekkera…….

II.3. Etude hydrologique du bassin versant d'oued mekkera……

II.3.1. Climat de la région……..

II.3.2. Les paramètres morphologiques…….

II.3.2.1. Superficie et Périmètre de bassin versant ……..

II.3.2.2. Indice de Gravilius (ou compacité) Kc……..

II.3.2.3. Longueur de bassin versant……..

II.3.2.4. Rectangle équivalent……..

II.3.2.5 Langueur du cours d'eau principale (THALWEG)…….

II.3.2.6Densité de drainage……

II.3.2.7Pente du cours d'eau principal……..

II.3.2.8Temps de concentration……

II.3.2.9 Caractéristiques de relief……

II.3.2.10 Courbe hypsométrique……

II.3.2.11 Tableau récapitulatif……..

II.4 Végétation et géologie…….

II.5 La base de données de l'oued Mekkerra…….

II.6 L'historique de crue d'oued Mekkerra……..

II.7 Causes des inondations dans la wilaya de Sidi Bel Abbes……

III. Données et Méthode……

III.1 Présentation des données (Les méthodes des mesures)……

III.1.1 La mesure des débits liquides……

III.1.1.1 Le jaugeage au moulinet……

III.1.2 La mesure de concentration (prélèvement)……

III.1.2.1 Les techniques de prélèvement……

III.1.3 La mesure des débits solides……

III.1.4: L'analyse des composantes principales (La matrice de corrélation)……

III.2 Approche et Méthodologie (Réseaux de neurones artificiels)…….

III.2.1 Aperçu……

III.2.2 Définition de réseaux neurones artificiel……..

III.2.3 La structure de RNA…….

III.2.4 Apprentissage pour les RNA……

III.2.4.1 Définition……

III.2.4.2 Les méthodes d'apprentissage……..

III.2.4.2.1 L'apprentissage supervisé……..

III.2.4.2.2 L'apprentissage non- supervisé……

III.2.5 Les réseaux de neurones feed-forward (Non bouclés) rétro propagation (RNFFBP)…….

III.2.6 Les avantages et Les inconvénients de RNA……

III.2.6.1 Les avantages…….

III.2.6.2 Les inconvénients…….

III.2.7 Développement de modèle…….

III.2.7.1 Sélection des données d'entrée…….

III.2.7.2 Sélection de la fonction de transfert /la fonction d'activation…….

III.2.7.3 Normalisation des données…….

III.2.7.4 sélection de l'architecture RNA……..

III.2.7.5 La sélection des algorithmes de formation……

III.2.7.6 La sélection des mesures d'évaluation de la performance……

III.2.7.6.1 Le coefficient de détermination "R^2 "…….

III.2.7.6.2 L'erreur carrée moyenne "MSE"……..

III.3 Résultats et Discussion……..

Conclusion…….

Références bibliographiques……....

Liste des tableaux

Tab 1 : *Facteurs affectant l'érosion hydrique…….*

Tab 2 : *Différentes études pour estimer les sédiments en suspension en Algérie……*

Tab 3 : *Classification des ordres avec leurs longueurs*

Tab 4: *La répartition des surfaces en fonction de classement des pentes*

Tab 5 : *Classement des altitudes selon la superficie du bassin versant d'oued mekkera*

Tab 6: *Récapitulatif des caractéristiques morphométriques et hydrographiques de sous bassin versant de l'oued Mekerra…….*

Tab 7 : *Couverture terrestre du bassin de Mekerra……*

Tab 8 :*Matrice de corrélation (Pearson (n)……..*

Tab 9 : *Les performances des réseaux neurones pendant la période d'apprentissage……*

Tab 10 : *Les performances des réseaux neurones pendant la période de validation……*

Liste des figures

Figure 1 : *l'érosion en nappe……..*

Figure 2: *Erosion en griffes…….*

Figure 3 : *Erosion en rigoles…….*

Figure 4 : *Ravins profonds……..*

Figure 5 : *Mouvement de masse…….*

Figure 6 :*Modes de transport solide……*

Figure 7 : *Situation administrative du bassin versant de Macta…….*

Figure 8 : *La limite de sus bassin versant d'oued Mekkera……*

Figure 9 : *Situation géographique du bassin versant d'oued Mekkera*

Figure 10 : *Le réseau hydrographique du bassin versant d'oued mekkera*

Figure 11 : *Carte des pentes du bassin versant de l'Oued de Mekkera*

Figure12: *La courbe hypsométrique*

Figure 13 : *La crue du 24 octobre2000……..*

Figure 14 :*La crue du 18 et 19 avril 2007, Moulay Slissene - Sidi Bel-Abbès……..*

Figure 15 :*Le moulinet…….*

Figure 16 : *La structure (l'architecture) des réseaux de neurones……..*

Figure 17 : *Les Qs prédites et observés utilisant des RNA dans la crue 01 d'oued mekkera……*

Figure 18 : *Les Qs prédites et observés utilisant des RNA dans la crue 02 d'oued mekkera*…….

Figure 19 : *Les Qs prédites et observés utilisant des RNA dans la crue 03 d'oued mekkera*……

Figure 20: *Les Qs prédites et observés utilisant des RNA dans la crue 04 d'oued mekkera*…….

Liste d'Abréviations

RNA : Réseaux de neurones Artificiels.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydraulique.

Ql : Débit liquide ;

Ql_{t-1} : Débit liquide précédent.

Ql_{t-2} : Débit liquide deux valeurs précédent.

Qs : Débit solide.

Qs_{t-1} :Débit solide précédent.

Qs_{t-2} : Débit solide deux valeurs précédent.

MES : Matières En Suspension.

C : Concentration.

R^2 : Coefficient de détermination.

MSE : Mean Square Error (l'erreur carré moyen).

ACP : Analyse des Composantes Principales.

RNFFRP : Réseaux de Neurones Feed-Forward Rétro Propagation.

LM : Levenberg - Marquardt

Introduction :

De nombreux phénomènes agitent notre environnement aujourd'hui aux quels les hydrologues sont confrontés, parmi lesquels la charge des sédiments dans les bassins versant. Le transport solide dans les oueds, les rivières, les bassins versants et les barrages créent de sérieux problèmes où les écosystèmes peuvent endommager par la sédimentation qui est transporté par le ruissellement lorsque la quantité d'eau pluviale est élevée. Ces derniers se retrouvent depuis plusieurs années envasés suite à un dépôt de grandes quantités de sédiments dont l'origine semble être l'érosion hydrique des sols et des terres agricoles du bassin versant, S.BOUGUERRA, (2014).Les rejets de sédiments en suspension dans une rivière constituent un paramètre important pour la gestion des projets hydrauliques et un indice de l'état de l'érosion des sols et de l'environnement écologique d'un bassin versant Zhu et al, (2007).

Les conséquences de l'érosion hydrique en Algérie du Nord sont dramatiques. Selon une étude établie par l'agence nationale des barrages (ANB) en 2003 un taux d'envasement de 12.21% a été enregistré pour les barrages de l'est algérien, 16.47% et 19.08% pour les régions du centre et de l'ouest, Selon (Remini, 2004, Remini et all 2009), le taux d'érosion est compris entre 2000 et 4000 t/km^2/an. La quantité annuelle moyenne se sédiments déposés dans les barrages est passée de 20 million de m^3 dans les années 80 à 35 million de m^3 dans les années 90 et a atteint 45 millions de m^3 en 2000 (Serbah 2011). Cette situation aura pour impact une réduction de la capacité utile de la réserve d'eau. Les coulées de boue liées à l'érosion hydrique augmentent par ailleurs la charge en sédiments des cours d'eau, des collecteurs d'égouts et des bassins d'orage, avec notamment comme conséquence une hausse du risque d'inondation. Ainsi, des quantités non négligeables de nutriments et de micropolluants, fixés sur les particules de sol et la matière organique érodées, peuvent être déplacées vers les cours d'eau et les autres agro-écosystèmes, affectant la qualité écologique de ces différents milieux,S.Bouguerra, (2014).

Les processus d'écoulement et de charge sédimentaire sont complexes en Algérie, en raison d'un régime pluviométrique peu fréquent, intense et présent dans la bande côtière, ainsi que de la pénurie de données et de la difficulté de la mesure directe quotidienne.

Le manque des données constitue un handicap majeur dans l'estimation et la prévision des transports solides; cet état de fait a conduit de nombreux chercheurs à proposer des modèles de prévision. Différents chercheurs ont tenté de quantifier les rejets de sédiments en les mettant en relation avec

différents facteurs hydro-climatiques d'un auteur à l'autre et d'une région à l'autre en utilisant des modèles de regression : Khanchoul et al, 2012 (Courbe d'évaluation des sédiments (SRV)), Mokadmi (2012) ; Demmak (1984, Touaibia et al. (2001), Meddi et al. (1999), Terfous (2001), Benkhaled et Remini (2003), Bouanani, (2005), Achite et Meddi, (2004, 2005), Larfi et Remini, (2006), Khanchoul, (2006,2009), Cherif et al, (2009) et Boucheklia et al. (2013).

Au cours des vingt dernières années, les hydrologues ont commencé à appliquer des techniques d'intelligence artificielle pour estimer et prévoir différents phénomènes hydrologiques. Parmi ces techniques le plus célèbre est : Système d'inférence adaptative neuro-floue (ANFIS) Lefkir et al, 2006, Réseau de neurones artificiels ″RNA″ (ASCE 2000a, b, Abrahart et al., 2004, Solomatine et al., 2003, Zhu et al., 2007, Mellesse et al., 2011, Afan et al., 2014,Tachi et al, 2016).

Les réseaux de neurones sont des ensembles de techniques alternatifs et complémentaires aux modèles traditionnels. RN peut être décrite comme une procédure de recherche et d'appariement de modèles computationnels permettant la prévision sans connaissance détaillée des processus physiques ou chimiques. Pour les hydrologues, cette technique est intéressante, à condition qu'il n'y ait pas d'explication détaillée du processus qui puisse être supportée par Abrahart et al. (2004).

Des études dans le domaine de la prévision hydrologique ont montré qu'il est probable que les réseaux de neurones artificiels offrent une bonne alternative à la modélisation pluie-débit (Hsu et al., 1995, Savic et al., 1999, Solomatine & Dulal., 2003), Boulmaiz Tayeb 2016, prédiction du débit des cours d'eau (Raman et Sunilkumar, 1995, Campolo et al, 1999, Kisi, 2004a) et la prévision des apports d'eau (Saad et al., 1996; Jain et al., 1999); Ehrman, 1998), le développement de réseaux de neurones artificiels est allé plus loin en hydrologie en étudiant des phénomènes plus difficiles tels que le transport de sédiments. Le nombre de documents de recherche n'était pas aussi large que celui des précipitations, mais il fournissait l'estimation des rejets de sédiments par rapport aux modèles classiques qui étaient utilisés auparavant pour prévoir la charge de sédiments. De nombreux chercheurs ont contribué à la prévision de la charge de sédiments en utilisant des réseaux de neurones ; Kisi (2004) a indiqué que l'utilisation d'un réseau de neurones artificiels pour prévoir la concentration de sédiments en suspension à l'échelle quotidienne pourrait donner de meilleurs résultats que d'autres modèles. Raghuwanshi et al, (2006) ont comparé les modèles RNA avec une régression linéaire pour prédire le ruissellement et la charge de sédiments à deux échelles de temps

différentes (quotidienne et hebdomadaire) dans le bassin agricole. Et ils ont déclaré que les modèles RNA ont montré de meilleurs résultats de performance que les modèles de régression linéaire.

Le but de ce travail est une étude hydrologique et prédiction de la décharge de sédiments lors d'un événement des crues en utilisant la méthode de RNA "Réseaux de Neurones artificiels" basée sur le système « The Back Propagation » dans le bassin versant de l'oued Mekkara, nord-ouest algérien.
Notre travail, est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre, défini les éléments de base du phénomène de l'érosion, transport solide et les crues.
Le deuxième chapitre, comporte une brève étude hydrologique détaillée sur le sous bassin versant de l'oued Mekerra.
Le dernier chapitre, concerne trois parties : Le traitement de données et la sélection des échantillons des crues observées pendant la période allant de 1989 au 2001 ; Aperçu du réseau neuronal artificiel et sa construction ; Discuter des résultats et enfin une conclusion générale.

I- Synthèse bibliographique :

I.1 Erosion des sols :

I.1.1 Aperçu :

L'érosion hydrique c'est un phénomène naturel qui provoque des dégâts non seulement sur le sol et l'agriculture mais aussi sur la qualité de l'eau, elle est définie comme un détachement de fragments des particules de la surface du sol par l'agent érosif à savoir l'eau de la pluie au fil du temps. Son mécanisme résume en trois étapes détachement - transport - dépôt .l'érosion hydrique comporte plusieurs forme et cela dépend des facteurs qui le favorisent (la structure du sol, la pente, le climat de la région, couvert végétal). Une légère érosion est en fait bénéfique à la formation du sol mais une érosion sévère ou accélérée affecte négativement le sol et l'environnement, TACHI(2017).Pour une meilleure évaluation et compréhension du mécanisme de l'érosion hydrique, il est très important de quantifier la perte de sol et de développer différents modèles et pratiques pour contrôler ce phénomène. L'objectif de ce chapitre est de décrire ce phénomène et les différents types, facteurs de l'érosion hydrique.

I.1.2 Les type d'érosion :

I.1.2.1 L'érosion en nappe (laminaire ou surface) :

Après que le sol arrête d'absorber toute la quantité d'eau de pluie, L'excès d'eau ne peut pas s'infiltrer et ruisselle donc sur la surface du sol en déplaçant les particules arrachées de la surface par la battance de la pluie. Lors de leur écoulement sur les surfaces, la vitesse de l'eau de ruissellement conjointement avec les particules et exercent un effet mécanique capable d'entraîner le détachement d'autres particules.

D'une part l'érosion laminaire sur le terrain est difficile á détecté car les sols perdent une mince couche de façon plus ou moins uniforme. Et d'autre part, l'érosion laminaire est un processus ou une technique idéalisé et parfait qui est rarement existé dans les champs car en raison du microrelief du terrain, l'eau de ruissellement tend à se concentrer et à creuser les surfaces sous forme de rigoles, LEFKIR (2009).

L'érosion en nappe dépend de:

- L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement

- L'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules
- La durée des pluies et/ou l'humidité avant les pluies, c'est à dire l'état du sol, Mokhtari (2009)

Fig 1 : *l'érosion en nappe (source :http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1)*

I.1.2.2 L'érosion linéaire :

Ce type de l'érosion se manifeste dès que les courant d'eau (filets d'eau) diffus se concentrent sur la forme des lignes de plus forte pente et exercent ainsi sur le sol une force de cisaillement permettant de creuser des formes de plus en plus profondes dans le sol en arrachant et divise des particules de plus en plus grosses: graviers, cailloux voir des blocs (Megnounif,2007) ,de petits canaux pouvant être diviser en trois types : griffes (quelques centimètres de profondeur), rigoles (la profondeur dépasse 10 cm), ravines (quelques mètres), Bougeurra(2014).

a- Erosion en griffes et rigoles :

L'érosion en rigole succède à l'érosion en nappe par la concentration du ruissellement dans les creux. L'écoulement se concentre davantage pour créer son passage sous forme de griffes, sont plus parallèles ; par une incision peu profonde et elles faisant apparaitre des rigoles quoique petite à la surface de la terre ; (Heush,1970), Bougeurra(2014).

Fig 2 : *Erosion en griffes (source :http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1)*

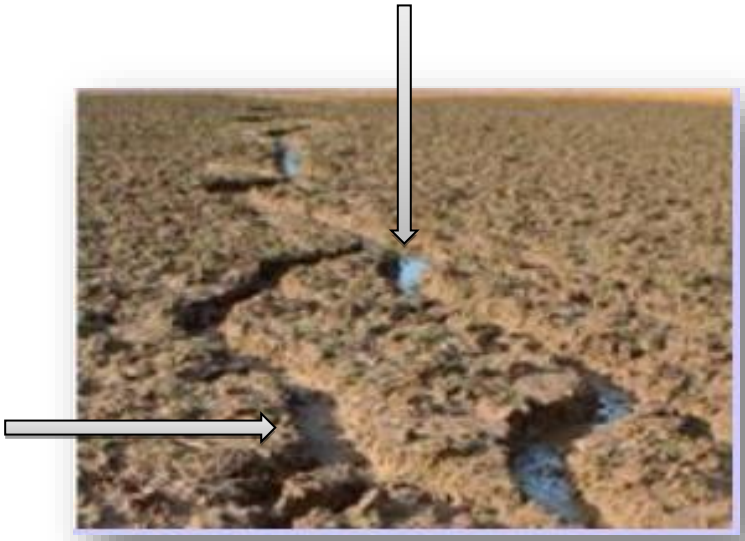


Fig 3 : *Erosion en rigoles (source :http://nwww.ma.auf.org/erosion/chapitre1)*

b- Erosion en ravine :

L'érosion en ravines est une incision linéaire, cette forme d'érosion est créer par le ruissellement se produit lorsque les rigoles touchent non seulement à l'horizon de surface mais érodent également les horizons sous-jacents à un point tel que les pratiques agricoles ne peuvent effacer les traces.

Le ravinement est un facteur prépondérant dans le processus global de l'érosion, Lorsque les ravines creusent les horizons de sol, parfois elles peuvent atteindre un sous-sol plus résistant à l'érosion provoquant l'allongement des ravines vers le haut de la pente.

A l'instar de l'érosion en nappe et rigoles, l'érosion en ravine se déplace les sols sous forme de particules ou d'agrégats de façon lente. Pour déplacer les blocs de sols de façon spontanée, alors que il existe des processus pouvant pour: les mouvements de masse et les coulées de boue, Lefkir (2009).

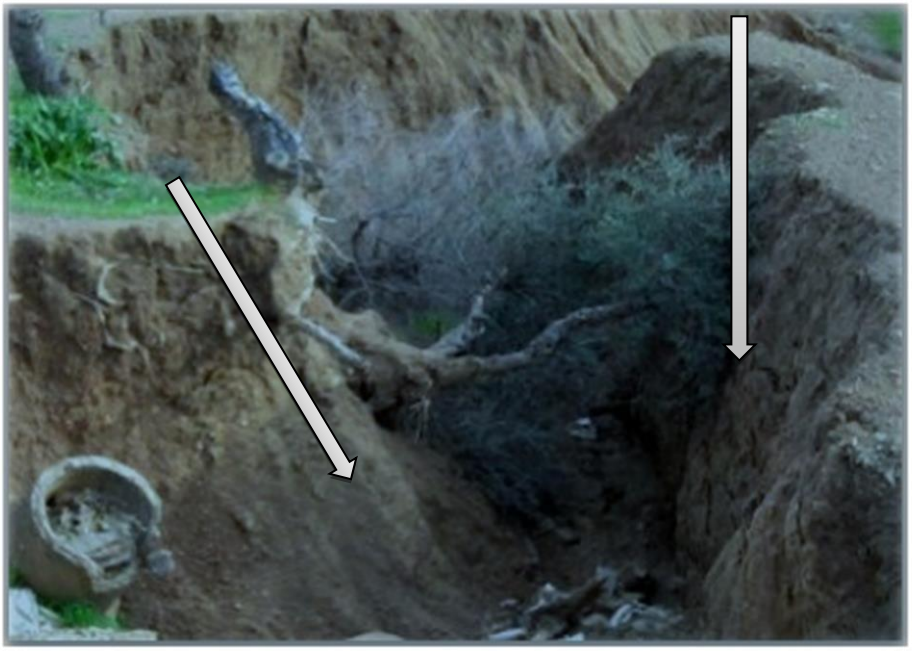


Fig 4 : *Ravins profonds (source : comité scient.2011_Elbarakka.pdf)*

I.1.2.4 Mouvements de masse :

Le mouvement de masse du sol est le mouvement instantané descendant de la gravité des masses finies de sol, de roche et de débris. Les glissements de terrain, les avalanches de débris, l'éboulement et les coulées de terre, le fluage et les torrents de débris sont des exemples de ce mouvement.

Les glissements de terrain sont souvent utilisés comme un terme générique pour inclure toutes les formes de mouvements de masse du sol qui présentent un mouvement perceptible (Satterlund et Adams, 1992). Cependant, de grandes quantités de mouvements imperceptibles de la masse du sol se produisent également. (Peter Ffolliott et all 2013).

Ces conditions sont prononcées dans les zones montagneuses escarpées qui connaissent des précipitations abondantes et prolongées ou une fonte des neiges rapide.

Se présente essentiellement sous formes :

- **mouvement humide :** cause par l'écoulement, le sapement latérale ; provoque un état de déséquilibrage des berges, ce qui détruite des masses de sol dans le talweg.
- **mouvement à sec :** il existe deux types :

a- écroulement et chute des pierres : elle est de volume inferieur à 1 dm³, qui tombe brusquement sur les versants de pente assez redressée.

Mouvement par gravité dû la raideur du versant et humidité du soubassement

b- éboulement : Les éboulements sont très dangereux, car il s'agit de gros blocs qui se détachent des hautes versant de fortes pentes, et avec leurs masses se déplacent avec une vitesse extraordinaire jusque au piedmont ou ils s'éclatent.

Fig 5 : *Mouvement de masse (source :http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1)*

I.1.2.5 Le sapement des berges :

La force cinétique reliée à l'écoulement de l'eau peut exercer un stress sur les berges et y éroder les matériaux les plus fragiles. Le sapement des berges provoque l'éboulement de masses importantes de sols dans les cours d'eau dans lesquels ces masses se fragmentent et s'incorporent à la charge du

cours d'eau. Rullan-Perchirin (1989) a noté que le sapement des berges contribuait aux mouvements de masses surtout dans la zone aval des bassins versants, Lefkir (2009).

I.1.3 Les facteurs de l'érosion :

L'érosion hydrique est un phénomène difficile auquel font face les hydrologues et les hydrogéologues depuis de nombreuses décennies. De nombreux facteurs affectent et augmentent l'érosion hydrique dans les bassins versants en raison de différents facteurs. L'érosion hydrique est contrôlée principalement par quatre facteurs principaux: les facteurs climatiques, la couverture végétale, la topographie et les propriétés du sol et sont discutés dans le tableau (1) (Blanco2008).

Tab 1 : *Facteurs affectant l'érosion hydrique(Blanco2008).*

Climat	Couvert végétale	Topographie	Propriété du sol
-Tous les facteurs climatiques (p. Ex. Précipitations, humidité, température, évapotranspiration, rayonnement solaire et vitesse du vent) influent sur l'érosion hydrique. - La précipitation est l'agent principal de l'érosion hydrique. - La quantité, l'intensité et la fréquence des précipitations déterminent l'ampleur de l'érosion. -L'intensité de la pluie est le facteur le plus critique. - Plus orage est intense, plus le ruissellement et la perte de sol sont importants. - Une température élevée peut réduire l'érosion hydrique en	-La couverture végétale réduit l'érosion en interceptant, adsorbant et réduisant l'énergie érosive des gouttes de pluie. -La morphologie de la plante comme la hauteur de la plante et la structure de la canopée l'efficacité de la couverture végétale. - La couverture de résidus de surface éponge les gouttes de pluie qui tombent et réduit le rebond des gouttes. Il augmente la rugosité du sol, ralentit la vitesse de ruissellement et filtre les particules de sol dans les eaux de ruissellement. -Le détachement du sol augmente avec la diminution de la couverture végétale.	-L'érosion du sol augmente avec l'augmentation de la pente du champ. -La topographie du sol détermine la vitesse à laquelle l'eau s'écoule du champ. -La capacité de transport des eaux de ruissellement augmente avec l'augmentation de la pente de la pente. - Les sols sur les champs convexes sont plus facilement érodés que dans les zones concaves en raison de l'interaction avec le fluage superficiel du sol par gravité. -Le degré, la longueur et la taille de la pente	-La texture, la teneur en matière organique, la macroporosité et l'infiltration d'eau influencent l'érosion du sol. -La teneur en eau antécédente est également un facteur important car elle définit l'espace poreux du sol disponible pour l'absorption de l'eau de pluie. -L'agrégation des sols affecte le taux de détachement et de transportabilité. -Les particules d'argile sont transportées plus facilement que les particules de sable, mais les particules d'argile forment des agrégats plus solides et plus stables. -Les matériaux organiques stabilisent la structure du sol et

augmentant l'évapotranspiration et en réduisant la teneur en eau du sol. - Une forte humidité de l'air est associée à une teneur en eau du sol plus élevée. - Des vents plus forts augmentent l'épuisement de l'eau du sol et réduisent l'érosion hydrique.	- La végétation dense et à croissance courte (par exemple, l'herbe) est plus efficace pour réduire l'érosion que la végétation clairsemée et haute. -Plus le couvert végétal est dense et plus la couverture de litière est épaisse, plus le contrôle de l'érosion par éclaboussure est important et plus l'érosion totale du sol est faible.	déterminent le taux d'écoulement de surface. -L'érosion des rigoles, des ravins et des canaux est typique des bassins versants en pente. -Les pentes plus abruptes sont sujettes à l'érosion des coulées de boue et aux glissements de terrain.	coagulent les colloïdes du sol. -Le compactage réduit la macroporosité du sol et l'infiltration de l'eau et augmente les taux de ruissellement. -Les agrégats grands et instables sont plus détachables. -Les processus interactifs parmi les propriétés du sol définissent l'érodabilité du sol.

I.1.3.1 Facteurs anthropiques :

L'érosion est devenue essentiellement une conséquence directe de l'activité humaine qui représente maintenant le principal facteur de la dégradation des sols. L'homme peut être à l'origine du déclenchement et de l'accélération de l'érosion par ses actions de défrichement des forêts, incendies et surpâturages et pratiques culturales. De plus, les aménagements routiers et urbains, en augmentant les surfaces imperméables, exacerbent les inondations, favorisent le ruissellement et donc constituent un facteur d'entraînement du sol.

I.1.3.1.1 Le pâturage

L'espace pastoral s'amenuise suite au surpâturage. La disparition de la couverture végétale, laisse donc des surfaces importantes du sol non protégées et par la suite plus exposées aux effets érosifs de l'eau de la pluie et du ruissellement.

I.1.3.1.2 L'urbanisation

Les zones urbanisées ont souvent une érosion spécifique supérieure à celle des régions rurales. On a signalé des taux d'érosion de 20.000 à 40.000 fois supérieurs à ceux des régions naturelles non perturbées (Becker et Mulhern, 1975).

Les plus grandes quantités de sédiments sont produites durant les phases de construction, surtout quand la végétation et le sol de couverture sont provisoirement enlevés. Les travaux de construction peuvent accroître l'érodibilité et diminuer la stabilité des pentes de façon radicale. L'érosion et les

sédiments produits dans les zones de développement urbain causent souvent plus de dommage aux régions situées à l'aval que dans les sites d'érosion eux-mêmes. Le réseau de drainage peut se remplir de sédiment et sa capacité d'écoulement décroît.

I.1.3.1.3 L'incendie

Puisque le feu endommage et ravage le couvert végétal, cela sous-entend un risque élevé d'érosion. En fait, les zones sans aucune couverture végétale courent toujours un plus grand risque de forte érosion que les autres

I.1.4 Les impacts de l'érosion sur l'environnement :

I.1.4.1 Perte de sol arable :

L'érosion peut être un processus lent et insoupçonné, ou encore prendre des proportions alarmantes, entraînant une perte énorme de sol arable. Le lessivage de la terre arable peut résulter en une réduction du potentiel de production, en une réduction de la qualité de l'eau de surface et en l'encrassement des réseaux de drainage. (Lefkir 2009)

I.1.4.2 Envasement des barrages :

Les retenues créées par des barrages sur les cours d'eau naturels sont toutes confrontées au problème de l'alluvionnement. Si la rétention de grandes quantités d'eau lors des crues à un effet protecteur sur les régions sises à l'aval, les matériaux solides déposés dans les retenues peuvent en revanche porter préjudice aux ouvrages annexes, et réduire le cas échéant de manière significative la capacité d'accumulation d'eau. La quantité de sédiments déposés dans les 100 barrages algériens était évaluée à 560 106 m3 en 1995 soit un taux de comblement de 12.5%(Remini 1999). L'envasement présente aussi un grand risque pour la stabilité de l'ouvrage par l'effet qui peut être provoqué par la poussée de la vase (de densité 1.6) dont la valeur progresse au carrée de la hauteur (Remini 1999). Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement de quelques organes annexes aux barrages tels que : le vidange de fond, les canaux d'irrigation.(Lefkir 2009)

I.2 Transport solide :

I.2.1 Aperçu :

Le transport solide est l'entraînement de granulats sous l'action d'un écoulement fluide. Il existe dans différents phénomènes physiques, naturels ou industriels.

Le transport des sédiments dans les rivières représente la deuxième phase de l'érosion hydrique, les mouvements des sédiments dans les cours d'eau prennent deux formes: vitesse et énergie des eaux de ruissellement, taille des particules, intensité des précipitations, caractéristiques du sol et topographie du bassin versant.

Les cours d'eau affectent tous les facteurs qui divisent la sédimentation dans les rivières et les cours d'eau en une charge de suspension de sédiments ou une charge de fond.

La répartition entre la charge au fond et la suspension dépend essentiellement de la taille des particules en fonction de la vitesse de l'eau et de la turbulence de l'écoulement.

L'apport de sédiments est le produit de l'érosion du sol définie par les caractéristiques des paramètres hydrologiques dans le bassin versant, qu'il s'agisse de l'érosion de surface, de l'érosion des ravines, du mouvement des masses du sol ou de l'érosion des canaux, TACHI (2017).

I.2.2 Les modes de transport solide :

Dans le transport solide on générale on considère deux modes:

Le transport solide par charriage et le transport solide en suspension. Ces dernières est différent par deux aspects essentiels : dans le premier cas, le déplacement des particules par roulement et glissent sur le fond et leurs vitesses est inférieure à celle de l'écoulement. Dans le deuxième cas, le déplacement au sein de l'écoulement avec une vitesse de même ordre de grandeur que celle du fluide, Bouanani(2004).

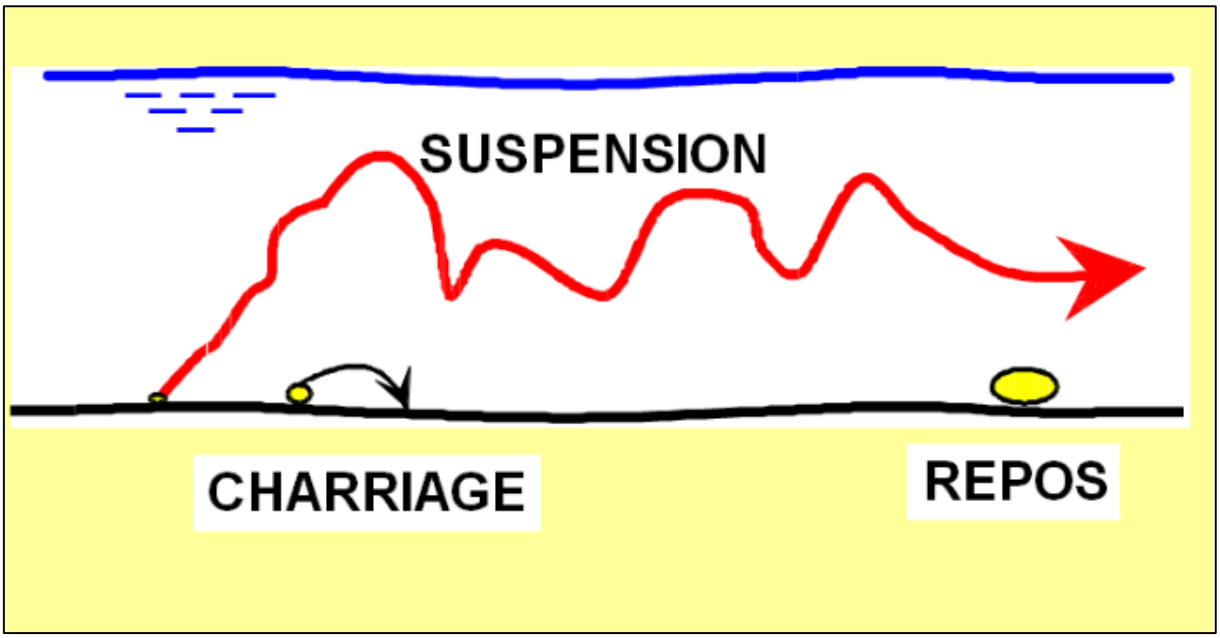


Fig 6 : *Modes de transport solide*

I.2.2.1 Le transport solide par charriage :

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, gravier, galets et blocs), de diamètre supérieur à 1 mm, qui se déplacent par roulement ou glissement, au voisinage immédiat du fond du cours d'eau, et parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace. À cause des perturbations de l'écoulement, Les mesures sur le terrain du transport solide par charriage sont très coûteuses. De ce fait, les estimations de ce type de transport sont difficiles à tenir en l'insuffisance de bases de données, Bouanani (2004).

I.2.2.2 Le transport solide en suspension :

Le transport solide en suspension montre le transport de sédiments fins (argiles, limons, sables fins), de taille micronique, conservées en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement. Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval, Bouanani (2004).

I.2.3 Aperçu sur le transport solide en Algérie:

Le flux de sédiments en suspension dans une rivière est un paramètre important pour la gestion des projets hydrauliques et un indice de l'état de l'érosion des sols et de l'environnement écologique d'un bassin versant, Zhu et al, (2007). Le problème de la disponibilité des données sur le transport des

sédiments est aiguë en Algérie, et la mesure directe pour quantifier les rejets de sédiments est difficile et nécessite suffisamment de temps, d'argent et d'entretien quotidien. Une estimation efficace et rapide des sédiments dans les bassins versants présente un grand intérêt pour un grand nombre d'applications d'ingénierie pour protéger les infrastructures hydrauliques de différentes catastrophes telles que: problèmes de stabilité, perte de stockage d'eau dans le réservoir et détérioration de la qualité de l'eau. Selon (Remini, 2004, Remini et al., 2009), le taux d'érosion est compris entre 2000 et 4000 t / km2 / an. La quantité annuelle moyenne de sédiments déposés dans les barrages est passée de 20 millions de m3 dans les années 80 à 35 millions de m3 dans les années 90 et a atteint 45 millions de m3 en 2000 (Serbah, 2011). Les rejets de sédiments en suspension en Algérie sont estimés aux stations hydrométriques des bassins versants pour pratiquement tous les épisodes de débit. L'augmentation de la charge sédimentaire en suspension et sa sédimentation en Algérie ont conduit les hydrologues à étudier le phénomène des rejets sédimentaires en suspension et sa relation avec certains paramètres hydro-climatiques tels que les précipitations, le ruissellement, la couverture terrestre et la concentration des sédiments. On peut citer quelques ouvrages: «Medinger (1960), qui a procédé au traitement de trente bassins de la première série de mesures collectées en Algérie au cours de la période 1946-1957; Tixeront (1960), qui a fondé ses recherches sur la teneur en sédiments en suspension dans les fleuves algériens et tunisiens avec respectivement 32 et 9 stations hydrométriques; Demmak (1984), qui a obtenu une relation empirique entre les paramètres physico-climatiques des rejets sédimentaires et des bassins versants pendant une période de 10 ans dans certains bassins versants du nord de l'Algérie; Meddi et al (1998), qui ont utilisé dans leurs travaux des données de 18 réservoirs avec 50 stations hydrométriques en Algérie, 16 réservoirs marocains et 11 réservoirs tunisiens pour améliorer un modèle qui estime la charge de sédiments en suspension dans le nord de l'Algérie.

Dans des nombreuses études qui ont montré dans leurs recherches la quantification des rejets de sédiments en suspension en utilisant la méthode la plus usagée en Algérie la courbe de sédimentation. Les chercheurs ont utilisé différents paramètres hydrologiques pour estimer et prédire les rejets de sédiments dans différentes rivières algériennes. Le tableau ci-dessous (2) montre la plupart des articles énumérés traitant de ce phénomène.

Tab 2 : *Différentes études pour estimer les sédiments en suspension en Algérie*

Auteures	Année	Oueds	Technique (méthode)	Durée
Meddi	1999	Oued Ebda	Régression linéaire	16 ans
Benkhaled et Remini	2003	Oued Wahrane	Régression linéaire	18 ans
Bouanani	2004	Oued Sebdou , Mouilah, Isser et Sekkar	Régression linéaire	30 ans
Lefkir et all	2006	Oued Isser	Régression linéaire	3 ans
Khanchoul	2006	Oued Safsaf, Mellah, Ressoul	Régression linéaire	22 ans
Khanchoul	2009	Oued mellah	Régression linéaire	24 ans
Cherif et all	2009	Oued Mekkara	Régression linéaire	8 ans
Tachi	2017	Oued Isser, Sebaou	Réseaux de neurones artificiels	30 ans

I.3 Etude des débits extrêmes :

Les débits extrêmes représente les phénomènes de crues et d'étiages ne peuvent être cernés que dans leur succession chronologique, allant de quelques heures à plusieurs jours.

L'étude des crues permet de mettre en évidence la réaction du bassin versant pendant un pas de temps réduit à une averse ou séquence pluvieuse donnée. Cette réaction ou réponse du bassin, fonction des caractères propres des précipitations (hauteur, intensité et durée) est déterminée par la combinaison complexe des divers éléments caractérisant l'organisation fluviale : état de saturation des sols, importance des pentes, densité de drainage, taux de la couverture végétale, forme du bassin etc…

On se limitera dans l'étude des crues, à leurs caractères généraux tels que leur genèse et leur potentiel hydrologique énorme qu'elles représentent.

L'étude des étiages, c'est un phénomène moins brutal dans leur apparition, permet de mettre en valeur la forte décroissance des débits en phase de tarissement et surtout de préciser les restitutions des nappes aquifères à l'écoulement fluvial. Ils seront envisagés du point de vue de leur genèse et de leur évolution dans le temps, Bouanani(2004).

I.3.1 Les crues :

I.3.1.1 Définition de crue :

La crue est une augmentation brutale du débit dans un cours d'eau.

I.3.1.2 Définition d'inondation :

L'inondation est une conséquence du débordement d'un système hydrographique (Ex : rivière, oued).

I.3.1.3 L'étude de crue :

Dans les oueds de l'Algérie l'étude des crues restent un domaine inconnu, sauf quelques indications très ponctuelles sont données dans les annuaires hydrologiques algériens. Les crues est un des traits fondamentaux du régime d'un cours d'eau, malheureusement nous ne possédons pas de longues séries de crues pour pouvoir tirer des conclusions globales.

Selon R. Frécaut (1971), il convient de distinguer crues et hautes eaux ; les hautes eaux moyennes représentent une situation saisonnière durable. Au contraire les crues constituent avec les étiages une situation extrême dans le comportement des cours d'eau. Il s'agit de gonflements fluviaux exceptionnels et irréguliers, tant en saison froide (période de hautes eaux), qu'en saison chaude (période de basses eaux). D'après G. Remenieras, une crue annuelle est le débit le plus fort observé dans l'année, Bouanani (2004).

I.3.1.4 Genèse des crues :

Les crues qui surviennent sous climat méditerranéen sont occasionnées par des orages violents et fréquents, elles sont accompagnées de pluies torrentielles dont l'intensité atteint jusqu'à (120 mm à 190 mm/h) dans certaines régions de l'ouest algérien comme le cas du bassin versant de l'oued Mekkera (Borsali et al., 2005) , ou bien encore le cas de la crue du 17 novembre 1986 au niveau de l'oued Mouillah (une lame d'eau précipitée mensuelle de 168.3 mm à la station de Maghnia soit 43% des précipitations annuelles de l'année même). Cette dernière crue qui a engendré un débit de pointe égal à 1912 m3/s,a provoqué d'énormes inondations. La réponse hydrologique des bassins pendant ces séquences pluvieuses est très particulière (Achite&Ouillon, 2007).Cette particularité est due à la manifestation d'averses brutales qui provoquent des crues dévastatrices dont la période d'apparition concerne généralement la saison de l'automne et celle du printemps, Bouguerra(2014).

II. Caractéristique de la région :

II.1. Aperçu :

L'objectif de ce chapitre est la représentation de la zone étudiée et la définition les paramètres hydrologique et morphologique du sous bassin versant de l'oued de **Mekkera,** les données des débits d'eau et la concentration des sédiments, ont été relevées et mesurées à partir de la station hydrométrique (110301) de l'ANRH.

II.2. Présentation de la zone d'étude :

II.2.1. Situation géographique de bassin versant de Macta :

Le bassin versant Macta fait partie du grand bassin hydrographique «**le grand Chatt Chergui** » situé en Algérie occidentale entre les altitudes **36°0'0''N**et **34°15'0''N** et entre les longitudes **0°30'0''E** et **1°10'0'' O.**

Il recouvre une superficie totale de **14648,34**km²et un périmètre environ **730,90** km .il s'étend sur les wilayas à savoir : Sidi bel Abbes, Tlemcen, Mostaganem, mascara, Saïda (Fig 7).

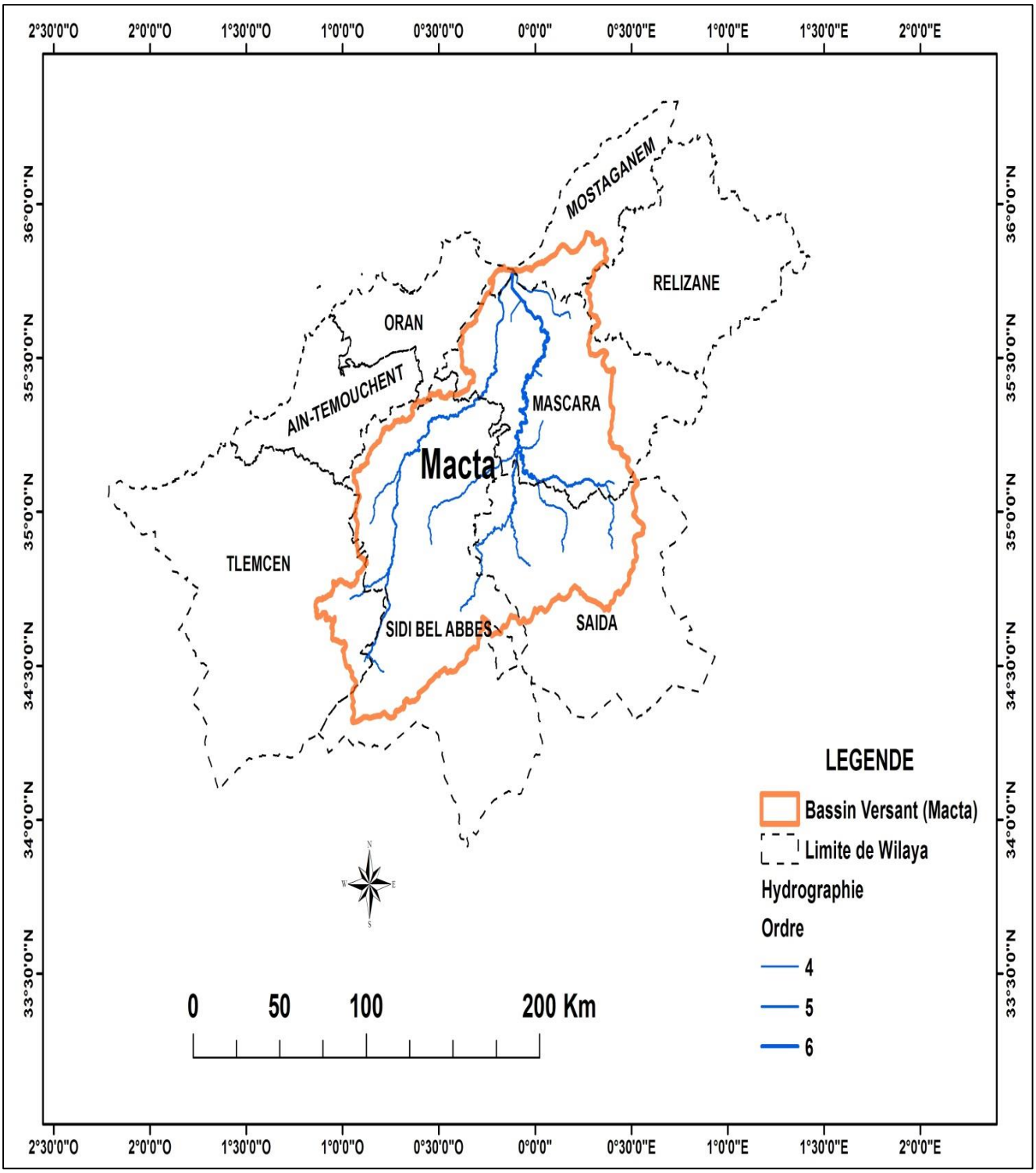


Fig 7 : *Situation administrative du bassin versant de Macta.*

Le bassin versant Macta sous le code d'ANRH n°**11**, il se divise en 16 sous bassins, permis eux la partie de bassin versant de l'oued **Mekkara,** qui celle la région concernée par notre études (Fig 8).

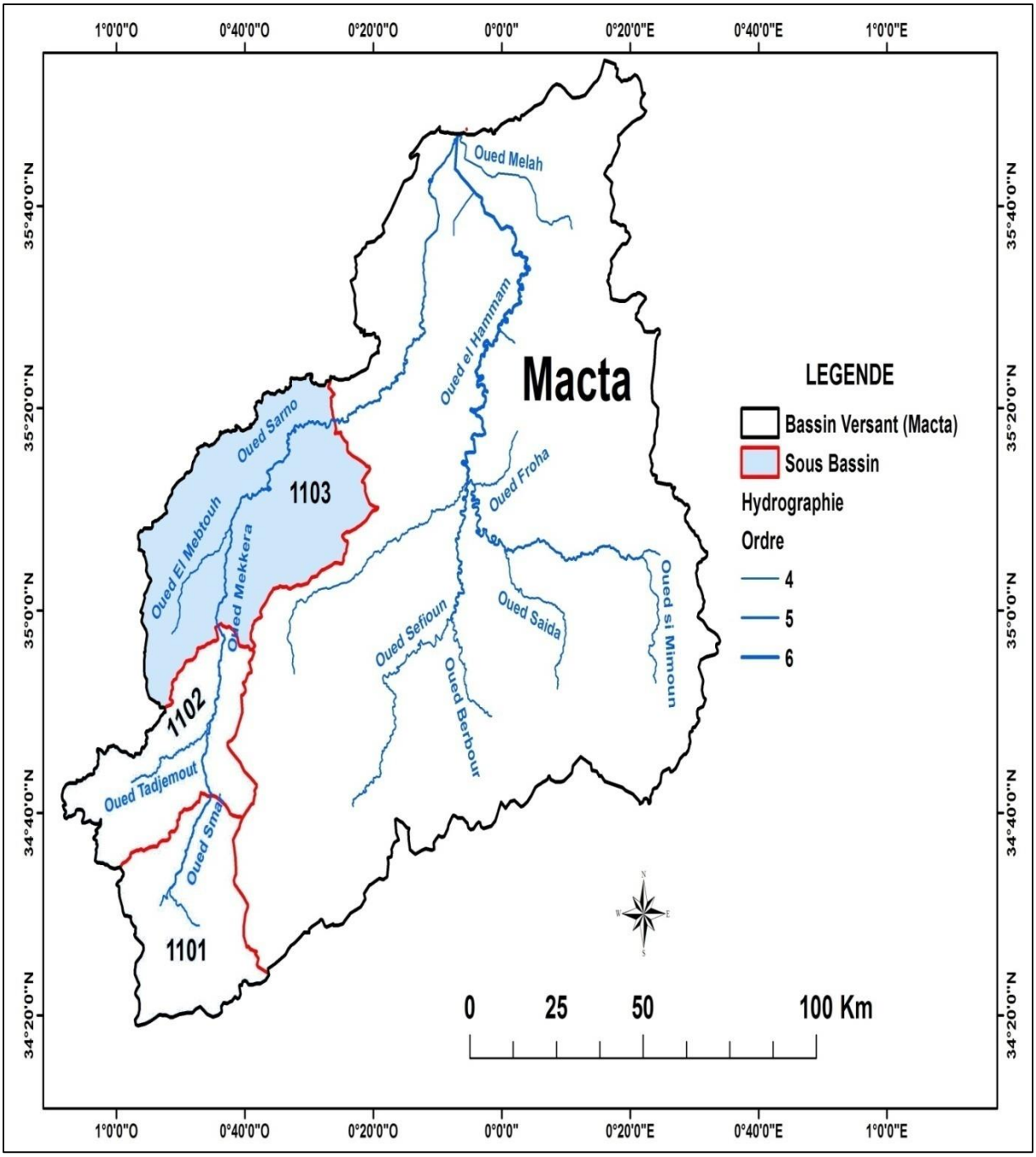


Fig 8 : *La limite de sus bassin versant d'oued Mekkera*

II.2.2.Situation géographique de bassin versant d'oued Mekkera :

cette étude concerne le sous bassin versant de Mekkera, ce dernier occupe une superficie de **1094,22** km ² et de périmètre **195,32** km comprise entre les altitudes**35°25'0''N** et **34°50'0''N** et entre les longitudes **0°20'0''O** et **1°0'0'' O.**

Du point de vue géomorphologique le bassin versant de l'oued mekkera peut être subdivisé en trois parties : **haciba(1101), sidi Ali Ben ayoub(1102),**et **laville de BelAbbes(1103)(**qui corresponde à notre recherche),chaque une à une station de jaugeage (station hydrométrique) (Fig 9).

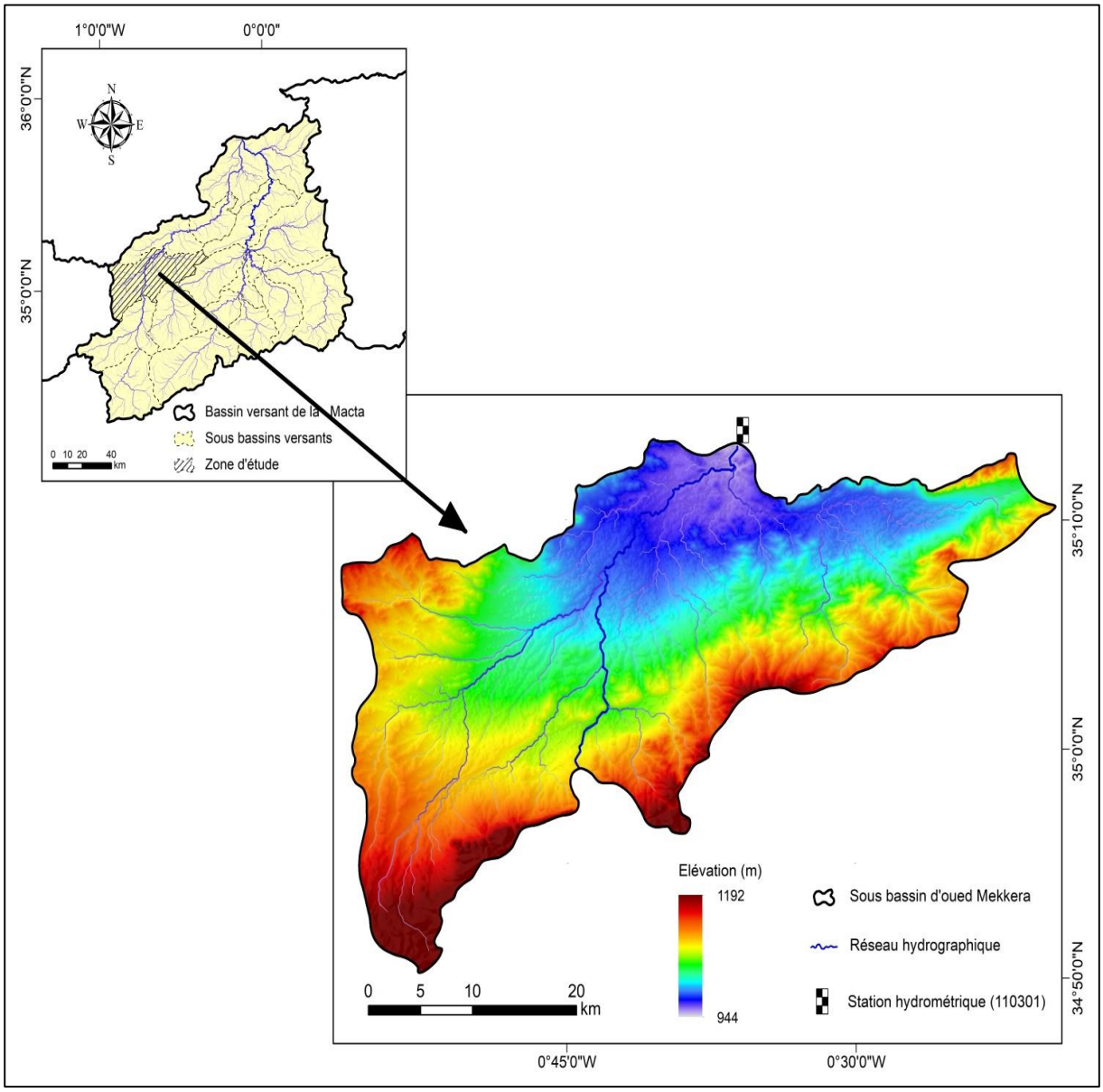


Fig 9 : *Situation géographique du bassin versant d'oued Mekkera.*

II.3. Etude hydrologique du bassin versant d'oued mekkera :

II.3.1. Climat de la région :

C'est un facteur important qui conditionne l'hydrographie ; le bassin versant d'oued mekkera situé dans la région climatique semi-aride, il est caractérisé par des étés chauds et secs s'étendant d'avril à août et un hiver relativement doux et humide d'octobre à mars. La température moyenne annuelle est d'environ 15 °C. Les vents dominants viennent du nord-ouest et de l'ouest. La vitesse moyenne interannuelle est d'environ 20 m/s. Les précipitations sont irrégulières, caractérisées par des pluies automnales intenses provoquant des inondations importantes. Pendant les années humides, la quantité de pluie peut dépasser 800 mm. Dans les années sèches, il diminue à 110 mm. La pluviosité interannuelle moyenne est d'environ 400 mm (Korichi, Hazzab, 2012).Les précipitations est considérée comme un facteur principal de l'alimentation des cours d'eau, ont une influence sur la variabilité des écoulements à toutes les échelles de temps ; Ce qui leurs confèrent une importance capitale sur les effets des crues et les inondations produites dans cette région (Meddi *et al.*, 2013).

II.3.2. Les paramètres morphologiques:

II.3.2.1. Superficie et Périmètre de bassin versant :

La superficie et le périmètre du bassin versant sont peut être évalués et mesurer à l'aide du logiciel **ArcGis**, (**A** en km^2, **P** en km).

II.3.2.2. Indice de Gravilius (ou compacité) Kc:

Cet indice est un paramètre de forme, son utilisation pour caractériser la forme du bassin est très répondue en hydrologie. L'idée la plus simple est de comparer le bassin étudié à un bassin de forme standard. C'est ainsi que Gravilius (1861-1939), a proposé en 1914 le coefficient de compacité (compactes coefficient) défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface (Wisler et Brater, 1959 ; in Bendjoudi et Hubert, 2002).

$$Kc = 0,28\frac{P}{\sqrt{A}} .....(1)$$

P : le périmètre du bassin versant (Km).

A: la surface du bassin versant (Km^2).

II.3.2.3. Longueur de bassin versant :

McCuen (2004) défini la longueur (LH), d'un bassin versant comme étant la seconde caractéristique la plus importante après la surface. Il donne cette longueur comme étant la distance mesurée de l'exutoire le long du cours d'eau principale jusqu'à la limite du bassin versant. Puisque le cours d'eau n'atteint pas la limite du bassin, il est nécessaire de tracer une ligne d'écoulement (qui reçoit le plus grand volume d'eau) du point de naissance du cours d'eau jusqu'à la limite du bassin versant. Cette longueur est désignée comme la longueur hydrologique du bassin versant. (ANRH 2011)

II.3.2.4. Rectangle équivalent :

C'est une transformation purement géométrique en un rectangle de dimension (L) et (l) ayant la même surface (Touaibia, 2004), (L) c'est la longueur du bassin et (I) comme sa largueur (ANRH), ils sont données par les formules suivantes :

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12}\left[1+\sqrt{1-\left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2}\right] \text{ et } l = \frac{P}{2} - L \quad \ldots\ldots(2)$$

II.3.2.5 Langueur du cours d'eau principale (THALWEG) :

La longueur du cours d'eau principal est une grandeur très utilisée dans les calculs hydrologiques, c'est la distance mesurée le long du cours d'eau principal du bassin, à partir de l'exutoire de ce dernier jusqu'à la fin du cours d'eau ;

Le thalweg du bassin versant est mesuré à l'aide de l'ArcGis (Fig10).

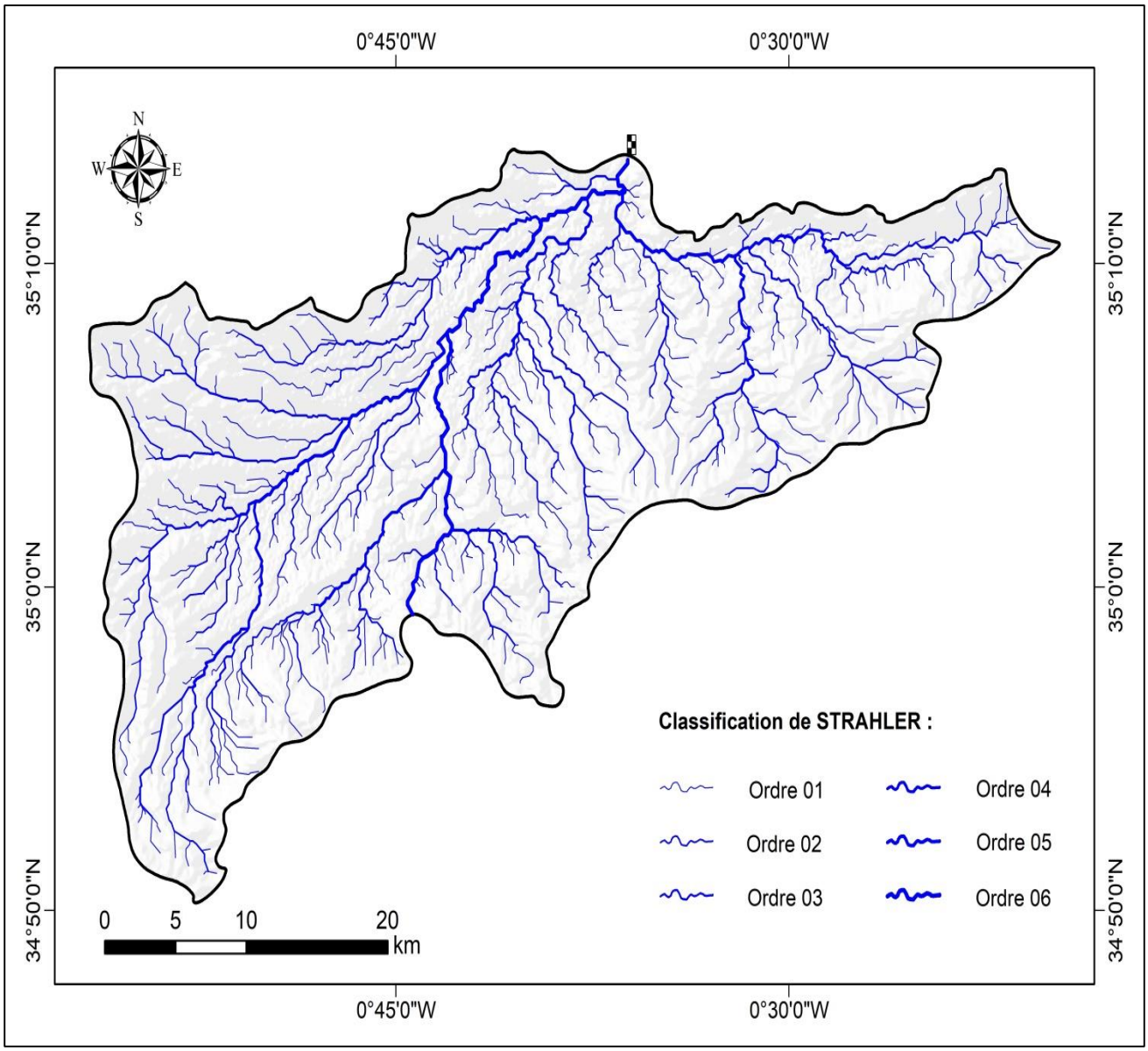


Fig 10 : *Le réseau hydrographique du bassin versant d'oued mekkera*

Ordre	Nombre des cours d'eau	Longueur des cours d'eau [km]
1	453	555,85
2	210	273,25
3	30	169,35
4	9	68,98
5	2	27,51
6	1	37,73

Tab 3 : *Classification des ordres avec leurs longueurs*

II.3.2.6 Densité de drainage

Elle se définit comme le rapport la longueur totale des cours d'eau et la superficie du bassin versant.

$$D_d = \frac{\sum Li}{A} \ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

ΣLi : somme des longueurs de tous les cours d'eau d'ordre i en (km).

A: surface du bassin versant (Km^2).

II.3.2.7 Pente du cours d'eau principal

Cette pente correspond au rapport entre la différence d'élévation (ΔH_{cp}) du point le plus haut et du point le plus bas du cours d'eau divisée par la longueur du cours d'eau (L_{cp}) (ANRH 2011).

$$I_c = \frac{\Delta H_{cp}}{L_{cp}} \ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

$\Delta H_{cp} = (640 - 444)$

$L_{cp} = 37,73$

II.3.2.8 Temps de concentration:

Le temps de concentration (T_c) est le temps mis par une particule d'eau pour parcourir le bassin versant du point hydrauliquement le plus éloigné jusqu'à l'exutoire (ANRH 2011).

Pour son calcul, nous nous utilisons la formule suivante :

- **Formule de GIANDOTTI (Sud Italie 1937):**

$$Tc = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L_T}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{\min}}} (\text{heure}) \ldots\ldots\ldots(5)$$

Tc : temps de concentration en Heures

A : superficie du bassin versant (Km2)

L : longueur de l'Oued (m)

H_{moy}: altitude moyenne (m)

H_{min}: altitude minimale (Km)

II.3.2.9 Caractéristiques de relief :

Le relief possède une influence directe sur les facteurs climatiques et une influence indirecte sur la formation des écoulements de surface qui est un facteur important au cours des crues. Il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydraulique d'un bassin.

Le relief joue un rôle essentiel sur le régime de l'écoulement. Il est indiqué par les courbes de niveau et est caractérisé par la courbe hypsométrique (Fig 11).

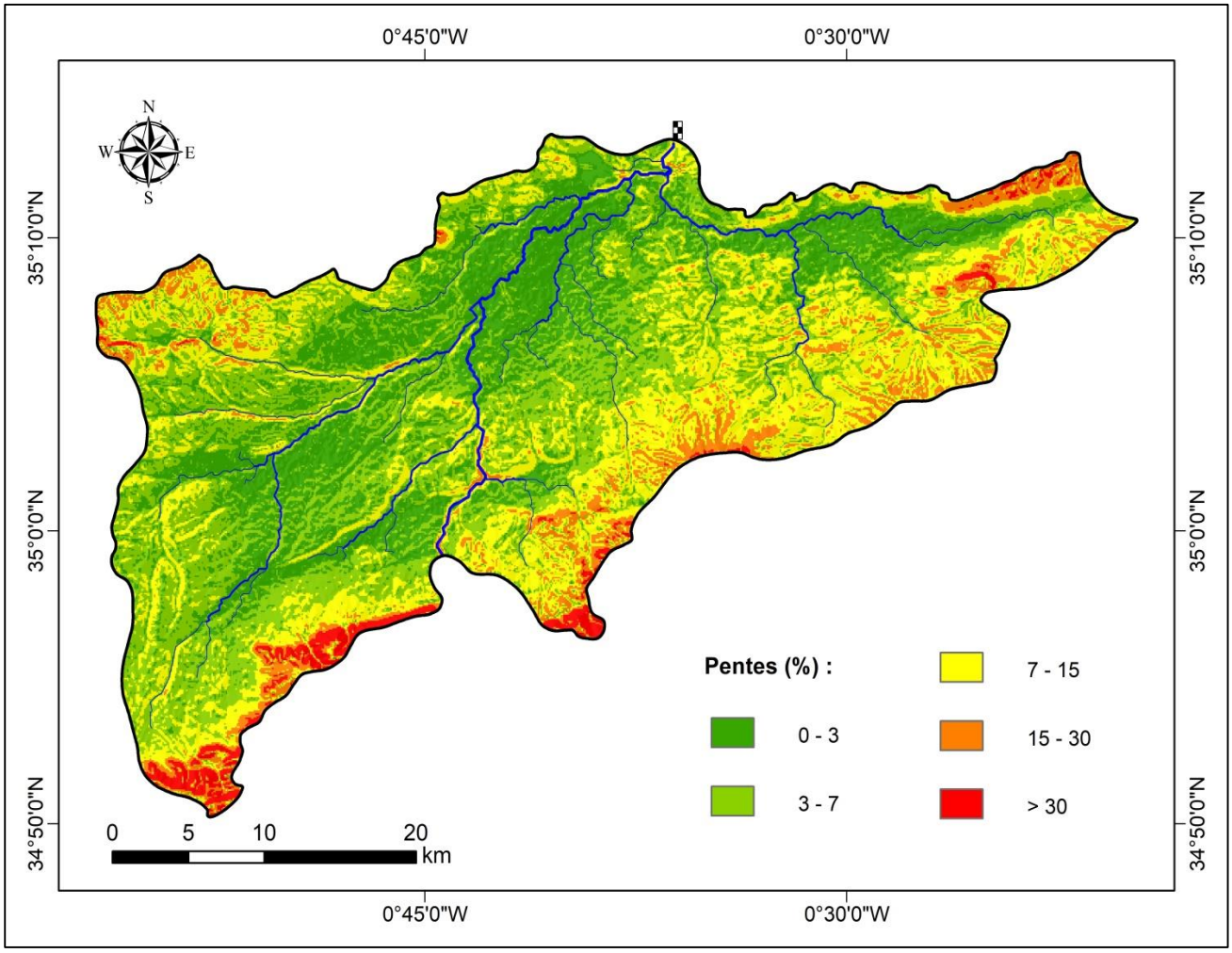


Fig11 : *Carte des pentes du bassin versant de l'Oued de Mekkera*

Le bassin est caractérisé par des pentes plus ou moins abruptes; Selon le tableau (4), environ 24% (272 km²) de la zone du bassin versant est constitué de pentes inférieures à 7%, plus de 70% de la superficie (235 Km²) est constituée de pentes variant entre 3% et 30%. Alors que les terres avec des pentes supérieures à 30% représentent environ 29.55 Km² avec 2.70% de la superficie totale du bassin versant d'oued mekkera.

Tab 4: *La répartition des surfaces en fonction de classement des pentes*

Classe	Pente (%)	Surface (km²)	Surface (%)
1	0 - 3	272,66	24,92
2	3 - 7	359,90	32,89
3	7 - 15	325,55	29,75
4	15 - 30	106,61	9,74
5	> 30	29,55	2,70

II.3.2.10 Courbe hypsométrique

C'est une courbe exprimant le pourcentage de superficie du bassin versant au delà d'une certaine élévation.

la courbe hypsométrique montre que plus l'altitude augmente plus le pourcentage des superficies diminue du bassin versant, cette dernière présentent une allure moyennement concave qui indique un relief bas et un développement de la plaine influencée par une forte érosion vers l'amont du versant vers les basse d'altitudes, cette courbe prenne une forme convexes au niveau des zones d'épandages ou s'étalent les alluvions des cours d'eau.

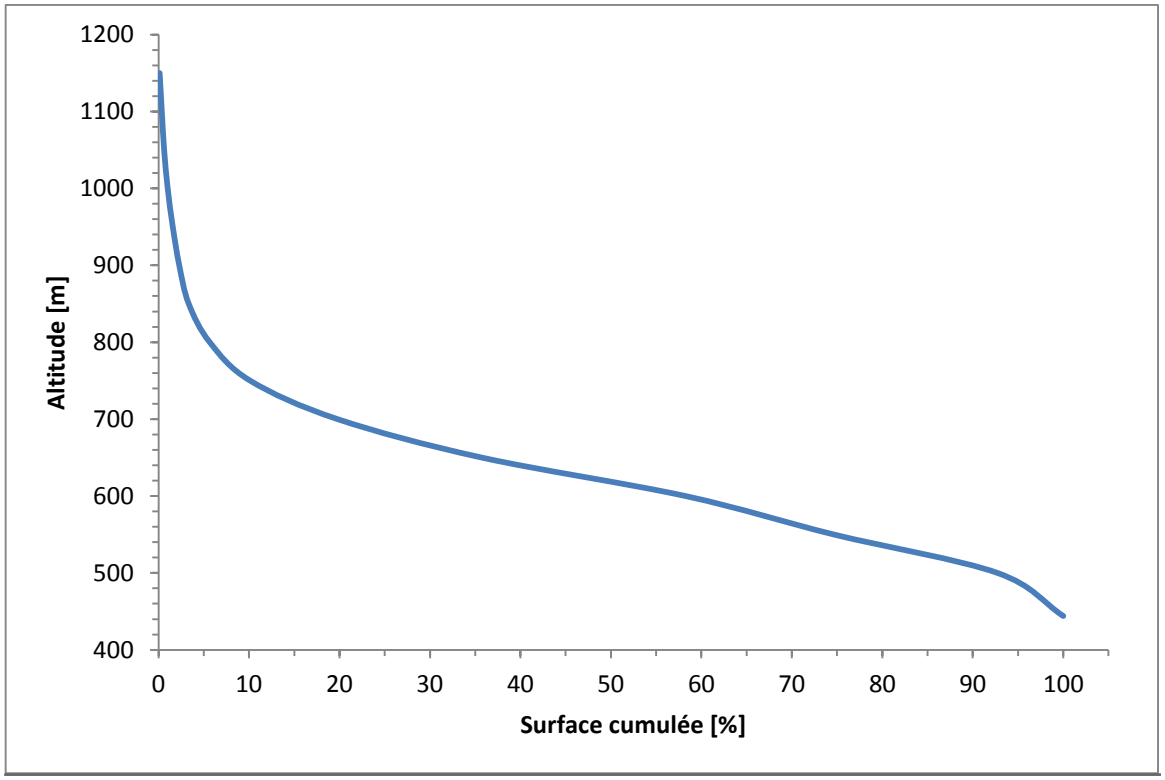


Fig 12 : *La courbe hypsométrique*

N °Classe	Classe d'altitude	Borne inf.	Altitude moy.	Surfaces partielles		Surfaces cumulées	
	H(i) - H (i-1)	H (i) [m]	H (i) [m]	Si [km2]	Si [%]	ΣSi [km²]	ΣSi [%]
1	1192-1150	1150	1171	1,37	0,125	1,366	0,125
2	1150-1100	1100	1125	2,59	0,236	3,952	0,361
3	1100-1050	1050	1075	2,84	0,259	6,787	0,620
4	1050-1000	1000	1025	4,30	0,393	11,083	1,013
5	1000-950	950	975	6,16	0,563	17,239	1,575
6	950-900	900	925	7,82	0,714	25,055	2,290
7	900-850	850	875	11,47	1,048	36,520	3,338
8	850-800	800	825	25,43	2,324	61,946	5,661
9	800-750	750	775	48,91	4,469	110,852	10,131
10	750-700	700	725	105,71	9,660	216,558	19,791
11	700-650	650	675	174,44	15,941	390,993	35,732
12	650-600	600	625	246,42	22,520	637,409	58,252
13	600-550	550	575	179,34	16,389	816,745	74,641
14	550-500	500	525	197,96	18,091	1014,701	92,732
15	500-444	444	472	79,53	7,268	1094	100

Tab 5 : *Classement des altitudes selon la superficie du bassin versant d'oued mekkera*

II.3.2.11 Tableau récapitulatif

La connaissance des paramètres morphométriques et hydrographique ainsi que leur comparaison sont importantes, Ils interviennent souvent de façon combinée pour commander les modalités de l'écoulement.

Ces paramètres sont résumés dans le tableau (6) suivant :

Tab 6 : *Récapitulatif des caractéristiques morphométriques et hydrographiques de sous bassin versant de l'oued Mekerra*

Désignation		Symbole	Unités	Valeurs
Superficie		S	Km^2	1094,22
Périmètre		P	km	195,32
Indice de Gravilius		Kc	-	1,67
Rectangle équivalent	Langueur	L	m	85,61
	Largeur	l	m	12,78
Longueur du thalweg principal		L_T	m	37.73
Pente du cours d'eau principal		I_C	%	0,052
Densité de drainage		Dd	(km/km^2)	1,04
Temps de concentration		Tc	Heures	17,50
Altitude	max	H_{max}	m	1192
	moy	H_{moy}	m	626
	min	H_{min}	m	444
Pente moyenne de B.V		I_{bv}	%	25.95

II.4 Végétation et géologie :

Dans l'ensemble du bassin versant de la Mekerra, seulement 25% du sous-sol est imperméable. La partie nord est beaucoup plus perméable que la partie sud. Tableau (4) reprend la couverture terrestre du bassin versant de Mekerra (ANAT, 2000). On constate ainsi que la couverture végétale du bassin est développée de manière irrégulière. A l'aval de la ville de Ras El Ma apparaissent des terres recouvertes d'Alfa, qui vers le nord cèdent la place aux broussailles. A l'amont, des céréales, des vignes et des agrumes occupent la zone de Sidi Ali Benyoub. Les forêts couvrent plus de 20% de la superficie du bassin (DGPC, 2000).

L'étude de l'influence de la végétation sur la configuration et l'aspect des cours d'eau a été décrite par Filliol (1954). Selon les taux de fixation intégrale des berges ou de fixation partielle du lit par la végétation, il en résulte des processus d'érosion latérale ou d'érosion en profondeur. Il y a aussi le facteur d'influence de la vitesse d'écoulement. Selon Martinez-Mena et al. (1999) et Rachman et al. (2003), la couverture végétale peut réduire l'énergie cinétique des précipitations de 50% et la puissance de ruissellement de 75% (Korichi, Hazzab 2012).

Tab 7 : *Couverture terrestre du bassin de Mekerra ((Korichi, Hazzab 2012).*

Couverture terrestre	Surface%
Forêt	27.61
Cultures annuelles	35.82
Alfa	10.71
Agglomérations	1.17
Travaux de conservation des sols	0.42
Terre improductive	2.8
Route	5.73

Trois principaux ensembles de sols dominent le bassin versant de Mekerra. Il s'agit de sol brun calcaire, de sol calcaire et de sol alluvial. Les deux premiers types appartiennent à la classe de sol magnésium-calcique. Ces sols sont plus profonds, ayant une structure granitique ou grumeleuse généralement bien développée dans l'horizon de surface et polyédrique dans la profondeur (Bouasria et al. 2010). Sur le plan agricole, leur adsorbant complexe est saturé de calcium et de magnésium, le **ph** est supérieur à 6,8. Les sols alluviaux appartiennent à la classe peu évoluée. Ces sols sont

rencontrés sur les terrasses d'oued et caractérisés par un profil peu différencié et peu structuré. Ceci explique que ces sols sont bons pour l'agriculture (Askri et al. 1993).

II.5 La base de données de l'oued Mekkerra :

Le sous bassin versant de l'oued mekkerra a une superficie **1094,22** km ²
Le réseau de mesures hydrométriques d'oued Mekkerra et de ses affluents mise en place et géré par l'ANRH. Le réseau est contrôlé par 4 stations :

- Station hydrométrique automatisé (0301)
- Station de la surveillance de la qualité de l'eau (0304)
- Station hydrométrique automatisé et site de surveillance de la qualité de l'eau (0302) (0201)

Les ensembles de données de stations sont généralement incomplète pleines de lacunes ou de valeur aberrantes ; Sont dues à:

- ✓ Le vandalisme
- ✓ Le non-paiement des observateurs
- ✓ Les désastres naturels que causent des dommages

Les données enregistrés est envoyés a L'ANRH où elle sera transformé en fichier Excel ; Après ce fichier est stocké dans la base des données 《BASHYD》 est une base de données qui utilise par les services de l'ANRH pour stocker et gestionnaire les données hydro climatologique.

II.6 L'historique de crue d'oued Mekkerra :

Le bassin versant de la Mekerra se caractérise aussi par une pluviosité assez irrégulière, tombant sous forme d'averses générant ainsi d'importantes crues. En Septembre 1941, la Mekerra grossie soudainement, inondait les rives des territoires de Boukhanifis, Sidi Khaled et Sidi Lahssen sur une largeur de 200 à 300m, de part et d'autre du lit. La crue atteignait Sidi Bel Abbés, inondant jardins et rues des bas quartiers, en quelques heures, l'eau avait monté de 8 mètres et son débit passait de 0.5 m^3/s à 100 m^3/s…Le trafic routier était interrompu et la voie ferrée coupée ; c'était la plus forte crue depuis 37 ans à Sidi Bel Abbés. (A.BORSALI, 2005).

Les études faites par les services de l'hydraulique en vue de protéger la plaine et la ville essentiellement contre les crues de l'oued Mekerra ont abouti à l'estimation d'une crue dont le volume varie de 900 à 1500 m3/s pour une fréquence centennale admise après la crue d'octobre1986.

Les orages sont fréquents généralement de septembre à octobre et accompagnés de pluies torrentielles. Ce qui nous mène à parler des inondations ravageuses de la Mekerra qui a été l'objet d'une crue régulière généralement au mois d'octobre 1966,1986 et le 30 octobre avec un débit de 200 m3/s.

Pour ce qui est de la crue de 1986, elle illustre clairement ce que l'on pourrait appeler (les basses crues) les informations recueillies sur cette crue enregistrée sur l'oued Mekerra a touché plusieurs communes riveraines (Ras El Ma, Moulay Slissen, Boukhnafis , Sidi Khaled, Sidi Lahcen et jusqu'à Sidi Bel Abbés). Des dégâts importants et la principale cause des débordements sont les étranglements par endroit à Boukhnafis (à cet endroit précis il y a plusieurs méandres). Dans les localités ou le lit d'oued sont très étroits ne dépassent pas 3 mètres de largeur, ceci entraîne une vitesse d'écoulement très importante et pour une aussi faible section il y a automatiquement un débordement de l'oued. (Chahmi. A., Boudahri B. 2007).

Des précipitations intensives et de durée exceptionnellement longue, durant tout la nuit du 23 au 24 octobre 2000, puisqu'en 45 minutes, la masse de pluie reçue sur les hauteurs de Ras El Ma a été estimée à plus de 100 mm. Les conséquences de cet orage ont été vivement ressenties par la population qui a été surprise par le déferlement des eaux qui sont arrivée à la plaine avec une vitesse estimée de 7 Km/h et d'un débit de 500 m3/s, déposant sur son passage des mètres cubes de sables et de matériaux charriés sur les rues et les places du centre-ville de Sidi Bel Abbés et des villages sinistrés. La stagnation des eaux a durée de quelques heures à trois jours (figure 13). (Merabet A., 2007).

Fig 13 : *La crue du 24 octobre 2000 (MERABET A., 2007).*

Une crue survenue les 18 et 19 avril 2007 était classée parmi les plus dévastatrice. Des “vagues” de près de 5 mètres, une sorte de “tsunami”, ont été enregistré, soulignent les rescapés. Ces vagues ont déferlé à une vitesse inouïe sur le village. Le chef de daïra de Moulay Slissene, tentant de secourir des personnes en détresse, a été emporté par les eaux en furie. Son corps a été repêché plusieurs mètres plus loin. Le chef de brigade de la Gendarmerie nationale a disparu dans les mêmes circonstances dans le torrent bouillonnant de l’oued et son corps ne sera retrouvé que le lendemain soir dans la localité de Sidi Khaled où on dénombre trois blessés suite à l’effondrement d’un mur. L’orage de la nuit du 18 au 19 avait une intensité horaire de 60 mm/h. Ce qui équivaut aux précipitations de tout le mois d’avril qui, généralement, ne dépassaient pas les 39 mm. C’est l’équivalent d’un grand fleuve qui s’est déversée dans la zone causant des pertes de vies humaines et d’importants dégâts matériels et faisant beaucoup de familles sinistrées. Plusieurs maisons ont été inondées dans la localité de Boukhanefis. (figure 14) (Bouasria et al, 2010).

Fig 14 : *La crue du 18 et 19 avril 2007, Moulay Slissene - Sidi Bel-Abbès. (Bouasria S. & all, 2010)*

II.7 Causes des inondations dans la wilaya de Sidi Bel Abbes :

La ville de Sidi Bel Abbés est implantée à l'exutoire de la plaine avale de la Mekerra. Selon les services de l'hydraulique de la wilaya, cette ville est particulièrement concernée par le risque inondation **;** Les principales causes des inondations enregistrées à travers le bassin peuvent être résumées comme suit :

- La géomorphologie des principales composantes du bassin versant sont la cause de l'inondation de certaines agglomérations;
- La pente, depuis Ras El Ma (amont) jusqu'au-delà de la ville de Sidi Bel Abbés (aval), va en s'abaissant doucement ;
- La forme allongée du bassin versant constitue un réceptacle des crues ;
- L'urbanisation sur les rives immédiates de l'oued Mekerra, donc sur les zones inondables ;
- Débordement de l'oued Mekerra, résultant des ruissellements des eaux des versants dominants les agglomérations et survenant le plus souvent en période d'automne (qui se singularise par des orages particulièrement intenses) ;
- Cassure naturelle de l'oued Mekerra, au niveau du pont en amont de Sidi Khaled, qui provoque des débordements (pour Sidi Khaled et entrée sud de Sidi Bel Abbés) ;

- Débordement des eaux au niveau du pont à l'intérieur de Sidi Lahcen, aggravé par les eaux d'épandage arrivant de Sidi Khaled ;
- Épandage des eaux de crues à l'entrée sud de la ville de Sidi Bel Abbés (route de Boukhanifis), inondant la zone (cuvette) située entre Makam EchChahid et Bab Dhaya.

III. Données et Méthode

III.1 Présentation des données :

La mesure directe du débit est une opération complexe qui ne peut être réalisée que ponctuellement. Sauf dans des cas très particulier, on ne peut pas réaliser un suivi direct et continu du débit. C'est la hauteur d'eau que l'on mesure en continu, le débit est ensuite recalculé à partir d'une relation liant le débit à la hauteur d'eau : la courbe de tarage. Cette relation est propre à chaque site de mesure et peut varier dans le temps, en particulier à la suite d'une crue si celle-ci a creusé ou déposé du sédiment dans le lit du cours d'eau. Il est donc nécessaire de mesurer régulièrement le débit pour définir la relation hauteur-débit et suivre son évolution. Une mesure ponctuelle de débit est appelé jaugeage.

Au niveau de la station hydrométrique de contrôle du bassin versant on effectuées Ces mesures

Les données employées dans cette étude ont été collectées après de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) qui gère toutes les mesures nécessaires (hydroclimatologique) des cours d'eau et contrôle les ressources en eau par les stations hydrométriques, postes pluviométriques et par les analyses de la qualité de l'eau.

III.1.1 La mesure des débits liquides :

Pour mesurer le débit d'un écoulement naturel (cours d'eau, canal, dérivation...), il existe plusieurs méthodes ; parmi ces méthodes le plus utilisable par l'ANRH est : les méthodes **"d'exploration du champ de vitesse"** consistent à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section, tout en mesurant la surface de la section mouillée. Ces techniques nécessitent un matériel spécifique (moulinet, perche, saumon, courantomètre...) et un personnel formé à son utilisation.

La vitesse d'écoulement n'est jamais uniforme dans la section transversale d'un cours d'eau. Le principe de cette méthode consiste donc à calculer le débit à partir du champ de vitesse déterminé dans une section transversale du cours d'eau (en un certain nombre de points, situés le long de verticales judicieusement réparties sur la largeur du cours d'eau). Parallèlement à cette exploration du champ de vitesse, on relève le profil en travers du cours d'eau en mesurant sa largeur et en effectuant des mesures de profondeur.

Le débit Q [m^3/s] s'écoulant dans une section d'écoulement S [m^2] d'une rivière peut être défini à partir de la vitesse moyenne V [m/s] perpendiculaire à cette section par la relation (6) :

$$Q = V.S \quad \text{.....(6)}$$

Parmi les nombreuses méthodes d'exploration du champ de vitesse, les jaugeages au moulinet.

III.1.1.1 Le jaugeage au moulinet :

Le moulinet hydrométrique permet de mesurer la vitesse ponctuelle de l'écoulement. Le nombre de mesures sur une verticale est choisi de façon à obtenir une bonne description de la répartition des vitesses sur cette verticale. De manière générale, on fera entre 1, 3 ou 5 mesures suivant la profondeur du lit.

Le jaugeage au moulinet consiste à explorer le champ des vitesses dans la section à travers laquelle on veut mesurer le débit liquide.

Fig 15 : *Le moulinet*

La vitesse d'écoulement est mesurée en chacun des points à partir de la vitesse de rotation de l'hélice située à l'avant du moulinet (nombre de tours n par unité de temps). La fonction v = f (n) est établie par une opération d'étalonnage (courbe de tarage du moulinet). Suivant le mode opératoire adopté

pour le jaugeage, le moulinet peut être monté sur une perche rigide Dans le cas du montage sur perche, le moulinet manœuvré directement par l'opérateur placé dans l'écoulement (jaugeage à gué), la perche reposant sur le fond du lit du cours d'eau. Cette méthode est utilisable dans des sections de profondeur inférieure à 1 mètre et avec des vitesses d'écoulement inférieures à 1 m/s.

Finalement, le calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement sur l'ensemble de la section S de longueur L se fait par intégration des vitesses Vi définies en chacun des points de la section de profondeur Pi (variant pour chaque verticale de 0 à une profondeur maximale P) et d'abscisse Xi (variant pour chaque verticale de 0 à L).

La formule à utiliser pour calculer les vitesses à partir du nombre de tours par seconde de l'hélice est:

$$\mathbf{V = a\,n + b} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(7)$$

V : vitesse du courant en mètre par seconde.

n : nombre de tours d'hélice par seconde.

a : pas réel de l'hélice en m.

b : vitesse dite de frottement en mètre par seconde.

a, pas réel de l'hélice, a une valeur différente pour chaque hélice: on la détermine par tarage. On n'appelle pas nominal une valeur arrondie de a caractérisant un grande nombre d'hélices. Le pas nominal est donc une caractéristique de constructeur et le pas réel un résultat de mesure.

Si n inferieur (<) à 1.08 $\Rightarrow$ **V=0.2257 n + 0.04** ……..(8)

Si n supérieure / égale (≥) à 1.08 $\Rightarrow$ **V=0.2590 n+0.004**……..(9)

Après de faire le jaugeage et les calcules, peut établir les courbes de tarage du moulinet soit manuelle ou par le logiciel HYDRACCESS ; Ce logiciel traite à la fois les données d'hydrométrie (débit liquide - débit solide - concentration solide - salinité - conductivité) et de climatologie (pluviométrie - évaporation - vent (direction et vitesse) - humidité relative, température).

III.1.2 La mesure de concentration (prélèvement):

Une large gamme d'options est aujourd'hui disponible pour mesurer la quantité de sédiments en suspension transportée par un cours d'eau. La méthode la plus rigoureuse pour obtenir une estimation

de la charge solide en suspension consiste à la mesure de concentration par prélèvement d'eau, on mesure une concentration en Matières En Suspension (MES) qui correspond à la quantité de matériaux en suspension; Elle s'exprime en milligrammes par litre d'eau brute.

III.1.2.1 Les techniques de prélèvement :

a. Le lieu de prélèvement :

- Période de crue : le prélèvement se fait sur la bordure de l'oued (à 25 cm de profondeur)
- Période normale : le prélèvement se fait à mi-profondeur

b. Le matériel de prélèvement : Une fiole généralement de 500 ml

c. Nombre de prélèvement par jour :

- Période de crue : fonction de la hauteur (chaque 10 cm) 4 à 5 prélèvement par jour.
- Période normale : un seul prélèvement par jour.

d. Laboratoire :

- Placer le buvard dans l'Etuve pour dégager l'humidité.
- On mesure le poids de buvard (p)
- On mesure le volume eau + boue (V)
- Décantation (à 15 de 35 min)
- Faire chauffer le buvard + boue et mesurer leur poids (B)
- On faire le calcule de poids de la boue :

$$\mathbf{P = B - p} \ldots\ldots\ldots (10)$$

- On calcule la concentration :

$$\mathbf{C} = \frac{p * 1000}{V} \ldots\ldots\ldots (11)$$

III.1.3 La mesure des débits solides :

Pour mesurer le débit solide en applique la relation (12) suivant :

$$\mathbf{Q_S = Q_L * C} \ldots\ldots\ldots (12)$$

Q_S : débit solide

Q_L: débit liquide

C : concentration

III.1.4: L'analyse des composantes principales (La matrice de corrélation) :

L'analyse des composantes principales (A.C.P.) est une méthode mathématique d'analyse graphique de données qui consiste à rechercher les directions de l'espace qui représentent le mieux les

corrélations entre n variables aléatoires (relation linéaire entre elles). Simplement dit, une A.C.P. permet de trouver des similitudes de comportement d'achat entre les classes des données observées.

On a utilisée La matrice de corrélation (le type d'ACP : Pearson (n)) pour indiquer l'interaction entre les combinaisons de différentes variables d'entrée et de sortie. La matrice a été appliquée à **2120** individus en tenant compte de sept variables (**Ql** , **QL_{t-1}**, **QL_{t-2}**, **QL_{t-3}** , **Qs** , **Qst_{-1}**, **Qst_{-2}**) (voir le tableau 5).

Tab 8 : *Matrice de corrélation (Pearson (n)) (Excel stat)*

Variables	Ql	QLt-1	QLt-2	QLt-3	Qs	QSt-1	QSt-2
Ql	**1**	**0,793**	**0,552**	**0,489**	**0,541**	**0,529**	**0,505**
QLt-1	**0,793**	**1**	**0,793**	**0,552**	**0,526**	**0,541**	**0,529**
QLt-2	**0,552**	**0,793**	**1**	**0,793**	**0,500**	**0,526**	**0,541**
QLt-3	**0,489**	**0,552**	**0,793**	**1**	**0,467**	**0,500**	**0,526**
Qs	**0,541**	**0,506**	**0,490**	**0,467**	**1**	**0,977**	**0,928**
QSt-1	**0,529**	**0,541**	**0,526**	**0,500**	**0,977**	**1**	**0,977**
QSt-2	**0,505**	**0,529**	**0,541**	**0,526**	**0,928**	**0,977**	**1**

Les données d'entrée (combinaison) ont été choisies à partir le tableau ci-dessus, ce qui a prouvé dans les résultats qu'il existe une relation entre le débit de sédiment et le débit d'eau précédent et le débit de sédiment précédent.

III.2 Approche et Méthodologie (Réseaux de neurones artificiels):

III.2.1 Aperçu :

Les réseaux de neurones artificiels est l'un des modèles mathématiques pour la prévision en utilisant des procédures d'appariement et de comparaison de modèles Fischer, (1998), TACHI (2017). Les RN sont une approche dans le cadre plus large de l'hydro-informatique qui a émergé dans les années 1990 comme un moyen efficace de gérer la surcharge d'information Govindaraju, (2000).

L'RNA est l'une des forces les plus significatives des techniques d'intelligence artificielle (IA) utilisées par les hydrologues au cours des vingt dernières années, car l'RNA est considéré comme est un exemple de méthode de prédiction non linéaire (PNL), qui a été largement étudié et appliqué à divers problèmes, y compris la simulation météorologique et la prévision ,Varoonchotikul(2003). Tingsanchali,(2009) et Campolo et al, (2003) ont mené plusieurs études basées sur les RNA qui se sont intéressées à la prédiction des débits des rivières à une échelle de temps allant d'une année à une journée dans le fleuve Chao Phraya et le fleuve Arno en Italie, en utilisant uniquement les observations du passé, Ramapulana(2011).

III.2.2 Définition de réseaux neurones artificiel :

Les réseaux de neurones artificiels (ou Artificiel Neural Network ″ANN″ (en anglais)) sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèles. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau. TOUZET.C, (1992).

III.2.3 La structure de RNA :

Les structures RNA sont basées sur les réseaux neuronaux biologiques, La figure (16) présente la structure de RNA.L'unité neurale traite les informations d'entrée dans les informations de sortie. Chacune de ces unités est un modèle simplifié d'un neurone et transforme ses informations d'entrée en une réponse de sortie neuronale. Cette transformation implique l'activation du neurone calculée par la somme pondérée de ses entrées. Cette activation est ensuite transformée en une réponse en utilisant une fonction de transfert, Ramapulana (2011).

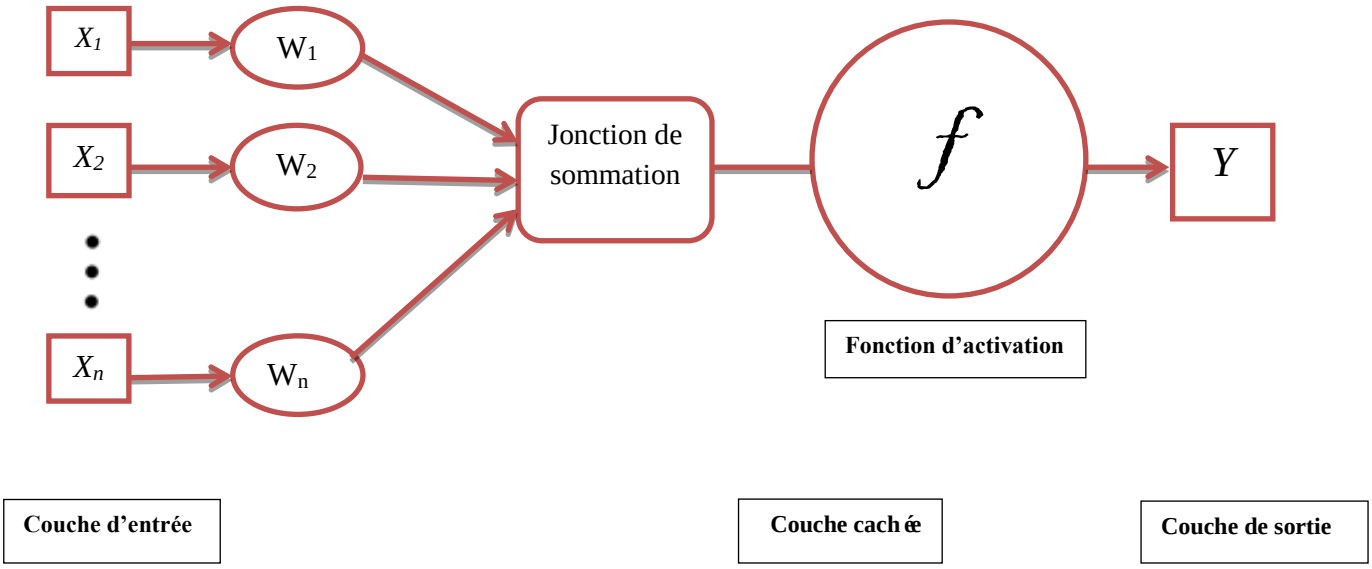


Fig 16 : *La structure (l'architecture) des réseaux de neurones*

III.2.4 Apprentissage pour les RNA :

III.2.4.1 Définition :

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré.

L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement, (Touzet, 1992).

III.2.4.2 Les méthodes d'apprentissage :

On distingue deux approche d'apprentissage : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non-supervisé.

III.2.4.2.1 L'apprentissage supervisé :

L'apprentissage supervisé est basé sur la formation d'un échantillon de données à partir d'une source de données avec une classification correcte déjà attribuée. De telles techniques sont utilisées dans les modèles feed forward ou Multi Layer Perceptron (MLP),Sathya et Abraham, (2013).

III.2.4.2.2 L'apprentissage non- supervisé :

Pour identifier les modèles cachés dans les données d'entrée non marquées pour les réseaux neuronaux auto-organisateurs est basé sur un algorithme d'apprentissage non supervisé. Le rôle de l'apprentissage non supervisé est d'apprendre et d'organiser les informations d'entrée sans évaluer la solution potentielle (Kohene et al., 1996).

III.2.5 Les réseaux de neurones feed-forward rétro propagation (RNFFRP):

L'algorithme d'entraînement «par défaut» le plus populaire est la rétro- propagation Rumelhart et al. (1986), Tveter (2003) et Abrahart et al. (2004). Il est largement utilisé pour résoudre des fonctions non linéaires compliquées. Il s'agit d'un algorithme d'apprentissage supervisé utilisé pour l'apprentissage d'un réseau neuronal artificiel. Cette technique offre une procédure de calcul efficace pour évaluer les dérivées de la fonction de performance du réseau. Le réseau neuronal de rétro propagation est largement utilisé en tant que réseau d'apprentissage multicouche, constitué d'une couche d'entrée, de couches cachées (une ou plusieurs couches cachées en fonction de la structure du réseau) et d'une couche de sortie. Des poids ajustables sont utilisés pour connecter les nœuds entre les couches adjacentes et optimisés par un algorithme d'apprentissage pour obtenir les résultats de classification souhaités. (Lin, 2007).

III.2.6 Les avantages et Les inconvénients de RNA :

Les chercheurs qui utilisant RNA pour prédire les différents problèmes et phénomènes font face à différents avantages et inconvénients ; Dans cet élément nous avons cité certains de ces avantages et inconvénients ont été énoncés par Khadir (2005).

III.2.6.1 Les avantages :

- ✓ Une tolérance aux incertitudes très élevé.
- ✓ Etant une multiple copie d'une unité simple (les neurones), donc facilement extensible.
- ✓ Facilité d'application car ne nécessitant pas une compréhension approfondie.
- ✓ Un choix de réseaux, types, architecture et fonctions d'activations diverses.
- ✓ Possède la capacité de généraliser (interpoler) dans le cadre de données utilisées pour l'apprentissage.

III.2.6.2 Les inconvénients :

- ✓ Facilité d'applications donnant lieu à de nombreuses implémentations et choix pas toujours justifiés.
- ✓ Malgré une solide base théorique, le choix du réseau incombe souvent à l'utilisateur car il n'´existe pas de guide prouvé pour toute utilisation.
- ✓ La nature non linéaire des RNAs peut piéger l'utilisateur dans un minimum local.

III.2.7 Développement de modèle :

Le modèle RNA sur lequel nous travaillons basé sur des étapes principale pour le faire la construction ; Il comprend : la sélection des données d'entrée, sélection de la fonction de transfert, normalisation des données, sélection de l'architecture RNA, la sélection des algorithmes de formation, et la sélection des mesures d'évaluation de la performance.

III.2.7.1 Sélection des données d'entrée :

La sélection des données d'entrée joue un rôle essentiel dans le développement d'un réseau approprié. La modélisation RNA appropriée dépend fortement de la sélection des données d'entrée qui représente la non-linéarité et la complexité des données lors de la formation du réseau (Rojas 1996).

Dans la présente étude, a été effectuée sur les données de 10ans (du1989 au 2001) dans la période des crues qui traitée a partir l'ACP (la méthode mentionné dans cette chapitre), environ 80% des données (12 crues : du 18/20 septembre 1989 au 23/28 octobre 1997) été sélectionné pour l'apprentissage et 20% des données (4crues : du 24/26 mai 2000 au 15/18 novembre 2000) validation le modèle.

III.2.7.2 Sélection de la fonction de transfert /la fonction d'activation :

Pour incorporer la non-linéarité de la fonction d'activation / de transfert sigmoïde de données a été utilisé dans la couche cachée. Pour fournir une flexibilité supplémentaire au modèle où l'extrapolation est nécessaire au-delà de la gamme de données d'apprentissage (Maier et Dandy 2000), la fonction linéaire a été utilisée dans la couche de sortie. Les fonctions d'activation pour les couches cachées et de sortie sont représentées par (Bishop 1995):

$$f(x)=\frac{e^{x}-e^{-x}}{e^{x}+e^{-x}} \quad \dots\dots\dots\dots(13) \qquad\qquad f(x)= x\dots\dots\dots(14)$$

Où, x est les données d'entrée.

La fonction d'activation sigmoïde logistique a été largement utilisée (par exemple, Agarwal et al 2009, Kisi 2005, Zhu et al 2007, Tayfur 2002) dans les modèles RNA pour la prédiction des sédiments. L'avantage de l'utilisation de la fonction d'activation sigmoïde tangente hyperbolique est qu'elle est continue, facilement différentiable et ses limites sont comprises entre -1 et 1, M. R. Mustafa(2012).

III.2.7.3 Normalisation des données :

L'ensemble de données quotidiens disponibles comprenaient les rejets d'eau (m3.s-1), et les rejets de sédiments en suspension (kg.s-1).Ces données sont utilisées dans notre étude qui proviennent de l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH)).

En raison des différentes unités de mesure, nous avons appliqué la normalisation, dans ce cas ont prendre de considération l'équation (15) Pour empêcher l'effet des valeurs extrêmes des ensembles de données et pour correspondre au type de fonction de transfert sigmoïde, qui a une gamme de valeurs variant de 0 à1.

Les données d'entrée et de sortie ont été normalisées en utilisant l'équation de transformation suivante:

$$Y_{norm} = Y_i / Y_{max} \ldots\ldots\ldots (15)$$

Où:

Y norm : la variable adimensionnelle normalisée,

Yi : la valeur observée de la variable;

Y max : la valeur maximale des variables.

III.2.7.4 sélection de l'architecture RNA :

• **Les variables d'entrée choisies :** dans l'analyse présentée les variables sont dues à la relation directe entre le rejet d'eau et le rejet de sédiments. Prenant en considération que la formule d'estimation des rejets de sédiments en Algérie est $Q_S = C_S * Q_L$. Lorsque le Q_S est un rejet de sédiments en suspension (kg / s), C_S est la concentration de sédiments mesurée (g / l) et Q_L est le débit d'eau mesuré dans l'oued (m3 / s) ou obtenu par la formule de la courbe. Les valeurs

préexistantes sont parfaitement appliquées pour les rejets d'eau, et les sédiments sont choisis afin de comprendre la relation entre les rejets de sédiments et les différentes valeurs précédentes d'écoulement et de sédimentation, d'autre part pour améliorer la prédiction et l'estimation des rejets sédimentaires dans les oueds.

• **La combinaison d'entrée**: Dans le modèle présenté les valeurs actuelles et précédentes du débit liquide et les valeurs des rejets de sédiments en suspension.

Dans ce model nous avons Sept combinaisons d'entrées qui sont appliquées celui-ci l'algorithme de propagation avec une architecture de réseau neural différente. Dans les points suivants, nous expliquons chaque combinaison d'entrée et son architecture:

RNA 01 : Dans la première combinaison d'entrée, Nous avons utilisé le débit liquide pour prédire le débit solide **Qs** ; notre modèle neuronal se compose à une couche d'entrée **Ql** **« tansig »** et une couche cachée avec la fonction de transfert **« logsig »**;et une couche de sortie **Qs** avec un transfert de **« logsig »**.

Le type d'architecture de ce modèle est le réseau neuronal « feedforward ».

RNA 02 : dans ce modèle nous avons appliqué la décharge des sédiments précédentes $\mathbf{Qs_{t-1}}$ dans la 2ème combinaison .Le modèle RNA se compose d'une couche d'entrée avec celle de la fonction de **« tansig »** et deux couches : la première couche cachée est de la fonction de transfert **« logsig »**;la seconde couche est de **« logsig »** qui est dans la couche de sortie .

RNA 03 : la troisième combinaison d'entrée dépend de deux entrée principale : la décharge de sédiments de deux valeurs précédentes $\mathbf{Qs_{t-2}}$ .les couche d'architecture de notre modèle sont composées de 3 couches :

- La première est une couche d'entrée avec (la fonction de transfert « tansig »).
- La deuxième est une couche cachée avec (la fonction de transfert « logsig »).
- La troisième est une couche de sortie avec (la fonction de transfert « logsig) ».

RNA 04 : le quatrième modèle de réseaux de neurones dépond de deux entrées .Le débit liquide actuelle $\mathbf{Ql_t}$ et le débit solide de deux valeurs précédentes $\mathbf{Qs_{t-1}}$; trois couches avec leurs fonction de transfert « tansig ; logsig ; logsig » respectivement.

RNA 05 : dans ce modèle les combinaison d'entrées de RNA est basées sur les valeurs des rejets de sédiments précédents et de deux débits précédents $\mathbf{Qs_{t-1}}$ et $\mathbf{Qs_{t-2}}$ qui ont la même fonction de

transfert que les autres imitations RNAs dans les deux couches et la couche de sortie pour prédire la décharge de sédiments.

RNA 06 : nous avons démontrée dans ce type les débits liquide actuel $\mathbf{Ql_t}$ et la précédentes de rejet de sédiments ($\mathbf{Qs_{t-1}}$; $\mathbf{Qs_{t-2}}$) leur fonction de transfert des trois couches est « tansig, logsig, logsig ».

RNA 07 : les rejets des sédiments actuels $\mathbf{Ql_t}$et de deux valeurs imitations $\mathbf{Qs_{t-2}}$ nous avons appliqué dans la combinaison d'entrée de ce modèle trois couches dont la même fonction de transfert que celle dans les précédentes de RNAs.

- **Apprentissage :**

Après la sélection de la fonction d'apprentissage (LM), et la structuration du réseau neuronal, le réseau est prêt à être fonctionné pour ces applications particulières. Dans ce modèle RNA, les données d'entrées et de sorties pour cette période sont connues et entièrement introduites dans le modèle. Les réseaux commencent à traiter les entrées et comparent leur sortie résultant aux sorties désirées qui sont établirai dans notre modèles. Dans l'application de ce modèle les rejets de sédiments en suspension sont estimés avec une itération complète (500 époques) qui donnent au modèle BP pour évaluer la meilleure performance pendant la période d'entraînement. L'ensemble d'apprentissage est utilisé pour but/ de prendre le réseau de neurones en minimisant l'erreur des données, et en trouvant ses meilleures résultats.

Dans cette période, Les données utilisées sont seulement établir dans le processus d'apprentissage, et ne sont pas introduites dans la validation.

- **Validation :**

L'ensemble de validation est a pour bute d'utiliser les performances globales du réseau d'apprentissage. Cette dernière est aussi destinée à l'obtention du réseau choisi.

III.2.7.5 La sélection des algorithmes de formation :

L'algorithme de levenberg- marquardt est une fonction de formation populaire et efficace pour former de plus petits réseaux (Hagan et Menhajs 1994) ;Cet algorithme utilise la méthode de Newton qui approximera l'erreur de réseau (Marquardt 1963).Elle fournit une solution numérique au

problème de minimisation d'une fonction non linéaire sur un espace de paramètres pour la fonction, cet algorithme est la fonction la plus populaire utilisée dans la retro-propagation "back-propagation " pour prédire les paramètres hydrologiques (Tachi .S 2016).

III.2.7.6 La sélection des mesures d'évaluation de la performance :

Pour évaluer la performance des modèles ont servant deux équations différentes pour calculer l'erreur entre les données observées et quantifier.

III.2.7.6.1 Le coefficient de détermination "R^2 ":

Le coefficient de détermination R^2 décrit le degré de colinéarité entre les données simulées et mesurées; R^2 décrit la proportion de la variance dans les données mesurées expliquée par le modèle MORIASI et al. (2006). R^2 varie de 0 à 100%, avec des valeurs plus élevées indiquant une variance d'erreur inférieure et des valeurs supérieures à 50% est considéré comme acceptables SANTHI et al(2001); VAN LIEW et al (2003), Tachi (2016). En utilise le coefficient de détermination R^2 a pour évaluer la performance du modèle prédictif par une analyse plus approfondie et précision, Tachi(2016).

Il est défini comme suit:

$$R^2 = \left(1 - \frac{S_{cr}}{S_{ct}}\right) 100 \ldots\ldots\ldots\ldots(16)$$

Scr = somme carrée des résidus.

Sct = somme des carrés du total.

III.2.7.6.2 L'erreur carrée moyenne "MSE" :

Plusieurs indices d'erreur sont couramment utilisés dans l'évaluation de modèle, y compris l'erreur carrée moyenne (MSE). Ces indices sont utiles car ils indiquent une erreur dans les unités (ou unités au carré) du constituant d'intérêt, ce qui facilite l'analyse des résultats. Les valeurs MSE de 0 indiquent un ajustement parfait SINGH & WOOLHISER, (2002). L'erreur carrée moyenne a été utilisée pour tester l'importance statistique entre la concentration de sédiments en suspension estimée et observée, Tachi(2016).

Il peut être exprimé comme suit:

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[(\dot{\theta} - \theta)^2\right] \ldots\ldots\ldots\ldots(17)$$

Où :

θ : le rejet de sédiment observé.

$\dot{\theta}$:Le débit de sédiment prédit.

n : le nombre d'observations.

III.3 Résultats et Discussion :

Pour confirmer l'efficacité et la robustesse des modèles RNA développés, nous avons prédit la charge de sédiments en suspension dans la station hydrométrique (110301) située dans l'oued Mekkera.

La Prédiction de débit solide (ou MES) dans les oueds à l'aide du RNA nécessite de deux étapes fondamentales : apprentissage et validation. L'étape d'apprentissage est utilisée pour apprendre le réseau neuronal de minimiser l'erreur des données et trouver la meilleur performance.

L'autre étape de validation utilisé pour vérifie la performance de l'apprentissage.

Les séries des données ont été divisées en deux ensembles : la 1ère représente 80 % ont été introduites dans la phase d'apprentissage qui exprime 12 crue de 18/20 septembre 1989 au 23/28 octobre 1997 ; la seconde à été utilisée pour la phase de validation (20%) qui exprime 4 crue du 24/26 mai 2000 au 15/18 novembre 2000.

Tab 9 : *Les performances des réseaux neurones pendant la période d'apprentissage*

RNA	Combinaison d'entrer	Apprentissage	
		MSE	R²(%)
1	Ql	$0,889*10^{-4}$	82,32
2	Qs_{t-1}	$0,22*10^{-3}$	95,86
3	Qs_{t-2}	$0,62*10^{-3}$	88,11
4	Ql, Qs_{t-1}	$8,87*10^{-5}$	98,38
5	Qs_{t-1}, Qst_{-2}	$0,13*10^{-3}$	97,5
6	Ql, Qst_{-1}, Qst_{-2}	$5,27*10^{-5}$	99,04
7	Ql, Qst_{-2}	$2,69*10^{-4}$	90,26

Ce tableau ci-dessus (Tab 6) représente les résultats pendant la période d'apprentissage, Nous avons utilisé l'algorithme levenberg - Marquardt (LM) (1963) pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones à retro-propagation avec 500 itérations complète dans chaque modèle de RNA. Ceci pour

évaluer la meilleure performance pendant la période d'entrainement, conçu avec une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie.

Dans notre modèle, ont été proposées sept (07) combinaisons d'entrées qui ont été choisis en utilisant l'ACP pour prédire les débits solides en suspension durant la période de crue avec des mesures horaire, nous avons utilisé les données de 8 ans avec 12 évènements de crues été sélectionné pour l'entrainement (80%).

Les valeurs de performance de la phase d'apprentissage montrent que l'RNA est bien ajusté et elle a donné très bon résultats des RNA en termes de R^2 et MSE entre (82 % et 99%) et ($0.88*10^{-4}$ et $5.27*10^{-5}$). Le meilleur obtenu et celui du RNA 06 avec R^2 =99,04% et MSE=5,27x10 $-^{5}$.

Tab 10 : *Les performances des réseaux neurones pendant la période de validation*

RNA	Combinaison d'entrer	Validation							
		Crue 24/26-05-00		Crue 13/16-10-00		Crue 22/26-10-00		Crue 15/18-11-00	
		MSE	R (%)	MSE	R (%)	MSE	R (%)	MSE	R (%)
1	**Ql**	$0,99*10^{-5}$	97,25	$1,23*10^{-5}$	97,48	0,0127	72,70	$9,23*10^{-4}$	39,71
2	**Qs_{t-1}**	$1,66*10^{-4}$	95,45	$3,21*10^{-5}$	93,42	0,0069	85,20	$1,20*10^{-4}$	92,15
3	**Qs_{t-2}**	$5,74*10^{-4}$	84,24	$1,07*10^{-4}$	78,16	0,083	82,23	$2,97*10^{-4}$	80,43
4	**Ql, Qs_{t-1}**	$1,17*10^{-4}$	96,79	$1,52*10^{-5}$	96,89	0,0072	84,6	$3,14*10^{-4}$	79,49
5	**Qs_{t-1}, Qst_{-2}**	$5,82*10^{-5}$	98,4	$1,07*10^{-5}$	97,81	0,0096	79,36	$1,30*10^{-4}$	91,5
6	**Ql, Qst_{-1}, Qst_{-2}**	$7,66*10^{-5}$	97,89	$1,36*10^{-5}$	97,21	0,0103	77,74	$1,75*10^{-4}$	88,58
7	**Ql, Qst_{-2}**	$2,08*10^{-4}$	94,29	$5,52*10^{-5}$	88,7	0,0087	81,2	$6,13*10^{-4}$	59,98

Les valeurs de performance R^2 et MSE des réseaux de neurones sont représentées dans le tableau (8), obtenues durant la période de validation du modèle, qui présente 4 évènements de crues. Nous expliquons par la suite chaque crue en détail.

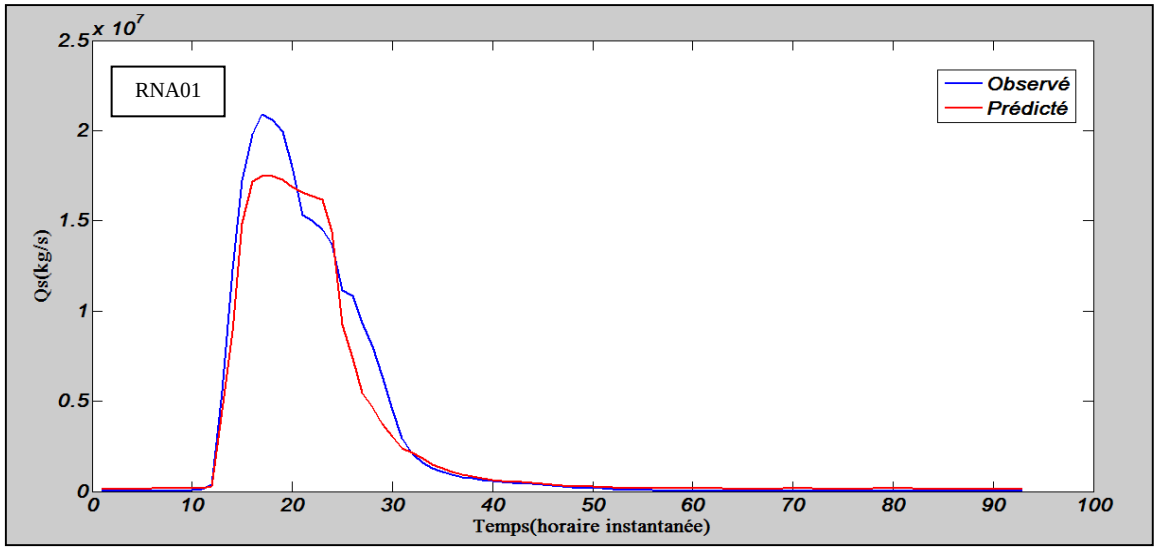
Crue 01 :

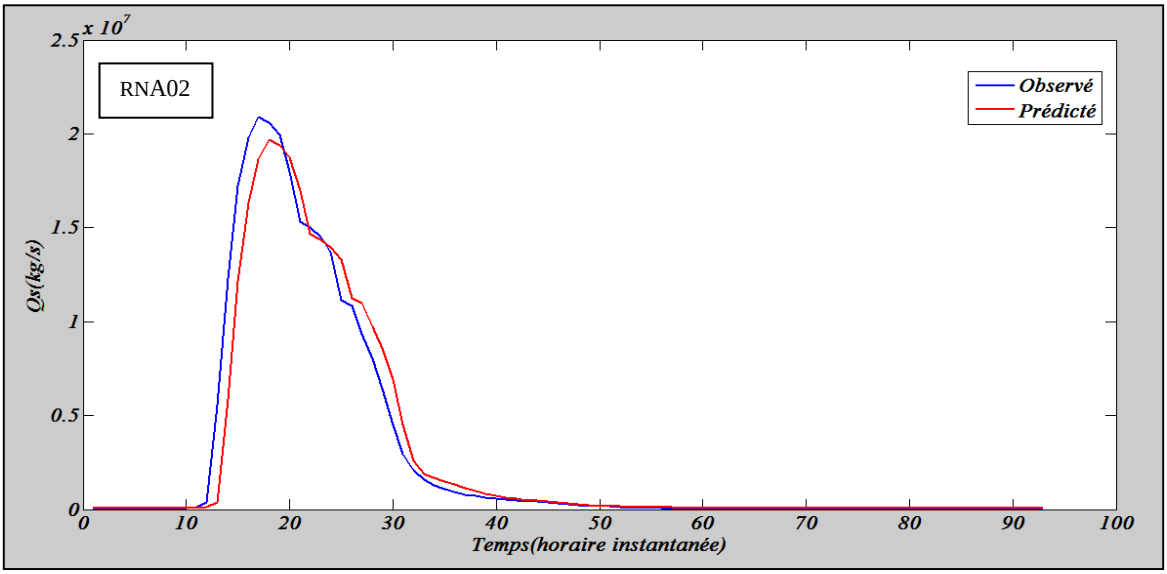
Le modèle simulé n°1 qui présente la crue 24/26-05-00 avec 7 combinaisons différents d'entrée du débit liquide et débit actuel et débit antécédent, les valeurs de performance de la phase du validation

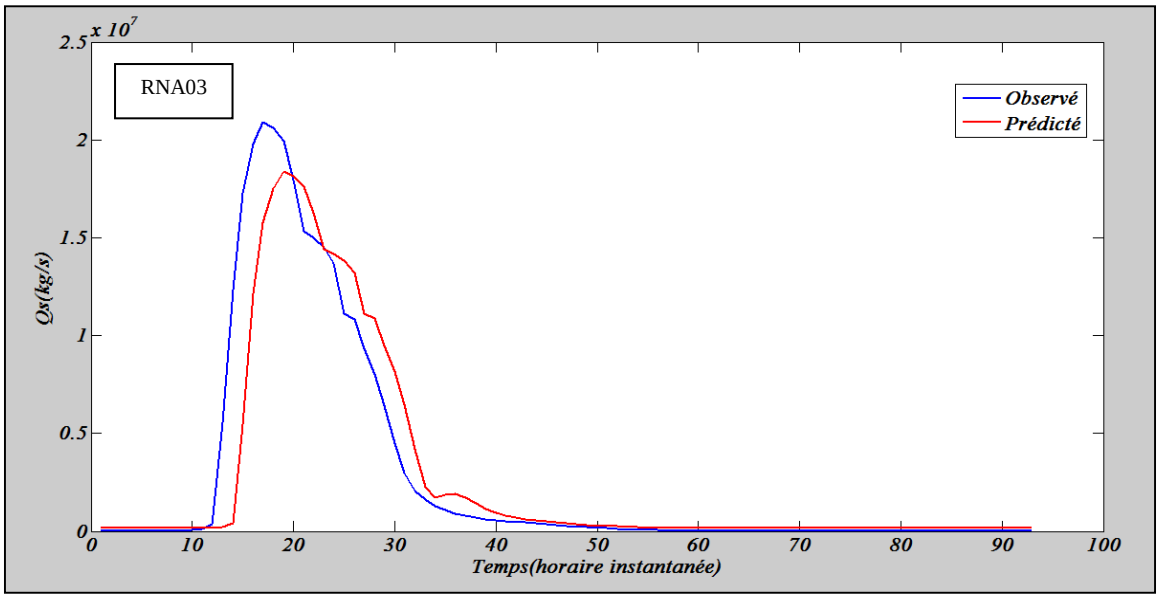
pendant cette crue montrant une très grande qualité d'ajustement qui confirment que l'utilisation des trois entrées améliore l'apprentissage du RN et minimise l'erreur .

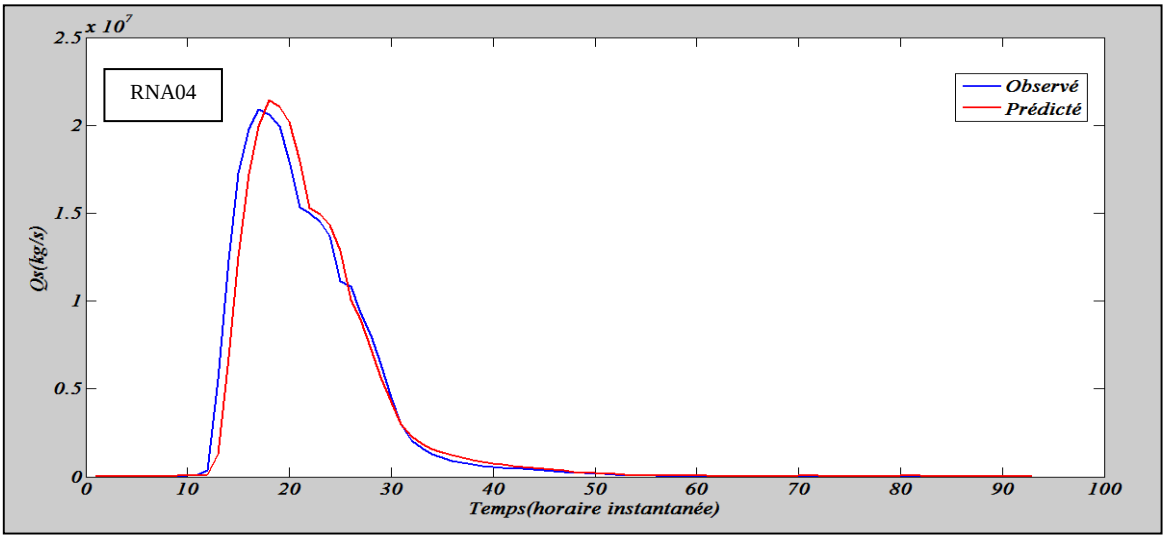
La relation entre les combinaisons d'entrées et la sorties a montré des résultats très bon et acceptables. De même, le modèle RNA 05 avec combinaison Qs_{t-1} et Qs_{t-2} donné les meilleurs résultats en termes de R^2 =98,4 %et MSE = 5,82 x10^{-5} ce qui prouve la relation positive entre le débit solide et le débit solide précédent et deux valeurs précédent, et ils sont également montré une très forte corrélation avec l'estimation des sédiments en suspension.

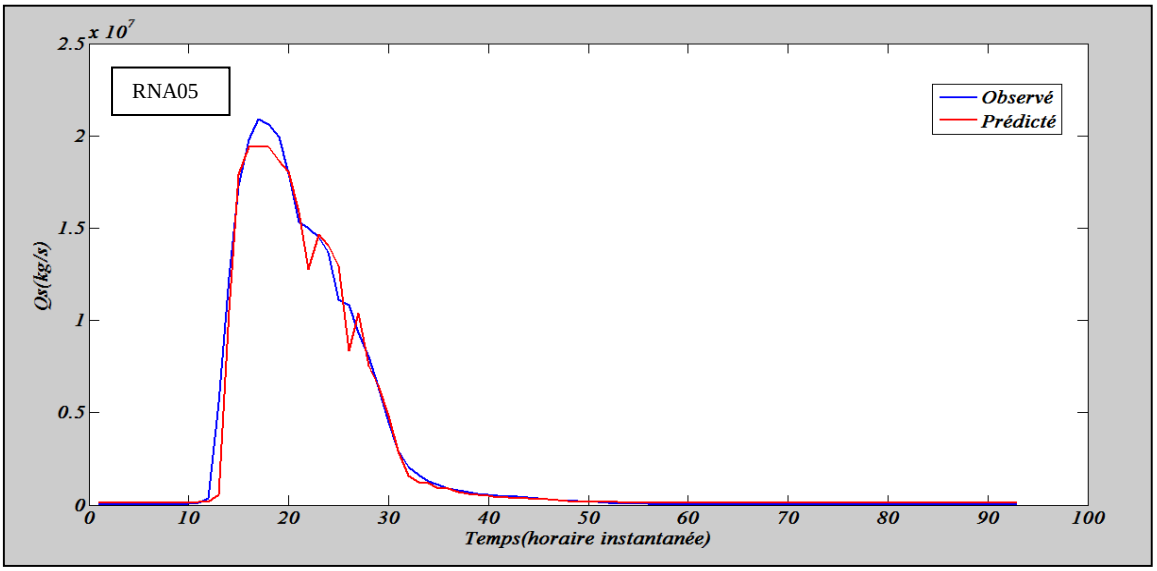
Fig 17 : *Les Qs prédites et observés utilisant des RNA dans la crue 01 d'oued mekkera*

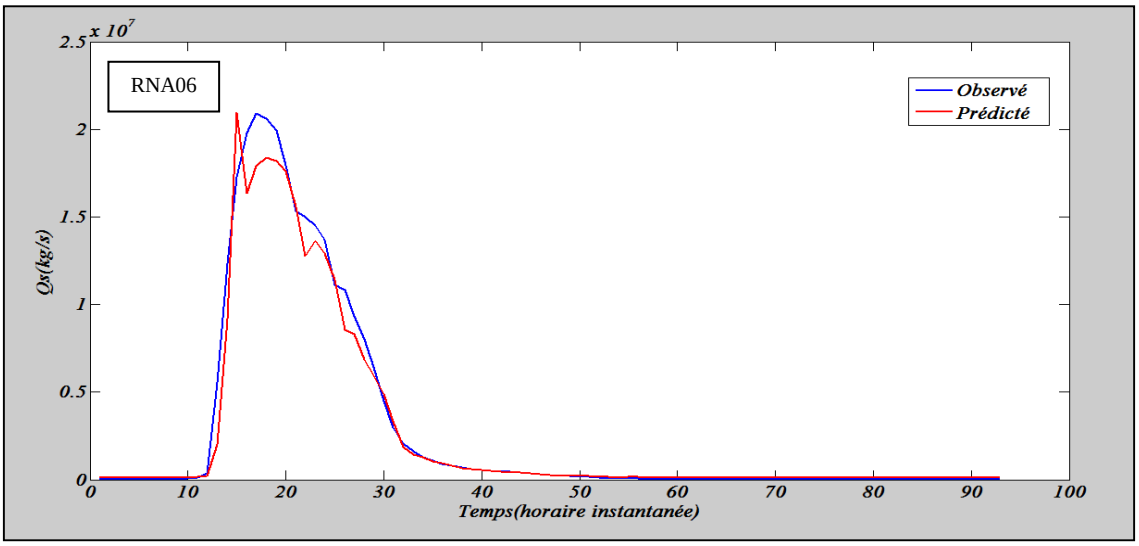


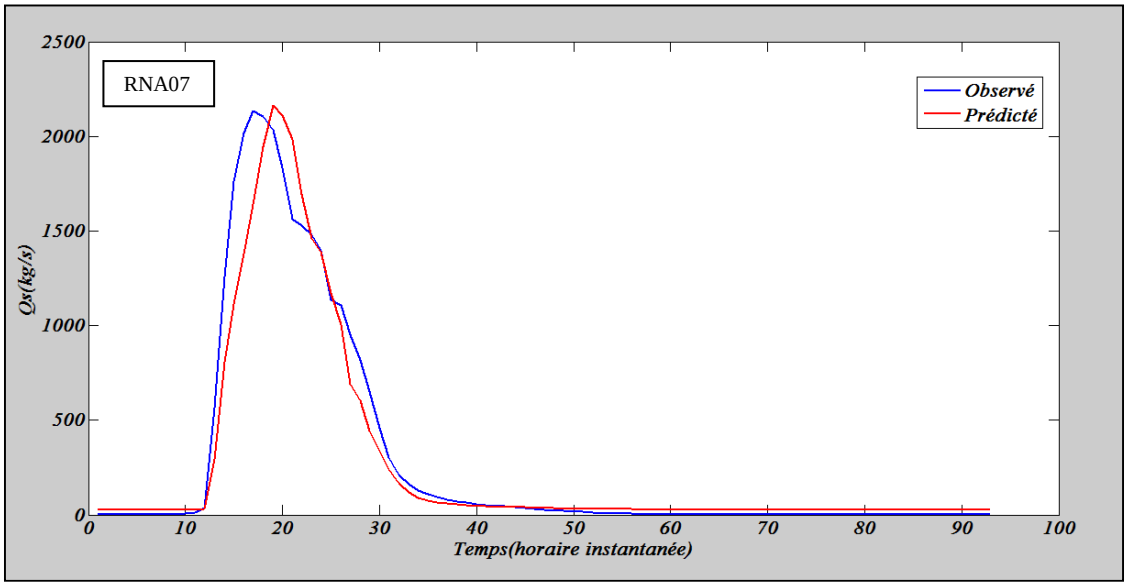



RNA03
Observé
Prédicté
x 10^7
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA04
Observé
Prédicté
x 10^7
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA05
Observé
Prédicté
x 10^7
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)





Les estimations pour la période de validation ont été comparées aux valeurs de sédiments en suspension observées sous la forme d'un hydrogramme (Fig 17).

Dans cette crue le modèle arrive à prédire avec efficacité le pic maximale ce qui représente une crue forte, comme le montre les figures 01, 02, 03,05 et 06 les valeurs des débits prédites est inferieurs aux valeurs observées dans la partie de crue extrême, c'est ce qu'on appelle le sous-estimation avec une erreur des MSE (qui mentionné dans le tab 8), tendit que les RNA 04 et 07 indiquent le sur-estimation, car les valeurs données pour notre modèle sont plus grande par rapport a ce qui à été mesuré.

Ces cas sont dues aux propriétés de données qui a utilisé pour l'apprentissage pour remédier a cette situation il est consulté d'utiliser une base des données beaucoup plus grande ce qui augmentera la capacité de notre modèle à généraliser.

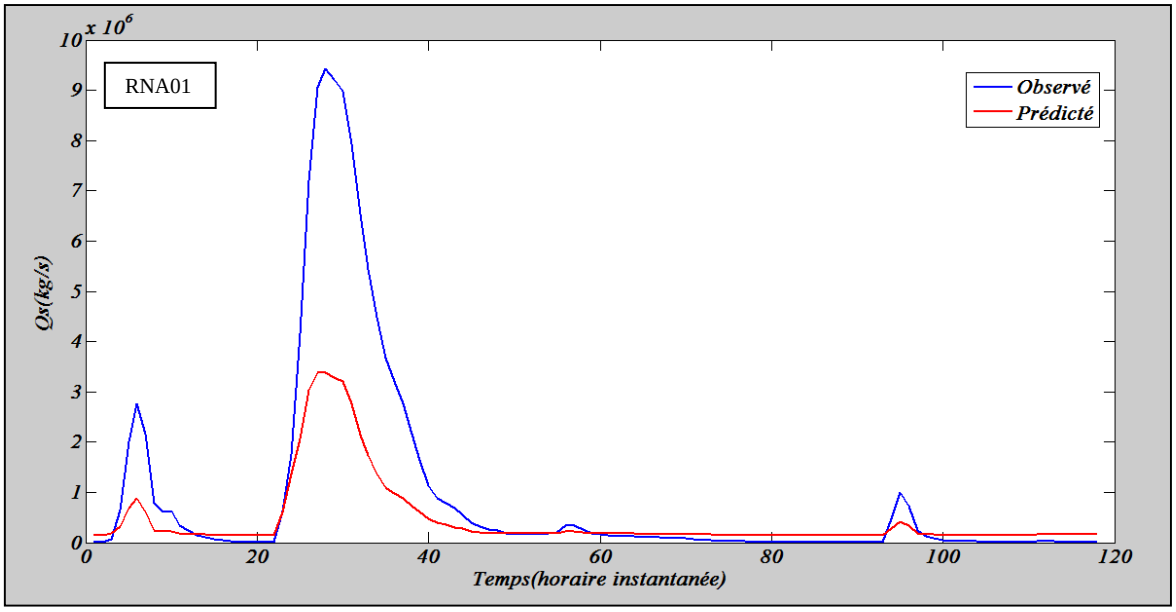
Crue 02 :

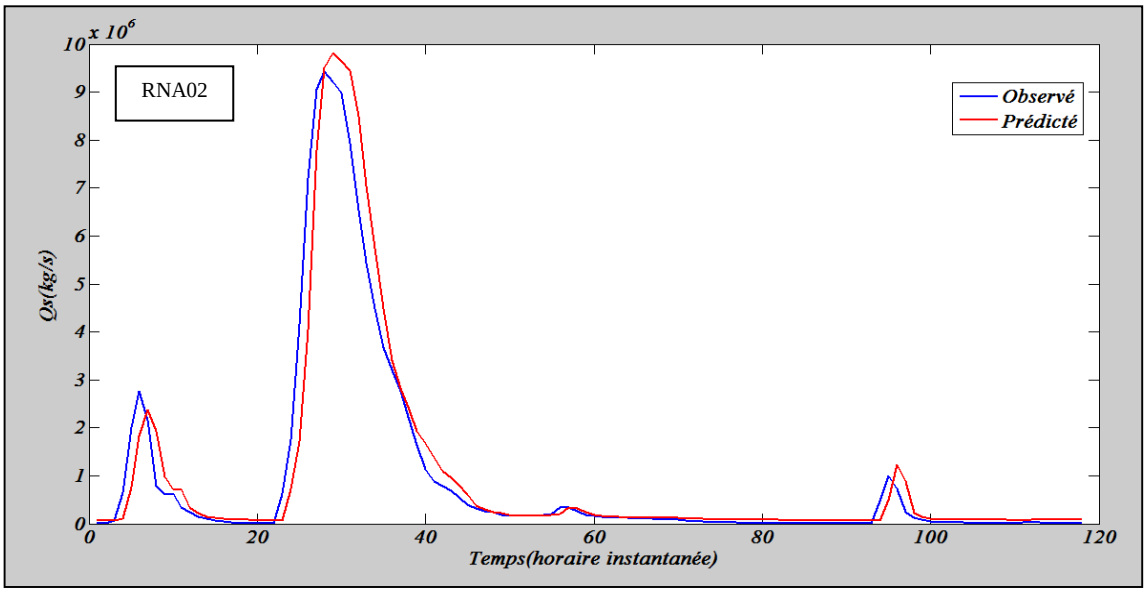
Dans cette seconde crue de 13/16-10-00 ; les meilleurs valeurs de R^2 et MSE au cours de phase de validation ont été obtenues par le RNA 05 pour la combinaison des rejets de sédiments précédents Qs_{t-1} et Qs_{t-2} avec 97,81 % et 1,07 $x10^{-5}$

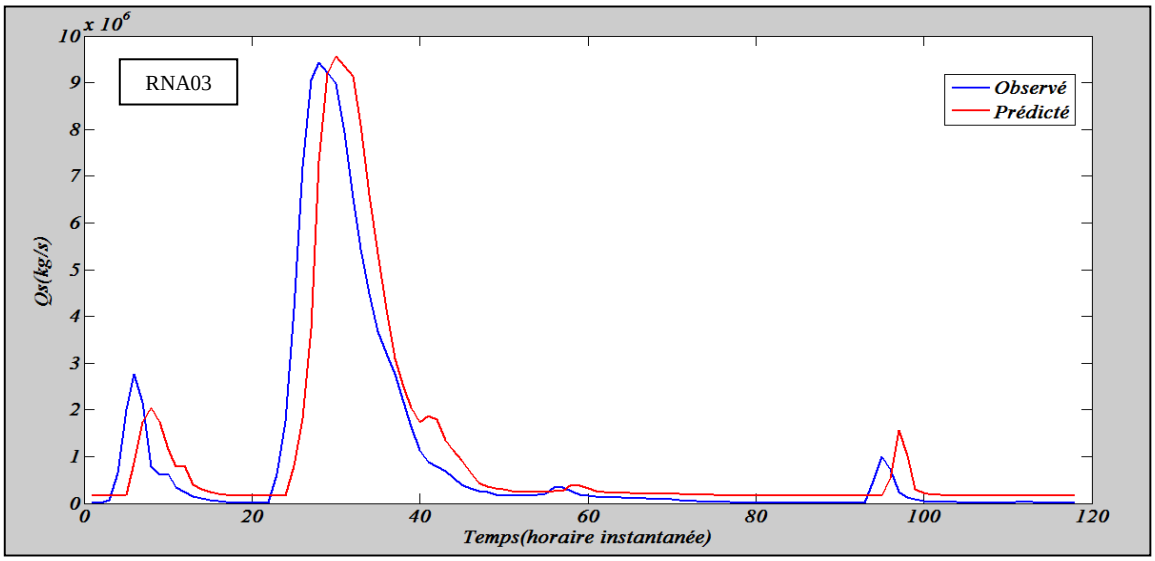
Les RNAs 1,2,4 et 6 donne aussi des bon valeurs non loin du RNA 05 avec les combinaisons de débit liquide actuel et le débit solide précédent avec R^2 de 97,48 % ; 93,42% ; 96,89% et 97,21% et MSE est égale 1,23 $x10^{-5}$; 3,21$x10^{-5}$; 1,52 $x10^{-5}$ et 1,36$x10^{-5}$ respectivement.

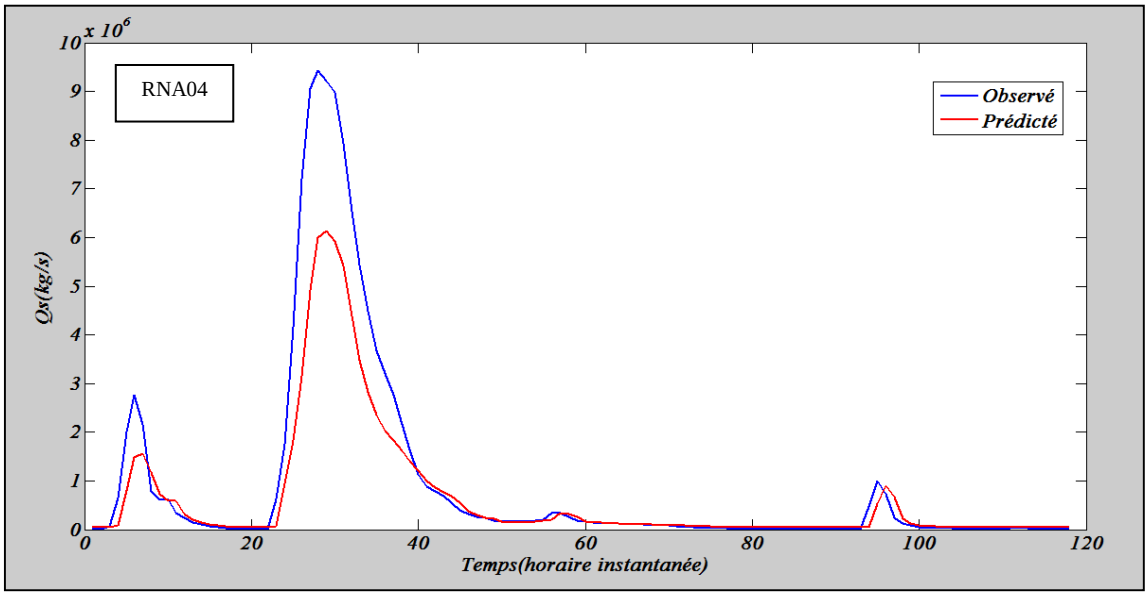
Au cours de la période de validation de cette crue, les résultats montrent qui RNA montre le meilleur lieu entre la combinaison d'entrée et la sortie prouvant la relation entre les rejets d'eau actuel (Ql) avec les rejets de sédiments précédents (Qs_{t-1}) et (Qs_{t-2}).

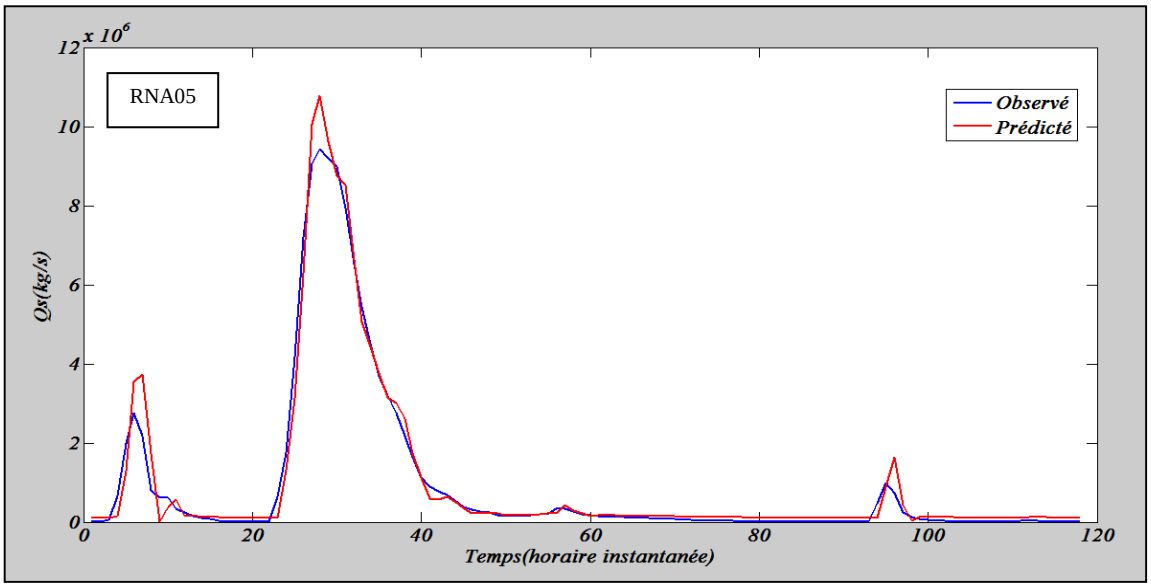
Fig 18 : *Les Qs prédites et observés utilisant des RNA dans la crue 02 d'oued mekkera*

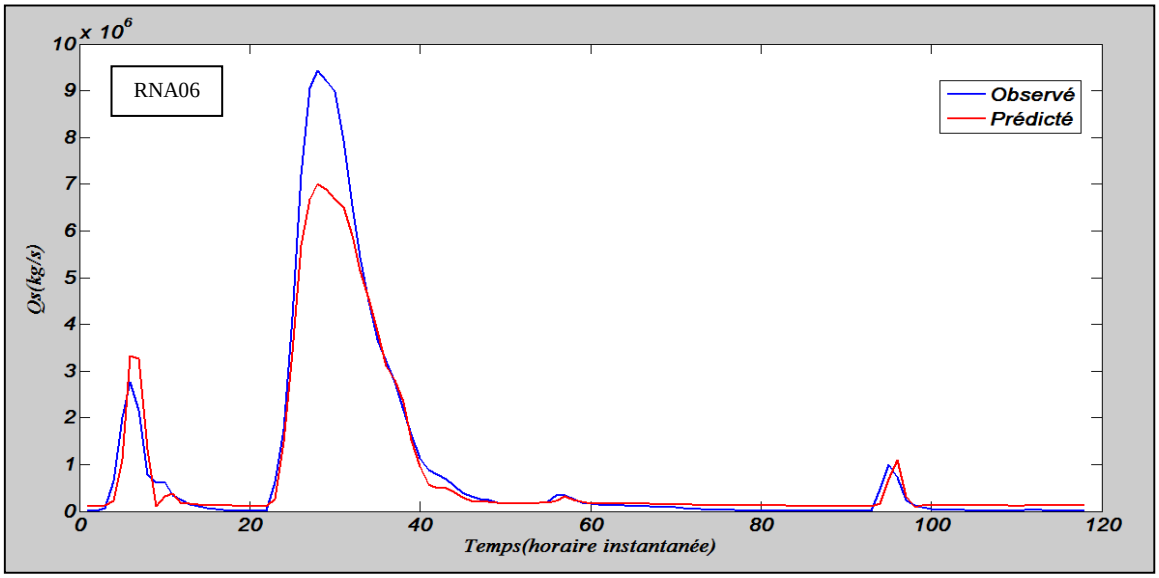


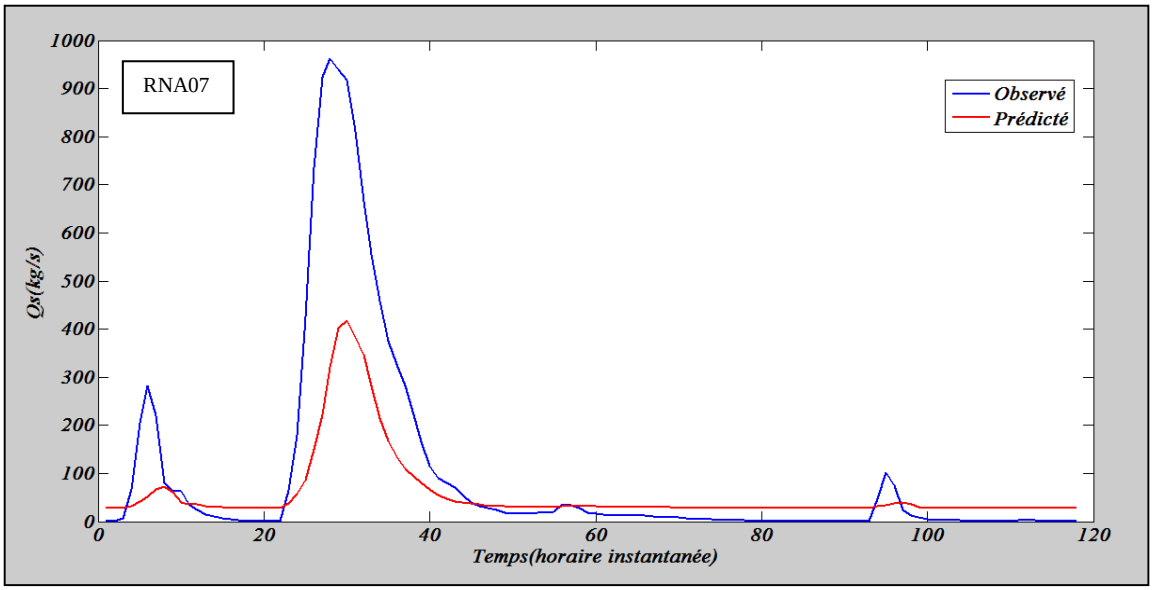

RNA02
Observé
Prédicté
x 10^6
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA03
Observé
Prédicté
x 10^6
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA04
Observé
Prédicté
x 10^6
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA05
Observé
Prédicté
x 10^6
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA06
Observé
Prédicté
x 10^6
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA07
Observé
Prédicté
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)

La comparaison des sédiments en suspension observées et estimées est montrée dans la Figure (18) sous la forme d'un hydrogramme, on a observé que ce modèle donne encore des pics moins élevés que le modèle RNA de la première crue ; les hydrogrammes des RNAs 01,04,06 et 07 montrent le sous-estimation, sachant que les RNAs 02,03 et 05 enregistre les sur-estimation.

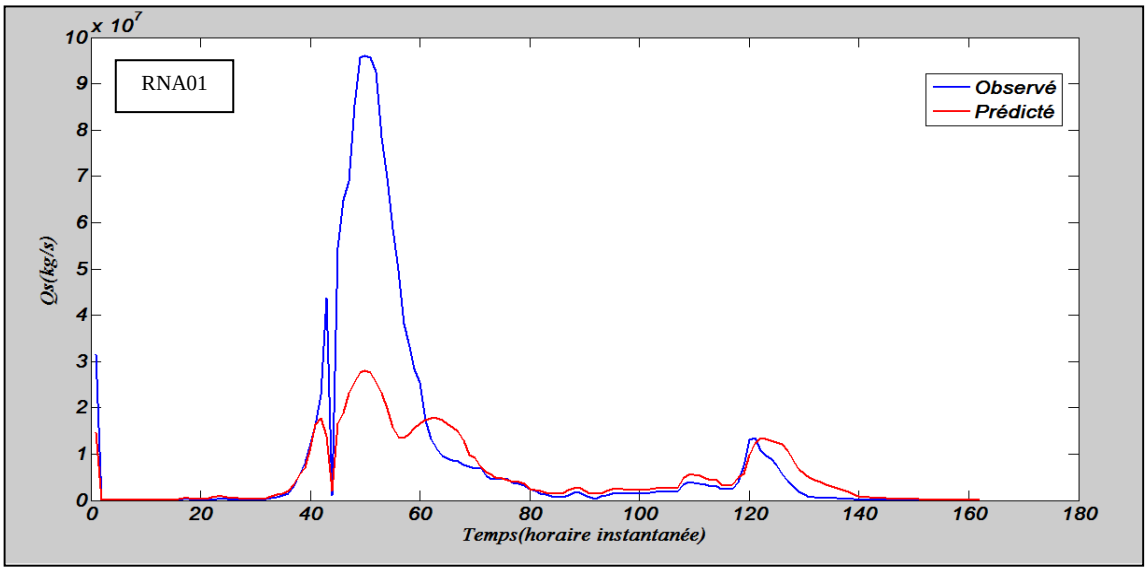
Crue 3 :

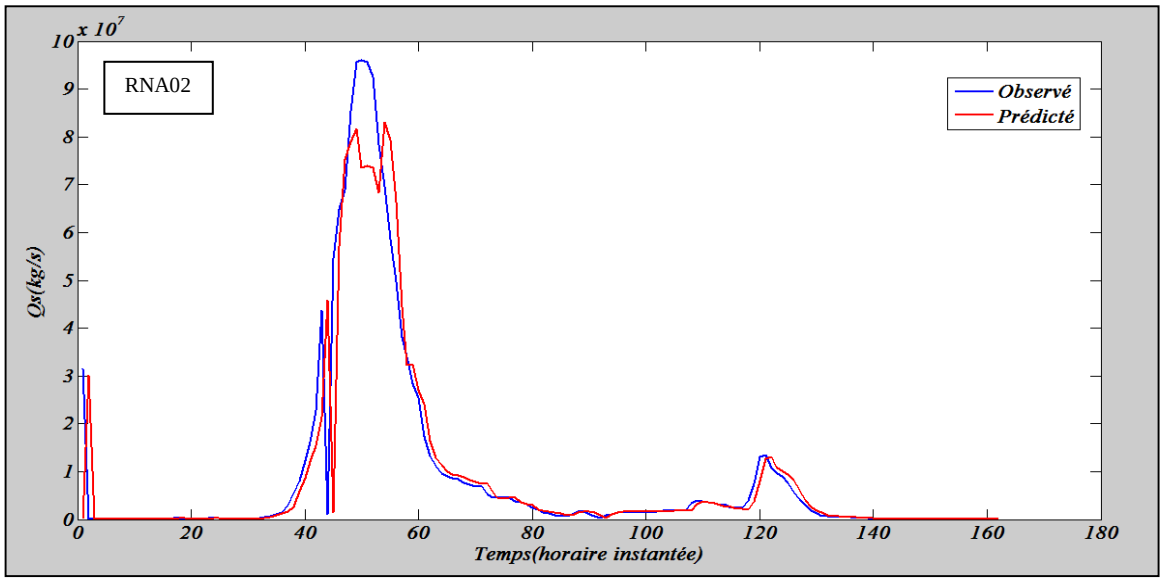
L'évaluation des modèles (R^2 et MSE) durant de la période de validation dans cette crue (22/16-10-00) montre que le réseau avec le débit solide précédent (Qs_{t-1}) qui représente RNA 02

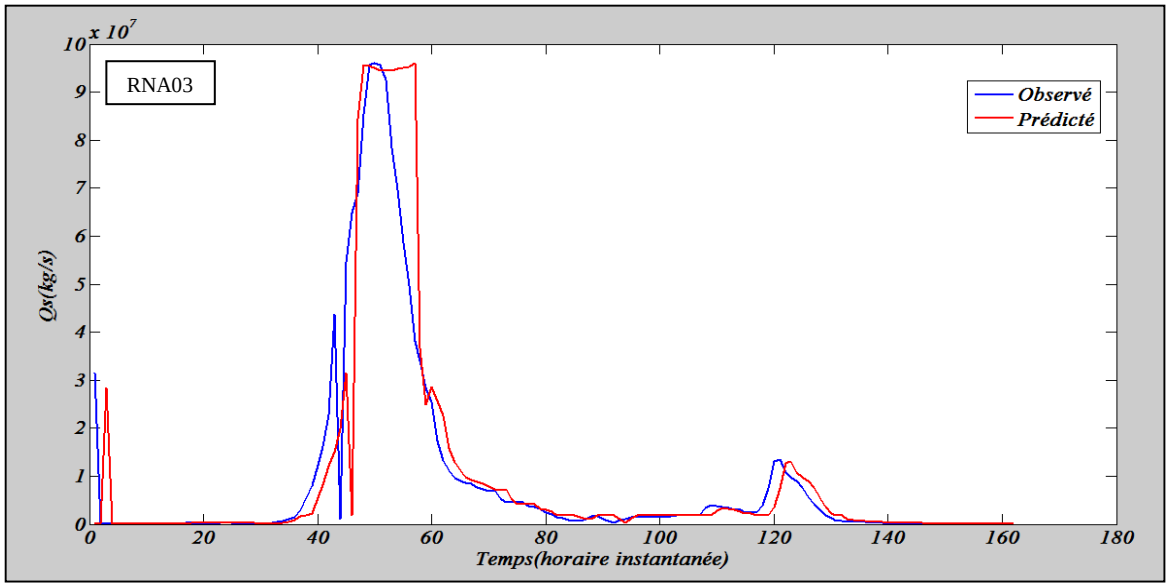
(fig19) donne la meilleur performance avec le plus élevé R^2 (85,20%) et le plus bas MSE (0,0069). Les RNA_S 1,3,4,5,6 et 7 donne une bonne et acceptable résultats et des valeurs proches de l'RNA 02 avec R^2 (72,70 % ; 82,23 % ; 84,6% ; 79,36% ; 77,74% et 81,2%) et MSE (0,0127 ; 0,083 ; 0,0072 ; 0,0096 ; 0,0103 et 0,0087) respectivement.

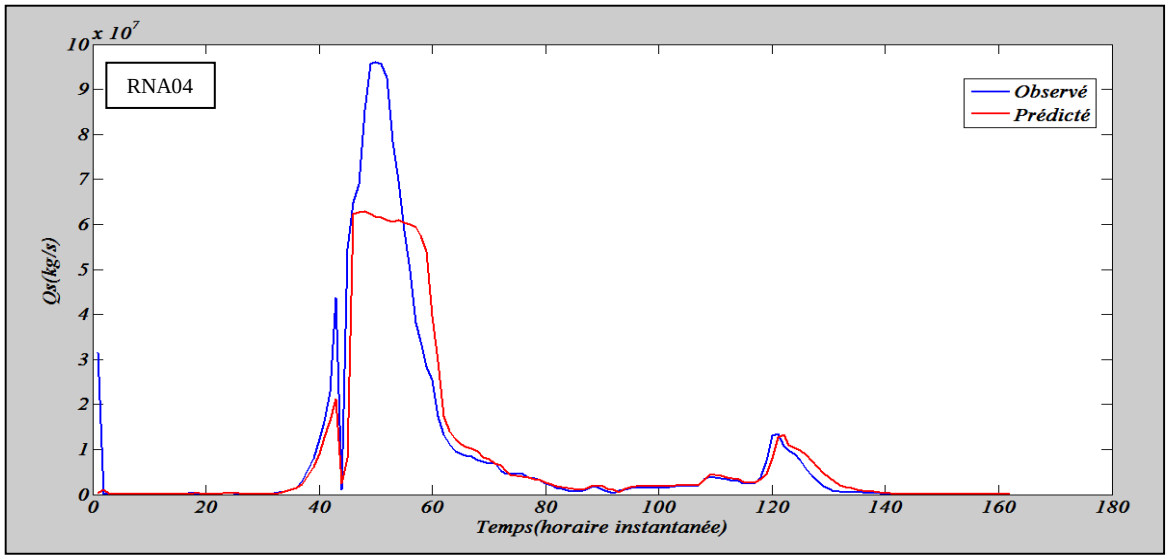
La combinaison la mieux utilisée des réseaux dans cette application est constituée par les rejets de sédiments précédents, ce qui signifie la forte relation entre les entrées avec la prédiction des débits solides.

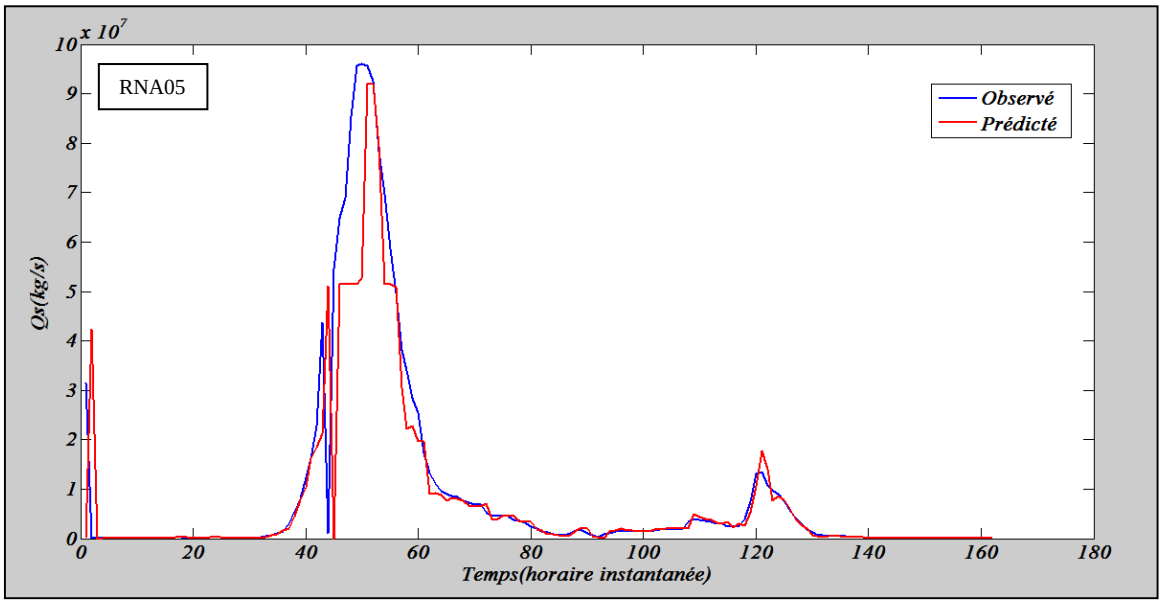
Fig 19 : *Les Qs prédites et observés utilisant des RNA dans la crue 03 d'oued mekkera*

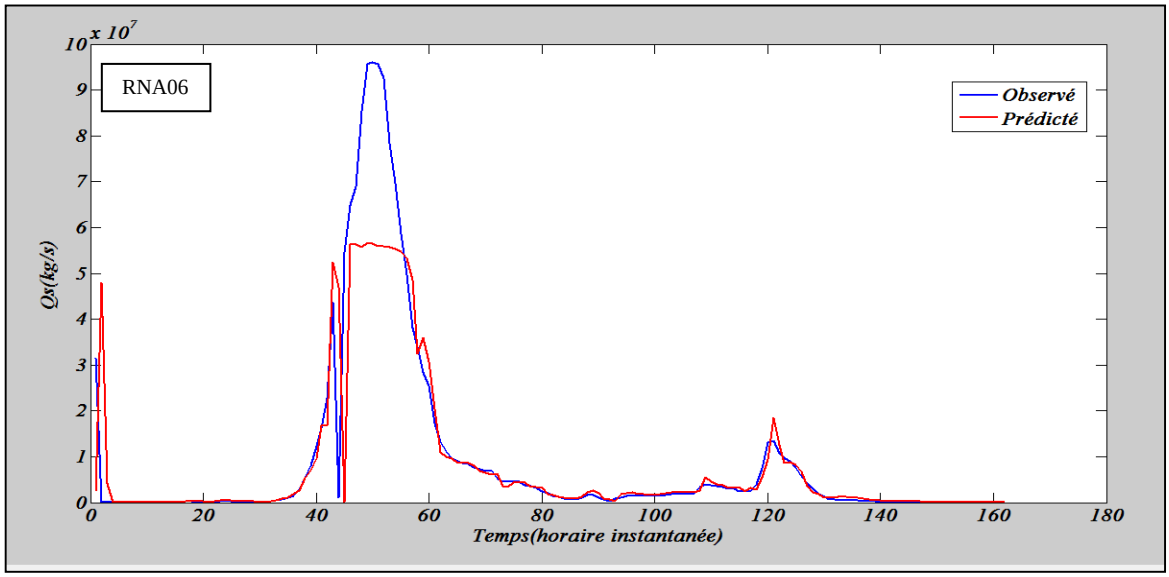


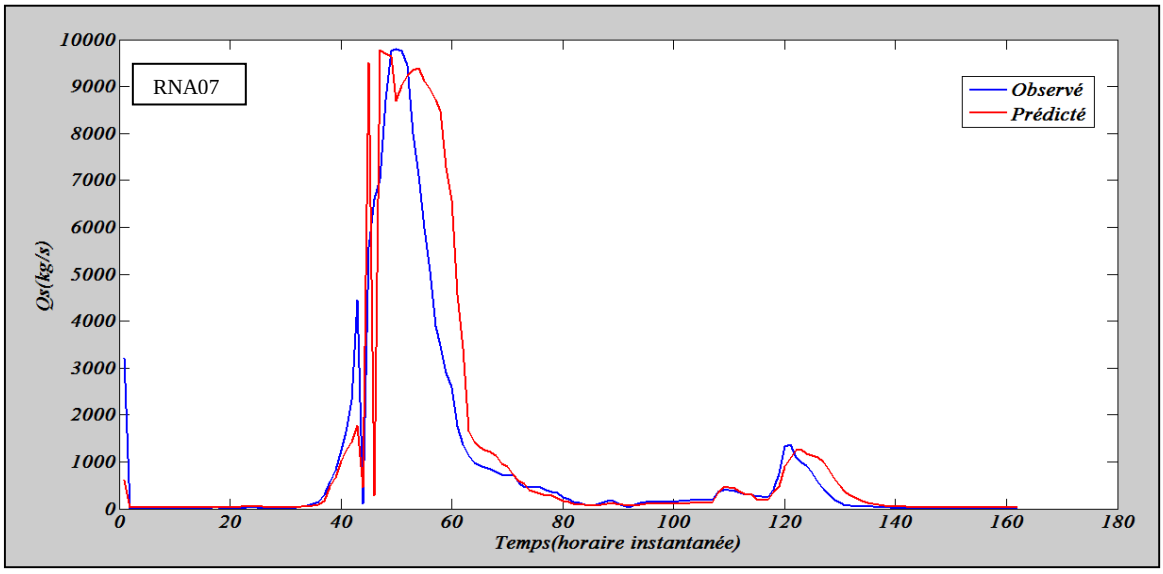

RNA02
Observé
Prédicté
x 10^7
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantée)


RNA03
Observé
Prédicté
x 10^7
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA04
Observé
Prédicté
x 10^7
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


x 10^7
RNA05
Observé
Prédicté
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


x 10^7
RNA06
Observé
Prédicté
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA07
Observé
Prédicté
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)

Ces figures représente les hydrogrammes des valeurs estimées et observées de notre modèle ; a partir de ces figure on observant que le modèle a été simulé avec une sous-estimation dans les RNAs 01,02,03,04 et 07 ; quant à les RNAs 05 et 06, les RNAs 05 et 06 enregistre les estimations dans la même durée doit être comprise de 0h jusqu'à 45h et 80h jusqu'à 140h ; et le sous-estimation dans la période de 45h à 80h dans les deux figures ; Et en ce qui concerne le RNA07, qu'il montre le sous-estimation.

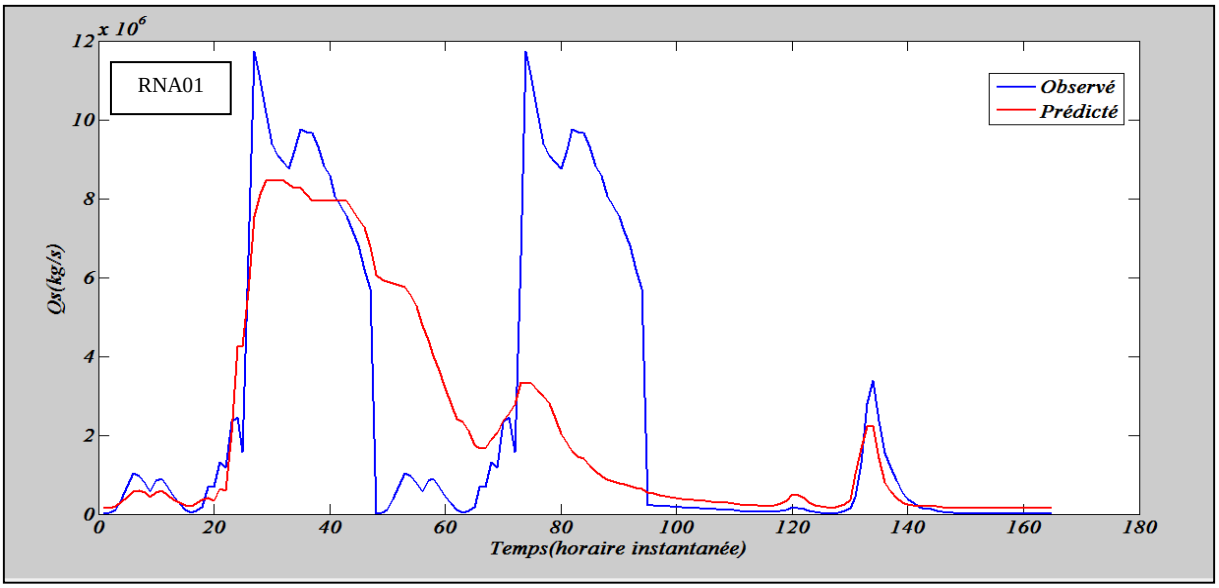
Crue 04 :

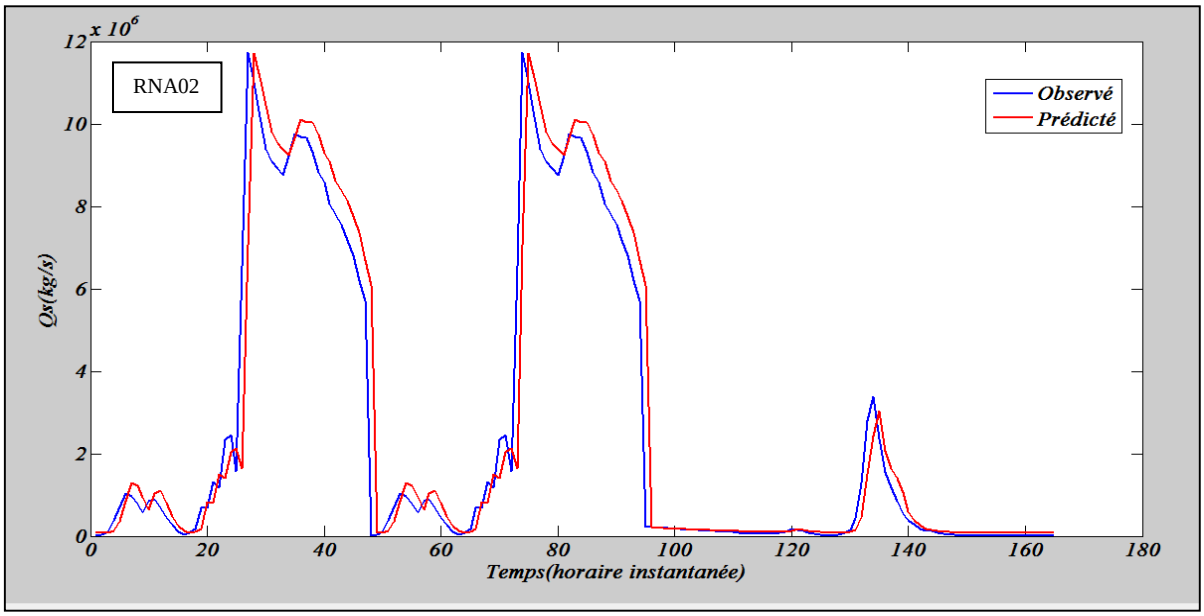
Durant la quatrième crue (15/18-11-00) ; le meilleure réseau de neurone pendant la période de validation est obtenue par la combinaison à l'entrée de Qs_{t-1} (RNA 02) avec les valeurs de performance R^2=92.15% et MSE=1.20*10^{-4}.

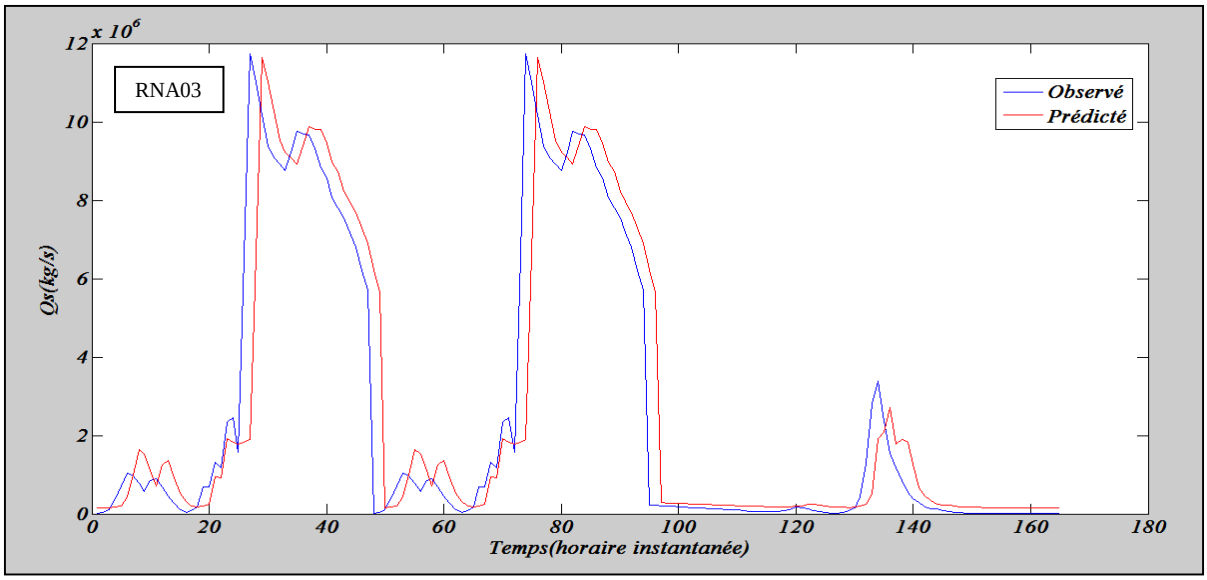
Cette résultat montre que la corrélation était forte entre la combinaison d'entrée et de sortie ; De même, les RNAs 03, 04, 05 et 06 donne de très bonne valeurs de R^2 (80.43%, 79.49%, 91.5% et 88.58%) et de MSE (2.97*10^{-4} ; 3.14*10^{-4} ; 1.3*10^{-4} et 1.75*10^{-4}) respectivement ;

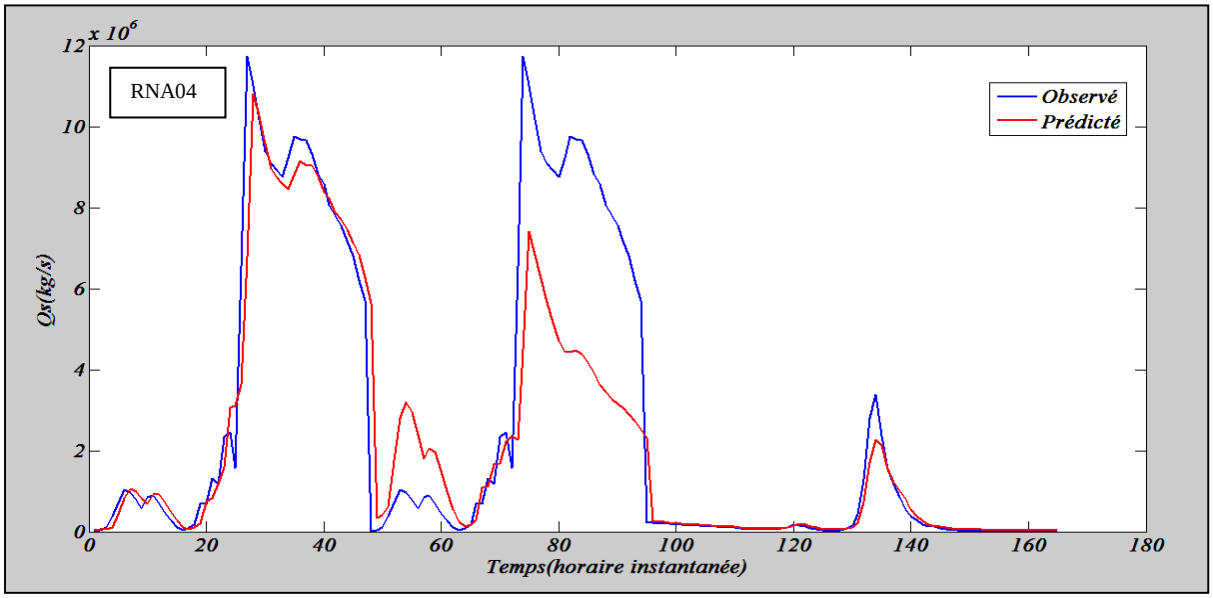
Ce qui prouve la vrai relation entre les combinaisons d'entées et de sorties ; Tendis que l'RNA 01 et 07 de faible valeurs mais sont acceptable avec R^2 (51.94% et 59.98%) et MSE (6.97*10^{-4} et 6.13*10^{-4}),ce qui signifie que le réseau n'a pas appris correctement les donnée en raison de la complexité des données introduites.

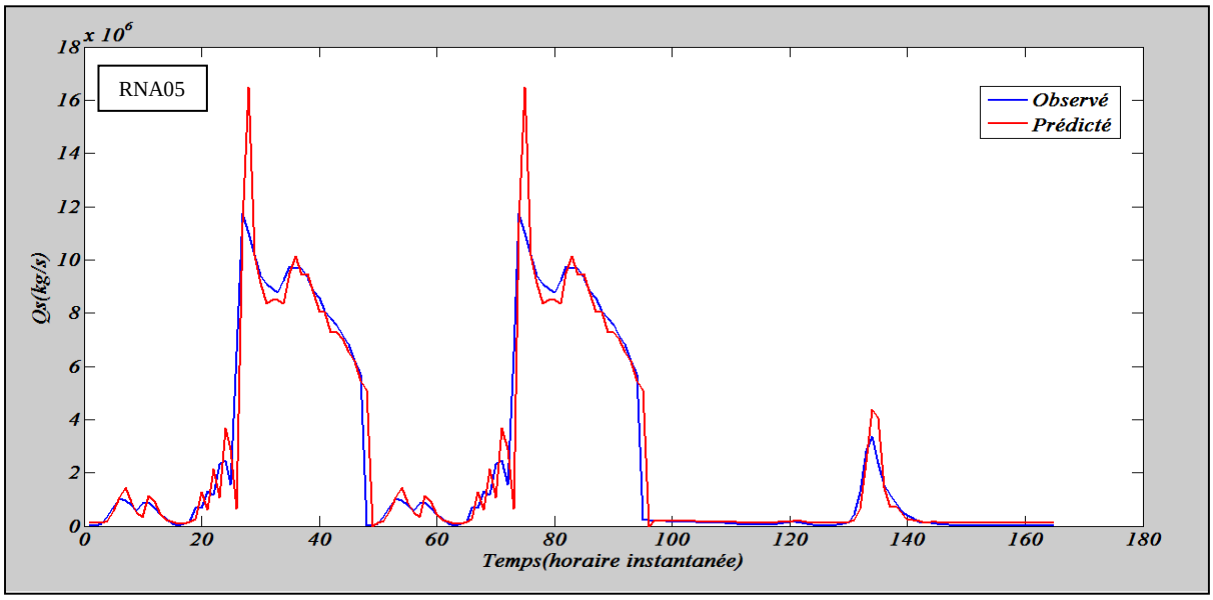
Fig 20: *Les Qs prédites et observés utilisant des RNA dans la crue 04 d'oued mekkera*

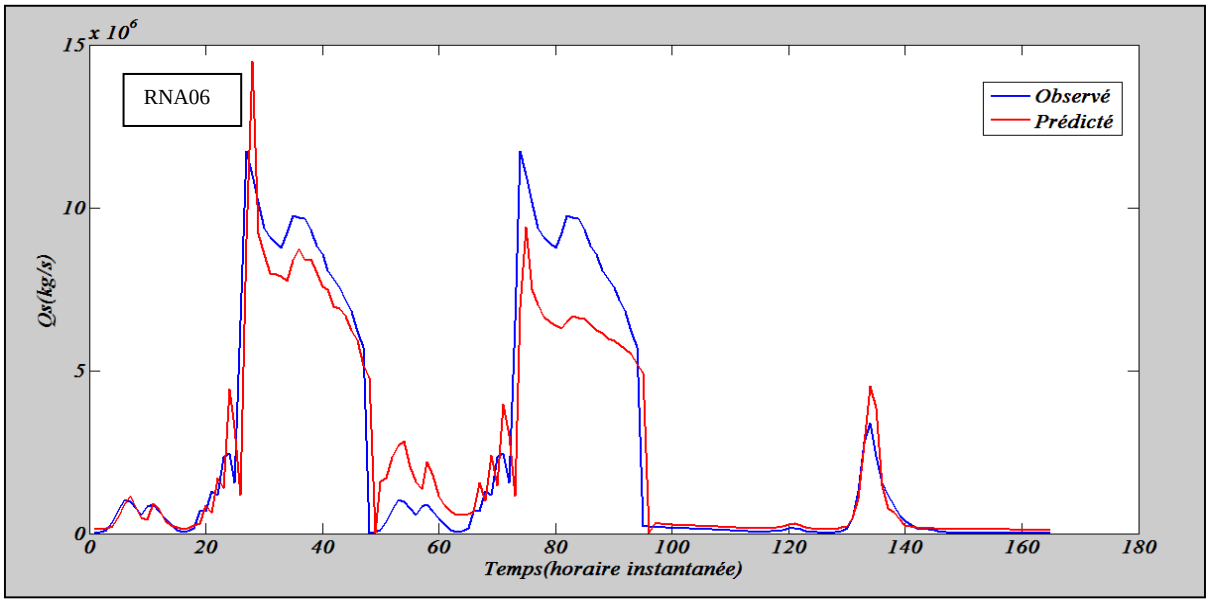


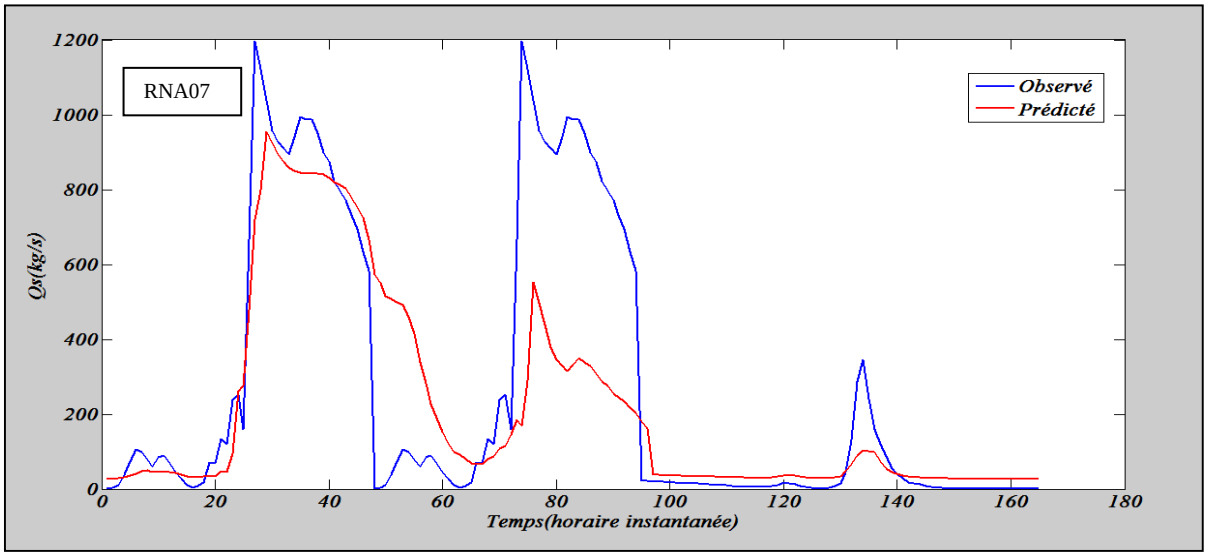

RNA02
Observé
Prédicté
x 10^6
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA03
Observé
Prédicté
x 10^6
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA04
Observé
Prédicté
x 10^6
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA05
Observé
Prédicté
x 10^6
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA06
Observé
Prédicté
x 10^6
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)


RNA07
Observé
Prédicté
Qs(kg/s)
Temps(horaire instantanée)

En observant dans les hydrogrammes se la figures (20) : la présence des pics consécutif dans les résultats sont apparents, ceci peut s'expliquer une forte crue avec quantité des Qs importante, les valeurs estimées par les modèles 01 et 07 représente le sous-estimation ; Le modèle de RNA 05 montre le sur-estimation. Les RNAs restant (02, 03,04 et 06) indiquer les deux cas sous-estimation et sur-estimation de même hydrogramme selon le temps, tondit que les RNAs 02 et 03 montré la sur-estimation sauf la période de 130h à 145 h enregistré le sous-estimation. De même ; le RNA 04 montre la sous-estimation sauf les périodes (de 0h jusqu'à 20h) et (de 50h jusqu'à 65h) montre la sur-estimation. Quant à le RNA 06, les valeurs prédites indique la sur-estimation dans les périodes (de 20h à 25h) et (de 50h à 75h) et (de 100h à 160h) ; Alors que le modèle enregistré les sous-estimations dans les périodes (de 25h à 50h) et (de 75h à 160h)

Comparaison :

Pour comparer nos résultats, nous pouvons présenter une étude différente réalisée sur le même oued. (Mokadmi.S 2012) a estimé le débit sédimentaire en utilisant le modèles de régression linéaire (la relation de puissance débit solide - débit liquide.)

L'étude est réalisée à partir des données collectées au niveau la station Sidi bel Abbès (1988-2001) constituées des débits instantanés et des concentrations des sédiments en suspension.
La corrélation entre les rejets d'eau et les rejets de sédiments était de 90,07%.
La comparaison avec d'autre méthode montre que le modèle RNA donne du meilleur résultat.

Conclusion :

La prédiction des débits solides fait partie des tâches les plus importantes en hydrologie du fait qu'elle permet d'anticiper l'évolution des flux de transports solides à l'exutoire d'un bassin, ou en amont des barrages. Ce modèle peuvent être utilisés dans la gestion des ressources en eau (ex : gestion d'un barrage) et aussi dans la protection contre les inondations (ex : comme outil de prévention des crues).

L'objectif de ce travail, la prédiction du transport solide en suspension dans le sous bassin versant de l'oued Mekerra (Nord-Ouest Algérien) dans les périodes des crues utilisant le modèle des réseaux de neurones artificiels. Dans cette application, nous avons utilisé différentes combinaisons d'intrants, y compris les écoulements horaires et les rejets de sédiments antérieurs dans les modèles RNA afin d'obtenir la combinaison d'intrants optimale.

Le modèle RNA a donné des résultats performants dans cette étude, et a montrés que cette technique est très robuste et efficace pour la prévision des rejets de sédiments en suspension utilisant. Nous avons également montré que l'utilisation de débit liquide et solide comme entrés est très efficace pendant la période de crue, et montré une très grande précision par rapport à la littérature.

L'application de ce modèle est bien fiable et pouvant l'utiliser pour bien gérer les ressource en eau dans les bassins versants et prévision l'érosion et la charge sédimentaire qui affect négativement à l'enivrement des eaux.

Références bibliographiques :

1. *Abrahart, R., Kneale, P.E. and See, L.M. eds., 2004. Neural networks for hydrological modeling. CRC Press.*
2. *Achite M., & Ouillon S. 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995). J.Hydrol, 343, 187-202.*
3. *Agarwal A, Rai RK, Upadhyay A (2009) Forecasting of runoff and sediment yield using Artificial Neural Networks. J Water Resour Prot 1:368–375*
4. *ANAT, Agence Nationale pour la Conservation de la Nature, 2000: Programme national sur la conservation de la nature,40 p.*
5. *ANRH 2011 (agence national des ressources hydraulique) étude hydrologique (bassin versant-ISSER)*
6. *Askri H., Belmecheri A., Benrabah B., Boudjema A., Boumendjel K., Daoudi M., Drid M., Ghalem T., Docca A. M., Ghandriche H., Ghomari A., Guellati N., Khennous M., Lounici R., Naili H., Takherist D., Terkmani M., 1993: Geology of Algeria. Contribution from Sonatrach Exploration Division, Research and Development Centre and Petroleum Engineering and Development Division (Schlumberger Wec Sonatrach)*
7. *Bendjoudi et Hubert et all, 2002 Discussion of "Evidence of chaos in the rainfall–runoff process" *by BellieSivakumar, Ronny Berndtsson, Jonas Olsson & Kenji Jinno, Hydrological Sciences Journal 46(1), 131–146.*
8. *Benkhaled, A. and Remini, B., 2003. Analyse de la relation de puissance: débit solide-débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'oued Wahrane (Algérie). Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, 16(3), pp.333-356.*
9. *Blanco-Canqui, H. and Lal, R., 2008. Principles of soil conservation and management. Springer Science & Business Media.*
10. *Bishop CM (1995) Neural networks for pattern recognition. Oxford University Press, 482*
11. *Borsali A. H. Bekki, A., & Hasnaoui O. 2005. Aspect hydrologique des catastrophes naturelles " Inondation, glissement de terrain " étude d'un cas : Oued Mekerra (Sidi Bel Abbes). XXIIIiemes Rencontres Universitaires de Génie Civil (Risque & Environnement), 1-8*

12. *Bouanani A. (2005): Hydrology and Sediment Transport Modelling. Study of Some Sub-basins of Tafna (North West Algeria). [Ph.D. Thesis.] University of Tlemcen, Tlemcen. (in French).*
13. *Bouasria S., Khalladi. M., Khaldi. A., 2010: Ralentissement Dynamique des Inondations au niveau d'un bassin Versant de l'Ouest Algérien: cas de l'Oued Mekerra (Sidi Bel Abbes), European J. Scientif. Res., Vol. 43, No. 2, pp. 172–182.*
14. *Bouguerra Sidahmed 2009 : Quantification et Modélisation Du Transport Solide Dans Un Cours d'Eau De L'Algérie Septentrional : Cas Du Bassin Versant De L'Oued BOUMESSAOUD (TLEMCEN).*
15. *Campolo, M., Soldati, A., and Andreussi, P. (2003). Artificial neural network approach to flood forecasting in River Arno/ Une approche base de Roseau de neurones artificiels pour la provision des crues du fleuve Arno. Hydrological Science Journal, 48(3):381–398. Accessed: 22 April 2009. Available: http://dx.doi.org/10.1623/hysj.48.3.381.45286*
16. *C.C. Lin, 2007. Partitioning Capabilities of Multilayer Perceptrons on Nested Rectangular Decision Regions Part I: Algorithm, WSEAS Transactions on Information Science & Applications, Vol.3, N0.9, 2007, pp. 1674- 1681.*
17. *Chahmi. A., Boudahri B., 2007." Contribution à l'étude du transport solide en suspension dans le sous bassin versant de l'oued Mekerra " Mémoire d'ingénieur, Université de Mohamed Boudiaf USTOran, p. 81 de contrôle, quantification et réhabilitation". Sécheresse, 11,4 :3 17-326.*
18. *Cherif, E.A., Errih, M. and Cherif, H.M., 2009. Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne. Hydrological sciences journal, 54(2), pp.338-348.*
19. *Demmak, A., 1984. Recherche d'une relation empirique entre apports solides spécifiques et paramètres physico-climatiques des bassins: application au cas algérien. Challenges in African hydrology and water resources, Harare. IAHS publication, (144), pp.403-414.*
20. *DGPC. Direction Générale de la Protection Civil, 2000: Problématique de l'inondation à Sidi Bel Abbes. Rapport.*
21. *Filliol J., 1954: Influence des crues et de la végétation sur la mobilité du lit mineur de quelques rivières françaises. Revue de géographie alpine. Tome 42, N°1. pp. 163–169.*
22. *Fischer, M.M., 1998. Computational neural networks: a new paradigm for spatial analysis. Environment and Planning A, 30(10), pp.1873-1891.*

23. *Frecault F., 1971. La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et la dynamique fluviales en milieu tempéréocéanique. Thèse, doct, Brest, Reprod. Univ. Lille III. 840 p., 122 fig., 2 cartes.*
24. *Hagan MT, Menhaj MB (1994) Training feed forward networks with the Marquardt algorithm. IEEE Trans Neural Netw 5(6):989–993*
25. *Khadir, M., 2005. Aspects of artificial neural networks as a modelling tool for industrial processes. Int. Arab J. Inf. Technol, 2(4), pp.334-339.*
26. *Khaled Korichi, Abdelkrim Hazzeb 2012 Hydrodynamic Investigation and Numerical simulation of Intermittent and Ephemeral Flows in Semi Arid Regions: Wadi MEKERRA, ALGERIA*
27. *Khanchoul, K., Altschul, R. and Assassi, F., 2009. Estimating suspended sediment yield, sedimentation controls and impacts in the Mellah Catchment of Northern Algeria. Arabian Journal of Geosciences, 2(3), pp.257-271.*
28. *Kisi O (2005) Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches. Hydrol Sci J 50(4):693–696*
29. *Kisi Ö. 2007.Development of stream flow-suspended sediment sating curve using a range dependent neural network. International journal of science & technology, 2 (1):49-61.*
30. *Kohonen, T., Oja, E., Simula, O., Visa, A. and Kangas, J., 1996. Engineering applications of the self-organizing map. Proceedings of the IEEE, 84(10), pp.1358-1384.*
31. *Lekfir, A., Ali, T.B. and Dechemi, N., 2006. Quantification du transport solide par la technique floue, application au barrage de Béni Amrane (Algérie) [Quantification of sediment transport by the fuzzy technique, application in the dam of Beni Amrane].Revue des Sciences de l'eau/Journal of Water Science, 19(3), pp.247-257.*
32. *Lefkir, A, E., 2009. Suspended sediment modeling by neuro-fuzzy model. [Ph.D. Thesis.] Ecole National Superieure Polytechnique, Algeria. (in French).*
33. *Maier HR, Jain A, Dandy GC, Sudheer KP (2010) Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resources variables in river systems: Current status and future directions. Environ Model Softw 25:891–909*
34. *Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics, 11(2), pp.431-441.*
35. *Martinez-Mena M., Alvarez Rogel J., Albaladejo J., Castillo V. M., 1999: Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment. Catena, vol. 38,pp. 175–190.*

36. *McCuen (2004) :Accuracy Evaluation of Rainfall Disaggregation Methods,Journal of Hydrologic Engineering/Volume 9 Issue 2 - March 2004*

37. *Meddi, M., Khaldi, A. and Meddi, H., 1998. Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord. Iahs Publication, pp.393-398.*

38. *Meddi, M., 1999. Etude du transport solide dans le bassin versant de l'oued Ebda (Algérie). Zeitschrift für Geomorphologie, 43, pp.167-184.*

39. *Meddi Mohamed , Abdelkader Sadeuk Ben Abbes 2013 Analyse statistique et prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'Oued Mekerra (Ouest de l'Algérie), Revue « Nature & Technologie ». C- Sciences de l'Environnement, n °10/Janvier 2014. Pages 21 à 31*

40. *Medinger, J.M., 1960. Transport solide des oueds algériens. Annuaire hydrologique de l'Algérie (années 50-59), Alger.*

41. *Merabet A., 2007. "Etude de la protection de la ville de Sidi Bel Abbés contre les inondations" Mémoire de Magister, Université de Djilali Liabes- Sidi Bel Abbès- p.217.*

42. *Mokhtari Elhadj : 2009 Contribution à l'étude du transport solide en suspension Bassin de l'Oued Cheliff - Ghrib*

43. *Mustafa & R. B. Rezaur & S. Saiedi & M. H. Isa 2012, River Suspended Sediment Prediction Using Various Multilayer Perceptron Neural Network Training Algorithms—A Case Study in Malaysia ,journal of Water Resour Manage (2012) 26:1879–1897 DOI 10.1007/s11269-012-9992-5*

44. *Peter Ffolliott et all 2013 Soil Erosion and Sediment Production on Watershed Landscapes: Processes, Prevention, and Control Published in 2013 by the International Hydrological Programme (IHP) of the Regional Office for Science for Latin America and the Caribbean of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organizations (UNESCO).*

45. *Pichaid Varoonchotikul,2003: Flood Forecasting using Artificial Neural Networks , Pubhshed by: A.A . BalkemaPubhshers, a member of Swets & ZeithngerPublishers , ISBN 90 5809 631 9.*

46. *Rachman A, Anderson S. H., Gantzer, C. J., Thompson A. L., 2003: Influence of long-term cropping system on soil physical properties related to soil erodibility. Soil Sci. Soc. Am. J., 67, 637–644.*

47. *Ramapulana Nkoana 2011 Artificiel Neural Network Moddeling of Flood Prediction And Early Warning , Introduction au Connexionnisme Cours, Exercices et Traveaux Pratiques, réseaux de neurones artificiels 6; 94 University of The Free State Bloemfontein*

48. *Rao S. Govindaraju et Bin Zhang and Rao S. Govindaraju 2000: Prediction of watershed runoff using Bayesian concepts and modular neural networks, Water Ressources Research, VOL. 36, NO. 3, PAGES 753-762.*
49. *Remini B., 1999. Les conséquences de l'envasement des barrages : quelques exemples Algériens. Revue Techniques Sciences Méthodes. 4 :55-62.*
50. *Remini, B. and Hallouche, W., 2004. Sédimentation des barrages en Algérie [The sedimentation in Algerian dams].Revue Internationale La Houille Blanche, (1), pp.1-5.*
51. *Remini, B., Aallouche, W. and Achour, B., 2009. L'Algérie: plus d'un siècle d'envasement des barrages (Chapitre 08)) [Algeria: more than a century of dams siltation (Chaptre 8)]. Ouvrage intitulé: Etat des ressources en eau au Maghreb en 2009.*
52. *Rojas R (1996) Neural networks: A systematic introduction. Springer Verlag, Berlin, pp 151–184*
53. *Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J. (1986) Learning internal representations by error propagation. In Rumelhart, D. E., McClelland, J. L., and the PDP Research Group, editors, Paralled Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition. Volume 1: Foundations, pages 318-362. The MIT Press, Cambridge, MA.*
54. *Rullan-Perchirin, F. (1989). Les mouvements de masse dans le bassin-versant du Rhumel constantinois: essai méthodologique. Travaux de l'Institut de Géographie de Rheims 69-70-71-72: 151-171.*
55. *Santhi C., Arnold J.G., Williams J.R., Hauck L.M. Dugas W.A. 2001. Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. Vol. 44. No. 6 p. 1559–1570.*
56. *Sathya, R. and Abraham, A., 2013. Comparison of supervised and unsupervised learning algorithms for pattern classification. Int J Adv Res Artificial Intell, 2(2), pp.34-38.*
57. *Serbah B. 2011. Etude et valorisation des sédiments de dragage du barrage Bakhadda Tiaret. These de Magister. Telemcen. Univ. Abou Baker Belkaid pp. 44.*
58. *Singh V.P., Woolhiser D.A. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. Journal of Hydrologic Engineering. Vol. 7. No. 4 p. 270–292.*
59. *Tachi S.E., Ouerdachi L., Remaoun M., Derdous O., Boutaghane H. 2016. Forecasting suspended sediment load using regularized neural network: Case study of the Isser River (Algeria). Journal of Water and Land Development. No. 29 p. 75–81. DOI: 10.1515/jwld-2016-0014*

60. *Tachi Salah E 2017, Contribution To The Characterization And The Modelling Of Sediment Transport In Urbab Hydro-Systems, dspace.univ-chlef.dz-se tachi - 2017*
61. *Tayfur G (2002) Artificial neural networks for sheet sediment transport/Application des réseaux de neurones artificiels pour le transport sédimentaire en nappe. Hydrol Sci J 47(6):879–892*
62. *Tingsanchali, T. (2009). Forecasting model of chao phraya river flood levels at Bangkok. Electronic publication. Accessed: 12 September 2009. Available: http://std.cpc.ku.ac.th/delta/conf/Acrobat/PapersEng/Volume2/TawatchaiPaperOK.pdf*
63. *Tixeront, J., 1960. Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie.IAHS Publ, 53, pp.26-42.*
64. *Tveter, D.R. 2003. Backpropagator's Review. URL = http://www.dontveter.com/bpr/bpr.html*
65. *Van Liew M.W., Arnold J.G, Garbrecht J.D. 2003. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. Transaction of American Society of Agricultural Engineers. Vol. 46 No. 6 p. 1539–1551.*
66. *Zhu, Y.M., Lu, X.X. and Zhou, Y., 2007. Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China. Geomorphology, 84(1), pp.111-125.*