

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



**Département Hydraulique
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement
Mémoire de master en Hydraulique**

**Modélisation du transport solide par les
Modèles ANN et ANFIS couplés au filtre
Wavelet avec réorganisation puis
clustérisation des données
-Application au bassin versant des Issers-**

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2017

Par M^{me} **Haoued Mouissa Imene Moufida**

Sous la direction du **Dr LEFKIR Abdelouahab**

Codirigé par **M. BENGHERIFA Samir**

Composition du Jury :

<i>Président</i>	M.BERMAD Abdelmalek	Professeur	ENP
<i>Promoteurs</i>	M. LEFKIR Abdelouahab	MCA	ENSTP
	M. BENGHERIFA Samir	Doctorant	ENP
<i>Examineur</i>	M.KHEMISSI Houari	MAA	U-OEB
<i>Examineur</i>	M.AMIRECHE Mohamed	MAA	U-OEB

ENP 2017

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents. Tout au long de mon cursus, ils m'ont toujours soutenu dans mes efforts. Ma mère, la plus belle étoile qui puisse exister dans mon univers, avec son amour m'a procuré un nid de sécurités et de sérénité dont j'avais besoin dans les moments de doute. Mon père, mon ami, le meilleur de tous les pères, Ils ont su me donner toutes les chances pour réussir. C'est grâce à eux que je suis ce que je suis maintenant Leur bonté, Leur éducation et leur patience m'ont guidé tout au long de ma vie.

Je ne pourrais les remercier assez...que Dieu les protège !

A mon époux , mon âme sœur ,lui qui a toujours su me faire rire dans mes moments les plus sombres , lui qui m'a soutenu , aider et remonté le moral lorsque j'en avais besoin , et qui a été de très bon conseil , je n'aurais jamais rendu ce travail sans lui, il a été pour moi la brise d'air en plein été

A ma belle-famille, ma deuxième famille qui m'ont beaucoup encouragé.

A mes amis et camarades de ma promotion ENP 2017.

A tous ceux qui m'ont soutenue de près comme de loin.

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu tout-Puissant, de m'avoir donné la force, le courage et la volonté Durant tout mon cursus des études et de m'avoir aidé à réaliser mon travail.

Mes vifs remerciements s'adressent à mon encadreur Pr. BERMAD. Pour sa disponibilité, sa rigueur, ses encouragements et ses critiques ainsi que pour ses conseils constructifs afin de mener à terme ce travail.

Mes vifs remerciements vont également au Dr. LEFKIR. Pour son soutien, sa patience, et de m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques et pratiques.

J'exprime ma profonde reconnaissance à tous les membres du Jury pour l'honneur qu'ils m'ont accordé en acceptant de lire et examiner mon travail.

Mes gratitudes vont aussi à tous mes enseignants et enseignantes, pour leurs disponibilités et leurs sacrifices, durant tous mon cursus d'études et pour tout le savoir qu'ils m'ont fidèlement transmis.

Enfin, mes sincères remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont apporté leur aide, de près ou de loin, et en particulier mon époux Chawki.

ملخص

في المناطق الجافة وشبه الجافة، المياه نادرة جدا مما يستلزم إقامة المشاريع المائية، مثل السدود ولكن هذه الأخيرة تخضع لنقل المواد الصلبة. لحل مشكلة اطماء سد بني عمران في حوض الصرف "إيسر" المهددة بظاهرة نقل المواد الصلبة، أجري بحث عن نموذج لتقدير حمولة الرواسب العالقة. باستغلال طريقة تجميع معطيات القياس و تطبيق عدة نماذج الاصطناعي، التي تتمثل في نموذج الشبكة العصبية الغامضة والشبكة العصبية الاصطناعية مسبق بفلتر الموجات. يستند اختيار النموذج على معايير الأداء و مستويات المتانة.

الكلمات المفتاحية: انجراف التربة، نقل الرواسب، ايسر، سد بني عمران، الذكاء الاصطناعي، تجميع البيانات، نموذج الشبكة العصبية الغامضة، الشبكة العصبية الاصطناعية، فلتر الموجات.

Abstract

In the arid and semi-arid zones, the lack of water is established therefore hydraulic works such as dams are the most commonly chosen solution, unfortunately the latter are subjected to the transport of materials which sediment to the 'outlet. In order to overcome the problem of silting the Beni Amrane dam at the Isser sub-watershed, a research is being carried out on a model for estimating suspended solid transport. Using Clustering of data and the application of various models based on artificial intelligence, which are, the neuro-fuzzy model and neural network preceded by a Wavelet filter. The choice of the model is based on the performance criteria as well as the robustness rate.

Keywords: erosion, Solid transport, Isser, Beni Amrane dam, clustering, neural network model, neuro-fuzzy model, Wavelet.

Résumé

Dans les zones arides et semi-arides, Le manque d'eau est plus qu'établi par conséquent les ouvrages hydrauliques telles que les barrages sont la solution la plus communément choisie, hélas ces derniers sont soumis aux transports de matières qui se sédimentent à l'exutoire. En vue de pallier le problème d'envasement du barrage de Beni Amrane au niveau du sous bassin versant Isser, une recherche d'un modèle d'estimation du transport solide en suspension est menée. L'exploitation des données de mesures nous a conduit à l'application d'une clustérisation des données ainsi que divers modèles basés sur l'intelligence artificielle, qui sont le modèle neuro flou et réseau de neurones précédés par un filtre Wavelet. Le choix du modèle se base sur les critères de performances ainsi que le taux de robustesse.

Mots clés : érosion, Transport solide, Isser, barrage Beni Amrane, clustérisation, modèle réseau de neurones, modèle neuro flou, Wavelet.

Table des matières

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE 11

Chapitre 1. L'état de l'art

I.1. Introduction	13
I.2 . Le réseau de neurones artificiels ANN.....	13
I.3. Adaptative Neural-Fuzzy Inference System (ANFIS)	13
I.4. Filtrage ondelette (wavelet)	13
I.5. Les travaux les plus récents dans ce domaine	14
I.6. Conclusion	18

Chapitre 2. Matériel et Méthodes

Matériel: Matlab.....	20
------------------------------	-----------

Méthodes	21
-----------------------	-----------

Partie 1 : Modélisation par Intelligence artificielle.

II.1. Introduction.....	21
II.2. Définition	21
II.2.1 Les réseaux neurones artificiels	21
II.2.2 Architectures neuro-floues	23
II.3. Domaines d'application de L'ANN et ANFIS.....	24

Partie 2 : Wavelet.

II.1. Introduction	25
II.2. Notion de transformation en ondelette (wavelet)	25
II.3. En pratique	25

Partie3 : WANN ou WANFIS.

II.1. Introduction	26
II.2. Descriptif de la méthode.....	26
II.3. Organigramme du WANN	27
II.4. Conclusion	27

Chapitre 3. Présentation de la zone d'étude

III.1. Introduction	29
III.2. Situation géographique du bassin versant	29
III.3. Caractéristiques du bassin hydrographique	30
III.3.1 Caractéristiques géologiques et lithologiques	30
Le socle cristallophyllien	30
Les formations sédimentaires	30
III.3.2 Le climat.....	31
III.3.3 La pente du terrain	32
III.3.4 Le couvert végétal	32
III.4. Etat d'envasement du barrage de Beni Amrane.....	33
III.4. Base de données	34
III.5. Critique des données	35
Test de Grubbs et Beck	35
III.6. Conclusion	36

Chapitre 4 :Analyses et interprétations des résultats

IV.1. Introduction	38
IV.2. Modélisation avec les données Algériennes	39
IV.2.1 WANN au découpage automatique avec 20N en couche cachée	39
Pas de temps journalier	39
Pas de temps mensuel.....	40
Pas de temps 4 saisons.....	41
Pas de temps 2 saisons	43
Conclusion des interprétations	44
IV.2.2 WANN au découpage manuel avec 20N en couche cachée et 100 itérations	45
Pas de temps journalier	45
Pas de temps mensuel	46
Pas de temps 4 saisons.....	47
Pas de temps 2 saisons	48
Conclusion des interprétations.....	50
IV.2.3 WANFIS avec 4 fonctions d'appartenance et 30 itérations..	51

Pas de temps journalier	51
Pas de temps mensuel	52
Pas de temps 4 saisons.....	53
Pas de temps 2 saisons	54
Conclusion des interprétations.....	55
IV.2.4 Comparaison des trois structure de modélisation avec le meilleur filtre Wavelet et le meilleur pas de temps.....	56
IV.3. Clustérisation des résultats précédents.....	56
IV.3. Conclusion du chapitre.....	56
Conclusion générale	58
Bibliographie	59

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Résultats du test de Grubbs et Beck pour le bassin versant de Oued Isser.....	36
Tableau 4.1 : Comparaison entre les différents types des modèles pour les données du Colorado	38
Tableau 4.2 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec Validation au pas de temps journalier	39
Tableau 4.3 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec Validation au pas de temps mensuel	40
Tableau 4.4 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec Validation au pas de temps 4 saisons	41
Tableau 4.5 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec Validation au pas de temps 2 saisons	42
Tableau 4.6 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel avec Validation au pas de temps journalier.....	45
Tableau 4.7 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel avec Validation au pas de temps mensuel.....	46
Tableau 4.8 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel avec Validation au pas de temps 4 saisons	47
Tableau 4.9 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel avec Validation au pas de temps 2 saisons.....	48
Tableau 4.10 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec Validation au pas de temps journalier.....	51
Tableau 4.11 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec Validation au pas de temps mensuel	52
Tableau 4.12 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec Validation au pas de temps 4 saisons	53
Tableau 4.13 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec Validation au pas de temps 2 saisons.....	54
Tableau 4.14 : Comparaison entre les différents types de modèle.....	56

Liste des figures

Figure 2-1 : Schéma représentatif du neurone artificiel	21
Figure 2-2 : Réseau multicouches Perceptron (MLP) utilisé dans notre projet ...	22
Figure 2-3 : Comportement du neurone artificiel en fonction de la fonction de transfert	23
Figure 2-4 : Étape de synthèse d'une identification floue sous ANFIS de Matlab	24
Figure 2-5 : Organigramme du programme WANN en matlab	27
Figure 3-1 : Plan de situation du bassin versant de l'Oued Isser	29
Figure 3-2 : Carte schématique des formations lithologiques du bassin versant de Oued Isser.....	31
Figure 3-3 : Carte schématique de végétation du bassin versant de l'Oued Isser.	32
Figure 3-4 : Situation des prélèvements dans le barrage de Béni Amrane	33
Figure 3-5 : simulation des données pour le bassin versant de Oued Isser.....	34
Figure 4-1 : Simulation au pas de temps saisonnier (4 saisons) par le modèle réseau de neurones Qs, Ql sans et avec filtrage (découpage automatique)	44
Figure 4-2 : Simulation au pas de temps saisonnier (4 saisons) par le modèle réseau de neurones Qs, Ql sans et avec filtrage (découpage manuel).....	50
Figure 4-3 : Simulation au pas de temps mensuel par le modèle réseau de neurones Qs, Ql sans et avec filtrage (WAnfis)	55

Liste des abréviations

NASH : Coefficient de NASH-SUTCLIEFFE ;

R² : Coefficient de détermination;

RSR : Ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured data;

RMSE : Root Mean Square Error ou Carré de l'erreur moyenne quadratique ;

BV : Bassin versant ;

ANN : Artificial neural network;

ANFIS : Adaptive neuro fuzzy inference system.

N : Neurone

WANN : Couplage Wavelet et ANN

WANFIS : Couplage Wavelet et ANFIS

INTRODUCTION GENERALE

En Algérie, pays à dominance aride où l'eau est au coeur des préoccupations les plus importantes, la notion de bassin versant rentre de plus en plus dans le langage courant des ingénieurs et des décideurs.

Le bassin est défini comme une entité topographique et hydrographique drainant l'ensemble de ses eaux (sous forme de précipitations essentiellement, sans oublier les apports souterrains issus d'autres bassins) et où l'écoulement (et le transport de matériaux mobilisés par l'érosion) s'effectue suivant un système de pentes et de drains naturels en direction de l'exutoire ou embouchure du cours d'eau collecteur.

Il convient d'ajouter à cette idée que c'est également, à l'échelle du bassin versant, qu'il devient de plus en plus aisé d'étudier les aménagements hydrauliques et de leurs impacts sur le cycle hydrologique, de même que les phénomènes de pollution et de leurs transferts amont-aval. En somme, les questions de la gestion de l'eau au sens large du terme.

Le transport solide constitue par son importance, un problème majeur en algérie, l'estimation du taux d'envasement nécessite une bonne connaissance des apports solides. Ces derniers dépendent des données de débit liquide et solide ; afin de pallier à ce problème plusieurs couplages modèles/filtre ondelette (Wavelet) sont proposés dont WANN et le WANFIS, ainsi qu'une clustérisation des résultats .

Pour atteindre l'objectif de cette étude, ce mémoire s'articule autour de trois grandes parties (généralités, matériel et méthodes, et analyses et interprétation des résultats). La première partie (généralités) est composée de deux chapitres traitant l'état de l'art, et de la zone d'étude. La deuxième partie (matériel et méthodes), constituée de trois parties, le réseau de neurones et le Anfis, les ondelettes (Wavelet), et enfin le couplage WANN/WAnfis. Dans la troisième et dernière partie (analyses et interprétation des résultats) sont consignés et discutés les résultats des simulations et de la prévision effectuée avec le WANN et WAnfis.

Une conclusion générale et des perspectives de recherche de même que des références bibliographiques terminent ce mémoire.

Chapitre 1 : l'état de ¹ l'art

I.1. Introduction

L'étude du débit solide occupe une place très importante et très vaste dans le domaine de l'hydrologie de surface et dans la régulation des débits (Touaibia, 1996). La matière première du débit solide est principalement l'érosion continentale. Son étude doit être intégrée à l'ensemble du bassin versant. Ces derniers sont soumis à une forte érosion hydrique provoquant l'arrachement de grande quantité de terres. Ces sédiments sont transportés par les Oueds et se déposent à l'aval dans les barrages.

Plusieurs recherches dans ce domaine ne cessent d'avancer et vu la complexité du phénomène, toutes les recherches visent deux choses, la compréhension du phénomène et la prévision du dépôt. Les études se font suivant la modélisation numérique par la simulation.

I.2. Le réseau de neurones artificiels ANN

Le réseau de neurones artificiel est un ensemble d'algorithmes permettant, après apprentissage, d'approximer des fonctions, de modéliser des systèmes; Il est caractérisé par sa fonction d'activation, son type d'apprentissage, et son architecture.

Selon le problème posé on décide de quel type d'apprentissage choisir (dans notre cas vu que l'entrée et la sortie du système sont connues l'apprentissage est dit supervisé) ; de plus l'une des caractéristiques premières des réseaux de neurones est que le lien entre la complexité du problème et le nombre de neurones adéquats à sa résolution est d'ordre exponentiel contrairement à d'autres qui est d'ordre linéaire.

I.3. Adaptive Neural-Fuzzy Inference System (ANFIS)

Outil neuro-flou permettant l'approximation et la modélisation par le biais de la création de règles imputants à l'entrée (correspondant un apprentissage donné) ; Il est caractérisé par son type de règle et le nombre de fonctions d'association.

I.4. Filtrage ondelette (wavelet)

Le filtrage en ondelette consiste à transformer un signal en ondelettes par un seuillage qui modifie les coefficients d'échelle et d'ondelette des premiers niveaux de décomposition (niveaux dans lesquels se trouvent en général l'information du bruit) ;.Sa plus grande capacité reste le fait que même après débruitage le signal obtenu après filtrage contient les mêmes informations tant sur le plan de l'amplitude que sur le plan fréquentiel et sa distribution.

I.5. Les travaux les plus récents dans ce domaine

Moosavi et al. (2013) ont appliqué des modèles hybrides basés sur Wavelet, Wavelet-ANFIS et Wavelet-ANN pour la prévision de l'eau souterraine pendant différentes périodes de prévision. Les résultats d'ANFIS, Wavelet-ANFIS, ANN et Wavelet-ANN ont indiqué que les méthodes hybrides présentent une précision supérieure à la fois au ANFIS et à l'ANN, tandis que Wavelet-ANFIS représente le meilleur de tous les modèles. Ebtehaj et Bonakdari (2014b) ont optimisé les poids MLP-ANN dans la prévision du transport des sédiments en utilisant deux algorithmes évolutifs (EA): l'algorithme compétitif impérialiste (ICA) et l'algorithme génétique (GA). Une comparaison des méthodes hybrides (ANN-ICA et ANN-GA) avec l'ANN ordinaire indiquait que EA est significativement supérieure à l'ANN.

Ebtehaj et Bonakdari (2014a) ont évalué la performance de l'ANFIS pour prédire le transport des sédiments. Les auteurs ont recommandé d'appliquer des algorithmes évolutifs pour la sélection optimale des fonctions d'adhésion ANFIS. Par conséquent, dans cette étude, ANFIS est couplé avec l'algorithme DE (Évolution différentielle) pour la première fois pour développer un modèle hybride et évaluer le transport des sédiments dans les égouts. L'objectif principal est d'accroître la précision et la fiabilité de la prévision en bénéficiant de la spécificité de chaque approche. L'algorithme DE est appliqué pour optimiser la fonction d'appartenance du réseau ANFIS en utilisant trois ensembles de données avec une large gamme de données.

I.5.1. Tian Peng, Jianzhong Zhou, Chu Zhang, and Wenlong Fu Published in 7 June 2017

Cet article montre le développement d'un nouveau modèle hybride pour la prévision du débit et démontre son efficacité. Dans le modèle hybride proposé pour la prévision du débit, la transformation empirique d'ondelettes (EWT) est d'abord utilisée pour éliminer les bruits redondants de la série du débit d'origine. Deuxièmement, les valeurs de la fonction d'autocorrélation partielle sont explorées pour identifier les entrées pour les modèles de réseau neuronal artificiel (ANN). Troisièmement, les poids et les biais de l'architecture ANN sont réglés et optimisés par l'algorithme multi-verse optimizer. Enfin, le débit de transmission simulé est obtenu en utilisant le modèle EWT-ANN bien formé. Le modèle hybride proposé a été appliqué à des observations annuelles du débit provenant de quatre stations hydrologiques dans la partie supérieure du fleuve Yangtze, en Chine.

I.5.2. Alireza Docheshmeh Gorgij, Ozgur Kisi, Asghar Asghari Moghaddam Published in April 2017

La prévision d'un débit d'eau souterraine en utilisant l'intelligence artificielle était la portée de cette étude. Pour cet objectif, l'aquifère de la Plaine d'Azarshahr, l'Azerbaïdjan de l'Est, l'Iran, a été sélectionné en raison de sa grande dépendance à l'égard des eaux souterraines et de la nécessité de connaître son budget dans les programmes futurs. Les fluctuations à long terme de la nappe phréatique en 13 piézomètres ont été simulées par un modèle hybride de réseau neuronal artificiel couplé aux ondelettes (WANN), et leurs lacunes statistiques ont été couvertes. Ensuite, la nappe phréatique modélisée a été prédite pour les 12 prochains mois en utilisant une programmation génétique. Les résultats de la simulation et de la prédiction ont été évalués par des critères d'évaluation de performance tels que R^2 , RMSE, MAE et NSE.

I.5.3. Amit Prakash Patil, Paresh Chandra Deka, February 2017

Cet article évalue la capacité de la transformation des ondelettes dans l'amélioration de la précision des modèles de réseau neuronal artificiel (ANN) et des systèmes adaptatifs d'interfaces neuro-floues (ANFIS). Dans cette étude, la performance des modèles hybrides Wavelet-ANN et Wavelet-ANFIS pour l'estimation de l'évapotranspiration quotidienne dans les régions arides a été évaluée. La performance des modèles hybrides proposés a été comparée à l'équation ANN, ANFIS et conventionnellement utilisée Hargreaves. Les résultats ont révélé que l'utilisation de la transformée en ondelettes comme technique de prétraitement des données a amélioré l'efficacité des modèles ANN et ANFIS. Wavelet-ANN et Wavelet-ANFIS ont été raisonnablement meilleurs que les autres modèles. Une meilleure manipulation des variables d'entrée décomposées en ondelettes a permis aux modèles Wavelet-ANN d'avoir des résultats légèrement meilleurs que les modèles Wavelet-ANFIS. W-ANN2 (RMSE = 0,632 / jour et $R^2 = 0,96$) et a été par conséquent considéré comme le meilleur modèle pour estimer l'évapotranspiration quotidienne dans les régions arides. Le modèle W-ANN2 proposé a utilisé les sous-séries de température et les valeurs d'évapotranspiration décomposées par ondelette db3 de second niveau comme entrée. L'étude conclut que les modèles hybrides Wavelet-ANN et Wavelet-ANFIS peuvent être utilisés efficacement pour modéliser l'évapotranspiration.

I.5.4. Mohamed Chettih, Khaled Chorfi & Kaddour Mouattah, 2015

Dans cet article les chercheurs proposent l'application d'outils d'analyse issus de la dynamique non-linéaire des systèmes complexes à la relation pluie-débit, et des modèles hybrides intelligents basés sur la reconstruction de l'espace des phases, et la transformée en ondelettes pour la prédiction des débits. Dans ces modèles, les séries générées à l'aide de la technique de reconstruction de l'espace de phase de Takens et à l'aide de la décomposition du signal dyadique en une succession d'approximations et de détails, constitueront la base de données au réseau de neurones et permettront ainsi de prendre en compte la dynamique du signal hydrologique et d'apprendre son évolution.

I.5.5. N. Fritier, N. Massei, D.M. Hannah4, D.A. Lavers, B.Laignel, 2012

Dans certains travaux antérieurs, il a été démontré l'existence de liens statistiquement significatifs entre les fluctuations interannuelles jusqu'au plus long terme des précipitations et les débits en Seine, le bassin hydrographique et l'oscillation de l'Atlantique Nord (NAO). À savoir, les échelles interannuelles de la variabilité commune aux séries chronologiques d'indice hydrologique et NAO a été détectée en utilisant la transformée continue en ondelettes (CWT), qui a permis d'expliquer jusqu'à un tiers du total de la Seine.

La prochaine étape consiste à étudier la répartition spatio-temporelle de ces liens en utilisant les champs climatiques du NCEP 1950-2007 mensuel 850 hPa réanalysés (SLP, géopotential, zonal / méridional Vent), des précipitations régionalisées dans le bassin versant de la Seine et de la rivière Seine près de sa sortie en l'estuaire de la Seine.

Dans un premier temps, les chercheurs étudieront la variabilité spatio-temporelle du climat en analysant le contenu spectral des séries temporelles EOF avec CWT, en comparant avec ceux des signaux hydrologiques.

Puis, une fois que les échelles typiques de la variabilité sont détectées, elles sont filtrées, analysées et tracées afin de visualiser les motifs spatiaux correspondants.

Ces résultats sont préliminaires, mais l'étude de la cohérence et de la phase des ondelettes entre les signaux/champs hydrologiques et climatiques sont actuellement entrepris afin de préciser les liens entre les oscillations du climat spatial et les variations hydrologiques régionales-locales.

I.5.6. Turgay Partal, 2008

Une structure de réseau de neurones à ondelettes, qui combine une transformée par ondelettes et des réseaux de neurones artificiels, a été utilisée dans cette étude pour prédire des débits de rivières en Turquie. Des transformées discrètes par ondelettes, utiles pour obtenir les composantes périodiques des données mesurées, présentent des effets très positifs sur le rendement de la modélisation par réseau de neurones artificiels. De manière générale, la méthode par réseaux neuronaux à rétropropagation non récurrents a été étudiée par rapport aux applications de réseau de neurones artificiels sur des données de ressources en eau. Dans la présente étude, le rendement des réseaux de neurones artificiels et les réseaux à fonctions de base radiales ont été comparés aux méthodes par réseaux neuronaux à rétropropagation non récurrents. Six différents modèles ont été étudiés afin de prédire les débits mensuels des rivières. Le modèle par ondelettes couplé aux réseaux neuronaux à rétropropagation non récurrents s'est avéré supérieur aux autres modèles en termes des critères d'évaluation choisis.

I.5.7. François Anctil and , Doha Guy Tape, 2004

Cette étude consiste en une comparaison de la performance de réseaux de neurones artificiels multicouches et d'un système hybride neuro-ondelette pour la prévision des débits à deux sites. Des spectres de puissance Morlet sont exploités pour étudier l'échelle des périodes de séries temporelles de pluie et de débit. Les séries temporelles sont décomposées en ondelettes en trois sous-séries décrivant les processus pluie-débit de courtes, moyennes et longues périodes. Des réseaux multicouches sont ensuite entraînés pour chacune de ces sous-séries. Les résultats révèlent que les courtes périodes sont responsables de la majeure partie des erreurs associées au système hybride neuro-ondelette. Les fluctuations courtes sont donc la clef de tout progrès supplémentaire dans la modélisation des processus pluie-débit par réseaux de neurones artificiels. La performance finale du système hybride neuro-ondelette et des réseaux multicouches classiques sont très semblables. Le léger avantage en performance du système hybride neuro-ondelette peut être expliqué par une meilleure utilisation de la série temporelle de l'évapotranspiration.

I.6. Conclusion

Suite à ces publications dans les domaines qui se rapprochent au plus de notre sujet, notre contribution est résumée en ce qui suit :

- Couplage WANN et WANFIS dans le domaine du transport solide.
- Utilisation des 275 fonctions mères (mother wavelet) pour la décomposition du signal et le débruitage.
- Utilisation de deux sortes de gestion d'apprentissage pour l'ANN : automatique et manuelle.
- Variation des paramètres des modèles : nombre de neurones en couche cachée, nombre d'itération et nombre de fonctions d'appartenance.

Et tous ceci pour différentes échelles temporelles.

Chapitre 2 :

Matériel et Méthodes

Matériel

Le logiciel utilisé pour notre étude est le MATLAB, (« matrix laboratory ») R2016b qui est un langage de programmation de quatrième génération émulé par un environnement de développement du même nom.

MATLAB est présent dans des systèmes automobiles de sécurité active, des véhicules spatiaux, des appareils de surveillance médicale, des réseaux électriques intelligents et des réseaux mobiles LTE. Il est utilisé dans les domaines de l'apprentissage automatique, le traitement du signal, la vision par ordinateur, les communications, la finance computationnelle, la conception de contrôleurs, la robotique et bien plus.

II.1. Mathématiques, graphiques, programmation

La plate-forme MATLAB est optimisée pour résoudre les problèmes scientifiques et techniques. Le langage MATLAB, basé sur les matrices, est le moyen le plus naturel au monde pour exprimer les mathématiques computationnelles. Les graphiques intégrés permettent de visualiser facilement les données afin d'en dégager des informations. Grâce à la vaste bibliothèque de boîtes à outils prédéfinies, on peut commencer directement par les algorithmes essentiels à notre domaine. L'environnement bureau encourage l'expérimentation, l'exploration et la découverte. Les outils et les fonctionnalités MATLAB sont tous testés rigoureusement. Ils sont conçus pour fonctionner conjointement.

II.2. Adoption, intégration, déploiement

MATLAB accompagne les idées au-delà du bureau. On peut analyser des ensembles de données plus vastes et étendre notre utilisation à des clusters et des clouds. Le code MATLAB peut être intégré à d'autres langages, ce qui nous permet de déployer des algorithmes et des applications au sein de systèmes Web, d'entreprise et de production.

Méthodes

Partie 1 : Modélisation par Intelligence artificielle et neuro-flou

II.1. Introduction

Les réseaux de neurones, fabriqués de structures cellulaires artificielles, constituent une approche permettant d'aborder sous des angles nouveaux les problèmes de perception, de mémoire, d'apprentissage et de raisonnement. Ils s'avèrent aussi des alternatives très prometteuses pour contourner certaines des limitations des ordinateurs classiques. Grâce à leur traitement parallèle de l'information et à leurs mécanismes inspirés des cellules nerveuses (neurones), ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner des problèmes jadis qualifiés de complexes.

II.2. Définition

II.2.1 Les réseaux neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels consistent en une interconnexion du nombre de neurones.

Il existe de nombreuses variétés de connexions en cours d'étude; cependant, nous discutons ici d'un seul type de réseau appelé Perceptron multicouches (MLP) (Le Cun, 1987 ; Bishop, 1995 ; Haykin, 1994). Dans ce réseau, les données évoluent vers la sortie en continu sans aucun retour. Nous avons utilisé un modèle typique à trois niveaux. Les neurones d'entrée sont une série chronologique à plusieurs échelles temporels de données sur les débits liquides, tandis que la sortie du réseau est la prédiction du débit solide. Avec une couche cachée avec n neurones cachés utilisés pour traiter les informations reçues par les neurones d'entrée.

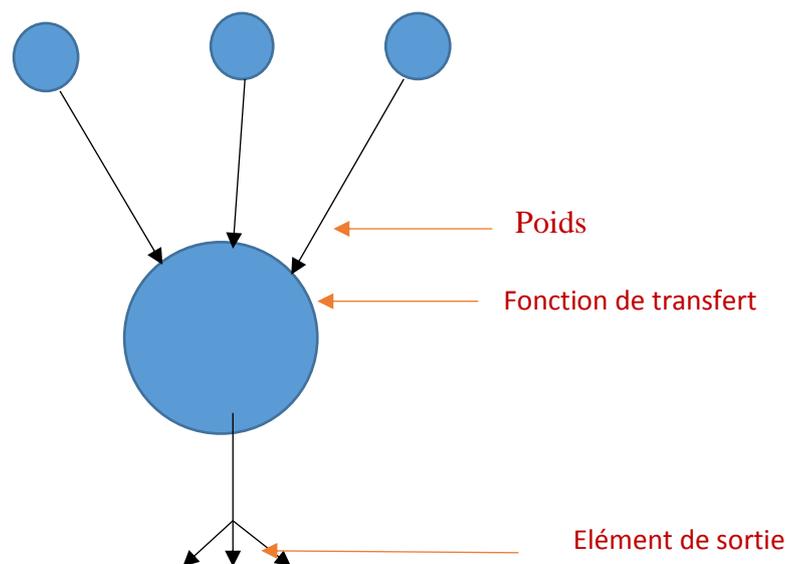


Figure 2-1 : Schéma représentatif du neurone artificiel

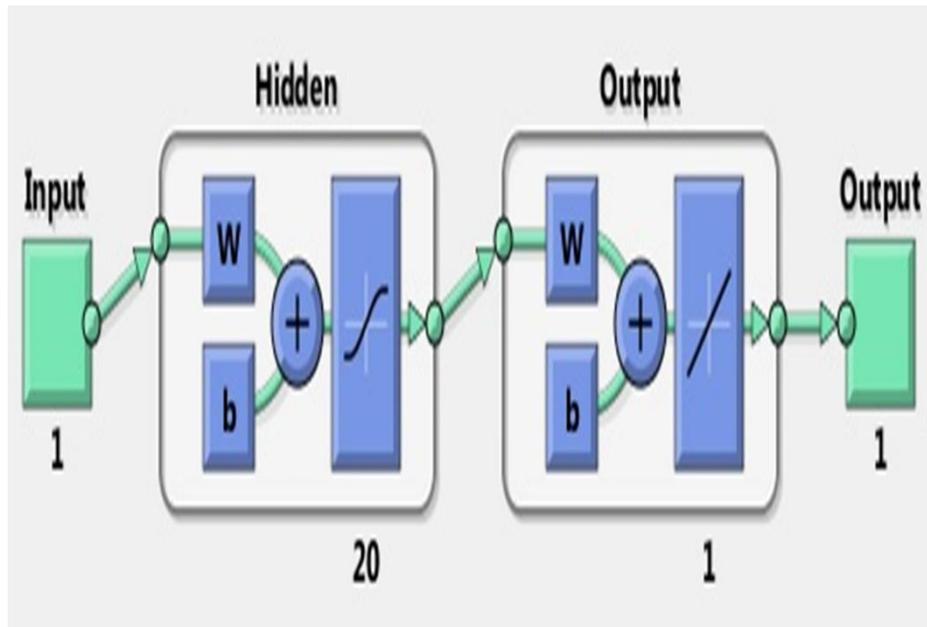


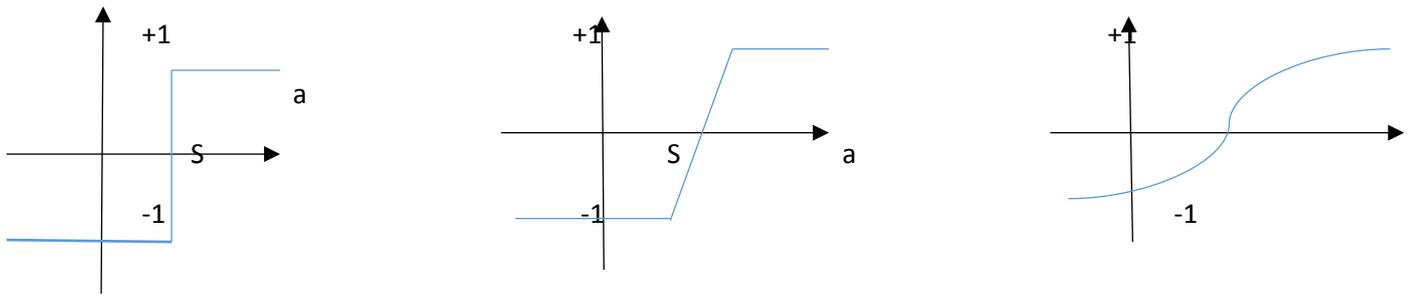
Figure 2-2 : Réseau Perceptron multicouches (MLP) utilisé dans notre étude

L'ANN possède donc une entrée et une sortie. La relation entre la sortie et l'entrée est représentée par une fonction de transfert qui peut avoir plusieurs formes :

- C'est en général des fonctions continues dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1 ou +1 et -1.
- La fonction d'activation sert à introduire une non-linéarité dans le fonctionnement du neurone.
- Le comportement d'un neurone artificiel est composé de deux phases :
 - ❖ Calcul de la somme pondérée des entrées (a) selon l'expression suivante

$$a = \sum(\omega_i, e_i) \quad (2.1)$$

- ❖ Calcul de la fonction de transfert $f(a)$ qui donne la valeur de l'état du neurone, c'est cette valeur qui sera transmise aux neurones en aval.



Fonction à seuil

Linéaire par morceaux

Sigmoïde

Avec

- S : la valeur du seuil
- $X=f(a)$

Figure 2-3 : Comportement du neurone artificiel en fonction de la fonction de transfert

II.2.2 Architectures neuro-floues

Divers associations des méthodes et architectures neuro-floues ont été développées depuis 1988.

(Racoceanu, 2006) a recensé plusieurs architectures de systèmes neuro-flous. La figure ci-dessous montre les différentes architectures des systèmes neuro-flous. FALCON, GARIC interprètent la règle floue avec une structure à 5 couches, NEFCLASS interprète la règle floue avec une structure à 3 couches et ANFIS interprète la règle floue avec une structure à 6 couches.

Dans notre étude nous utiliserons l'ANFIS.

❖ ANFIS (Adaptive Network based Fuzzy Inference System)

Le système ANFIS est une classe de réseau adaptatif. Il peut être vu comme un réseau de neurones non bouclé pour lequel chaque couche est un composant d'un système neuro-flou et, à ce titre, c'est un "approximateur" universel. Il est utilisé dans différentes applications de prédictions.

Il réalise une approximation linéaire de la variable de sortie en décomposant l'espace des entrées en différents espaces flous.

Il utilise la procédure d'apprentissage hybride. Cette architecture affine les règles floues obtenues par des experts humains pour décrire le comportement d'entrée-sortie d'un système complexe. Ce modèle donne de très bons résultats en poursuite de trajectoire, approximation non linéaire, commande dynamique et traitement de signal. Sous Matlab l'identification de systèmes à l'aide d'ANFIS s'effectue en suivant l'organigramme présenté ci-dessous

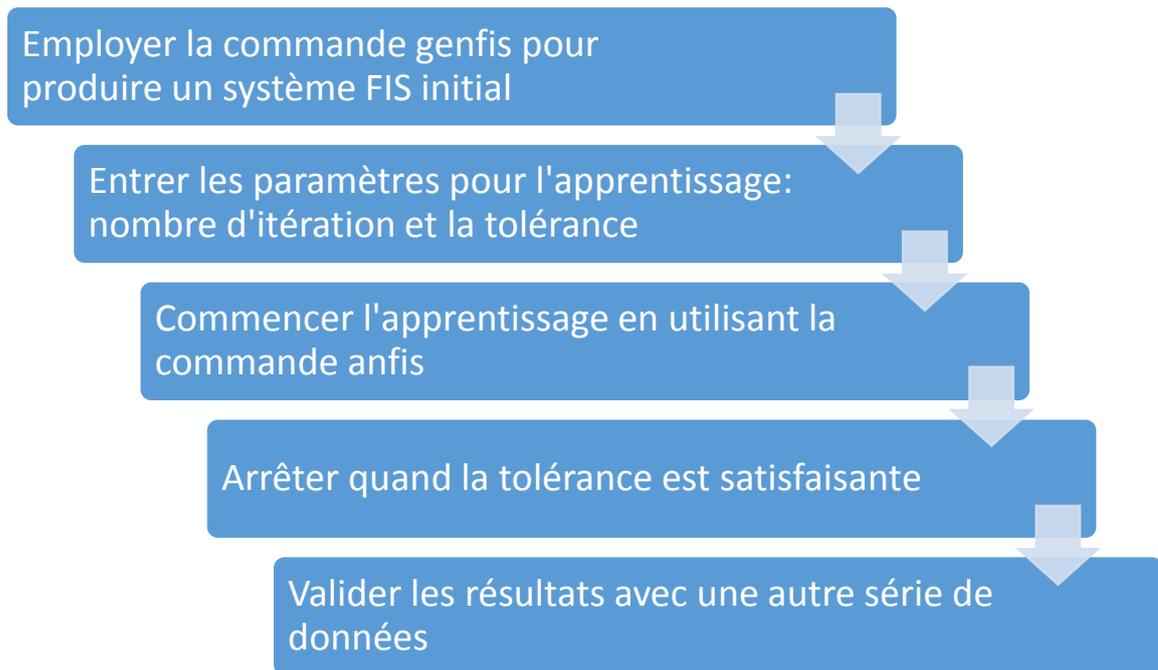
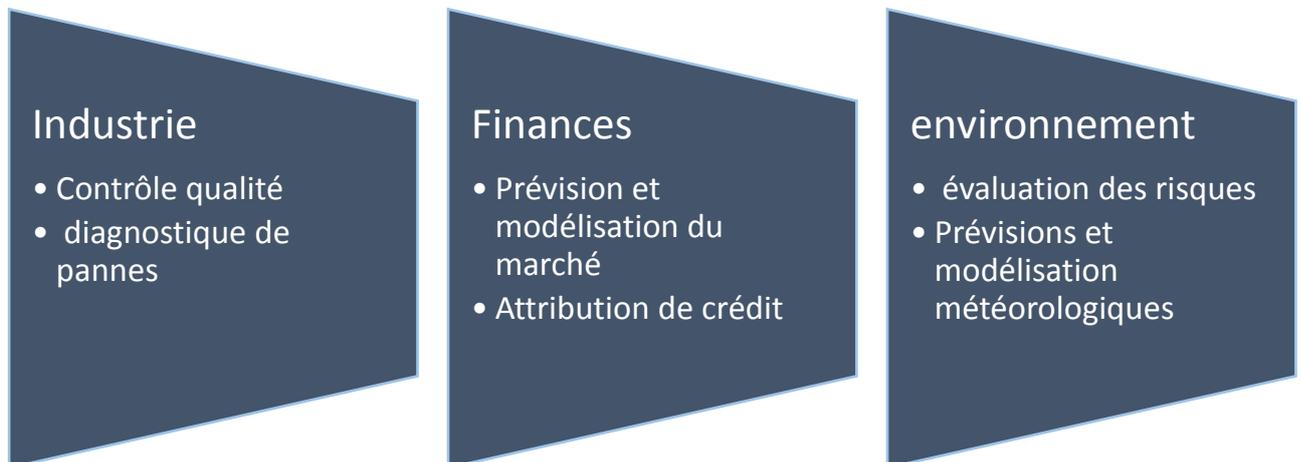


Figure 2-4 : Étape de synthèse d'une identification floue sous ANFIS de Matlab

II.3. Domaines d'application de L'ANN et ANFIS



Partie 2 : Wavelet

II.1. Introduction

De nombreux textes de Présentation de la théorie des ondelettes sont disponibles, on peut citer entre autres les trois premiers exposés dans Lemarié 90, Mallat 89, Daubechies 88, Strang 89, Gasquet- Witomski 90 et Bien-sûr le livre d'Y. Meyer. Ce Qui suit on présente rapidement des aspects partiels en se centrant sur le cadre géométrique des analyses multi résolution, les bases orthonormées d'ondelettes et l'algorithme de décomposition-reconstruction de Mallat.

II.2. Notion de transformation en ondelette (wavelet)

La transformation Wavelet s'applique à l'extraction de données non triviales et des informations potentiellement utiles, ou des connaissances, à partir des données importantes et disponibles en sciences expérimentales (documents historiques, réanalyse, simulations de modèles climatiques globaux, etc.). Fournir des informations explicites dans une forme lisible, il peut être utilisé pour résoudre des diagnostics, problèmes de classification ou de prévision.

Dans une revue des applications de la transformation des ondelettes dans la modélisation des séries chronologiques en hydrologie, Sang (2013a) a souligné l'information multiforme qui peut être tiré de cette analyse: caractérisation et compréhension des échelles multitemporelles de la série hydrologique, identification des saisonnalités et les tendances, et la désynchronisation des données.

II.3. En pratique

Le filtrage en ondelette (Wavelet) consiste à transformer un signal en ondelettes par un seuillage qui modifie les coefficients d'échelle, en le compressant, puis en le décomposant par la transformée en ondelette (Wavelet) en fonctions de dilatation et fonctions de translation, et enfin en les débruitant en utilisant les 275 fonctions mères ainsi que la fonction de débruitage qui permet le filtrage.

Partie 3 : WANN ou WANFIS

II.1. Introduction

L'approche WANN ou WANFIS est une méthodologie utile, fondée sur à la fois la transformée en ondelettes et diverses techniques de modélisation ANN ou ANFIS. La combinaison permet une élucidation détaillée des signaux, rendant la méthode hybride efficace tant dans la prédiction des phénomènes hydrologiques que dans l'optimisation

II.2. Descriptif de la méthode

Le couplage passe par plusieurs étapes illustrées comme suit :

1. Décomposition par la transformé en ondelettes

Qui se fait par la fonction

$$[C,L] = \text{wavedec}(X,L,'wname')$$

Avec C : vecteur de décomposition en ondelettes ;

L : vecteur de comptabilité, qui contient le nombre de coefficients par niveau.

2. Le débruitage du signal

$$[XD,CX,LX] = \text{wden}(C,L,TPTR,SORH,SCAL,N,WNAME);$$

Avec

- XD : version débruitée des données obtenues par seuillage des coefficients de la décomposition en ondelettes ;
- CX : vecteur de décomposition en ondelettes ;
- LX : vecteur de comptabilité ;
- TPTR : type de seuillage employé, soit le heursure dans notre cas;
- SORH : seuillage Soft ou Hard on a choisi Hard pour plus de précision ;
- SCAL : défini un rééchantillonnage du seuillage multiplicatif ;
- N : Niveau de décomposition en utilisant la formule établie par Aussem et al.1998 ; Nourani et al.2008

$$N = \text{int} [\log(n)] + 1 \quad (2.2)$$

Avec n le nombre de données, on trouve N=5

- WNAME : nom de la fonction mère employé pour la décomposition , puisque nous avons des données continues , nous avons 7 fonctions mères (mother wavelet) ;

haar, db, sym, coif1, bior, rbio1, dmey avec pour chacune une famille d'ondelette :

après filtrage, débruitage du signal par transformée en ondelettes (Wavelet) et recombinaison l'étape suivante sera le couplage avec l'ANN et l'ANFIS.

3. Le couplage WANN (pareil que pour WANFIS)

Le signal filtré sera couplé avec un réseau de neurones de type multi couche pour permettre la modélisation ; Pour ce faire, on programmera une fonction "WANN" qui a pour entrées, un signal X, un seuil d'apprentissage Sappr et un signal d'entrées inputs. Cette fonction permettra d'avoir en sortie, le coefficient de détermination NASH, R^2 RMSE, RSR, la simulation et la mesure nécessaire pour la comparaison.

II.3. Organigramme du WANN

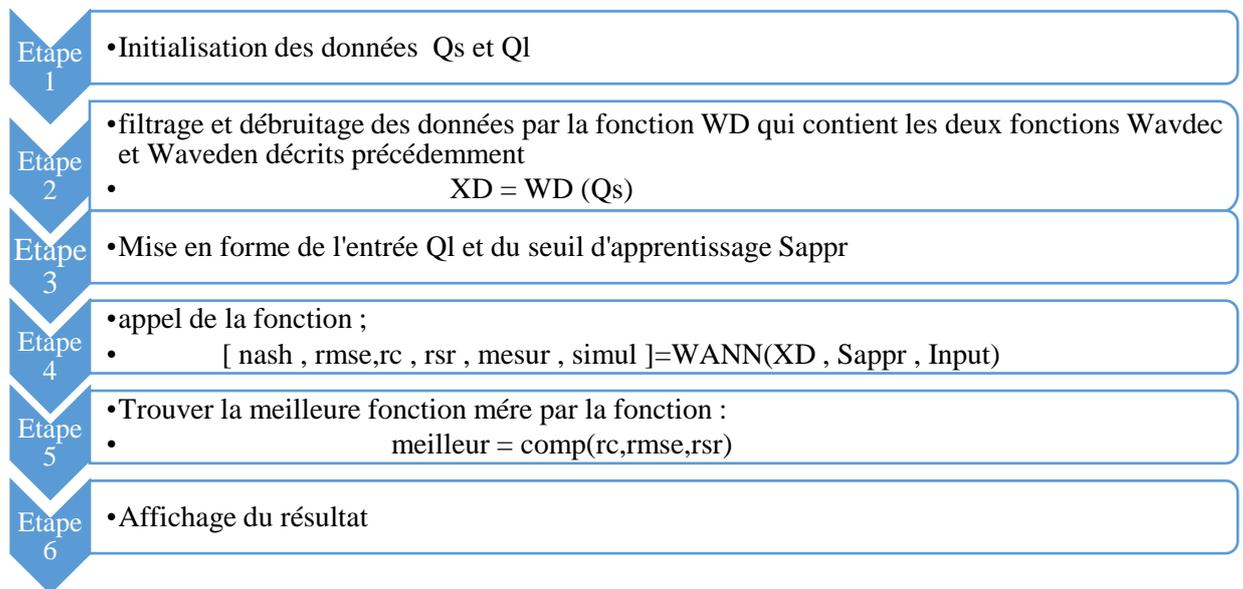


Figure 2-5 : Organigramme du programme WANN en matlab

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre une description plus ou moins détaillée des outils de travail a été présentée. Entre autres, nous avons discuté de l'utilité du filtre WAVELET lors de la modélisation et de la simulation et de son couplage avec l'ANN et l'ANFIS. Le chapitre suivant consistera en la présentation de la zone d'étude.

Chapitre 3 :
PRESENTATION DE LA
ZONE D'ETUDE

III.1. Introduction

En hydrologie l'Algérie est divisée en 09 bassins versants tributaires de la Méditerranée et 08 bassins endoréiques et sahariens.

Le Nord est divisé en 04 bassins hydrographiques : 1 : Oranie- 2 : Cheliff –Zahrez - 3 : Algérois- 4 : Constantinois. Chaque bassin versant est subdivisé en sous bassins versants. Les grands cours d'eau sont connus par leur écoulement permanent contrairement aux affluents qui sont connus pour leur écoulement faible et temporaire.

Le bassin versant que nous allons présenter ci-dessous est le bassin versant des Isser.

III.2. Situation géographique du bassin versant

Le bassin versant de l'Oued Isser est situé à environ 70Km au Sud Est d'Alger. Il occupe une superficie de 4100 km² et est localisé entre les 35°90' et 36°85' Nord et les méridiens 2°88' et 3°95' Est. Ce bassin versant est considéré comme l'unité fonctionnelle idéale pour évaluer l'érosion.

Il se situe à l'amont du barrage de Béni Amrane et présente une forme allongée sur l'axe sud-ouest (Ain Boucif/Beni Slimane) à nord-est (mer Méditerranée).

Il est limité au Nord par la mer et le bassin du Sebbaou, au sud par le bassin de Chott Hodna, à l'Est par le grand bassin du Cheliff. Une partie du bassin est drainée par l'Oued Mellah et l'Oued Hammam, les deux oueds constituent l'Oued Isser.

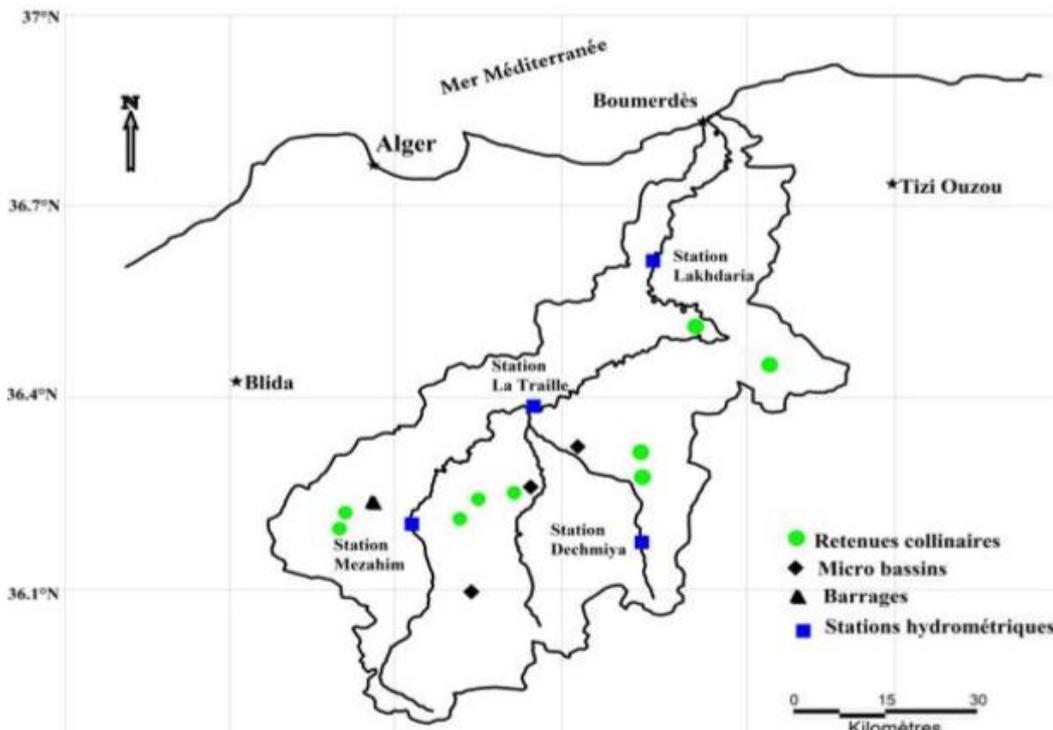


Figure 3-1 : Plan de situation du bassin versant des Issers

III.3. Caractéristiques du bassin hydrographique

Le bassin est caractérisé par l'irrégularité du régime pluviométrique. Il est drainé par deux principaux cours d'eau : Oued Isser et Oued Mellah. Il dispose d'un réseau hydrographique assez dense et couvrant une très grande partie du bassin.

Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes due à quatre facteurs principaux.

III.3.1 Caractéristiques géologiques et lithologiques

Du nord vers le sud, le relief prend de l'ampleur où l'on note une côte maximale de 1810m. Le bassin versant de l'Isser est formé en majeure partie de roches tendres : marnes et argiles (figure 4). Ces formations tendres, situées en pente, sont facilement érodables. Au regard des valeurs importantes des coefficients de territorialité ainsi que les fortes densités de drainage obtenues au niveau des stations (Pont de Latraille, Lakhdaria et à l'embouchure), le bassin versant est vulnérable aux fortes crues et à l'érosion.

La géologie du bassin est constituée à partir de plusieurs formations:

- **Le socle cristallophyllien**

Il est constitué de deux assises :

L'une inférieure formée de schistes cristallophylliens (micaschistes à biotites à teinte verte et schistes à deux micas de teinte plus claire, avec lentilles de gneiss à biotite et de marbre) ;

L'autre supérieure formée de phyllades (schistes satinés de teinte avec de nombreuses lentilles de marbre encaissées dans ces phyllades). Elle constitue le cœur du synclinal, dans la région du Djebel Amour. Ces assises sont attribuées au Précambrien.

- **Les formations sédimentaires**

Elles vont du Crétacé au Quaternaire passant par Oligocène. Les lithofaciès sont, selon leur âge, inégalement répartis dans l'espace.

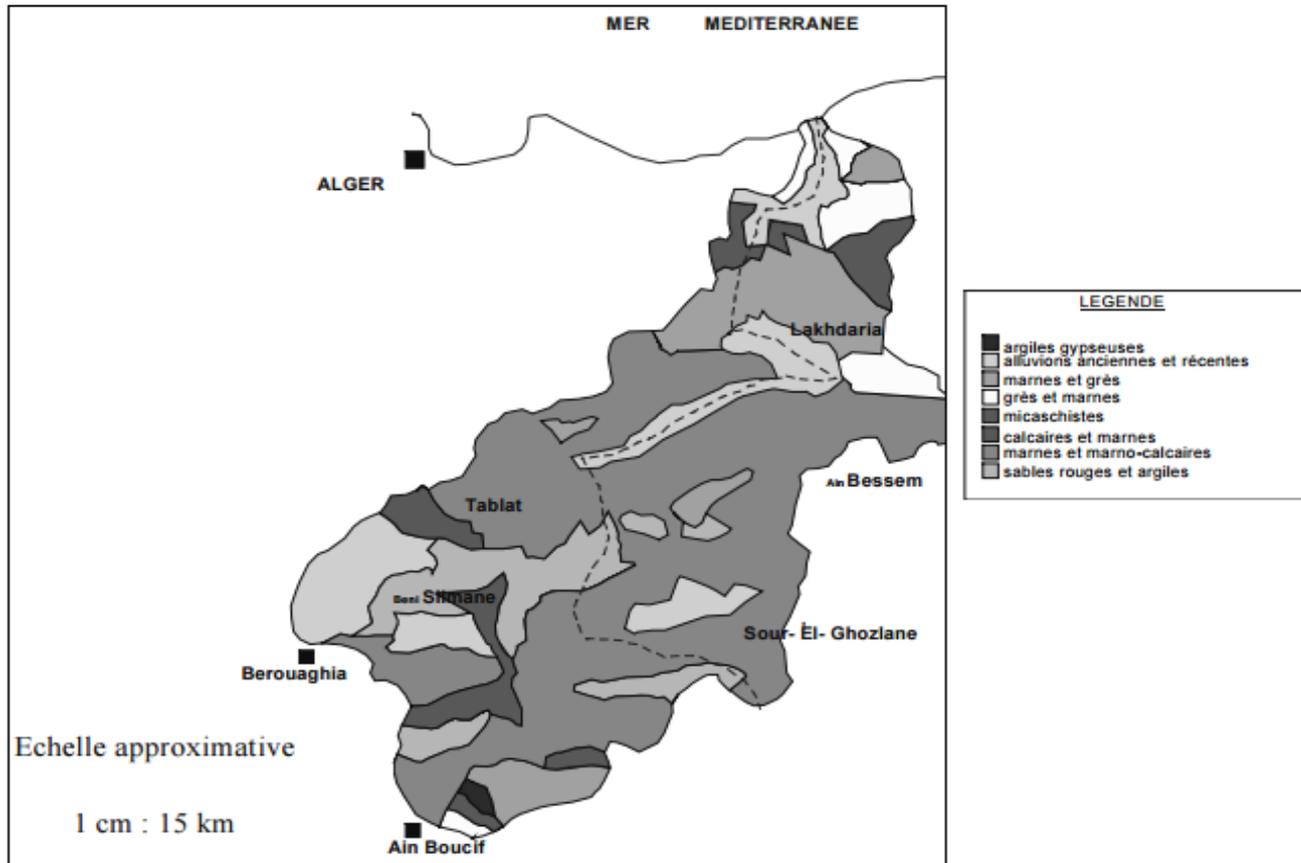


Figure 3-2 : Carte schématique des formations lithologiques du bassin versant de l'Oued Isser

III.3.2 Le climat

Le bassin est soumis à un climat méditerranéen intermédiaire caractérisé par :

- **Un régime pluviométrique**

Entre 700 et 800 mm annuel avec des pluies abondantes, concentrées surtout en hiver (140 mm en décembre), qui diminuent presque régulièrement au printemps et atteignent en été quelques millimètres par mois. (Makkeb 2016)

- **Une température moyenne annuelle**

Qui en moyenne est de 17°C, pour les mois les plus froids, entre 5°C et 6°C, et pour les mois chauds entre 27°C et 31°C .

- **L'humidité**

Elle est modérée pendant toute l'année, avec des valeurs d'environ 70% le matin et le soir en été et de 80% en hiver; les valeurs à midi sont d'environ 57% en avril et octobre, 60% en été et 64% en hiver. L'humidité moyenne de l'air varie entre 72% en été et 80% en hiver

III.3.3 La pente du terrain

Elle détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.

III.3.4 Le couvert végétal

Le bassin se caractérise par un couvert végétal peu dense localisé au centre et représente 20% de la superficie totale, ce qui accélère le phénomène de l'érosion. Le reste de la surface, soit 80%, est occupé par des cultures essentiellement céréalières et fourragères. Au bas Isser, on rencontre essentiellement les cultures annuelles, et sur des superficies réduites, les cultures et l'arboriculture (LARFI Juin 2006).

Le couvert végétal (bois et broussaille) étant peu répandu et souvent dégradé, l'érosion est particulièrement active en présence de matériaux lithologiques tendres et un régime hydrique défavorable (pluies irrégulières, ruissellement).

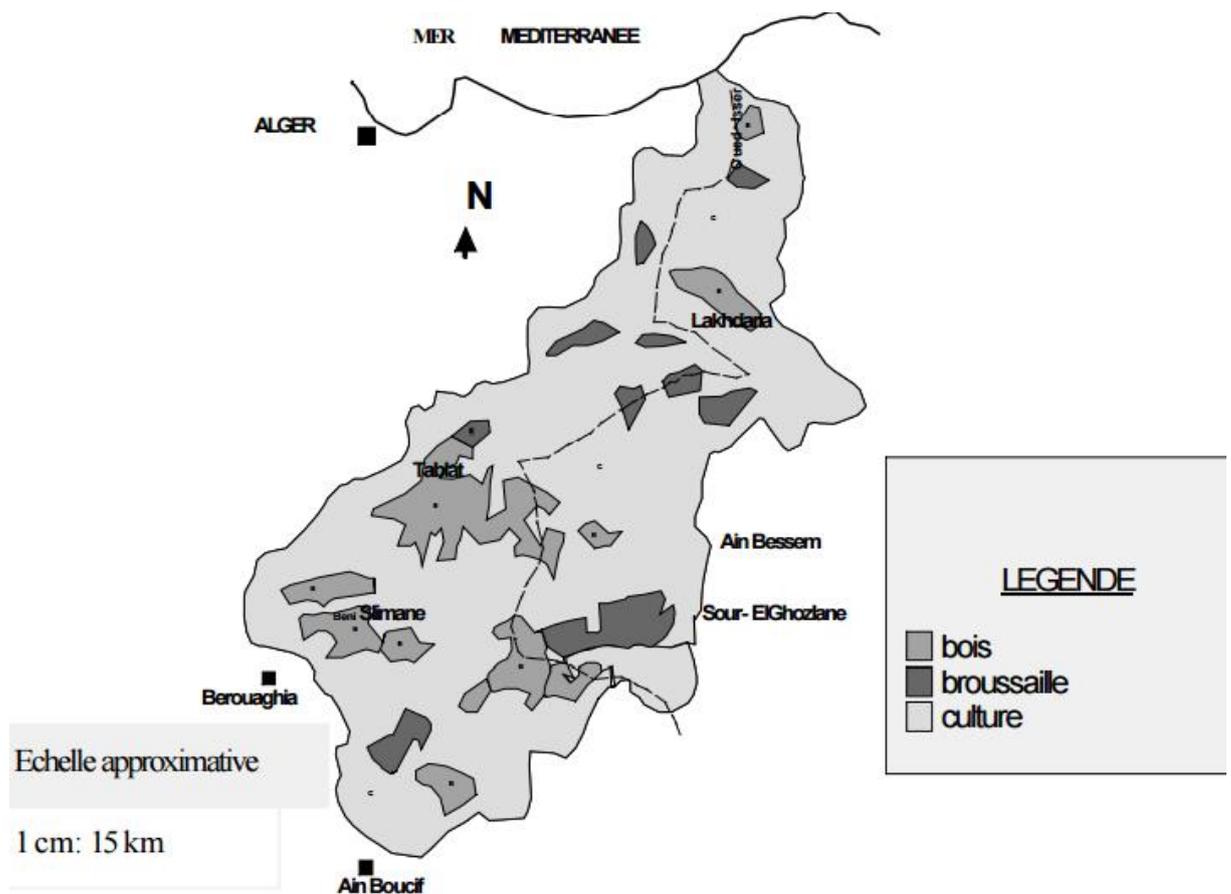


Figure 3-3: Carte schématique de végétation du bassin versant de l'Oued Isser

III.4. Etat d'envasement du barrage de Beni Amrane

Le barrage de Beni Amrane a été mis en service en 1988. Il a été surélevé en Juillet 2003, la cote de retenue normale initiale était de 63m.

Lors d'une campagne de levés bathymétriques des barrages en exploitation, initiée par l'ANBT en 2004, le volume d'eau, pour la retenue normale était de 11,85Hm³, tandis que la surface de la retenue était estimée à 202,5ha. Pour la cote des plus hautes eaux exceptionnelles le volume était estimé à 35,17Hm³ tandis que la surface était de 303,3ha.

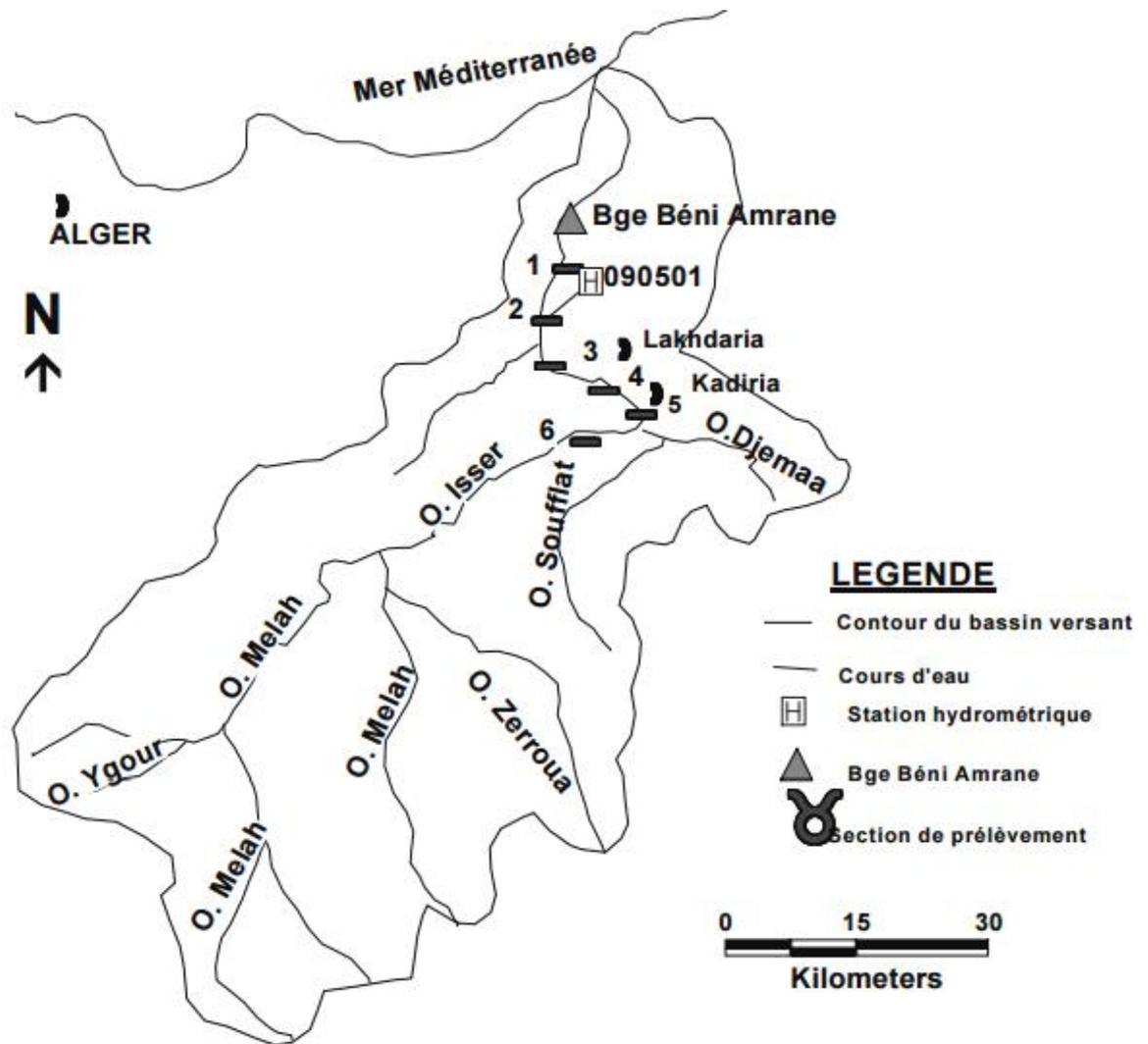


Figure 3-4 : Situation des prélèvements dans le barrage de Béni Amrane

III.4. Base de données

Dans cette partie, nous allons présenter les données que nous avons utilisées dans notre modélisation, ces données proviennent de deux régions différentes le Colorado afin de valider le modèle et les Issers pour le test.

Pour la zone de Oued Isser, nous avons utilisé les données de la station de Lakhdaria fournies par l'ANRH, elles sont composées de deux séries de mesures, celle des débits moyens liquides instantanés et celle des débits solides instantanés s'étendant sur une période allant de 1971 à 2010, avec 13123 données observées sur 14126 au total ce qui nous laisse 1000 vides, par conséquent nous avons établi un programme qui simule ces derniers, voici son organigramme :

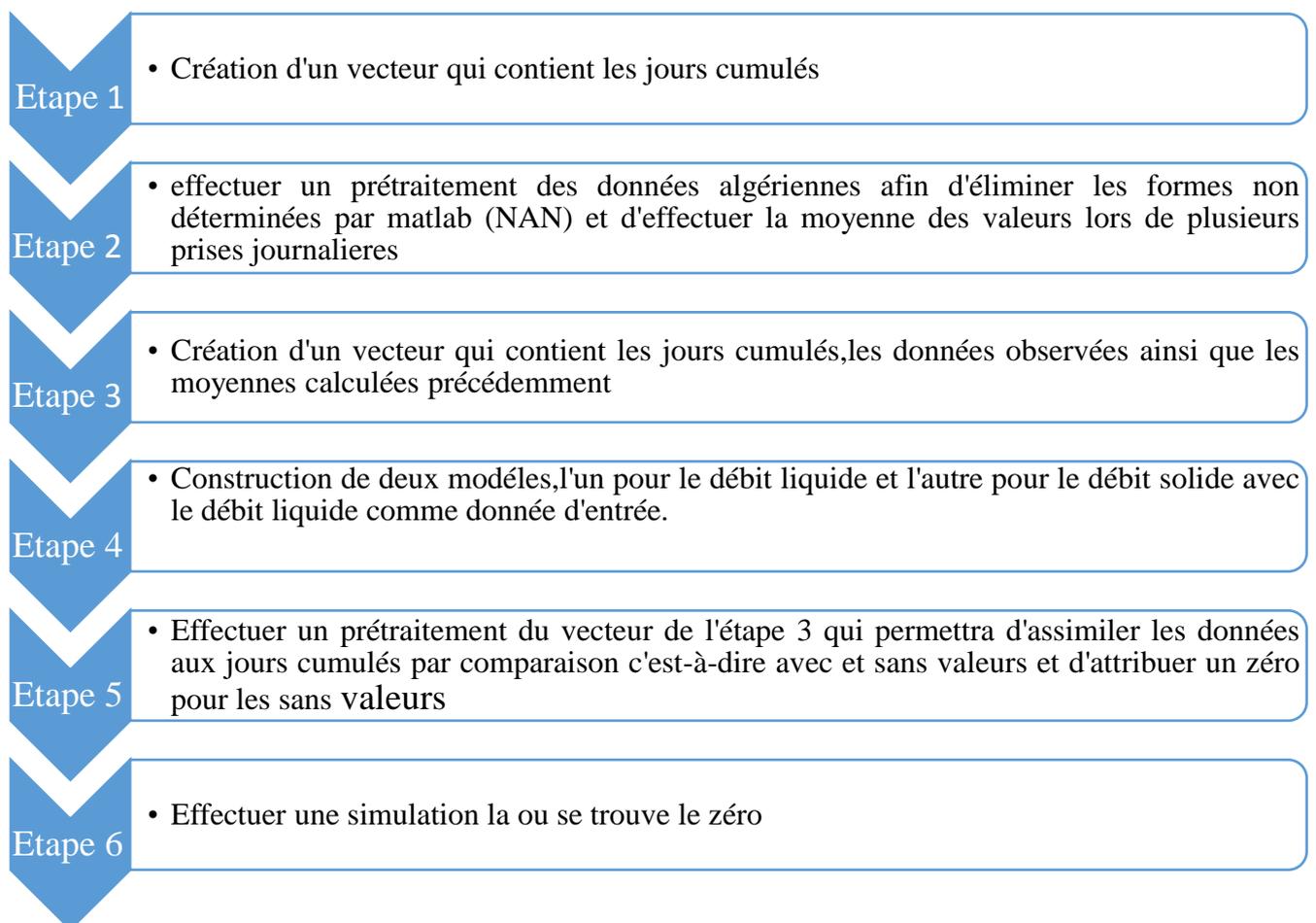


Figure 3-5 : Simulation pour le comblement des lacunes des données du BV des Issers.

III.5. Critique des données

Lors de la phase de mesure ou de récupération de données, des erreurs peuvent être commises. Ces erreurs (valeurs) sont appelées valeurs aberrantes. Pour ne pas perturber l'adéquation de notre modèle, il faut les éliminer. Pour cela, plusieurs tests statistiques existent dans l'hydrologie, parmi eux le test de Grubbs et Beek.

Test de Grubbs et Beck

Connu pour sa puissance ce test est utilisé pour la détection des valeurs aberrantes et est recommandé par le United States Water Resources Council (1981). Le principe de ce test est de comparer les valeurs absolues des écarts réduits en d'autre terme

$$G_i = \frac{\max |u_i - \bar{u}|}{S} \quad (4.1)$$

Où :

- \bar{u} la moyenne des mesures
- S l'écart type des mesures
- U_i point de mesure le plus éloigné de la moyenne

Si G_i est supérieur à la valeur critique G_c donnée dans le logiciel XLSTAT (incorporé dans Excel qui permet les tests statistiques) alors la valeur est considérée comme extrême.

On appelle valeur extrême (ou aberrante) une donnée observée pour une variable qui semble anormale au regard des valeurs dont on dispose pour les autres observations de l'échantillon. On distingue deux types de situation dans lesquels on rencontre des valeurs extrêmes :

- Lors d'une erreur de lecture, une erreur de saisie ou un événement particulier qui a perturbé le phénomène observé au point de le rendre incomparable aux autres. Dans de tels cas, il faut soit corriger la valeur extrême si c'est possible, ou sinon supprimer l'observation.
- Lors d'un événement atypique, mais néanmoins connu ou intéressant à étudier. Par exemple, si l'on étudie la présence de certaines bactéries dans de l'eau de rivière, on peut avoir des prélèvements sans aucune bactérie, et d'autres avec des agrégats importants ou très importants. Ces données sont bien entendu importantes à conserver. Les modèles utilisés doivent alors tenir compte de cette dispersion possible.

Lorsque l'on rencontre des valeurs extrêmes, en fonction du stade de l'étude on doit, identifier les valeurs extrêmes, éventuellement à l'aide de tests, les marquer dans les rapports (tableaux ou graphiques), les supprimer ou utiliser des méthodes capables de les traiter comme tels.

Pour identifier les valeurs extrêmes, il existe différentes approches. Par exemple, une régression linéaire classique, on peut utiliser la valeur des D de Cook, ou soumettre les résidus standardisés au test de Grubbs afin de voir si une ou deux valeurs sont anormales. Le test de Grubbs simple permet d'identifier une valeur aberrante, le test de Grubbs double permet d'en identifier deux. Il est déconseillé d'utiliser itérativement ces méthodes sur un même échantillon, néanmoins cela peut être pertinent si l'on soupçonne réellement qu'il y a plus de deux valeurs extrêmes.

Tableau 3-1 : Résultats du test de Grubbs et Beck pour le bassin versant de Oued Isser

Paramètres	G (Valeur observée)	Gc (Valeur critique)	p-value (unilatéral)	alpha
Débit liquide	0,230	4,492	1,000	0,05
Débit solide	0,215	4,492	1,000	0,05

Interprétation du test :

H0 : Il n'y a pas de valeur extrême dans les données

Ha : La valeur minimale est une valeur extrême

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0,05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 100,00%.

Donc il n'y a aucune valeur aberrante.

III.6. Conclusion

Après un comblement des vides et une vérification statistique des données fournies par l'ANRH du bassin versant de Oued Isser ainsi que le bassin versant du Colorado, ces données seront utilisées afin de permettre l'étude de la modélisation du transport solide.

Le chapitre suivant consistera en la présentation du travail réalisé, les résultats obtenus et leurs interprétations.

Chapitre 4 :Analyses et interprétations des résultats

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, on procédera à la modélisation du transport solide par le modèle de l'intelligence artificielle le réseau de neurones artificiel (ANN) ainsi que par ANFIS. En premier lieu, on entamera la modélisation en faisant passer les données par le filtre Wavelet en utilisant les sept fonctions mères de degrés allant de 1 à 5 ; On utilisera les résultats obtenus lors du projet de fin d'études, c'est-à-dire les 2 meilleures structures pour le WANN (automatique et manuelle) ainsi que le WANFIS et leurs validations en utilisant les données du Colorado, les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.1 : Comparaison entre les différents types des modèles pour les données du Colorado

Type de modèle	R ²	NASH	RMSE	RSR	Temps de calcul
WANN au découpage automatique avec 20 N en couche cachée	0,98	0,69	109,0	0,71	3 heures et 30 minutes
WANN au découpage manuel avec 20 N en couche cachée et 100 itérations	0,99	0,66	144,5	0,68	3 heures et 30 minutes
WANFIS avec 4 fonctions membres et 30 itérations	0,99	0,81	105,6	0,62	26 minutes et 46 secondes

Les modèles utilisés précédemment sont validés en utilisant les données du Colorado, en effet la solidité du calage en terme d'indépendance du jeu de paramètres vis-à-vis des données d'entrée est vérifiée et donc la capacité du modèle à fournir des simulations (ou des prévisions) et l'adéquation du modèle tout entier est bonne.

De plus le meilleur modèle est le WANFIS avec 4 fonctions membres et 30 itérations avec des critères de validation très satisfaisants et un temps de calcul relativement bon et très robuste.

Après avoir validé les modèles et trouvé le meilleur modèle en terme de critère de validation et temps de calcul , nous allons les appliquer aux données de l'Isser pour différentes échelles temporelles.

Nous espérons qu'à la fin de ce travail, déterminer en première partie la meilleure fonction Wavelet qui permettra le meilleur filtrage mais aussi en deuxième partie, déterminer la meilleure combinaison filtre modèle qui s'ajustera au mieux aux données de la région des Issers, et enfin en troisième partie déterminer le pas de temps le plus optimal puis faire la clustérisation du meilleur modèle avec un pas de temps optimal :

- Pas de temps journalier;
- Pas de temps mensuel;
- Pas de temps saisonnier (4 saisons) :
 - ❖ Automne : Septembre, Octobre, Novembre.
 - ❖ Hiver : Décembre, Janvier, Février.
 - ❖ Printemps : Mars, Avril, Mai.
 - ❖ Eté : Juin, Juillet, Août.
- Pas de temps saisonnier (saison sèche et saison humide) :
 - ❖ Saison.Humide : Décembre, Janvier, Février, Mars, Avril.
 - ❖ Saison.Sèche : Mai, Juin, Juillet, Août, Septembre, Octobre, Novembre.

IV.2. Modélisation avec les données Algériennes

Les résultats obtenus après application des deux modèles sont résumés comme suit:

IV.2.1 WANN au découpage automatique avec 20 neurones en couche cachée

❖ Pas de temps journalier

Tableau 4.2 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R ²	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,16	-61,73	2883,44	1,02
Harr	2	0,26	-188,40	5010,08	1,01
Harr	3	0,29	-61,87	2886,34	1,02
Harr	4	0,63	-1,21	540,72	1,22
Harr	5	0,53	-21,97	1744,87	0,99
Db2	1	0,55	-19,34	1641,67	1,04
Db2	2	0,49	-21,75	1736,24	1,04
Db2	3	0,30	-333,92	6661,75	1,00
Db2	4	0,16	-5,93	958,34	1,05
Db2	5	0,02	-31,64	2079,69	1,01
Sym3	1	0,06	-67,54	3013,86	1,00
Sym3	2	0,26	-4,00	814,33	1,06

Sym3	3	0,39	-0,44	437,46	1,21
Sym3	4	0,06	-16,43	1519,85	1,02
Sym3	5	0,21	-26,61	1912,57	1,01
Coif1	1	0,59	-5,39	919,96	1,01
Coif1	2	0,05	-6,20	977,07	1,07
Coif1	3	0,03	-15,10	1460,75	1,03
Coif1	4	0,37	-522,02	8324,78	1,00
Coif1	5	0,49	-58,17	2800,22	1,00
Le meilleur filtre :Dmey avec n=3		0,56	-0,01	467,50	1,00
Sans filtre		0	-320,38	6526,8	1,00

Interprétation des résultats :

D'après le tableau 4.2, on remarque qu'en période de validation les critères d'évaluation du modèle sont moyennement satisfaisants avec et sans filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash ne dépasse pas les 0% avec un R^2 de 56% et un RMSE de 467,50. Mais sans le filtre le NASH est très négatif avec un chiffre de -320,38, un R^2 de 0% et un grand RMSE.

Les résultats sont de moindre qualité dus à la faible qualité des données et l'erreur générée de la simulation des éléments manquants.

❖ Pas de temps mensuel

Tableau 4.3 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec Validation au pas de temps mensuel

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R^2	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,88	0,00	702,82	228,44
Harr	2	0,56	-0,03	716,46	9,28
Harr	3	0,78	-0,21	774,42	1,61
Harr	4	0,75	-45,54	4805,24	1,05
Harr	5	0,71	-0,36	820,55	3,06
Db2	1	0,67	-0,11	741,01	7,12
Db2	2	0,69	0,07	680,41	3,56
Db2	3	0,70	-0,24	785,27	3,61
Db2	4	0,73	0,06	683,22	2,99

Db2	5	0,64	-0,10	737,90	5,15
Sym3	1	0,69	-1,46	1104,50	1,07
Sym3	2	0,76	0,05	686,18	9,76
Sym3	3	0,72	0,01	700,01	29,00
Sym3	4	0,73	-1,89	1196,63	1,45
Sym3	5	0,69	-0,33	811,10	2,76
Coif1	1	0,68	0,05	687,88	3,12
Coif1	2	0,74	0,06	683,18	4,62
Coif1	3	0,73	0,03	693,06	2,22
Coif1	4	0,64	-0,21	775,91	3,55
Coif1	5	0,80	0,06	681,80	6,55
Le meilleur filtre :Bior3.3 avec n=1		0,74	0,18	539,14	1,20
Sans filtre		0,68	-0,19	766,83	2,99

Interprétation des résultats :

D'après le tableau 4.3, on remarque qu'en période de validation les critères d'évaluation du modèle sont satisfaisants avec et sans filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash ne dépasse pas les 18% avec un R^2 de 74% et un RMSE de 639,14. Mais sans le filtre le NASH est négatif avec un chiffre de -0,19, un R^2 de 68% et un grand RMSE.

De plus il y a une légère amélioration entre les résultats de l'échelle temporelle journalière et la mensuelle.

Cette amélioration des résultats due au regroupement des données qui permet une rationalisation de l'apprentissage via le classement des données avec un élément temporel qui est le mois.

❖ Pas de temps 4 saisons

Tableau 4.4: Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec
Validation au pas de temps 4 saisons

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R^2	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,62	-0,63	157,44	0,82
Harr	2	0,74	-0,02	124,39	1,84
Harr	3	0,60	-103,15	1259,06	1,06
Harr	4	0,58	-68,62	1029,42	1,08

Harr	5	0,57	-0,41	146,58	0,93
Db2	1	0,66	-0,14	132,01	0,81
Db2	2	0,56	-4,98	301,62	1,42
Db2	3	0,38	-0,06	127,00	16,77
Db2	4	0,61	-22,65	599,94	0,91
Db2	5	0,64	-15,98	508,37	1,15
Sym3	1	0,62	-4,81	297,51	0,83
Sym3	2	0,63	0,40	95,45	1,05
Sym3	3	0,64	-8,36	377,38	1,29
Sym3	4	0,59	-11,54	436,93	0,89
Sym3	5	0,52	-0,50	150,97	2,29
Coif1	1	0,59	-1,52	195,75	0,83
Coif1	2	0,59	-28,12	665,79	1,13
Coif1	3	0,63	0,08	118,37	2,83
Coif1	4	0,99	-5,04	303,30	1,08
Coif1	5	0,59	0,20	110,09	2,01
Le meilleur filtre :Sym7 avec n=3		0,63	0,43	92,96	0,88
Sans filtre		0,63	-3,39	258,60	1,00

Interprétation des résultats :

D'après le tableau 4.4, on remarque qu'en période de validation les critères d'évaluation du modèle sont très satisfaisants avec filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash est de 43% avec un R^2 de 63% et un RMSE de 92,96. Mais sans le filtre le NASH est négatif avec un chiffre de -3,39, un R^2 de 63% et un grand RMSE.

De plus il y a une amélioration entre les résultats de l'échelle temporelle mensuelle et saisonnière.

Le regroupement est optimale car celle-ci permet un apprentissage optimal pour une approche et une approximation beaucoup plus fidèle des données mesurées.

❖ Pas de temps 2 saisons

Tableau 4.5 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec Validation au pas de temps 2 saisons

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R ²	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,82	0,04	688,47	10,80
Harr	2	0,63	-0,64	903,32	1,99
Harr	3	0,72	0,06	681,62	4,56
Harr	4	0,71	-0,17	760,70	1,39
Harr	5	0,68	-4,79	1695,17	1,22
Db2	1	0,78	-0,31	805,46	3,38
Db2	2	0,67	-16,66	2959,76	1,09
Db2	3	0,71	-0,18	765,31	3,56
Db2	4	0,65	-2,30	1279,37	1,38
Db2	5	0,72	0,05	685,81	2,39
Sym3	1	0,65	-2,31	1281,98	1,34
Sym3	2	0,63	-0,02	711,64	10,10
Sym3	3	0,65	0,05	686,77	2,87
Sym3	4	0,68	0,05	686,47	3,16
Sym3	5	0,68	-0,01	708,44	3,01
Coif1	1	0,70	0,07	680,60	3,91
Coif1	2	0,70	-2,19	1257,50	1,42
Coif1	3	0,69	-0,02	712,07	30,64
Coif1	4	0,68	-0,11	741,83	5,21
Coif1	5	0,70	-0,38	828,28	2,71
Le meilleur filtre :Rbio2.2 avec n=1		0,73	0,18	638,99	3,44
Sans filtre		0,73	-2,61	1338,50	0,98

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 4.5, on remarque qu'en période de validation les critères d'évaluation du modèle sont moyennement satisfaisants avec et sans filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash ne dépasse pas les 18% avec un R² de 73% et un RMSE

de 638,99. Mais sans le filtre le NASH est négatif avec un chiffre de -2,61, un R^2 de 73% et un grand RMSE.

De plus il y a une dégradation entre les résultats de l'échelle temporelle saisonnière (4 saisons) et saisonnière (sèche et humide).

Les résultats sont plus probants qu'avec des données journalières mais d'une variance beaucoup plus grande; Ce qui nous permet de conclure de manière empirique qu'il ne faut négliger aucun critère pour une bonne approximation.

❖ Conclusion des interprétations

A travers cette première partie de résultats. On peut dire que le WANN au découpage automatique à 20 N en couche cachée et à échelle temporelle 4 saisons, est celui qui donne une meilleure simulation et donc montre une très bonne corrélation entre le débit solide et le débit liquide.

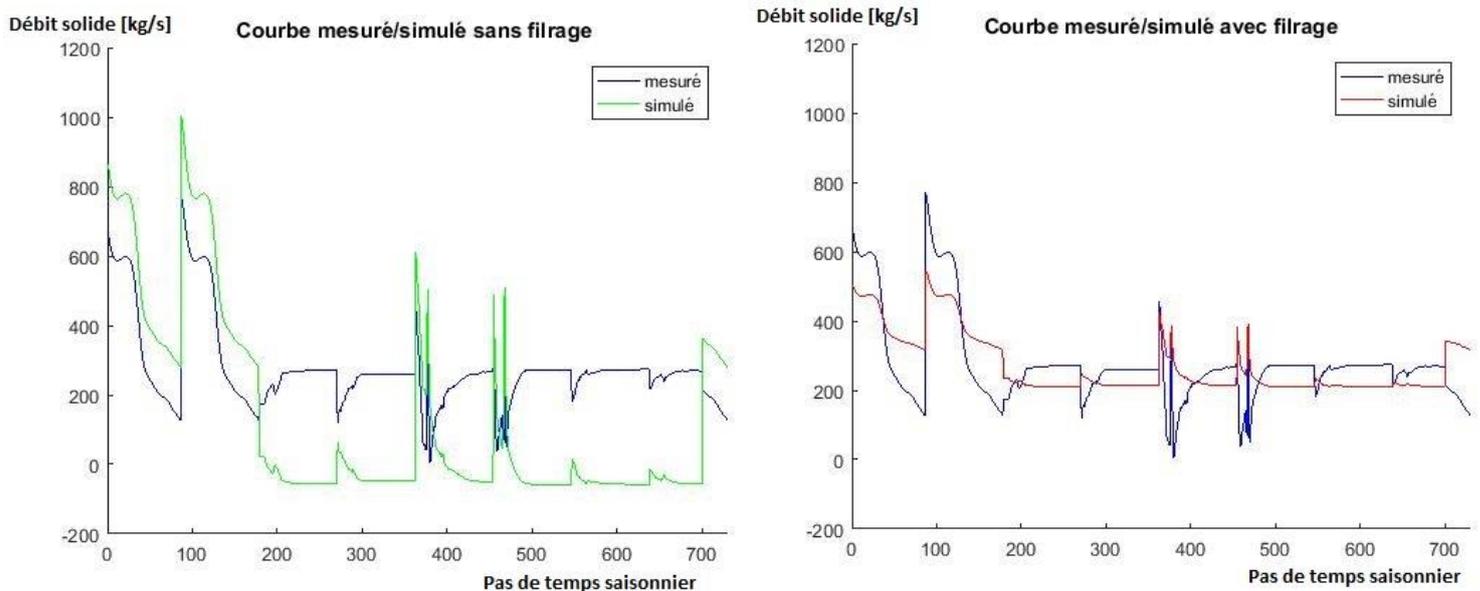


Figure 4.1: Simulation au pas de temps saisonnier (4 saisons) par le modèle réseau de neurones sans et avec filtrage

On peut observer très clairement que les graphes obtenus par modélisation avec filtrage sont plus convergents aux résultats désirés que ne le sont ceux obtenus par modélisation sans filtrage.

De plus on remarque que le grand pic a été filtré cela prouve le bon fonctionnement du filtre à filtrer les ondes douteuses.

IV.2.2 WANN au découpage manuel avec 20N en couche cachée et 100 itérations

❖ Pas de temps journalier

Tableau 4.6 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel avec
Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R ²	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,56	-1,47	572,04	1,14
Harr	2	0,42	-103,49	3721,27	1,01
Harr	3	0,56	-56,47	2759,62	1,00
Harr	4	0,16	-14,39	1427,98	1,04
Harr	5	0,54	-2,46	677,29	1,09
Db2	1	0,29	-3,09	736,51	1,06
Db2	2	0,01	-53,61	2690,15	1,01
Db2	3	0,01	-37,34	2253,97	1,01
Db2	4	0,46	-5,16	903,31	1,02
Db2	5	0,54	-14,46	1431,12	1,00
Sym3	1	0,24	-0,82	491,53	1,67
Sym3	2	0,21	-5,89	955,52	1,07
Sym3	3	0,05	-32,49	2106,44	1,02
Sym3	4	0,35	-0,45	438,50	1,37
Sym3	5	0,01	-58,39	2805,39	1,01
Coif1	1	0,55	-2,12	642,83	1,08
Coif1	2	0,51	-22,36	1759,47	1,03
Coif1	3	0,07	-0,96	509,17	1,53
Coif1	4	0,10	-9,00	1151,24	1,04
Coif1	5	0,00	-15,12	1461,56	1,03
Le meilleur filtre : Db8 avec n=4		0,49	0,00	363,77	1,48
Sans filtre		0,56	-16,15	1507,70	1,55

Interprétation des résultats :

D'après le tableau 4.6, on remarque qu'en période de validation les critères d'évaluation du modèle sont moyennement satisfaisants avec et sans filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash ne dépasse pas les 0% avec un R^2 de 49% et un RMSE de 363,77. Mais sans le filtre le NASH est négatif avec un chiffre de -16,15, un R^2 de 56% et un grand RMSE.

Les résultats sont de qualité insuffisante due à la faible qualité des données et l'erreur générée de la simulation des éléments manquants.

❖ Pas de temps mensuel

Tableau 4.7 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel avec Validation au pas de temps mensuel

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R^2	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,69	0,05	685,60	4,55
Harr	2	0,73	0,06	682,68	5,24
Harr	3	0,69	0,05	685,40	3,13
Harr	4	0,63	-0,03	714,68	12,33
Harr	5	0,65	0,05	687,53	4,04
Db2	1	0,40	-0,01	708,54	28,62
Db2	2	0,71	0,10	668,42	3,11
Db2	3	0,72	0,09	672,64	4,16
Db2	4	0,73	0,05	686,98	19,38
Db2	5	0,63	-0,09	734,53	6,52
Sym3	1	0,68	0,04	691,29	3,52
Sym3	2	0,65	-0,33	813,17	1,40
Sym3	3	0,72	0,06	682,51	3,31
Sym3	4	0,72	-0,03	714,20	8,35
Sym3	5	0,66	0,06	683,81	4,52
Coif1	1	0,68	0,05	687,13	3,06
Coif1	2	0,61	-0,04	718,42	11,74
Coif1	3	0,65	0,05	688,02	3,69

Coif1	4	0,69	0,05	686,68	3,40
Coif1	5	0,73	0,06	682,40	8,58
Le meilleur filtre :Bior2.2 avec n=5		0,72	0,10	668,42	3,11
Sans filtre		0,65	0,04	690,52	3,26

Interprétation des résultats :

D'après le tableau 4.7, on remarque qu'en période de validation les critères d'évaluation du modèle sont satisfaisants sans filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash ne dépasse pas les 10% avec un R^2 de 72% et un RMSE de 668,42. Mais sans le filtre le NASH est moins bon avec un chiffre de 4%, un R^2 de 65% et un RMSE de 690,52.

De plus il y a une légère amélioration entre les résultats de l'échelle temporelle journalière et mensuelle. Celle-ci est due au regroupement des données qui permet une rationalisation de l'apprentissage via le classement des données avec un élément temporel qui est le mois.

❖ Pas de temps 4 saisons

Tableau 4.8 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel avec Validation au pas de temps 4 saisons

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R^2	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,60	-0,13	131,30	0,82
Harr	2	0,59	-1,00	174,41	0,80
Harr	3	0,64	-2,14	218,48	0,87
Harr	4	0,57	-0,86	168,04	0,83
Harr	5	0,60	0,05	120,13	0,95
Db2	1	0,65	-0,78	164,42	0,83
Db2	2	0,55	-1,31	187,52	1,49
Db2	3	0,62	-0,03	125,40	0,84
Db2	4	0,57	0,30	102,95	1,02
Db2	5	0,60	0,38	97,00	1,04
Sym3	1	0,62	-1,76	204,82	0,82

Sym3	2	0,64	0,14	114,11	0,87
Sym3	3	0,63	0,30	103,21	0,95
Sym3	4	0,59	0,03	121,53	0,83
Sym3	5	0,57	-0,10	129,11	0,81
Coif1	1	0,60	0,04	120,81	0,83
Coif1	2	0,57	-0,64	157,92	0,81
Coif1	3	0,59	0,12	115,59	2,90
Coif1	4	0,57	0,08	118,04	0,86
Coif1	5	0,57	0,02	122,25	0,87
Le meilleur filtre : Rbio1.1 avec n=2		0,64	0,41	94,22	1,00
Sans filtre		0,62	-0,14	132,02	0,88

Interprétation des résultats :

D'après le tableau 4.8, on remarque qu'en période de validation les critères d'évaluation du modèle sont moyennement satisfaisants avec et sans filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash ne dépasse pas les 41% avec un R^2 de 64% et un RMSE de 94,22. Mais sans le filtre le NASH est négatif avec un chiffre de -0,14, un R^2 de 62% et un RMSE de 132,02.

De plus il y a une amélioration entre les résultats de l'échelle temporelle mensuelle et saisonnière (4saisons).

Le regroupement des données est optimale car elle permet un apprentissage optimal pour une approche et une approximation beaucoup plus fidèle des données mesurées.

❖ Pas de temps 2 saisons

Tableau 4.9 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel avec Validation au pas de temps 2 saisons

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R^2	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,74	0,07	679,93	4,65
Harr	2	0,68	0,04	691,33	6,91
Harr	3	0,74	0,04	690,97	10,53
Harr	4	0,81	0,01	700,12	106,90

Harr	5	0,65	-0,03	713,47	13,48
Db2	1	0,72	0,06	683,91	4,67
Db2	2	0,72	0,07	679,93	4,18
Db2	3	0,70	0,03	694,13	2,69
Db2	4	0,70	-0,10	738,12	1,72
Db2	5	0,70	0,04	690,16	6,54
Sym3	1	0,75	0,06	683,00	8,34
Sym3	2	0,74	0,04	690,18	4,92
Sym3	3	0,67	0,04	688,60	3,19
Sym3	4	0,70	0,04	690,37	11,15
Sym3	5	0,83	0,02	697,27	6,02
Coif1	1	0,74	0,06	682,99	4,04
Coif1	2	0,89	0,01	701,69	106,71
Coif1	3	0,67	0,05	686,50	3,70
Coif1	4	0,73	0,08	675,74	4,17
Coif1	5	0,71	0,06	683,76	5,16
Le meilleur filtre :Sym8 avec n=3		0,71	0,13	659,02	3,31
Sans filtre		0,65	0,04	688,09	4,71

Interprétation des résultats :

D'après le tableau 4.9, on remarque qu'en période de validation les critères d'évaluation du modèle sont moyennement satisfaisants avec et sans filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash ne dépasse pas les 13% avec un R^2 de 71% et un RMSE de 659,59. Mais sans le filtre le NASH est très petit avec un chiffre de 4%, un R^2 de 65% et un RMSE de 688,09.

De plus il y'a une détérioration des critères de validation entre l'échelle temporelle saisonnière (4saisons) et saisonnière (sèche et humide).

❖ Conclusion des interprétations

A travers cette deuxième partie de résultats. On peut dire que le WANN au découpage calage test manuel à 20 neurones en couche cachée avec 100 itérations et à échelle temporelle 4 saisons, est celui qui donne une meilleure simulation et donc qui montre une très bonne corrélation entre le débit solide et le débit liquide.

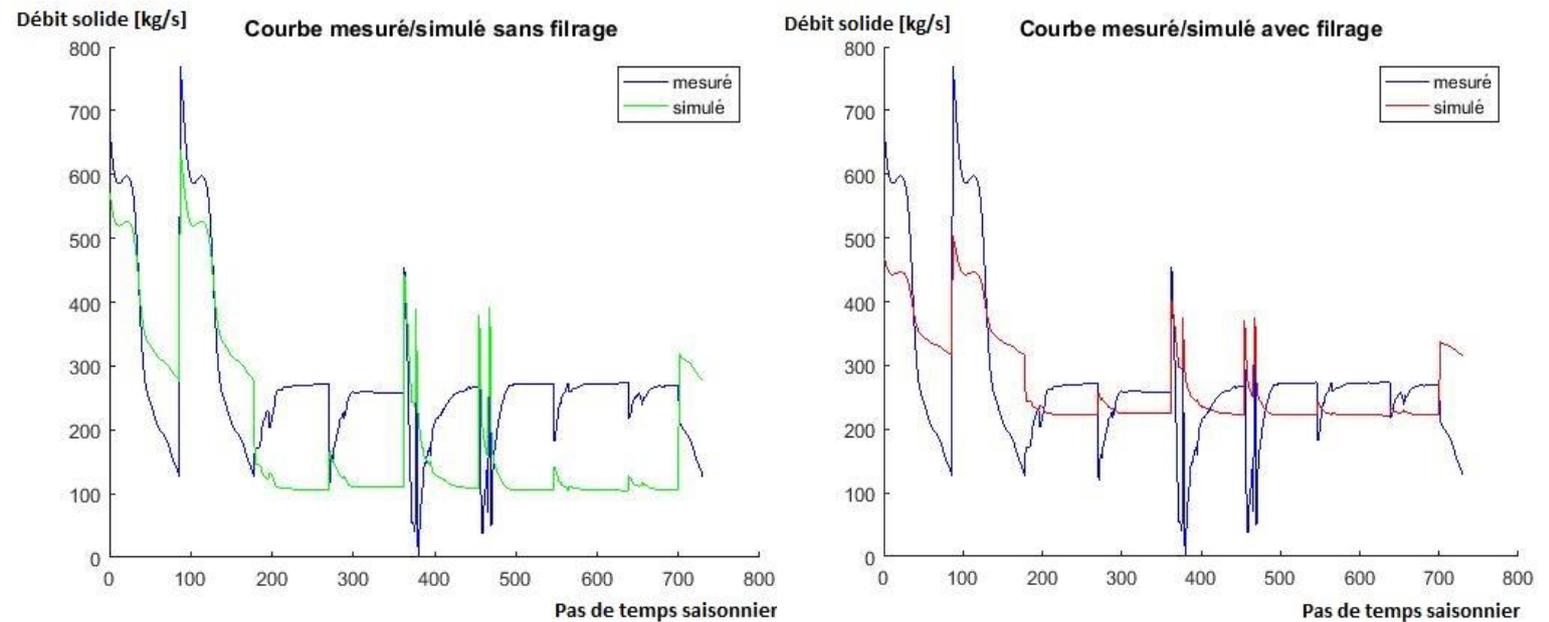


Figure 4.2: Simulation au pas de temps saisonnier par le modèle réseau de neurones sans et avec filtrage

On peut observer très clairement que les graphes obtenus par modélisation avec filtrage sont plus convergents aux résultats désirés que ne le sont ceux obtenus par modélisation sans filtrage.

De plus on remarque qu'avec filtrage le RMSE des données simulées est bon par conséquent les deux courbes se rapprochent au plus.

IV.2.3 WANFIS avec 4 fonctions d'appartenance et 30 itérations

❖ Pas de temps journalier

Tableau 4.10 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R ²	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,15	-5,13	204,07	1,00
Harr	2	0,15	-5,13	204,07	1,00
Harr	3	0,15	-5,13	204,06	1,00
Harr	4	0,15	-5,13	204,06	1,00
Harr	5	0,15	-5,13	204,06	1,00
Db2	1	0,15	-5,13	204,07	1,00
Db2	2	0,15	-5,13	204,07	1,00
Db2	3	0,15	-5,13	204,06	1,00
Db2	4	0,15	-5,13	204,06	1,00
Db2	5	0,15	-5,13	204,06	1,00
Sym3	1	0,15	-5,13	204,07	1,00
Sym3	2	0,15	-5,13	204,07	1,00
Sym3	3	0,15	-5,13	204,06	1,00
Sym3	4	0,15	-5,13	204,06	1,00
Sym3	5	0,15	-5,13	204,06	1,00
Coif1	1	0,15	-5,13	204,07	1,00
Coif1	2	0,15	-5,13	204,07	1,00
Coif1	3	0,15	-5,13	204,06	1,00
Coif1	4	0,15	-5,13	204,06	1,00
Coif1	5	0,15	-5,13	204,06	1,00
Le meilleur filtre : Harr avec n=1		0,15	-5,13	204,07	1,00
Sans filtre		0,15	-5,13	204,07	1,00

Interprétation des résultats :

D'après le tableau 4.10, on remarque qu'en période de validation une stabilité entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le harr avec un degré de décomposition de 1 où le R² est de 15 % et un NASH de -5,13% , et la modélisation sans filtrage, où la différence est de l'ordre de 10⁻⁵.

Les résultats sont de qualité insuffisante due à la faible qualité des données et l'erreur générée de la simulation des éléments manquants.

❖ Pas de temps mensuel

Tableau 4.11 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec Validation au pas de temps mensuel

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R ²	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,84	0,99	17,50	0,85
Harr	2	0,84	0,99	17,50	0,85
Harr	3	0,84	0,99	17,50	0,85
Harr	4	0,84	0,99	17,50	0,85
Harr	5	0,84	0,99	17,50	0,85
Db2	1	0,84	0,99	17,50	0,85
Db2	2	0,84	0,99	17,50	0,85
Db2	3	0,84	0,99	17,50	0,85
Db2	4	0,84	0,99	17,50	0,85
Db2	5	0,84	0,99	17,50	0,85
Sym3	1	0,84	0,99	17,50	0,85
Sym3	2	0,84	0,99	17,50	0,85
Sym3	3	0,84	0,99	17,50	0,85
Sym3	4	0,84	0,99	17,50	0,85
Sym3	5	0,84	0,99	17,50	0,85
Coif1	1	0,84	0,99	17,50	0,85
Coif1	2	0,84	0,99	17,50	0,85
Coif1	3	0,84	0,99	17,50	0,85
Coif1	4	0,84	0,99	17,50	0,85
Coif1	5	0,84	0,99	17,50	0,85
Le meilleur filtre : Harr avec n=1		0,84	0,99	17,50	0,85
Sans filtre		0,84	0,99	17,50	0,85

Interprétation des résultats :

D'après le tableau 4.11, on remarque qu'en période de validation les critères d'évaluation du modèle sont très satisfaisants et stables avec et sans filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash est de 99% avec un R^2 de 84% et un RMSE de 17,50.

De plus il y'a une grande amélioration entre les résultats de l'échelle temporelle journalière et mensuelle.

Le regroupement des données est optimale car elle donne les meilleurs résultats avec ce type de modèle, ce qui nous permet de conclure qu'elle permet un apprentissage optimal pour une approche et une approximation beaucoup plus fidèle des données mesurées.

❖ Pas de temps 4 saisons

Tableau 4.12 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec Validation au pas de temps 4 saisons

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R^2	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,66	-11,24	97,70	6,14
Harr	2	0,66	-11,24	97,72	6,14
Harr	3	0,66	-11,24	97,72	6,14
Harr	4	0,66	-11,24	97,72	6,14
Harr	5	0,66	-11,24	97,72	6,14
Db2	1	0,66	-11,24	97,72	6,14
Db2	2	0,66	-11,24	97,72	6,14
Db2	3	0,66	-11,24	97,72	6,14
Db2	4	0,66	-11,24	97,72	6,14
Db2	5	0,66	-11,24	97,72	6,14
Sym3	1	0,66	-11,24	97,72	6,14
Sym3	2	0,66	-11,24	97,72	6,14
Sym3	3	0,66	-11,24	97,72	6,14
Sym3	4	0,66	-11,24	97,72	6,14
Sym3	5	0,66	-11,24	97,72	6,14
Coif1	1	0,66	-11,24	97,72	6,14
Coif1	2	0,66	-11,24	97,72	6,14
Coif1	3	0,66	-11,24	97,72	6,14
Coif1	4	0,66	-11,24	97,72	6,14

Coif1	5	0,66	-11,24	97,72	6,14
Le meilleur filtre : Harr avec n=1		0,66	-11,24	97,70	6,14
Sans filtre		0,66	-11,24	97,67	6,14

Interprétation des résultats :

D'après le tableau 4.12, on remarque qu'en période de validation les critères d'évaluation du modèle sont peu satisfaisants et stables avec et sans filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash est de -11,24 avec un R² de 66% et un RMSE de 97,70.

De plus il y'a une grande détérioration entre les résultats de l'échelle temporelle mensuelle et saisonnière (4saisons).

❖ Pas de temps 2 saisons

Tableau 4.13 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec Validation au pas de temps 2 saisons

Mother wavelet type	Level n	Validation			
		R ²	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,83	0,99	17,50	0,85
Harr	2	0,83	0,99	17,50	0,85
Harr	3	0,83	0,99	17,50	0,85
Harr	4	0,83	0,99	17,50	0,85
Harr	5	0,83	0,99	17,50	0,85
Db2	1	0,83	0,99	17,50	0,85
Db2	2	0,83	0,99	17,50	0,85
Db2	3	0,83	0,99	17,50	0,85
Db2	4	0,83	0,99	17,50	0,85
Db2	5	0,83	0,99	17,50	0,85
Sym3	1	0,83	0,99	17,50	0,85
Sym3	2	0,83	0,99	17,50	0,85
Sym3	3	0,83	0,99	17,50	0,85
Sym3	4	0,83	0,99	17,50	0,85
Sym3	5	0,83	0,99	17,50	0,85

Coif1	1	0,83	0,99	17,50	0,85
Coif1	2	0,83	0,99	17,50	0,85
Coif1	3	0,83	0,99	17,50	0,85
Coif1	4	0,83	0,99	17,50	0,85
Coif1	5	0,83	0,99	17,50	0,85
Le meilleur filtre :Harr avec n=1		0,83	0,99	17,50	0,85
Sans filtre		0,83	0,99	17,50	0,85

Interprétation des résultats :

D'après le tableau 4.13, on remarque qu'en période de validation les critères d'évaluation du modèle sont très satisfaisants et stables avec et sans filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash est de 99% avec un R^2 de 83% et un RMSE de 17,50.

De plus il y'a une grande amélioration entre les résultats de l'échelle temporelle saisonnière (4saisons) et saisonnière (sèche et humide).

On remarque aussi qu'il y a une légère différence entre les valeurs des critères d'évaluation entre les deux échelles temporelles c'est-à-dire mensuelle et saisonnière.

❖ Conclusion des interprétations

A travers cette troisième partie de résultats. On peut dire que le WANFIS avec 4 fonctions membres et 30 itérations et à pas temps mensuel est celui qui donne une meilleure simulation et donc qui montre une très bonne corrélation entre le débit solide et le débit liquide.

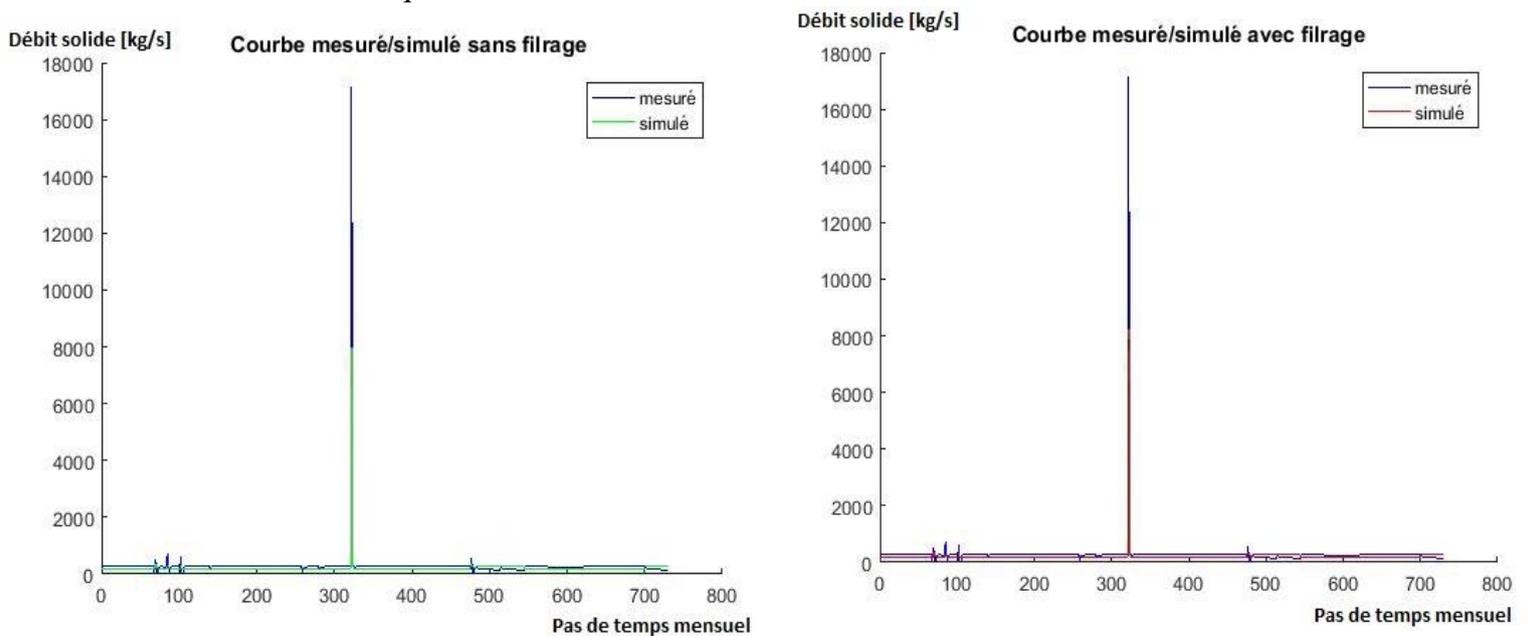


Figure 4.3: Simulation au pas de temps mensuel par le modèle ANFIS sans et avec filtrage.

On peut observer très clairement que les graphes obtenus par modélisation avec ou sans filtrage sont convergents aux résultats désirés.

De plus on remarque que le grand pic a été filtré cela prouve le bon fonctionnement du filtre à filtrer les ondes douteuses.

IV.2.4 Comparaison des trois structure de modélisation avec le meilleur filtre Wavelet et le meilleur pas de temps

Ci-dessous un tableau récapitulant les meilleurs résultats des deux modélisations

Tableau 4. 14 : Comparaison entre les différents types de modèle

Type de modèle	R ²	NASH	RMSE	RSR	Le temps de calcul
WANN au découpage automatique avec 20N en couche cachée	0,63	0,43	92,96	0,88	1h 49min
WANN au découpage manuel avec 20N en couches cachée et 100 itération	0,64	0,41	94,22	1,00	1h 54min
WANFIS avec 4 fonctions membres et 30 itérations	0,84	0,99	17,50	0,85	40min 58s

Interprétation des résultats :

Il est indéniable qu'en ce qui concerne les résultats des critères de validation des données sont très bon et meilleurs pour le WANFIS avec 4 fonctions membres et 30 itérations ; même le temps de calcul est très moindre.

En effet pour le WANN au découpage automatique avec 20N en couche cachée R² est bon de 63% , le NASH est de 43% et le RMSE de 92,96 , ces critères sont meilleurs que ceux pour WANN au découpage manuel avec 20N en couches cachée et 100 itérations mais moindres pour le WANFIS avec 4 fonctions membres et 30 itérations en tout point.

IV.3. Clustérisation des résultats précédents

Après avoir choisis le meilleur modèle avec le pas de temps le plus optimal, passons maintenant à la clustérisation des ces résultats obtenus par le WANFIS avec 4 fonctions membres et 30 itérations au pas de temps mensuel.

Voici ci-joint un tableau résumant les résultats du meilleurs filtre:

Clustérisation	R ²	NASH	RMSE	Temps de calcul
Mensuelle	0,56	-81,33	3303	32min 06s
Saisonnaire (4saisons)	0,004	-25,58	1876,68	24min 55s
Saisonnaire (Sèche et humide)	0,03	-0,35	423,07	27min 10s
Sans Clustrérisation	0,84	0,99	17,50	40min 58s

Nous remarquons que la meilleure clustérisation est la : mensuelle avec comme période de validation 2009 et 2010.

De plus les critères de validation sans clustérisation c'est-à-dire modèle ANFIS avec 4 fonctions d'appartenance et 30 itération à pas de temps mensuel sont meilleurs qu'avec clustérisation, nous en concluons que pour de meilleurs résultats le rearrangement des données est primordiale.

IV.4. Conclusion du chapitre

Les modèles utilisés précédemment sont validés en utilisant les données du Colorado et sont considérés comme robuste , mais en utilisant la clustérisation des données Algériennes, considérées incomplètes, les critères de validation se sont pas forcément améliorés de manière considérable pour toutes les échelles temporelles ;mais contre toute attente la réorganisation des données à permis une amélioration impressionnante des critères de validation ce qui est en soit une perspective de recherche à pousser.

En effet la réorganisation des données la plus optimale et celle qui donne les meilleurs résultats est le WANFIS avec 4 fonctions membres et 30 itérations, ce qui nous permet de conclure qu'avec ce type de modèle la réorganisation mensuelle permet un apprentissage optimal pour une approche et une approximation beaucoup plus fidèle des données mesurées ; avec un bon taux de précision et surtout un moindre temps de calcul.

CONCLUSION GENERALE

Après validation des différents modèles via les tests effectués sur les données du Colorado, puis la sélection des structures aux résultats les plus élevés, pour maximiser au préalable les chances d'obtenir des résultats d'approximation concluants, en utilisant les données clustérisées de l'Algérie même si elles ont elles-mêmes été en partie approximées pour pallier leur irrégularité de pas ; Nous permettent les conclusions suivantes ;

les modèles utilisés sur les données du Colorado ont prouvé leur efficacité avec des données fiables, on peut observer une certaine prépondérance de certaines structures sur d'autres et de certains modèles sur d'autres, tant sur le plan des résultats que sur le plan du temps de calcul ; de ce fait il a été décidé d'appliquer les meilleures structures de chaque modèle aux données algériennes, qui sont au préalable regroupées différents pas de temps (journalier, mensuel, 4saisons, saison sèche et humide) puis clustérisées ce qui donnera une amélioration plus que significative des résultats, qui sont la conséquence directe d'un apprentissage optimal pour une approche et une approximation beaucoup plus fidèle des données mesurées.

Nous concluons donc que la modélisation par ANFIS ou réseau de neurones à découpage automatique ou manuel a une efficacité avérée sur des données fiables et régulières, beaucoup moins sûre pour des débits solides découlant de données douteuses, mais la mise en application d'une clustérisation des données après regroupage sur le plan effectif et exécutif s'est avérée concluante ; mais encore nous avons trouvé qu'en dépit de la clustérisation une réorganisation des données s'est montrée beaucoup plus efficace que la clustérisation mais le fondement des raisons de cela doit être approfondie dans une recherche à part; mais tant qu'à choisir sur la base d'un rapport précision/temps de calcul, il est clair que la modélisation par ANFIS est la plus indiquée tant sur le fait qu'elle soit la moins gourmande en temps de calcul que sur sa précision considérable en dépit de la présence et de l'absence de filtrage par ondelettes.

Ce travail m'a permis personnellement d'enrichir mes connaissances en ce qui concerne des disciplines comme la modélisation, le traitement de signal, mais aussi il m'a permis d'élargir ma vision globale sur les problèmes réels que les ingénieurs rencontrent tout les jours, et les perspectives que je vois découler de ce projet sont très certainement le gain de temps, dans la sélection du modèle adéquat pour ce genre de problème, mais aussi dans son application sur un problème de terrain, et il serait tout aussi important comme perspective l'optimisation de ces modèles pour permettre des résultats et des prévisions fiables et surtout utiles et applicables même pour des zones dont les données souffrent d'un déficit que ce soit dans la distribution ou la consistance.

Bibliographie

- **A.Abdelli:** Dealing with resource requirement in multimedia document consistency verification" In proc of British Computer Society EWIC of 1Th VECoS First International workshop on verification and Evaluation of computer and communication systems. Algiers MAY 2007.
- **Abdelhafid Boussaid :** Étude des hydrogrammes des crue du bassin versant Isser(09) ,W.Boumerdes, Algérie 2013/214.
- **Alireza Docheshmeh Gorgij,Ozgun Kisi,Asghar Asghari Moghaddam :** Groundwater budget forecasting, using hybrid wavelet-ANN-GP modelling: a case study of Azarshahr Plain, East Azerbaijan, Iran , Published in April 2017.
- **Amit Prakash Patil, Paresh Chandra Deka :** Performance evaluation of hybrid Wavelet-ANN and Wavelet-ANFIS models for estimating evapotranspiration in arid regions of India Published in Journal Neural Computing and Applications archive,Volume 28 Issue 2, February 2017.
- **Boulvain,** Une introduction au processus sédimentaires, cours en ligne, université de Liège, 2004
- **Bourouba ,** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides de l'oued Medjerda supérieur (Algérie orientale) Department of geography, College of Arts King Saud University in Saudi Arabia M 1997,1998.
- **Braun,** Energy exchange in adsorbed layers, 1989.
- **Bruno Torresani:** analyse continue par ondelette, InterEditios/CNRS Editions.
- **CARDOSO A.H , G.O. NEVES** -1994- Prévision du transport solide total : évaluation de formules existantes.
- **Chandranath Chatterjee :** Effect of Utilization of Discrete Wavelet Components on Flood Forecasting Performance of Wavelet Based ANFIS Models, Received: 18 June 2013 /Accepted: 9 March 2014, Published online: 22 March 2014.
- **Couvert.B, J.L, Lefor, Ph, Belludy :** la gestion des rivières , transport solide et atterrissements. Guide methodologique, les étude des agences de l'eau, numéro 65, 1989.
- **Duvoisin J. :** Modèle réduit physique de la Rivière des Galets (La Réunion)", La Houille Blanche, , 1989
- **Le Cun,** automata networks and artificial intelligence, Manchester university 1987.
- **Demmak,** une nouvelle approche de lutte contre l'envasement des barrages : la technique des obstacles émergés, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Saad Dahlab- Blida, 1982.
- **Flandrin :** Generalized Target Description and Wavelet Decomposition dans Lemarié, 1990.

- **François Anctil and , Doha Guy Tape** : An exploration of artificial neural network rainfall-runoff forecasting combined with wavelet decomposition. Revue du génie et de la science de l'environnement, 2004
- **G.Beylkin** : Wavelets and fast Numerical Algorithms, University of Colorado.
- **Graf Susanne**, tools and algorithms for the construction and analysis of systems 2000.
- **Haykin Simon**, Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Macmillan College Publishing Company in 1994.
- **Haykin Simon**, Book of Neural Networks: A Comprehensive Foundation 2nd ,Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA ©1998.
- **Larfi, B. Remini et B.** Juin 2006. "Le transport solide dans le bassin versant de l'Oued Isser, Impact sur l'envasement du barrage de Beni Amrane." Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 05. pp 63-67.
- **Lefkir, A.** 2009. "Modélisation du transport solide par les modèles neuro-flous." Thèse en vue de l'obtention du titre de doctorat en hydraulique. ENP.
- **LEFKIR, BENKACI ET DECHEMI.** 2006. "Quantification du transport solide par la technique floue, application au barrage de Beni Amrane(Algérie)." Revue des Sciences de l'Eau 19 PP 247-257.
- **Leguédois, S.** 2003. "Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés." tel.archives-ouvertes.fr.
- **MARC, P.** 2004. "Réseaux de Neurones,." Université de l'AVAL.
- **M.MISITI** : analyse de signaux classiques par décomposition en ondelettes , revue de statistique appliquée , tome41, n4 , 1993.
- **Mohamed Chettih, Khaled Chorfi & Kaddour Mouattah** : Modélisation de la relation pluie-débit dans les bassins sahariens à l'aide des systèmes hybrides intelligents, Laboratoire de Recherche en Ressources en Eau, Sols et Environnement, Département de Génie Civil, Faculté de Technologie, Université Amar Telidji de Laghouat,2015.
- **MOULAHOU M. A. W** Etude de Performance de deux Algorithmes d'Optimisation Globale : Le Shuffled Complex Evolution (SCE) et l'Algorithme Génétique fGAI [Rapport] : Master en Hydraulique. - Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2016.
- **Muhammad hassan** : Development of sediment load estimation models by using artificial neural networking techniques, Received: 22 February 2015/Accepted: 15 September 2015, Published online: 13 October 2015.
- **Musy.A, Balin Talamba, Higy, and Joerin**, Hydrological modelling and sensitivity analysis using TOPMODEL and simulated annealing techniques.In 2002
- **Neboit, Rene.** 1991. L'érosion des sols dans le monde. Clermond-Ferrand: Presse Universitaire Blaise Pascal.

- **N. Fritier, N. Massei, D.M. Hannah4, D.A. Lavers,B.Laignel** : Investigating spatio-temporal linkages between interannual to pluridecennial fluctuations in precipitation and flow in the seine river watershed and northatlantic climate based on wavelet and spectral analysis of hydrological and climate fields data, 2012
- **Organisation des Nations Unies pour l'éducation.** 1986. Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants. la science et la culture, Paris, France.
- **Ozgun** : Daily suspended sediment estimation using neuro-wavelet models, Received: 19 February 2008/Accepted: 26 May 2009/Published online: 18 June 2009.
- **Raj Mohan Singh:**Wavelet-ANN Model for River Sedimentation Predictions, Springer India 2013.
- **Remini, Benkhaled.** 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.
- **Tardy, Y., N'Koukou, R. und Probst, J.L.** (1989) The Global Water Cycle and Continental Erosion during Phanerozoic Time .American Journal of Science, 289, 455-483.
- **Terfous, Megnouif et Bouanani.** 2001. "Étude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien)." Revue des sciences de l'eau 14(2) pp 173-185.
- **Tian Peng, Jianzhong Zhou, Chu Zhang,and Wenlong Fu** : Streamflow Forecasting Using Empirical Wavelet Transform and Artificial Neural Networks, Published in 7 June 2017
- **T. RAJAE** : Prediction of daily suspended sediment load using wavelet and neurofuzzy combined model , Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran, 2009.
- **Traitement du signal** : bases théoriques Réf. Internet : 42295 | 2e édition.
- **Turgay Partal** : River flow forecasting using different artificial neural network algorithms and wavelet transform, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Dumlupinar University, Kutahya 43100, Turkey, 2008
- **Vanoni, V.A. (ed),** Sedimentation engineering, published by New York: ASCE, 1977.
- **Vasile., Otilia Elena.** 2008. "Contributon au prognostic de défaillances par réseaneuro-flou:."
- **VAUCLIN, M.** 1994. "Modeling of solute transport in the vadose zone." Journal of Water Science pp 81-102.
- **Walling, DE.** 1983. "The sediment delivery problem." Journal of hydrology 65 (1) pp 209237.

- **Yao Blaise KOFFI** Etude du calage, de la validation et des performances des réseaux de neurones formels à partir des données hydro-climatiques du bassin versant du Bandama blanc en Côte d'Ivoire Université de Cocody Abidjan - Doctorat 2007.
- **Y. Meyer** livre d' Ondettes et operateurs ”paru chez Hermann en 1990.
- **YTOUI Y** Modélisation De La Relation Pluie-Débit Aux Pas De Temps Mensuel ET Journalier Par Les Modèles Conceptuels Et Neuro-Flous (Application Au Bassin Versant De l'ISSER) [Rapport] : Projet de fin d'études pour l'ingénieur en Hydraulique. - Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2012.
- **ZAHER MUNDHER YASEEN** : Application of soft computing based hybrid models in hydrological variables modeling: a comprehensive review, Received: 23 August 2015/Accepted: 10 January 2016.