

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 projet de fin d'études pour l'obtention du  
diplôme *d'ingénieur d'Etat en Hydraulique*

---

**Modélisation du transport solide par les  
Modèles ANN et ANFIS couplés au filtre  
Wavelet – Application sur le bassin versant  
du Colorado et de Oued l'Isser-**

---

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2017

Par Mme **Haoued Mouissa Imene Moufida**

Sous la direction du **Pr. BERMAD Abdelmalek**

Codirigé par **M. BENGHERIFA Samir**

**Composition du Jury :**

<b>Président</b>	M. BENYOUSSEF El Hadi	Professeur	ENP
<b>Promoteurs</b>	M. BERMAD Abdelmalek	Professeur	ENP
	M. BENGHERIFA Samir	Doctorant	ENP
<b>Examineur</b>	M. LEFKIR Abdelouahab	MCA	ENSTP
<b>Examineur</b>	M. REMRAM Youcef	MCA	USTHB

# 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 مشاريع مائية، مثل السدود ولكن هذه الاخيرة تخضع لنقل المواد الصلبة . لحل مشكلة اطماء سد بني عمران في حوض الصرف "ايسر" المهددة بظاهرة نقل المواد الصلبة، أجري بحث عن نموذج لتقدير حمولة الرواسب العالقة. باستغلال معطيات القياس المتوفرة تم تطبيق عدة نماذج الذكاء الاصطناعي، التي تتمثل في نموذج الشبكة العصبية الغامضة والشبكة العصبية الاصطناعية مسبق بفلتر المويجات. يستند إختيار نموذج على معايير الأداء ومستويات المتانة.

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

## **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 the measurement data has led us to 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, 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 de 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, modèle réseau de neurones, modèle neuro flou, Wavelet.

# *Table des matières*

## ***LISTE DES TABLEAUX***

## ***LISTE DES FIGURES***

## ***LISTE DES ABREVIATIONS***

## ***INTRODUCTION GENERALE* ..... 14**

### **Chapitre 1. théorie du transport solide**

I.1. Introduction .....	17
I.2 Erosion .....	17
I.2.1 Définitions.....	17
I.2.2 Erosion Hydrique .....	18
Définition .....	18
Processus.....	18
Origine et mécanisme .....	18
Les formes de l'érosion .....	19
Quantification de l'érosion .....	20
I.3. Transport solide.....	24
I.3.1 Introduction.....	24
I.3.2 Mode de transport .....	24
Transport solide par charriage .....	27
Transport solide en suspension .....	27
Suspension intrinsèque .....	27
I.3.3 Estimation analytique du débit solide .....	27
Transport solide par Charriage .....	28
Transport Solide Total .....	28
I.3.4 Estimation des débits solides par modèles de terrain .....	29
I.3.5 Mesure du transport solide .....	31
Mesure du transport en suspension .....	32
Mesure du transport solide par charriage .....	32
Méthode de mesure en Algérie .....	33
I.3. 6 Quelques données sur le transport solide en Algérie .....	33
I.4. Conclusion .....	33

## **Chapitre 2. Théorie de modélisation du Transport solide**

II.1 Introduction .....	35
II.2 Définitions .....	35
II.3 Pourquoi modéliser ?.....	35
II.4 Théories mathématiques du transport solide .....	36
II.5 Mise en œuvre d'un modèle .....	36
II.6 Critères d'évaluation d'un modèle .....	37
II.6.1. Critères mathématiques.....	37
Le coefficient de détermination .....	37
Le critère de Nash Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970).....	38
L'erreur quadratique moyenne (RMSE: Root Mean Square Error) .....	38
L'erreur quadratique absolue (MAE : Mean Absolute Error) .....	38
II.7 Conclusion .....	39

## **Chapitre 3. Les différentes Approches adoptées**

<b>Partie 1 : Modélisation par Intelligence artificielle</b> .....	41
III.1 Introduction .....	41
III.2 Définition .....	41
III.2.1 Les réseaux neurones .....	41
III.2.2 Le neurone biologique .....	41
III.2.3 Le neurone artificiel (ou formel) .....	42
III.3 Structure d'un neurone artificiel .....	43
III.4 Comportement du neurone artificiel .....	44
III.5 Les différents types de réseaux de neurones .....	45
III.6 Les différents types de structure des réseaux de neurones .....	45
III.7 Les différentes étapes de développement d'un réseau de neurones .....	46
III.8 Propriétés des réseaux de neurones.....	48
III.9 Domaines d'application des réseaux de neurones .....	49
<b>Partie 2 : Wavelet</b> .....	50
III.1 Introduction.....	50
III.2 Notion d'ondelette ( wavelet ).....	50
III.3 Transformée continue en ondelettes.....	51
III.4 Transformée discrète en ondelettes .....	53
III.5 Définition du AMR .....	54
III.6 Algorithme de Mallat .....	54

<b>Partie 3 : WANN ET WANFIS</b> .....	56
III.1 Introduction.....	56
III.2 Méthode WANN .....	56
III.3 Organigramme du WANN.....	58
III.4 Conclusion .....	59
<b>Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude</b>	
IV.1 Introduction.....	61
IV.2 Situation géographique du bassin versant .....	62
IV.3 Caractéristique du bassin hydrographique .....	62
IV.3.1. Caractéristiques géologiques et lithologiques .....	62
IV.3.2 Le climat .....	63
IV.3.3 La pente du terrain.....	65
IV.3.4 Le couvert végétal.....	65
IV.4 Etat d'envasement du barrage de Beni Amrane .....	66
IV.5 Base de données .....	67
IV.5.1 Bassin versant du Colorado .....	67
IV.5.2 Bassin versant de Oued Isser.....	68
IV.6 Critique des données.....	69
IV.7 Conclusion .....	71
<b>Chapitre 5. Analyses et interprétations des résultats</b>	
V.1 Introduction .....	73
V.2 Les différentes étapes de programmation .....	73
V.3 Modélisation avec les données du Colorado .....	75
V.3.1 WANN au découpage automatique .....	75
Réseau de neurones avec 10 N en couche cachée .....	75
Réseau de neurones avec 20 N en couche cachée .....	76
Réseau de neurones avec 30 N en couche cachée .....	78
Conclusion des interprétations .....	78
V.3.2 WANN au découpage manuel .....	80
Réseau de neurones avec 10 N en couche cachée .....	80
Pour 50 itérations .....	80
Pour 100 itérations .....	82
Réseau de neurones avec 20 N en couche cachée .....	83
Pour 50 itérations .....	83

Pour 100 itérations .....	85
Réseau de neurones avec 30 N en couche cachée .....	86
Pour 50 itérations .....	86
Pour 100 itérations .....	88
Conclusion des interprétations.....	89
V.3.3 WANFIS.....	90
ANFIS avec 3 fonctions d'appartenance .....	90
Pour 20 itérations .....	90
Pour 30 itérations .....	92
ANFIS avec 4 fonctions d'appartenance .....	93
Pour 20 itérations .....	93
Pour 30 itérations .....	94
ANFIS avec 5 fonctions d'appartenance .....	96
Pour 20 itérations .....	96
Pour 30 itérations .....	97
Conclusion des interprétations.....	98
V.3.4 Comparaison des trois modélisations avec le meilleur filtre Wavelet.....	100
V.3.5 Estimation de la robustesse des modèles .....	100
V.3.6 Conclusion .....	101
V.4. Modélisation avec les données Algériennes .....	101
V.4.1 WANN au découpage automatique avec 20 N en couche cachée .....	102
Conclusion de l'interprétation .....	103
V.4.2 WANN au découpage manuel avec 20 N en couche cachée et 100 Itérations	104
Conclusion de l'interprétation .....	105
V.4.3 WANFIS avec 4 fonctions d'appartenances et 30 itérations .....	107
Conclusion de l'interprétation .....	107
V.4.4 Comparaison des trois modélisations avec le meilleur filtre Wavelet .....	109
V.5 Conclusion du chapitre .....	110
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>111</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>112</b>

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Valeurs de pour différentes perméabilités (Zaibak,2007).....	<b>23</b>
<b>Tableau 1.2</b> : Valeurs caractéristique des paramètres a et b d'après Benkhaled et Remini (2003).....	<b>29</b>
<b>Tableau 3.1</b> : comparaison de la valeur seuil pour le harr .....	<b>57</b>
<b>Tableau 3.2</b> : comparaison de la valeur seuil pour le db2 .....	<b>57</b>
<b>Tableau 4.1</b> : Résultats du test de Grubbs et Beck pour le bassin versant du Colorado.....	<b>70</b>
<b>Tableau 4.2</b> : Résultats du test de Grubbs et Beck pour le bassin versant de Oued Isser.....	<b>70</b>
<b>Tableau 5.1:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec 10 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier .....	<b>75</b>
<b>Tableau 5.2:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec 20 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier .....	<b>76</b>
<b>Tableau 5.3:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec 30N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier .....	<b>78</b>
<b>Tableau 5.4:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel pour 50 itérations et avec 10 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier .....	<b>80</b>
<b>Tableau 5.5:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel pour 100 itérations et avec 10 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier.....	<b>83</b>
<b>Tableau 5.6:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel pour 50 itérations et avec 20 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier .....	<b>84</b>
<b>Tableau 5.7:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel pour 100 itérations et avec 20 N en couches cachées avec Calage Validation au pas de temps journalier .....	<b>85</b>
<b>Tableau 5.8:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel pour 50 itérations et avec 30 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier .....	<b>86</b>
<b>Tableau 5.9:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel pour 100 itérations et avec 30 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier .....	<b>88</b>
<b>Tableau 5.10:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS pour 20 itérations et avec 3 fonctions d'appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier.....	<b>90</b>
<b>Tableau 5.11:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS pour 30 itérations et avec 3 fonctions d'appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier.....	<b>92</b>
<b>Tableau 5.12:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS pour 20 itérations et avec 4 fonctions d'appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier.....	<b>93</b>

<b>Tableau 5.13:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS pour 30 itérations et avec 4 fonctions d'appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier.....	<b>94</b>
<b>Tableau 5.14:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS pour 20 itérations et avec 5 fonctions d'appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier.....	<b>96</b>
<b>Tableau 5.15:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS pour 30 itérations et avec 5 fonctions d'appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier.....	<b>97</b>
<b>Tableau 5.16 :</b> Comparaison entre les différents types du modèle.....	<b>100</b>
<b>Tableau 5.17 :</b> Estimation de la robustesse des modèles.....	<b>101</b>
<b>Tableau 5.18 :</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec 20 N en couche cachée et avec Validation au pas de temps journalier (pour l'Isser).....	<b>103</b>
<b>Tableau 5.19:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel pour 100 itérations et avec 20 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier (pour l'Isser).....	<b>104</b>
<b>Tableau 5.20:</b> Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS pour 30 itérations et avec 4 fonctions d'appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier (pour l'Isser).....	<b>107</b>
<b>Tableau 5.21:</b> Comparaison entre les différents types de modèle (pour l'Isser).....	<b>109</b>

# Liste des figures

<b>Figure 1-1</b> : Les différents processus de l'érosion diffuse et leurs conséquences .	<b>19</b>
<b>Figure 1-2</b> : diagramme de Hjulstrom (1935) .....	<b>24</b>
<b>Figure 1-3</b> : Modes du transport solide (Graf,2000). .....	<b>25</b>
<b>Figure 1-4</b> : modes de transport des particules dans un courant .....	<b>25</b>
<b>Figure 1-5</b> : Bouteille d'échantillonnage .....	<b>31</b>
<b>Figure 3-1</b> : schéma représentatif du neurone biologique .....	<b>31</b>
<b>Figure 3-2</b> : schéma représentatif du neurone artificiel.....	<b>31</b>
<b>Figure 3-3</b> : comportement du neurone artificiel en fonction de la fonction de transfert .....	<b>32</b>
<b>Figure 3-4</b> : Étape de synthèse d'une identification floue sous ANFIS de Matlab...	<b>46</b>
<b>Figure 3-5</b> : ondelette (chapeau mexicain) normalisée à $\psi =1$ , et centrée au voisinage de $t = 0$ .....	<b>51</b>
<b>Figure 3-6</b> : exemple d'ondelette dilatée et translatée.....	<b>52</b>
<b>Figure 3-7</b> : ondelette contractée d'un facteur de 2 et décalée de -4.....	<b>52</b>
<b>Figure 3-8</b> : ondelette contractée d'un facteur de 2 et décalée de 1 .....	<b>52</b>
<b>Figure 3-9</b> : Transformé en ondelette continue .....	<b>53</b>
<b>Figure 3-10</b> : Transformé en ondelette discrète.....	<b>53</b>
<b>Figure 4-1</b> : Plan de situation du bassin versant de l'Oued Isser .....	<b>59</b>
<b>Figure 4-2</b> : Carte schématique des formations lithologiques du bassin versant de Oued Isser.....	<b>61</b>
<b>Figure 4-3</b> : Caractéristiques de l'humidité à la station de Dar el Beïda .....	<b>64</b>
<b>Figure 4-4</b> : La Température mensuelle à la station de Dar el Beïda.....	<b>65</b>
<b>Figure 4-5</b> : Carte schématique de végétation du bassin versant de l'Oued Isser ...	<b>66</b>
<b>Figure 4-6</b> : Situation des prélèvements dans le barrage de Béni Amrane .....	<b>67</b>
<b>Figure 4-7</b> : positionnement du fleuve Colorado ainsi que le Bassin Versant.....	<b>68</b>
<b>Figure 4-8</b> : simulation des données pour le bassin versant de Oued Isser.....	<b>74</b>
<b>Figure 5-1</b> : Organigramme du programme WANN au découpage automatique....	<b>75</b>
<b>Figure 5-2</b> : Organigramme du programme WANN au découpage manuel .....	<b>75</b>
<b>Figure 5-3</b> : Organigramme du programme WANFIS .....	<b>76</b>
<b>Figure 5-4</b> : Représentation de la corrélation ( $Q_s$ simulé- $Q_s$ mesuré) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage (découpage automatique).....	<b>79</b>
<b>Figure 5-5</b> : Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones $Q_s, Q_l$ sans et avec filtrage (découpage automatique) .....	<b>80</b>
<b>Figure 5-6</b> : Représentation de la corrélation ( $Q_s$ simulé- $Q_s$ mesuré) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage (découpage manuel) .....	<b>89</b>
<b>Figure 5-7</b> : Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones $Q_s, Q_l$ sans et avec filtrage (découpage manuel).....	<b>90</b>
<b>Figure 5-8</b> : Représentation de la corrélation ( $Q_s$ simulé- $Q_s$ mesuré) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage (WANfis).....	<b>102</b>
<b>Figure 5-9</b> : Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones $Q_s, Q_l$ sans et avec filtrage (WANfis) .....	<b>102</b>

<b>Figure 5-10</b> : Représentation de la corrélation (Qs simulé-Qs mesuré) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage (découpage automatique) (pour l'Isser).....	<b>103</b>
<b>Figure 5-11</b> : Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones Qs, Ql sans et avec filtrage (découpage automatique) (pour l'Isser) .....	<b>104</b>
<b>Figure 5-12</b> : Représentation de la corrélation (Qs simulé-Qs mesuré) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage (découpage manuel) (pour l'Isser).....	<b>106</b>
<b>Figure 5-13</b> : Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones Qs, Ql sans et avec filtrage (découpage manuel) (pour l'Isser).....	<b>106</b>
<b>Figure 5-14</b> : Représentation de la corrélation (Qs simulé-Qs mesuré) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage (WAnfis) (pour l'Isser) .....	<b>108</b>
<b>Figure 5-15</b> : Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones Qs, Ql sans et avec filtrage (WAnfis)(pour l'Isser) .....	<b>109</b>

# Liste des abréviations

**NASH** : Coefficient de NASH-SUTCLIEFFE ;

**R<sup>2</sup>** : 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

## ***INTRODUCTION GENERALE***

En Algérie, pays à dominance aride et où l'eau est au coeur des préoccupations de la société et des pouvoirs publics, 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 dans laquelle se produisent des entrées d'eau (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 de plusieurs facteurs que nous citerons dans le chapitre 1 ainsi que des données de mesures hydrométriques accumulées au niveau des bassins jaugés, qui permettent de quantifier valablement les débits des cours d'eau et d'analyser les mécanismes hydrologiques dans le temps et dans l'espace des données qui hélas constituent une grande complexité et un handicap majeur ; afin de pallier à ce problème plusieurs couplages modèles/filtre ondelette (Wavelet) sont proposés dont WANN et le WANFIS que nous présentons dans le chapitre 3.

La question qui devrait être posée est comment ces modèles couplés avec un filtre inspirés de la biologie se comportent-ils alors en simulation et en prévision sur Oued Isser ? Ce travail de recherche permettra de vérifier l'efficacité des réseaux de neurones et du Anfis couplés avec le filtre dans la modélisation du transport solide.

Pour atteindre l'objectif de cette étude, ce mémoire s'articule autour de trois grandes parties (généralités, les différentes approches adoptées et analyses et interprétation des résultats). La première partie (généralités) est composée de trois chapitres traitant la théorie du transport solide, la théorie de la modélisation du transport solide et de la zone d'étude. La deuxième partie (les différentes approches adoptées), 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 : théorie du**<sup>1</sup> **transport solide**

## Problématique de l'envasement

Dans de nombreux pays du monde, le transport de sédiments dans les réseaux hydrographiques des bassins versants et leurs dépôts dans les retenues pose aux exploitants de barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse, non seulement la capacité utile est progressivement réduite, mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile (Remini, 2003).

Le problème d'envasement des barrages n'est pas un problème propre à l'Algérie, beaucoup de pays dans le monde souffre du problème surtout dans les zones arides et semi-arides, où le manque de ressources hydrique est accentué par l'érosion des sols qui peut atteindre les 5000 t/km<sup>2</sup>/an contre 30 à 50 t/km<sup>2</sup>/an en Europe (Abdeli, 2007).

En Afrique du Sud la moyenne d'envasement pour 170 barrages d'un volume allant de 0,5 à 5000 Hm<sup>3</sup> est de 0,35%, ce qui engendre une perte de capacité de 105 Hm<sup>3</sup> par an ce qui correspond à une perte économique de 21,2 Millions de Dollars (Braune, 1989).

Le Maghreb est considéré comme le plus touché par le problème d'érosion et d'envasement en Afrique, surtout si on se réfère aux travaux de Waling (1984) qui a lancé une fourchette de l'érosion spécifique de 1000 à 5000 t/km<sup>2</sup>/an. Les trois pays du Maghreb disposent de 230 barrages d'une capacité totale de 23 milliards de m<sup>3</sup> dont 61% reviennent au Maroc, 23 % à l'Algérie et 16% à la Tunisie (Remini, 2003), ces barrages enregistrent une perte annuelle de capacité de 125 Hm<sup>3</sup>.

### I.1. Introduction

L'Afrique du Nord, qui subit aussi les changements climatiques qui s'opèrent à travers le monde est en proie à une dynamique érosive désastreuse. Outre les pertes en terres fertiles, les sédiments transportés en suspension par les cours d'eau constituent des dépôts importants dans les réservoirs hydrauliques. En Algérie, les pertes en terre sont estimées à 120 millions de tonnes par an et la quantité de sédiments déposés dans les barrages ne cesse d'augmenter, passant de 484 millions de m<sup>3</sup> en 1996 [4] à 700 millions de m<sup>3</sup> en 2000 . À l'heure actuelle, les 52 grands barrages du pays reçoivent annuellement 32 millions de m<sup>3</sup> de sédiments, ce qui réduit de 0,6 % par an leur capacité de stockage estimée à 5,2 milliards de m<sup>3</sup>.

### I.2. Erosion

#### I.2.1 Définition

Le terme érosion vient du latin « ERODERE » qui signifie « Ronger », donc l'érosion est le détachement des particules du sol de leur emplacement initial pour les transporter en aval. Malgré que l'érosion a un effet néfaste sur les zones amonts, sauf qu'elle enrichit les plaines qui constituent les principaux terrains agricoles.

L'érosion apparaît sous plusieurs formes (Wikipedia) :

- L'érosion hydrique.

- l'érosion sous l'action du vent (éolienne) qui est considérée négligeable devant le transport hydrique.
- L'érosion thermique : le sol est dégradé et les roches effritées à cause de la différence de température.
- L'érosion chimique : comprenant la perte de nutriments et la salinisation.
- L'érosion causée par les êtres vivants : parmi les êtres vivants qui causent le plus de dégâts c'est bien l'homme, en dégradant directement le sol ou en favorisant d'autres facteurs.

### I.2.2 Erosion hydrique

#### ❖ Définition

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules du sol. Elle se définit comme la perte de sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt.

#### ❖ Processus

Il s'agit d'interaction de plusieurs mécanismes complexes tels que :

- Infiltration : basée sur la capacité d'infiltration et la capacité de stockage
- La capacité de rétention superficielle : qui est en fonction du type de sol, sa structure de surface tel que le couvert végétal
- Le ruissellement : lorsque le volume non infiltré dépasse la capacité de rétention superficielle du sol

#### ❖ Origine et mécanisme

La pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine de l'arrachage, du transport et du dépôt de la terre enlevée. L'arrachage est due à la fois aux gouttes d'eau (par rejaillissement) et aux eaux de ruissellement, dont le transport est assuré par elles.

- La pluie : Le sol subit un martèlement considérable causé par les gouttes de pluie. Si le sol est de nature poreuse, les premières gouttes subiront une infiltration. Mais lorsque la couche superficielle s'humidifie, trois processus se développent simultanément :

- la dégradation de la structure ;
- la formation d'une pellicule de battance ;
- l'érosion par splash (par rejaillissement)

- Le ruissellement : Lors du passage de l'eau, les grains se détachent et sont transportés, grâce à la vitesse de l'eau. On en conclue que la vitesse est un paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement superficiel.

La réduction de la vitesse de ruissellement revient à pratiquer des techniques antiérosives, par exemple :

- d'aménagement fonciers réduisant la pente de la parcelle;
- de techniques améliorant l'infiltration;
- des techniques culturales augmentant la rugosité de la surface du sol;

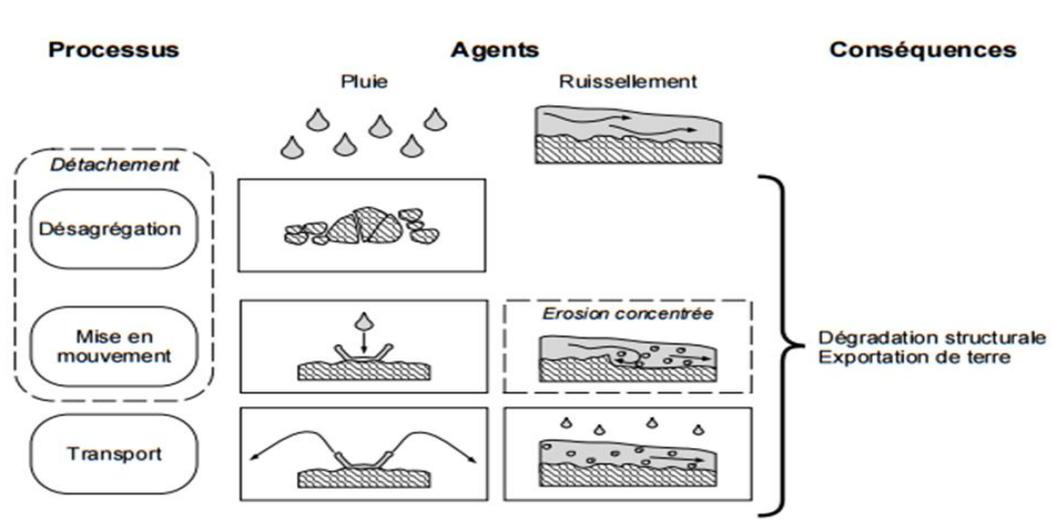


Figure 1-1 – Les différents processus de l'érosion diffuse et leurs conséquences

## ❖ Les Formes de l'érosion

### a- L'érosion en nappe ou "sheet erosion"

L'érosion en nappe est liée à 2 mécanismes

- Le détachement des particules de terre causé par le choc de gouttes des pluies (effet splash).
- Le ruissellement lorsque l'intensité devient supérieure à la vitesse d'infiltration. Cette forme d'érosion est caractéristique des sommets de bassin versant. Le martèlement des pluies (splash) détache les particules et les maintient en suspension par turbulence.

L'érosion en nappe a un effet érosif maximal au sommet des versants ou à l'aval d'un obstacle. Au bas des versants, au contraire, il s'agit d'accumulation.

### b- L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill erosion)

Un micro-filet ou une rigole est une dépression suffisamment petite pour pouvoir être supprimée par les façons culturales. Sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigole succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux.

A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles.

### c- L'érosion par ravinement (Gully érosion)

La ravine est une rigole approfondie (figure 4) où se concentrent les filets d'eau. La rigole se transforme en ravine lorsque sa profondeur interdit son nivellement par des simples instruments aratoires. Le ravinement constitue un stade avancé de l'érosion. Les ravines peuvent atteindre des dimensions considérables.

L'approfondissement des ravines remonte du bas vers le haut de la pente (érosion régressive). Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en "badlands" et explique également la sape d'ouvrages (ponts, radiers, digues filtrantes...). Lorsque l'aménagement des ravines n'est pas prolongé suffisamment en aval.

### d- La sédimentation

Les particules arrachées aux terres se déposent entre le lieu d'origine et les mers en fonction :

- de leur dimension
- de leur densité
- de la capacité de transport du ruissellement ou de la rivière.

## ❖ Quantification de l'érosion hydrique

La quantification de l'érosion hydrique peut se faire soit :

- Par la mesure directe du transport solide au niveau des stations de mesure.
- Par des formules expérimentales. On citera dans ce qui suit quelques formules les plus utilisées.

### a- Formule de Henin 1950

Cette formule symbolise la relation existante entre l'érosion et les facteurs susceptibles de la favoriser ou de la limiter.

La quantification de l'érosion spécifique "Es" est donnée par la formule ( 1,1)

$$Es = \frac{I_p I S}{K V_e} \quad (1,1)$$

Avec

$I_p$  : Intensité des précipitations; [mm/s]

$I$  : Pente du bassin versant;

Les facteurs " $I_p$ " et " $I$ " favorisent l'érosion

$S$  : Susceptibilité des sols;

$K$  : Perméabilité; [m/s]

$V_e$  : Végétation.

### b- Formule de Wischmeier et Smith (Universal Soil Loss Equation - 1958)

Il s'agit d'un modèle d'érosion, permettant d'évaluer les zones à haut risque et de quantifier les pertes de sol moyennes annuelles.

Le modèle permet l'estimation des quantités de sédiments qui seront transportées par cours d'eau. La formule s'écrit :(Schmitt,1992)

$$A = 2,24RKLSCP \quad (1,2)$$

Avec

$A$  : pertes annuelles de sol (t/ha/an)

$R$  : facteur d'agressivité climatique.

$K$  : facteur sol.

$S$  : facteur pente.

$C$  : facteur agronomique.

$P$  : facteur des aménagements antiérosifs

c- Formule de Fournier (1960)

$$Ass = \left(\frac{1}{36}\right) \left(\frac{P_m^2}{P_{am}}\right)^{2,65} \left(\frac{h^2}{S}\right)^{0,46} \quad (1,3)$$

Avec

Ass : apport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)

P<sub>m</sub> : précipitations moyennes mensuelles du mois le plus pluvieux (mm)

P<sub>am</sub> : précipitations annuelles (mm)

h : dénivelée moyenne (m)

S : superficie du bassin versant (km<sup>2</sup>).

d- Formule de Tixeront (1960)

Basée sur les données recueillies dans 32 bassins algériens et 9 bassins tunisiens sur une durée comprise entre 2 et 22 ans.

$$Ass = 354E^{15} \quad (1,4) : \text{Pour les bassins Tunisiens.}$$

$$Ass = 92E^{21} \quad (1,5) : \text{Pour la région Est Algérien.}$$

$$Ass = 200E \quad (1,6) : \text{Pour la région centre Algérien.}$$

Avec :

Ass : apport solide spécifique en t/km<sup>2</sup> /an

E : Ecoulement en mm.

e- Formule de Gravitovic (1960)

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnelle à la température, à la pluie et à un coefficient d'érosion.

$$Es = 3,14 T P_0 \sqrt{Z^3} \quad (1,7)$$

Avec :

Es : érosion spécifique dans le bassin versant (T/km<sup>2</sup> /an)

$$T : \text{coefficient de température} = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0,1 \quad (1,8)$$

t<sub>0</sub> : température moyenne annuelle en °c.

$P_0$  : pluie annuelle en (mm)

$Z$  : coefficient d'érosion

#### f- Formule de L'A.N.R.H (1970)

$$T_{ss} = 26,62 I_e + 5,071 IP + 9,77 C_t - 593,59 \quad (1,9)$$

Avec :

$T_{ss}$  : transport solide spécifique moyen annuel (T/Km<sup>2</sup> /an)

$I_e$ : indice lithologique (%).

$IP$  : indice des précipitations (%).

$C_t$  : coefficient de torrencialité.

Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :  $I_e > 10\%$  et  $IP > 300$

#### g- Formule de la SOGREAH

Basée sur les données de 30 bassins algériens, de superficie comprise entre 100 et 300 km<sup>2</sup>, soumis à une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 1000 mm.

$$A_{ss} = \alpha \cdot E^{0.15} \quad (1,10)$$

Avec :

$A_{ss}$  : apport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)

$\alpha$  : coefficient dépendant de la perméabilité du sol

$E$  : Ecoulement annuel (mm)

Tableau (1,1) : Valeurs de  $\alpha$  pour différentes perméabilités (Zaibak,2007)

Perméabilité	$\alpha$
Forte	8.5
Moyenne	75
Moyenne à faible	350
Perméabilité faible	1400
Imperméable	3200

### I.3. Transport Solide

#### I.3. 1 Introduction

Le processus d'érosion, entraînement, transport, dépôt de sédiments est très complexe le détachement des particules dans le processus d'érosion se produit suite à l'énergie cinétique de l'impact de la goutte de pluie, ou les forces générées par l'écoulement de l'eau, dès que la particule se détache elle est entraînée et transportée, ce transport dépend des dimensions et du poids de la particule, aussi des forces exercées par l'écoulement sur la particule (Vanoni,1977).

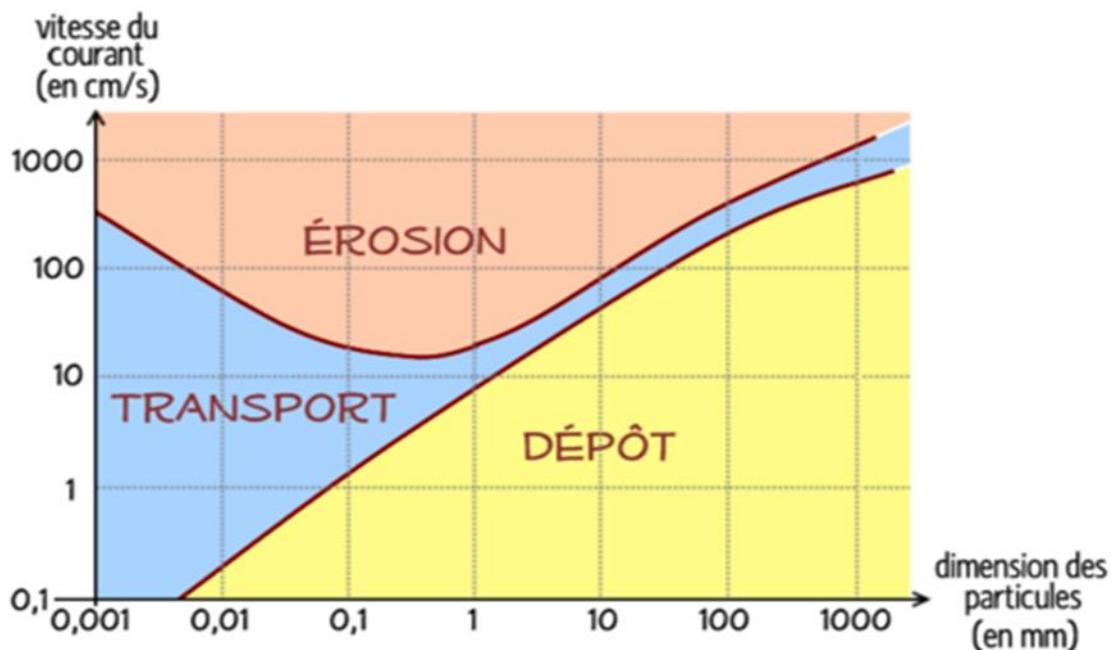


Figure 1- 2 :Diagramme de Hjulstrom (1935)

Hjulstrom a montré qu'il existait trois zones qui dépendent des dimensions des particules ainsi que de la vitesse du courant ce qui permet de distinguer plusieurs modes de transport

#### I.3. 2 Modes de Transport

Le transport solide total de sédiments est l'ensemble du transport des particules qui passent dans une section du cour d'eau, les sédiments sont transportées par plusieurs modes (Graf,2000)

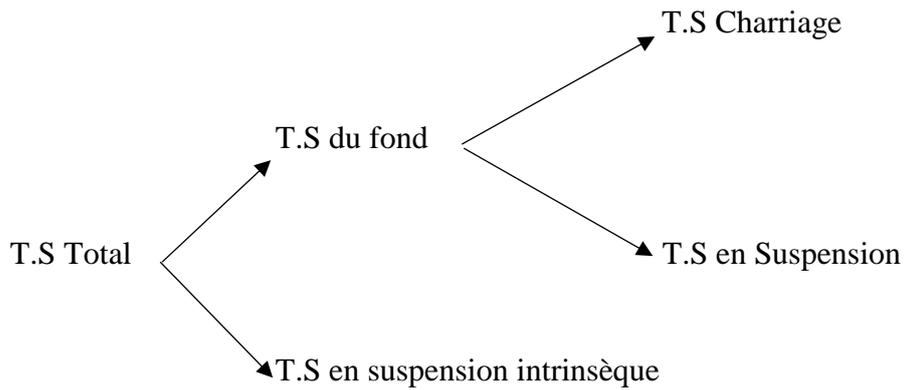


Figure (1,3) :Modes du transport solide (Graf,2000).

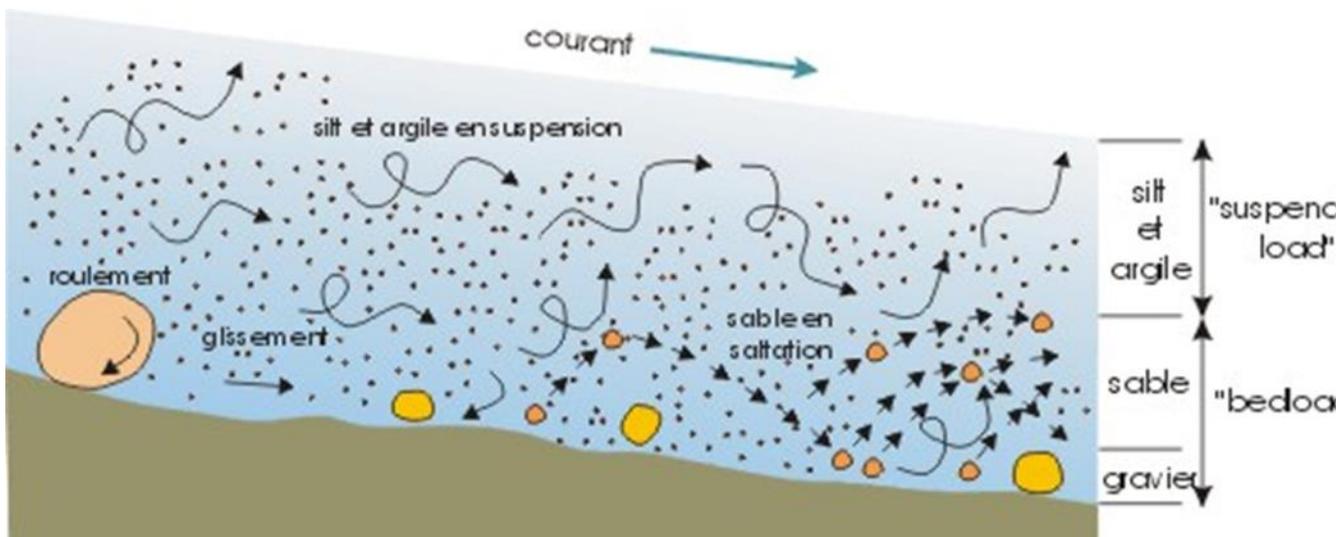


Figure 1-4 :Modes de transport des particules dans un courant (Boulvain, 2004)

On distingue deux modes de transport solide

- Par charriage où les particules se déplacent par roulement et glissent sur le fond avec une vitesse inférieure à celle de l'écoulement
- En suspension où les particules se déplacent au sein de l'écoulement avec une vitesse de même ordre de grandeur que celle du fluide
- Il y a des auteurs qui considèrent un troisième mode intermédiaire : la saltation où les particules se déplacent par des bonds en alternant le charriage et la suspension ( Probst , J.L et al. 1989 et Cardoso , A.H 1994 )

### ❖ Transport solide par charriage

Représente le déplacement de sédiments grossiers (sables, gravier, blocs) de diamètre supérieur à 0,1 mm par roulement ou glissement au voisinage immédiat du fond du cours d'eau et parcourant des distances relativement petites .

Les mesures dans ce cas sont très onéreuses à cause des perturbations de l'écoulement, de ce fait on se contente généralement sur l'étude sur un modèle réduit afin de déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total (Couvert, B. 1994 et al : Du voisin, J 1989)

### ❖ Transport solide en suspension

Représente le déplacement de sédiments fins ( argiles , limon et sables fins ) de taille micronique , maintenues en suspension par flottation où la turbulence est le facteur principal ( Van Rijn , 1984 )

Quelques valeurs indicatives permettent de délimiter les deux modes de transport, ces valeurs utilisent le rapport entre la vitesse de l'écoulement  $V$  et la vitesse de chute de particules  $W$  ( Graf 1971 )

- $\frac{V}{W} > 0,1$  début de transport par charriage
- $\frac{V}{W} > 0,4$  début de transport en suspension

### ❖ Suspension intrinsèque

Si les particules ne sont jamais en contact avec le fond, elles se déplacent en étant emportées par l'écoulement. Ceci concerne les particules très fines

### I.3.3 Estimation analytique du débit solide

De nombreux hydrauliciens ont cherché à établir des relations permettant d'estimer le débit solide d'un cours d'eau, à partir de nombreuses mesures en modèles réduits ou sur fleuves, ses différentes formules donnent rarement des résultats comparables, car elles ont été établies dans des conditions différentes, il n'y a pas de formules universelles de transport solide (Dégoutte, 2000).

### ❖ Transport solide par Charriage

- Duboys (1879) : (Vanoni,1977)

C'est l'une des premières formules de détermination du débit solide.

$$g_s = \psi \tau (\tau - \tau_c) \quad (1,11)$$

Avec

$\tau$  : contrainte tractrice au fond,

$\tau_c$  : contrainte tractrice critique.

$g_s$  : paramètre en fonction de la taille des grains.  $G_s$  : Débit solide par unité de largeur du cour d'eau.

- Meyer-Peter Müller (1948) : (Dégoutte,2000)

Elle donne la capacité de transport solide quand les grains sont plus ou moins uniformes

$$\frac{q_s}{\sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right) g d^3}} = 8 (\beta \tau^* - 0,047)^{\frac{3}{2}} \quad (1,12)$$

Avec :

$q_s$  : débits solides en m<sup>3</sup> /s/m de largeur, exprimé en volume des grains.

$\beta$  : Paramètre adimensionnel compris entre 0,35 et 1 qui dépend de la rugosité des grains et du fond.

### ❖ Transport Solide Total

- Engelund et Hansen (1967) : (Vanoni,1977)

Cette formule donne le transport solide total en volume de grains

$$\frac{q_s}{\sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right) g d^3}} = 0,05 \left( \frac{K^2 R^{\frac{1}{3}}}{g} \right) \tau^{5/2} \quad (1,13)$$

Avec

$K$  : coefficient de Strickler global du lit mineur.

Cette formule a été établie pour : 0,15 mm < d < 5mm (sable)

- Karim et Kennedy (1981) : (Cheniti, 2004)

C'est une formule qui donne le transport solide en  $m^3/s/m$  de largeur du cour d'eau.

$$\frac{q_s}{\sqrt{g \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) d_{50}^3}} = 0,00151 \left[ \frac{U}{g \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) d_{50}} \right]^{3,369} \left[ \frac{u^* - u_c^*}{g \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) d_{50}} \right]^{0,84} \quad (1,14)$$

Avec :

U : vitesse d'écoulement,

$u^*$  : vitesse de frottement,

$u^* c$  : Vitesse critique de frottement.

En plus de ces formules les plus connues, il y a :

- Schoklitsch 1934
- Schields 1936
- Einstein- Broun 1950
- Laursen 1958.
- Blench 1966.
- Colby 1964.
- Tofaletti (1969).

### **I.3. 4 Estimation des débits solides par modèles de terrain**

La mobilisation et le transport des matériaux solides par l'écoulement de l'eau représentent deux phénomènes distincts, mais liés entre eux.

Le transport solide en suspension peut s'exprimer par :

$$Q_s = Q_L C_s \quad (1,15)$$

Avec :

$Q_s$  : débit solide,

$Q_L$  : débit liquide,

$C_s$  : Concentration de sédiments.

Depuis longtemps, on a essayé de corréler les débits solides aux débits liquides et de déterminer une relation qui permettait d'estimer les premiers à partir des seconds.

A ce titre, nous citons les travaux de Jakuschoff (1932) sur les rivières de Turquie et ceux de Straub (1936) sur le fleuve du Missouri (USA) (Einstein,1950;Leopold et al,1953).

La concentration des sédiments en suspension  $C_s$  et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance  $Y = a X^b$  (Walling et al,1981).

$$C_s = a Q_L^{b-1} \quad (1,16)$$

Une autre relation empirique communément appelée courbe du transport solide (Cambell et al, 1940 ; Crawford, 1991) lie le débit solide au débit liquide :

$$C_s = a Q_L^b \quad (1,17)$$

Ce type de relation a été proposé dès 1895 par Kennedy, (Touaïbia,2000). Depuis, plusieurs chercheurs ont essayé d'identifier surtout la valeur de l'exposant  $b$ . Leopold et al (1953) proposent pour les rivières de l'ouest des Etats Unis d'Amérique des valeurs de  $b$  variant entre 2 et 3, d'autres auteurs tels que Wood (1977), Walling et Webb (1981,1982), ainsi que Probst et Bazerabachi (1986) les limitent entre 1 et 2, en fonction des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques des bassins versants, ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau.

En Algérie beaucoup d'auteurs ont travaillé sur le développement de pareils modèles pour l'estimation du débit solide en fonction du débit liquide. Les modèles ont varié selon la zone d'étude, mais aussi selon une échelle temporelle, donc ces modèles dans l'espace et dans le temps, ce n'est en aucun cas des modèles intrinsèques.

Tableau (1,2) : Valeurs caractéristique des paramètres a et b d'après Benkhaled et Remini (2003)

Equation	a	b	source
$Q_s = Q_L C_s$	4000 à 4446000	2 à 3 0,72 à 1,02 1,2 1,63 2 à 3	Leopold et al (1953) Fleming (1969) Dawdy (1967)
$C_s = a Q_L^{b-1}$	0,0004		Battala et al (1992) Vononi (1977)

Benkhaled et Remini (2003) ont élaboré une étude très intéressante sur les paramètres a et b de la relation puissance débit liquide- débit solide dans la région de Oued Wahrane pour différentes échelles temporelles, même à l'échelle des crues.

Ils ont mis en évidence la complexité de trouver une relation unique pour ces paramètres, ils ont conclu que l'exposant b est relié aux caractéristiques de l'écoulement, tandis que a est considéré comme paramètre représentatif de l'état du sol. L'exposant b varie en général entre 1 et 2 et a varie dans des intervalles plus larges, même intervalle trouvé par Achite et Meddi (2004) pour Oued Haddad situé dans le Cheliff, sur le même bassin Zaïbak a trouvé des valeurs proches mais toujours différentes.

On voit bien que ces modèles sont des modèles locaux et temporels aussi, donc difficile de les généraliser, ou de garder pour une région le même modèle unique, le climat est en mutation, le sol aussi, donc la validité de ces modèles est toujours limitée dans le temps.

### I.3. 5 Mesure du transport solide

La quantité de sédiments transportés par un cours d'eau, à une section donnée peut-être mesurée par plusieurs méthodes (Musy,2002)

- Collecte d'échantillons.
- Levé topographique et bathymétrique de lacs ou de retenues pour évaluer l'apport global de sédiments.
- Utilisation de traceurs de sédiments dont les signatures permettent surtout d'évaluer les taux de sédimentation.

### ❖ Mesure du transport en suspension

Elle consiste à mesurer une concentration de matière en suspension, une large gamme d'options est disponible, la méthode la plus rigoureuse pour obtenir la charge solide en suspension consiste à procéder, comme pour la mesure du débit, à une intégration de différentes concentrations et de vitesses sur plusieurs verticales, cette technique nécessite un matériel adapté.

Le dispositif de prélèvement le plus simple est la bouteille d'échantillonnage



Figure (1,5) : Bouteille d'échantillonnage.

### ❖ Mesure du transport solide par charriage

- Par échantillon: cette mesure a été mise au point pour l'hydraulique fluviale, elle consiste à mettre des masses dans le courant
- marquage des sédiments: par un traceur radioactif. On injecte à un endroit précis du lit des sédiments marqués et on relève leur dispersion par les crues.
- Globale : en utilisant une fosse à sédiments, après chaque crue on procède à une mesure de la qualité de sédiments déposés. Lorsque la capacité de remplissage du piège est atteinte on procède à un curage .
- La pesée quasi continue : ce système est implanté dans une partie canalisée à l'amont d'un seuil. Sur le fond bétonné du canal une saignée oblique recueille les matériaux. L'ouverture d'une vanne latérale crée un vortex qui entraîne les matériaux en contrebas sur une trémie qui les sépare de l'eau. Un tamis assure une dernière réparation où n'est conservée que la fraction de dimension supérieure à 4mm. Un tapis roulant achemine les graviers vers une balance enregistreuse puis, après pesée, ils sont rejetés dans la rivière en aval du seuil.

### ❖ Méthode de mesure en Algérie

En Algérie, la méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur la plupart des cours d'eau est l'échantillonnage uni-ponctuel. Le prélèvement d'un échantillon se fait par l'observateur à l'aide de bouteilles de 0,5 à 1 litre de contenance. Les échantillons prélevés sont analysés par les procédés classiques (filtrage sur filtre millipore et la charge en suspension est mesurée par pesée des filtres).

L'évaluation durant une crue est effectuée de la même façon que pour les débits liquides, sur la base d'un dépouillement des lectures. Avant le tracé du turbidigramme, l'opération de report sur le limnigramme. Le nombre de prélèvements et leur échelonnement correct dans le temps conditionnent la fiabilité et la précision des graphes temporels de la concentration des sédiments en suspension

### I.3. 6 Quelques données sur le transport solide en Algérie

Les bassins versants du Tell algérien dominés par un climat semi-aride sont caractérisés par une pluviométrie saisonnière qui a un impact direct sur l'action érosive et notamment sur le transport solide .

Les valeurs de la dégradation varient d'un bassin versant à un autre , nous citons par exemple

- 1160 t /km<sup>2</sup> pour l'oued Mazafran ( cotiers algérois ).
- 2300 t/ km<sup>2</sup> pou l'Isser à Lakhdaria.
- 490 t/km<sup>2</sup> pour oued soummam à sidi Aich.
- 680 t/km<sup>2</sup> pour oued Medjerda à Souk Ahras ( Bourouba,M 1997).
- 150 t/km<sup>2</sup> pour la Macta au barrage Cheurfa ( Bourouba,M 1998).

Les périodes responsables du transport solide sont l'automne et le printemps car précédé de l'été , le sol se dessèche et se fissure ce qui permet aux premières averses de l'automne de laver le sol de ces éléments fins , ces périodes représentent une courte période de forte érosion qui dure entre 2 et 4 mois ( Terfous,A et al. 1999 ) (Bourouba , M 1997,1998).

### I.4. Conclusion

On conclut avec quelques travaux effectués sur le transport solide en Algérie

Parmi les travaux concernant l'érosion et le transport solide effectués en Algérie on trouve :

#### 1. Medinger (1957)

Il a procédé aux premières séries de mesures durant la période de 1946 à 1957 et donné des estimations ( peu satisfaisantes ) des précipitations , des écoulements liquides

et transport solide en vue d'établir des expressions entre débits et concentrations instantanées (Demmak,1982).

## **2. Tixeront (1960)**

Ses travaux étaient basés sur les données de 32 bassins algériens et 9 tunisiens , il a procédé à la correction et l'homogénéisation des séries puis après les avoir regroupés en trois classes suivant le critère régional,il a essayé de mettre en évidence les facteurs : précipitation,écoulement annuel,répartition saisonnière des pluies et le couvert végétal dans la dégradation du sol.

## **3. Capolini (1965-1969)**

Il a basé son travail sur l'étude morphométrique des réseaux sur le bassin de Cheliff afin de mettre en clair le processus d'érosion qui conditionne les transports solides, l'application a permis de quantifier les débits solides et d'établir une relation statistique entre l'érosion spécifique des bassins et le coefficient de torrentialité.

## **4. Sogreah (1969)**

Les auteurs ont tenté de définir l'importance du transport solide basée sur les données d'observations recueillies au niveau de 9 barrages et 18 stations hydrométriques,leurs résultats ont été présentés sous forme d'une relation calquée sur la relation de Tixeront.

## **5. Demmak (1982)**

L'auteur a défini l'importance des indices lithologiques,pluviométriques et géomorphologiques dans les apports solides.

Il y'a eu aussi d'autres chercheurs qui ont travaillé sur le transport solide tel que :Heush Lahlou,Arabi,Meddi,Roose,Bourouba,Megnounif,Terfous,Achite,Touabia,Lefkir...

# **Chapitre 2 : Théorie de modélisation du Transport solide**

## **II.1. Introduction**

la recherche de modèles reliant les paramètres hydroclimatiques (précipitations, écoulement et transport solide ) a fait l'objet de nombreuses études Wailling D.E et al (1981),Demmak A. (1982),Megnounif A et al. (2000,2003),Katlan Zet al (1987) ...etc,leur objectif est d'expliquer les phénomènes de l'écoulement et du transport solide et de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des bassins versants où les mesures sont rares.

Tous ces paramètres font que les modèles diffèrent d'un auteur à un autre ; Mais qu'est-ce-qu'un modèle et la modélisation.

## **II.2. Définitions**

- D'après le Dictionnaire de l'Environnement, le modèle est " *une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir* ".
- La modélisation est une représentation mathématique de la relation qui lie les entrées et les sorties d'un processus par des équations, si celles-ci sont algébriques le modèle est dit «statistique»,si elles sont différentielles ou aux différences récurrentes le modèle est dit «dynamique».
- Variables indépendantes ou variables d'entrée représentent des données d'entrée du modèle. Dans notre cas , il s'agit essentiellement des mesures du débit liquide. Certains modèles utilisent des données d'entrée spatialement distribuées.
- Variables dépendantes ou variables de sortie sont définies par des débits solides simulés à l'exutoire du bassin versant.
- Variables d'état,celle-ci permettent de caractériser l'état du système modélisé,qui peuvent évoluer en fonction du temps dans un modèle dynamique.

## **II.3. Pourquoi modéliser ?**

La modélisation peut avoir trois objectifs :

- La prévision qui permet de déterminer le débit solide à l'exutoire
- La simulation c'est-à-dire l'analyse du comportement du système pour un signal particulier pour compléter des données manquantes et la prédétermination des crues.
- La détection qui permet de reproduire l'entrée d'un système en ayant sa réponse.

## **II.4. Théories mathématiques du transport solide**

Il existe quatre types de modèles mathématiques permettant de quantifier et prévoir la quantité du solide transporté.

### **1. Modèle empirique**

Il est basé sur les lois de la physique et ne comportant aucun paramètre, il est utilisé afin de déterminer une corrélation entre le débit solide-le débit liquide basé sur l'analyse de régression nous citerons le modèle de WISCHMEIER et SMITH 1960 Dans notre étude la relation qui lie les deux variables  $Q_s$ - $Q_l$  est une relation déterministe, c'est-à-dire que la relation est déterminée par un principe de causalité (cause, effet).

### **2. Modèle conceptuel**

Il est basé sur la dynamique de l'érosion et les différents mécanismes et processus élémentaires nécessitant une période de calage relativement longue nous citerons le modèle de VAN SICKLE et BESCHTA, 1983.

### **3. Modèle physique**

Il est basé sur les lois de la physique nécessitant l'introduction d'un nombre élevé de paramètres.

### **4. Modèle à boîte noire**

Il vise à transformer l'entrée du système en une réponse sans attacher d'importance à la façon de le faire. Il suffit seulement que le modèle soit capable de simuler la réponse du système étudié, ces principaux modèles sont:  
Les réseaux de neurones artificiels, la logique floue, les algorithmes génétiques, et les systèmes neuro-flou.

## **II.5. Mise en œuvre d'un modèle**

### **1. Paramètres des modèles**

Consiste à établir une relation entre les variables d'entrée et les variables de sortie puis estimer tous les paramètres susceptibles d'entrer en jeu s'il y'a moyen de le faire.

## 2. Calage du modèle

C'est-à-dire l'ajustement des entrées afin d'obtenir les sorties (observations), la calibration se fait sur les deux tiers de la série observée.

## 3. Validation du modèle

Permet de vérifier la solidité du calage en terme d'indépendance du jeu de paramètres vis-à-vis des données d'entrée et donc la capacité du modèle à fournir des simulations (ou des prévisions) dans diverses situations hydrologiques (Quesney, 1999).

Il est donc important de faire la différence entre le calage et la validation. La première opération assure l'adéquation des paramètres tandis que la seconde évalue l'adéquation du modèle tout entier (Fortin 1989, V.Rakem 1999).

## II.6. Critères d'évaluation d'un modèle

### Critères mathématiques

#### ❖ Le coefficient de détermination, $R^2$

Il consiste à estimer la dispersion entre la série des observées et des simulées, ainsi que le degré de corrélation entre deux variables le débit liquide et le débit solide si sa valeur est égale à « 0 » cela signifie qu'il n'y a aucune corrélation entre les deux variables.

S'il est égal à « 1 » cela signifie qu'il y a une très bonne corrélation.

Le  $R^2$  est donné par la relation :

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0 - \bar{Q}_0) (Q_m - \bar{Q}_m)}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (Q_0 - \bar{Q}_0)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^T (Q_m - \bar{Q}_m)^2}} \right]^2 \quad (2.1)$$

Avec :

$Q_0$  : représente les valeurs observées;

$Q_m$  : sont les valeurs simulées;

$\bar{Q}_0$  : est la moyenne des valeurs observées;

### ❖ Le critère de Nash Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970)

Il donne une indication sur la robustesse (pouvoir prédictif) des modèles utilisés, il varie de  $-\infty$  à 1

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0 - Q_m)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0 - \bar{Q}_0)^2} \quad (2.2)$$

- Si  $E=1$ , la modélisation est parfaite c'est-à-dire les simulées et les observées sont les mêmes.
- Si  $E=0$ , la modélisation est bonne c'est-à-dire les prédictions du modèle sont aussi précises que la moyenne des données observées.
- Si  $E<0$ , la modélisation est moins bonne.

### ❖ L'erreur quadratique moyenne (RMSE: Root Mean Square Error)

Couramment utilisée pour décrire l'erreur statistique, la performance du modèle est retenue selon une valeur minimale du RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_0} \sum_{t=1}^T (Q_m - Q_0)^2} \quad (2.3)$$

Mais des études statistiques (établies par SINGH et al, 2004) l'ont normalisé et ont développé le RSR (ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured). Il est calculé comme le rapport entre l'erreur quadratique moyenne et l'écart type des données mesurées comme le montre l'équation :

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV\ obs} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^T (Q_m - Q_0)^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (Q_m - \bar{Q}_0)^2}} \quad (2.4)$$

### ❖ L'erreur quadratique absolue (MAE : Mean Absolute Error)

C'est la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre les prévisions et les observations. La méthode est fondée sur la nullité de la moyenne des résidus. Mais la moyenne de leurs carrés n'est généralement pas nulle.

Cette moyenne n'est autre que la VARIANCE RÉSIDUELLE que l'on cherche à minimiser (Cf. le théorème de König)

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^T |Q_m - Q_0|}{n} \quad (2.5)$$

## **II.7. Conclusion**

Dans les chapitres suivants nous allons utiliser un des modèles à boîte noire qui utilise l'intelligence artificielle : le modèle réseau de neurones en passant ou pas par le filtrage wavelet. L'étude de ce modèle avec et sans filtrage a pour but d'arriver à représenter la relation qui lie le débit solide au débit liquide (le transport solide) de manière optimale. La performance du modèle reposera sur l'analyse des critères utilisés pour la validation de ces derniers

# **Chapitre 3 :**

## **Les différentes**

### **Approches adoptées**

## **Partie 1 : Modélisation par Intelligence artificielle.**

### **III.1. Introduction**

Le comportement intelligent de l'homme est réalisé grâce à un ensemble de mécanismes mentaux effectués par le cerveau, et l'unité fondamentale de celui-ci est le neurone.

Dans le système nerveux central, chaque neurone reçoit des signaux de ses voisins, les intègre et crée lui-même un signal qu'il transmet aux neurones auxquels il est connecté.

C'est ce même principe qui a été retenu pour créer des réseaux de neurones informatiques : chaque neurone est un petit processeur qui effectue la somme pondérée des informations reçues et émet à son tour un signal de sortie.

### **III.2. Définition**

#### **III.2.1 Les réseaux neurones**

Les réseaux neurones, copient la structure du neurone biologique : c'est un système de traitement informatique, caractérisé par un nombre très important d'entrées et une sortie. Ce système est alimenté, en vrac, par toutes les données susceptibles d'avoir un effet sur son fonctionnement (système appelé apprentissage).

Il y'a deux types de neurones :

1. Le neurone biologique.
2. Le neurone artificiel (ou formel)(ANN).

#### **III.2.2 Le neurone biologique**

C'est une cellule avec un noyau, le **corps cellulaire** ramène l'information de l'extérieur par une chevelure appelée **dendrites**. L'information est traitée par le neurone puis acheminée vers d'autres neurones par l'**axone**

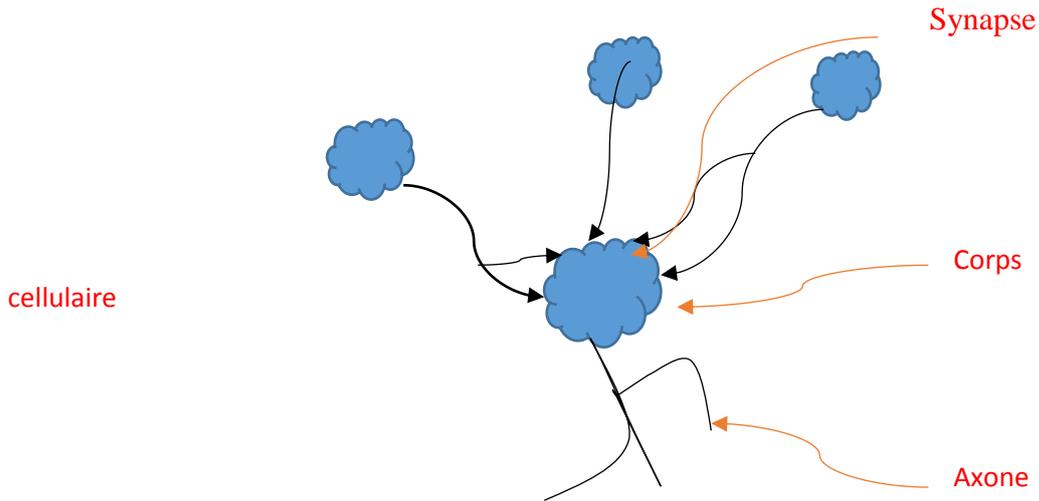


Fig 3-1 : Schéma représentatif du neurone biologique

### III.2.3 Le neurone artificiel (ou formel) (ANN)

- ❖ Des chercheurs ont montré que l'on pouvait s'inspirer du neurone biologique pour concevoir des processus pour résoudre des problèmes de l'électronique, les télécommunications, les finances etc., dans ce cas, on cherche à s'inspirer du traitement de l'information effectué par le cerveau. Le modèle mathématique du neurone biologique est appelé neurone artificiel ou neurone formel. C'est en 1943 que J.Mc Culloch et W.Pitts ont modélisé le neurone biologique.
- ❖ Les réseaux de neurones formels ont affiché des résultats spectaculaires depuis quelques années, dans des domaines très différents : vision par ordinateur, reconnaissance manuscrite et vocale, finance, médecine, production industrielle, météorologie, géologie, physique, etc.

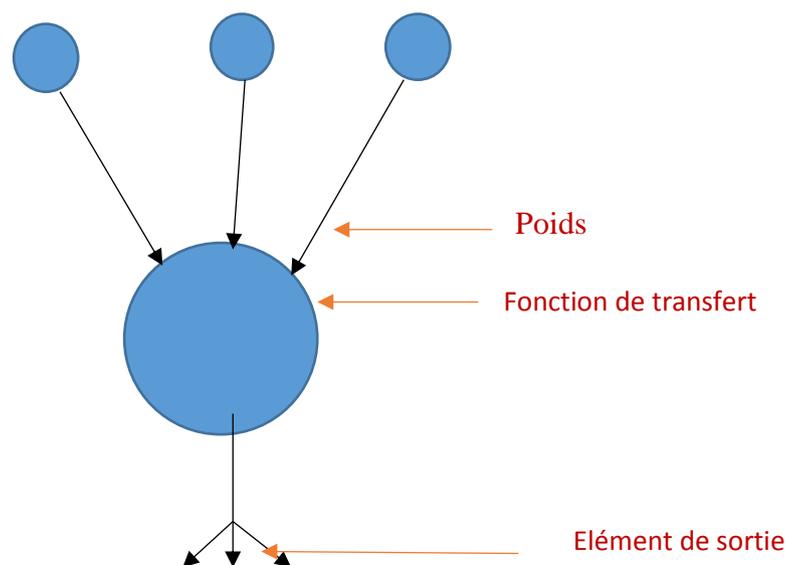


Fig 3-2 : Schéma représentatif du neurone artificiel

### III. 3 Structure d'un neurone artificiel

- ❖ Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire.
- ❖ Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurone amont .A chacune de ces entrées est associé un poids  $\omega$  ( weight) représentatif de la force de la connexion
- ❖ Chaque neurone est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones aval. à chaque connexion est associé un poids.
- ❖ Les notations utilisées dans un neurone formel sont :  
Neurone j : neurone en amont du neurone i et  $w_{ij}$  est le poids de la connexion entre i et j.  
Neurone k : neurone en aval du neurone i et  $w_{ki}$  est le poids de la connexion entre i et k.

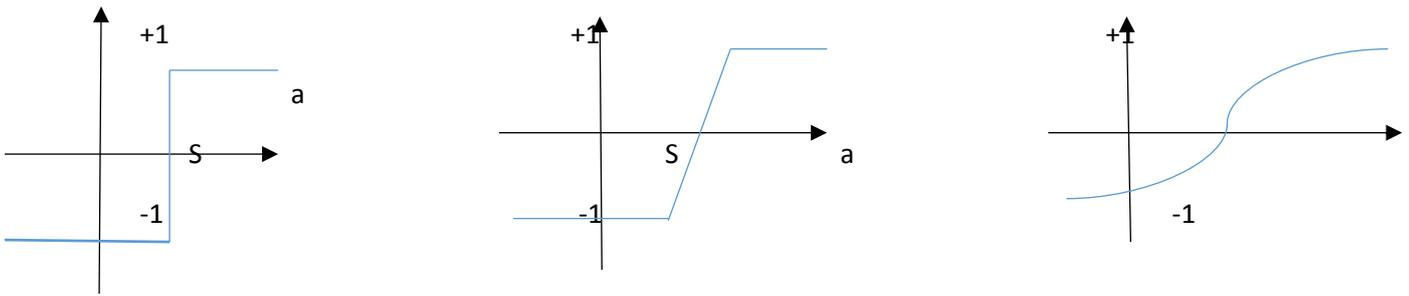
### III. 4 Comportement du neurone artificiel

Il possède donc une ou plusieurs entrées et une sortie. La relation entre la sortie et les entrées est représentée par une fonction de transfert (dites aussi une fonction d'activation ou fonction de seuillage) qui peut avoir plusieurs formes :

- C'est en général des fonctions continues dont la valeur est comprise 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

$$a = \sum(\omega_i, e_i) \quad (3.1)$$

- ❖ 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
- $X=f(a)$

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

### III. 5 Les différents types de réseaux de neurones

#### 1. Réseaux de neurones non bouclés

Il est représenté graphiquement par un ensemble de neurones Connectés entre eux, l'information circulant des entrées vers les sorties sans retour en arrière, il réalise une (ou plusieurs) fonctions de ses entrées, par composition des fonctions réalisées par chacun des neurones.

#### 2. Réseaux de neurones bouclés

Ils disposent d'un graphe de connexions cyclique c'est-à-dire la sortie d'un neurone du réseau peut être fonction d'elle-même; cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est explicitement prise en considération.

### III. 6 Les différents types de structure des réseaux de neurones

#### 1. Le perceptron

Ce système comporte trois couches dont deux effectuent des entrainements et une la rétine assure la réception des signaux , l'algorithme d'apprentissage utilisé pour le Perceptron est le suivant : en cas d'erreur en sortie le vecteur d'entrée correspondant est ajouté ou retranché au vecteur des poids synaptiques

$$E = (Y - Y_{\text{désiré}}) \quad (\text{erreur binaire}) \quad (3.2)$$

Avec  $Y_{\text{désiré}}$  sortie désirée

## 2. Adaline

Il fonctionne à partir d'une règle d'apprentissage où l'erreur est calculée à partir de la stimulation que la cellule aurait due recevoir en entrée, cette méthode est dite « Apprentissage de Widrow-Hoff » ou « règle  $\Delta$  » « Règle de Delta » et permet une réduction du gradient d'erreur à partir de la méthode des moindres carrés

$$E = (\psi - \psi_{\text{désiré}})^2 \quad (\text{erreur multivaluée}) \quad (3.3)$$

Avec  $\psi_{\text{désiré}}$  potentiel désiré

## 3. La principale limitation de ces deux réseaux

Elle provient directement de leur structure : en 1968 Minsky et Papert ont montré, que les modèles de réseaux à une couche de connexions et à fonction d'activation linéaire sont incapables de distinguer deux classes si celles-ci ne sont pas linéairement séparables.

## 4. Une solution à cette limitation

Les réseaux de neurones sont considérés comme des approximateurs universels dont les plus étudiés et appliqués en général sont les perceptrons multicouches (Bishop, 1995).

## 5. Le perceptron multicouche MLP

Les perceptrons multicouches sont les réseaux à la base des méthodes connexionnistes. Ils sont, en effet, les plus employés et les plus étudiés (Lippmann, 1987). Une abréviation anglaise est utilisée dans la littérature pour le nommer : MLP pour Multi Layer Perceptrons (Le Cun, 1987 ; Bishop, 1995 ; Haykin, 1994).

Il est composé de plusieurs couches de neurones et de connexions ce nombre est au moins égal à deux, signifiant ainsi que le réseau possède deux couches de poids connexionnistes, une couche de sortie et une couche cachée.

## 6. ANFIS ( Adaptative 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.

Sous Matlab l'identification de systèmes à l'aide d'ANFIS s'effectue en suivant l'organigramme présenté ci-dessous :

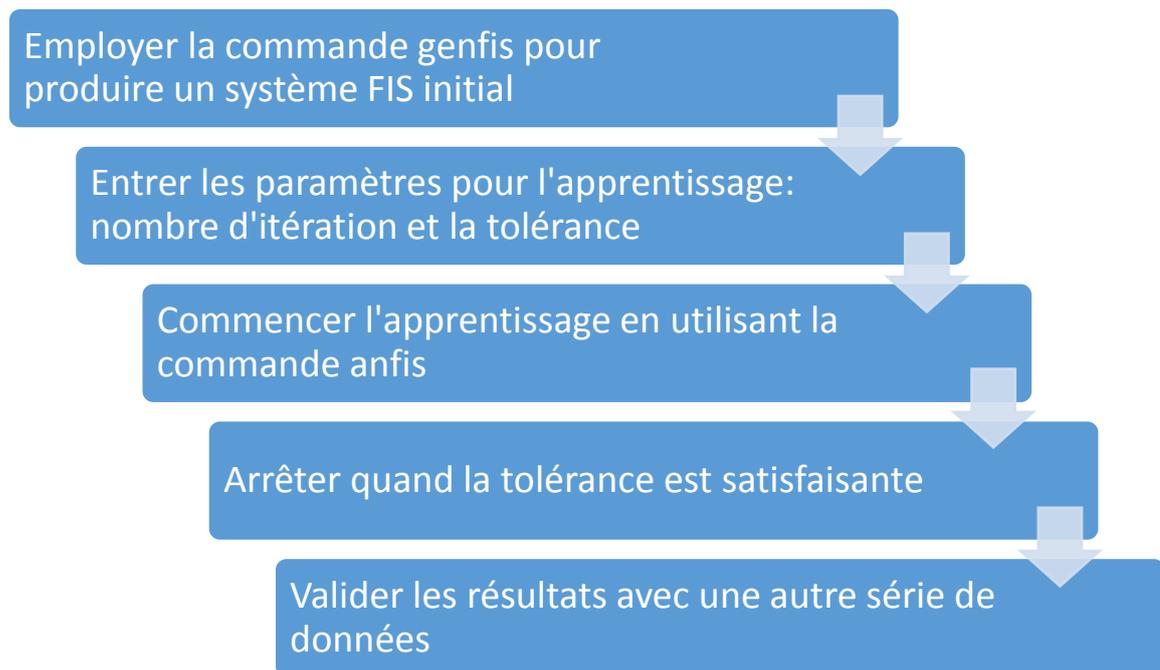


Figure 3-4 : Étape de synthèse d'une identification floue sous ANFIS de Matlab

### III. 7 Les différentes étapes de développement d'un réseau de neurones

#### III.7.1. La collecte et analyse des données

Recueillir une large panoplie de données afin de constituer une base représentative lors de l'apprentissage, dans notre cas nous avons été obligé de procéder à un remplissage de vide dans notre historique par la méthode de moyenne des jours non événementiels c'est-à-dire sans apport solide en pas de temps mensuel.

#### III.7.2. Détermination des bases de données

Il est nécessaire de disposer de deux bases de données , l'une pour effectuer l'apprentissage et l'autre pour tester la performance du réseau.

### III.7.3. Le choix du meilleur réseau de neurones

Ce choix repose sur la nature des données et du nombre de neurones , nous avons choisi dans notre cas un réseau multicouche avec l'instruction fitnet conçue spécialement pour la modélisation et le suivi des courbes.

### III.7.4. L'apprentissage du réseau de neurones

L'apprentissage consiste à déterminer son architecture (le nombre  $N$  de fonctions ) et à fixer les valeurs des paramètres pour lesquels la convergence sera la plus rapide.

#### ❖ Différentes approches d'apprentissage

Les quatre modes d'apprentissage pour les réseaux de neurones sont ici présentés :

i. **Mode supervisé (utilisé dans cette étude) :** Dans ce type d'apprentissage, le réseau s'adapte par comparaison entre le résultat qu'il a calculé, en fonction des entrées fournies, et la réponse attendue à la sortie. Ainsi, le réseau va se modifier jusqu'à ce qu'il trouve la bonne sortie, c'est-à-dire celle attendue, correspondant à une entrée donnée ;

ii. **Mode renforcé. :** Le renforcement est en fait une sorte d'apprentissage supervisé et certains auteurs le classe d'ailleurs, dans la catégorie des modes supervisés. Dans cette approche, le réseau doit apprendre la corrélation entrée/sortie via une estimation de son erreur, c'est-à-dire du rapport échec/succès. Le réseau va donc tendre à maximiser un index de performance qui lui est fourni, appelé signal de renforcement. Le système est capable ici, de savoir si la réponse qu'il fournit est correcte ou non, mais il ne connaît pas la bonne réponse ;

iii. **Mode non-supervisé (ou auto organisationnel). :** Dans ce cas, l'apprentissage est basé sur des probabilités. Le réseau va se modifier en fonction des régularités statistiques de l'entrée et établir des catégories, en attribuant et en optimisant une valeur de qualité, aux catégories reconnues. En effet, le réseau doit détecter des points.

### III.7.5. Validation

Après l'apprentissage, il est nécessaire de tester la performance du réseau de neurones si celle-ci n'est pas satisfaisante l'architecture du réseau sera modifiée sur la base d'apprentissage.

### **III.8. Propriétés des réseaux de neurones**

Les nombreuses performances obtenues avec les modèles à base de réseaux de neurones sont généralement le fait des propriétés qu'ils possèdent. Mangeas (1997) et Haykin (1999) font la description de certaines propriétés telles que : la non-linéarité ; la tolérance au manque d'information ; la résistance aux entrées aberrantes ; la possibilité de se passer de prérequis ; la non-unicité du modèle par rapport aux paramètres ; l'adaptabilité ; l'utilisation des données à leur état brut ; l'universalité et l'analogie avec la neurobiologie.

#### **❖ Non-linéarité**

Etant donné que le neurone est un élément non linéaire et que les neurones sont parallèlement distribués dans le réseau, celui-ci peut s'adapter aux phénomènes physiques complexes, là où le mécanisme responsable de la génération du signal d'entrée et/ou les relations entre les entrées et les sorties sont non linéaires comme c'est le cas entre la pluie et le débit mesuré en un point d'un bassin versant donné. Mais, cette non-linéarité ne dépend pas uniquement de la fonction d'activation, mais également de la norme des poids. Plus cette norme est petite, plus les entrées ( $I_n$ ) parvenant aux neurones se situent au voisinage de zéro et plus les fonctions sigmoïdes utilisées sont proches des fonctions linéaires.

#### **❖ Tolérance au manque d'information**

Vu que la distribution de l'information est parallèle, l'endommagement d'un neurone, ou d'une connexion, ou bien la perte de données, ne provoque pas un échec irrémédiable dans la performance du réseau, mais seulement une dégradation moins sérieuse dans les résultats. Ceci est seulement vrai si la couche cachée est munie de suffisamment de neurones. Le calcul de la sortie étant mené par plusieurs neurones, il y a différents chemins pour relier l'entrée à la sortie.

#### **❖ Résistance aux entrées aberrantes**

Du fait des filtres saturants que constituent les fonctions d'activation sigmoïdes, le réseau est résistant aux valeurs aberrantes qui pourraient se glisser dans les différentes séries hydroclimatiques dont nous disposons. Néanmoins, un réseau de neurones est prisonnier des données qui ont servi à sa calibration (apprentissage). Pour cette raison des analyses statistiques sont nécessaires afin de détecter et de remplacer les données aberrantes de nos différentes séries. Si ces données ne sont pas réparties sur tout le continuum de leur variabilité, le réseau sera incapable d'extrapoler sur les données. Par contre, pour un modèle linéaire, il suffit que, les exemples pour l'estimation des paramètres se situent sur les extrémités de ce continuum.

### ❖ Possibilité de se passer de prérequis

Le Réseau de neurones est en principe capable de faire correspondre à un ensemble de sortie, un ensemble de données d'entrée, sans avoir recours pour cette opération à une distribution de probabilité des variables du modèle ou à un prérequis des relations entre elles, (Haykin, 1999). Cette notion, bien que présente dans plusieurs références de base sur les réseaux de neurones formels, n'est pas partagée par les statisticiens évoluant dans ce domaine. En fait, Bishop (1995) démontre que les réseaux de neurones Formels requièrent les mêmes hypothèses de distribution que les autres modèles statistiques pour obtenir des estimations efficaces et optimales.

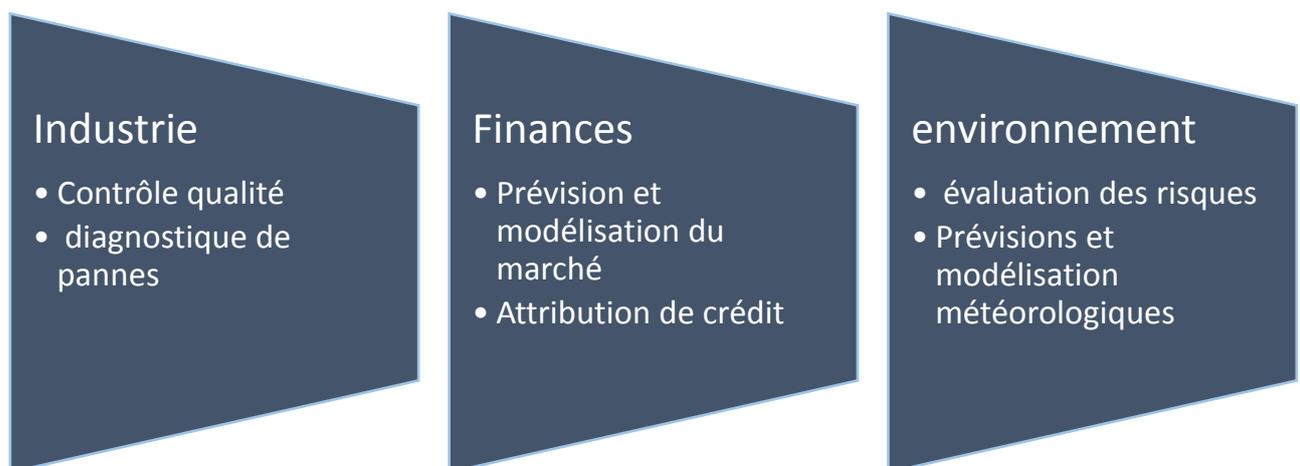
### ❖ Adaptabilité

Les modèles neuronaux pourraient être conçus de manière à changer les poids de leurs synapses en temps réel, en fonction des changements environnementaux. Ils peuvent donc opérer dans un environnement non stationnaire.

### ❖ Utilisation des données dans leur état brute

En principe, le Réseau de neurones fonctionne avec les données telles qu'elles sont, sans transformation pour rendre leur série homogène ou stationnaire, ou pour changer leur échelle. Néanmoins, il est préférable de standardiser les entrées et les sorties. Cette transformation permet au réseau de mieux éviter les minima locaux et d'avoir, pour une valeur d'initialisation des poids et seuils proches de zéro, une valeur plus proche du minimum global.

## III.9. Domaines d'application des réseaux de neurones



## Partie 2 : Wavelet

### III.1. Introduction

La transformée en ondelettes est une transformée intégrale, comme les transformées de Fourier ou de Laplace, et est souvent présentée comme une alternative à la transformée de Fourier. Sa construction provient de deux limitations de l'analyse de Fourier :

- l'une abstraite liée à l'impossibilité d'analyser et de caractériser certains espaces fonctionnels (cf. Meyer 90);
- l'autre concrète dans le domaine du traitement du signal, issue de la difficulté à analyser localement des signaux non-stationnaires (Flandrin Dans Lemarié 90 p. 81).

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 en 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.

### III.2. Notion d'ondelette ( wavelet )

Soit  $\psi (x)$  une fonction choisie bien régulière et bien localisée , cette fonction sera appelée ondelette mère ( wavelet mother) si elle vérifie la condition suivante

$$\int(x)dx = 0 \quad (3.4)$$

Cette relation signifie d'après Abdeldjalil OUAHABI (cité dans le TI 2013 p 22) que l'ondelette  $y$  analysant un signal :

- oscille (en prenant des valeurs positives et négatives), où le nombre  $n$  contrôle les oscillations de  $y$  ; plus  $n$  est élevé, plus  $y$  oscille ;
- est de moyenne nulle (pour  $p = 0$ ) ;
- est aveugle à la composante continue, pour  $p = 0$ , et de façon générale ( $p > 0$ ) orthogonale aux composantes polynomiales de degré inférieur à  $n$ .

Pour fixer les idées , A/ Grossman et J Mortlet (cité dans Meyer 90 page 15) disent qu'une ondelette oscille pendant un certain temps comme une onde mais est ensuite localisée grâce à un amortissement . L'oscillation d'une ondelette se meure par le nombre  $(m+1)$  , à partir de cette unique fonction  $\psi (x)$  on construit par translation et dilatation une famille de fonctions qui sont les ondelettes de base.

### III.3. Transformée continue en ondelettes

Pour analyser des transitoires de durées différentes, il est nécessaire d'utiliser une transformée capable d'agir pour toute une gamme de résolutions temporelles simultanément : la transformée en ondelettes joue ce rôle en décomposant un signal sur une famille d'ondelettes translatées et dilatées.

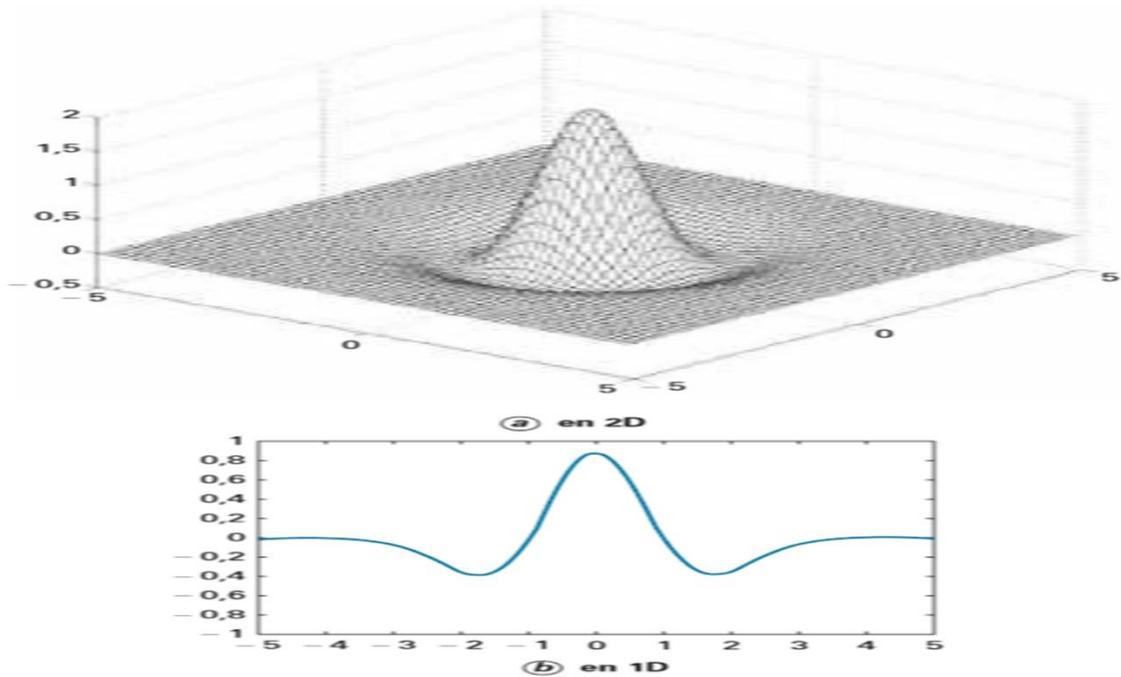


Figure 3-5 : ondelette (chapeau mexicain) normalisée à  $\psi = 1$ , et centrée au voisinage de  $t = 0$

Cette figure représente l'ondelette « chapeau mexicain » en 2D et 1D définie par

$$\psi(x) = \frac{2}{\pi^{\frac{1}{4}} \sqrt{3} \sigma} \left(1 - \frac{t^2}{\sigma^2}\right) e^{-t^2/2\sigma^2} \quad (3.5)$$

En dilatant l'ondelette  $\psi(x)$  par un facteur  $s$  et en la translatant par  $u$  (voir figure 2), on obtient la famille des ondelettes  $\psi_{u,s}$  associées à  $\psi$  de norme unité

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (3.6)$$

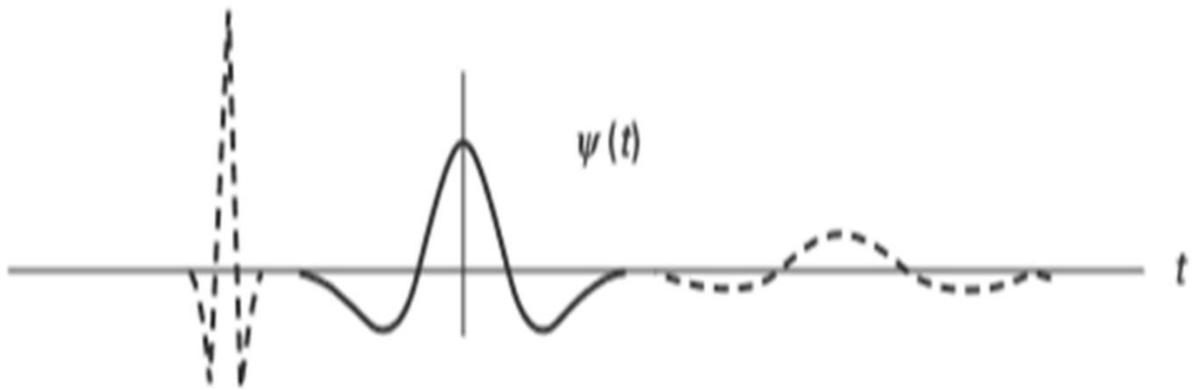


Figure 3-6 :Exemple d'ondelette dilatée et translatée

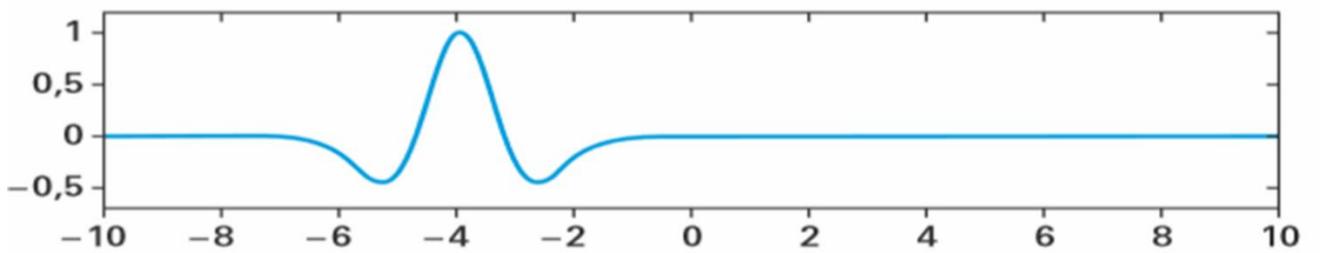


Figure 3.7 :Ondelette contractée d'un facteur de 2 et décalée de -4

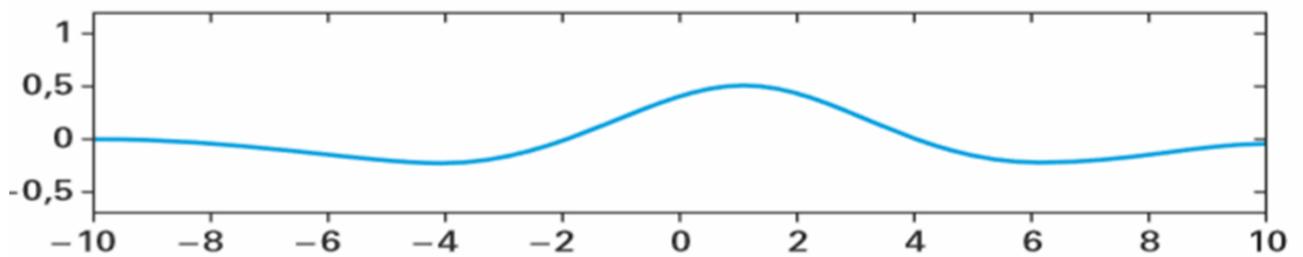


Figure 3.8 :Ondelette contractée d'un facteur de 2 et décalée de 1

### III.4. Transformée discrète en ondelettes

Afin de réduire cette redondance, il est possible de se servir de la famille dénombrable d'ondelettes  $\psi_{j,k}$  où

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi_{j,k} (2^{-j/2}t - k) \quad (3.7)$$

Le plan temps-échelle (u, s) se transforme en « grille dyadique » (ou de base 2), comme le montre la figure suivante

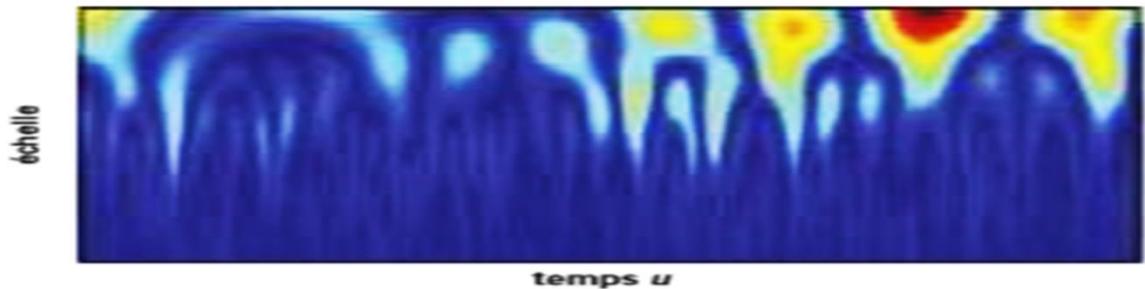


Figure 3.9 : Transformé en ondelette continue

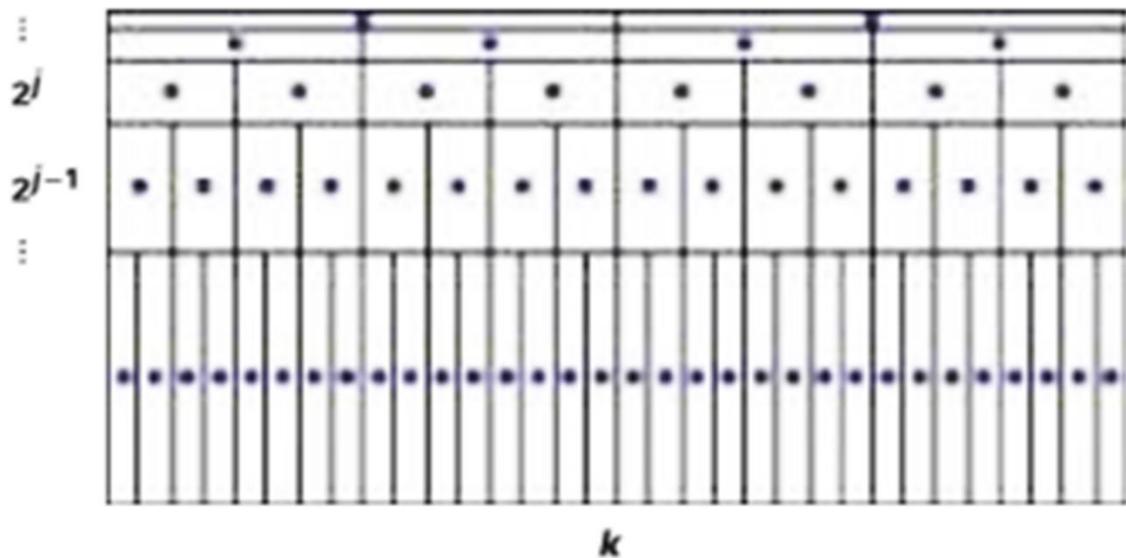


Figure 3-10 : Transformé en ondelette discrète

Toutefois, les conditions pour lesquelles cette base devient orthonormée – fournissant donc une transformée en ondelettes « très économique » – sont liées à la notion d'analyse multi résolution, notée en abrégé AMR.

### III.5. Définition du AMR

En clair, le concept de l'AMR à base d'ondelettes se résume ainsi :

il s'agit de la représentation d'un signal sous forme d'une approximation grossière et d'une suite de « corrections » d'ampleur décroissante. Une telle analyse multi résolution apporte également un aspect algorithmique séduisant (voir l'algorithme de Mallat) qui ouvre la voie à des applications spectaculaires, notamment en compression, débruitage, restauration d'images, lissage, infographie, vision, etc.

Sur un plan formel, l'analyse multi résolution d'un signal  $X$  consiste à réaliser des projections orthogonales successives du signal sur les espaces  $V_j$ , ce qui conduit à des approximations de plus en plus grossières de  $X$  au fur et à mesure que  $j$  croît. La différence entre deux approximations successives représente l'information de détail perdue lors du passage d'une résolution à une autre. Cette information de détail est contenue dans le sous-espace  $W_j$  orthogonal à  $V_j$ .

Ainsi, le signal  $X$  appartenant à un espace  $V_j$  est projeté sur un sous-espace  $V_{j+1}$  et un sous-espace  $W_{j+1}$  dans le but de réduire la résolution de moitié . Il existe alors :

- une fonction d'échelle  $\varphi(t)$  (skilling function) qui engendre par dilatation et translation une base orthonormée de  $V_{j+1}$  ;
- une fonction ondelette  $\psi(t)$  (basic function) qui engendre par dilatation et translation une base orthonormée de  $W_{j+1}$ .

La projection du signal  $X$  sur l'espace  $V_{j+1}$  sera notée

$$A^j X = \sum_K \langle X, \varphi_{j,k} \rangle \varphi_{j,k} = \sum_K a_{j,k} \varphi_{j,k} \quad (3.8)$$

où les produits scalaires  $a_{j,k} = \langle X, \varphi_{j,k} \rangle = \int_{-\text{inf}}^{+\text{inf}} X(t) 2^{-j/2} \varphi(2^{-j} t - k) dt$

fournissent une approximation à l'échelle  $2^j$

Ainsi, la notion d'analyse multi résolution fournit un cadre peu coûteux en terme de calcul pour la décomposition d'un signal sous la forme d'une suite d'approximations de résolution décroissante, complétée par une suite de détails.

### III.6. Algorithme de Mallat

Quelques années après la découverte des ondelettes, Stéphane Mallat offrit à la communauté des traiteurs de l'information une approche « filtrage », où le rôle principal est joué par une fonction d'échelle parfois appelée « ondelette père » « the father wavelet » : l'idée d'analyse multi résolution a été matérialisée par la décomposition d'un signal par une cascade de filtres .

Une paire de filtres miroirs pour chaque niveau de résolution, l'un passe-bas associé à la fonction d'échelle donne les approximations, et l'autre passe-haut associé à l'ondelette encode les détails. Un algorithme rapide applicable aux signaux et images. En fait, lors d'une analyse multi résolution, la transformée en ondelettes s'effectue sans ondelette, ni fonction d'échelle ! Nous avons besoin uniquement des coefficients d'un filtre passe-bas  $h$  (et d'un filtre passe-haut qui se déduit de  $h$ ). C'est le miracle de l'algorithme rapide de Mallat. En réalité, ces filtres sont directement liés à l'ondelette choisie.

### En pratique

Concrètement, on observe un signal  $f$  plus ou moins régulier. On a à notre disposition un échantillon de valeurs  $f(k\eta)$ , où le pas  $\eta$  dépend de la précision du matériel utilisé. Selon la forme du signal et selon ce que l'on veut en faire on choisit une ondelette adaptée (mother wavelet)

$$\psi_{j,k} = 2^{j/2} \psi_{j,k} (2^j x - k) \quad (3.9)$$

- Où  $\psi_{j,k}(x)$  est le produit de la mère des ondelettes  $\psi(x)$  qui est dilatée par  $j$  et translatée par  $k$ , la mère des ondelettes doit satisfaire la condition  $\int \psi(x) dx = 0$
- La fonction de l'ondelette discrète  $f(x)$  peut être calculé par

$$C_{j,k} = \int_{-inf}^{+inf} f(x) \psi_{j,k}(x) dx \quad (3.10)$$

$$f(x) = \sum_{j,k} C_{j,k} \psi_{j,k}(x) \quad (3.11)$$

- Où  $C_{j,k}$  est le coefficient approximative du signal

L'algorithme en cascade donne une approximation de  $\phi$ .

On calcule alors les coefficients  $C_{j,k}$  d'ondelettes du signal  $f$  à partir de cette approximation et des valeurs échantillonnées de  $f$ . On assimile  $f$  à sa projection sur un espace  $V_J$

On fera attention cependant à ne pas perdre trop d'informations sur  $f$  lors de cette étape on prendra donc  $J$  assez grand. On peut alors apporter le traitement voulu au signal  $f$  à travers ses coefficients d'ondelettes.

Le débruitage du signal consiste simplement à projeter de nouveau  $f$  sur un espace  $V_j$ ,  $j \leq J$ , pour une résolution  $j$  adaptée à la forme prévue du bruit (on peut par exemple modéliser le bruit par une variable aléatoire). Selon le choix de  $\phi$ , cette approximation peut être très régulière. Des calculs théoriques permettent de se donner une idée du changement de résolution à adopter pour obtenir de bons résultats.

• L'opération de compression consiste à garder intacts les coefficients de l'approximation grossière et pour chaque niveau de détail, ne garder que les coefficients de grande amplitude

$$\text{Pour cela on écrit } f_J = f_{J-1} + d_{J-1}$$

• la décomposition de  $f_J$  sur  $V_J = V_{J-1} \oplus W_{J-1}$ . Les coordonnées de  $f_{J-1}$  et  $d_{J-1}$  dans les bases de  $V_{J-1}$  et  $W_{J-1}$  peuvent être calculées grâce à des relations de récurrences similaires à celles utilisées dans l'algorithme en cascade.

• Puis on recommence l'opération avec  $f_{J-1}$ ,  $f_{J-2}$ , etc. l'approximation initiale  $f_J$  s'écrit comme la somme d'une approximation grossière de résolution  $j$  et de fonctions de détail :

$$f_j = f_j + d_j + d_{j+1} + \dots + d_{J-1}$$

## **Partie 3 : WANN ou WANFIS**

### **III.1. Introduction**

WANN est basé sur l'analyse en ondelette « wavelet analysis » et le réseau de neurones ANN qui a prouvé son efficacité pour la modélisation des signaux temporels non linéaires et non stationnaires, dans le but prévoir le débit solide à partir du débit liquide.

### **III.2. Méthode WANN**

Cette méthode 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] = wden(C,L,TPTR,SORH,SCAL,N,WNAME);

Avec

- XD : version débruitée de nos données obtenue par seuillage des coefficients de notre décomposition en ondelettes ;
- CX : vecteur de décomposition en ondelettes ;
- LX : vecteur de comptabilité ;
- TPTR : type de seuillage employé entre minmax, heursure , rigsure , et sqtwolog , le choix se fait en calculant une constante appelée valeur seuil  $\lambda$  qui plus elle est grande plus le débruitage est bon.

Pour cela nous avons choisi deux fonctions mère harr et db2 pour 4 niveaux de décomposition et comparé leur valeur seuil, les résultats sont représentés dans les deux tableaux ci-dessous

Tableau 3-1 : Comparaison de la valeur seuil pour le harr

	<u>Minmax</u>	<u>heursure</u>	<u>rigsure</u>	<u>sqtwolog</u>
$\lambda$ harr1 niveau 1	0	0	0	0
$\lambda$ harr1 niveau 2	-1,3628	-0,0378	-0,0378	-1,7510
$\lambda$ harr1 niveau 3	-1,4843	-0,4540	-0,4540	-2,1814
$\lambda$ harr1 niveau 4	-1,4842	-0,4540	-0,4540	-1,8389

Tableau 3-2 : Comparaison de la valeur seuil pour le db2

	<u>Minmax</u>	<u>heursure</u>	<u>rigsure</u>	<u>sqtwolog</u>
$\lambda$ db2 niveau 1	-1,3382	-0,0846	-0,0846	-1,8591
$\lambda$ db2 niveau 2	-1,6934	-0,0846	-0,0846	-3,6763
$\lambda$ db2 niveau 3	-1,6934	-0,0846	-0,0846	-3,6763
$\lambda$ db2 niveau 4	-1,6934	-0,0846	-0,0846	-3,6763

Les méthodes de Heursure et Rigsure ont montré une meilleure performance par rapport aux méthodes de seuillage Minimaxi et Sqtwolog pour tous les niveaux de décomposition. Et puisque Rigsure n'est que heursure amélioré nous avons opté pour cette dernière.

- SORH : seuillage Soft ou Hard on a choisit Hard pour plus de précision
- SCAL : définit un rééchantillonnage du seuillage multiplicatif
- N : Niveau de décomposition en utilisant la formule établie par Aussem et al.1998 ; Nourani et al.2008

$$N = \text{int} [ \log(n) ] + 1 \quad (3.12)$$

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 transformé en ondelettes (Wavelet) et recomposition l'étape suivante sera le couplage avec l'ANN.

### 3. Le couplage WANN

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<sup>2</sup> RMSE, RER, la simulation et la mesure nécessaire pour la comparaison.

#### III.3. Organigramme du WANN

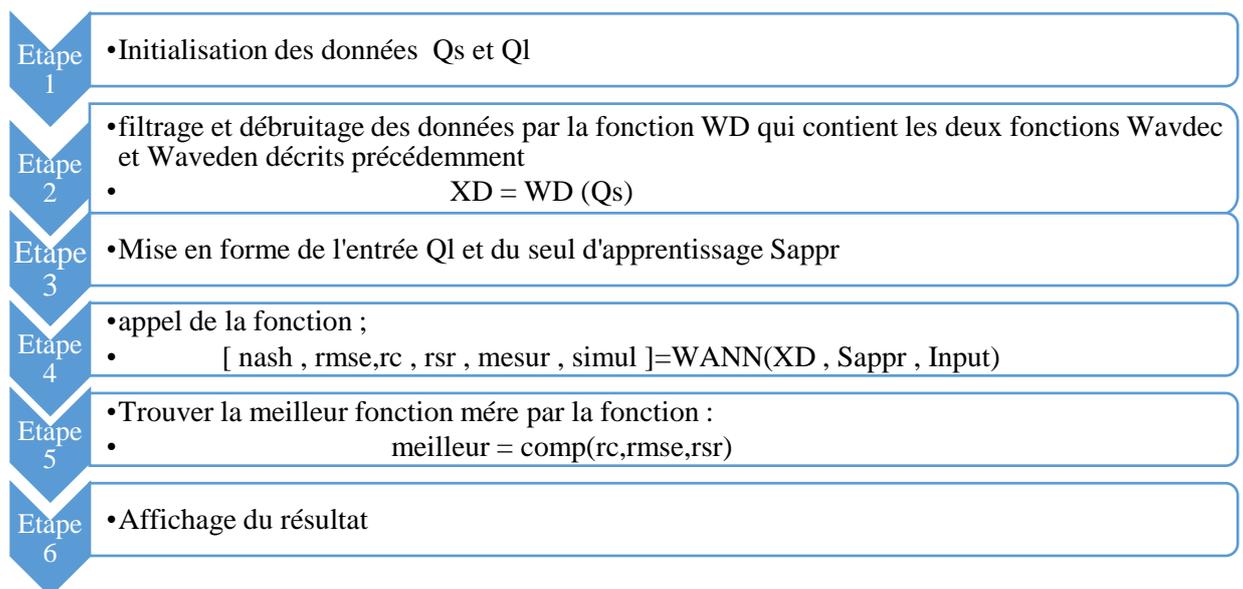


Figure 3-11 : Organigramme du programme WANN en matlab

### **III.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 le réseau de neurones.

Le chapitre suivant consistera en la présentation des résultats du travail réalisé, les observations effectuées et l'interprétation de ces observations.

# **Chapitre 4 :** **PRESENTATION DE LA** **ZONE D'ETUDE**

## IV.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 dévisé en 04 bassins hydrographiques : 1 : Oranie- 2 : Cheliff –Zahrez - 3 : Algérois- 4 : Constantinois. Chaque bassin versant est subdivisé en sous bassins versants. Les grands fleuves 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 de l'Isser.

## IV.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 km<sup>2</sup> 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 (Horton, 1945).

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.

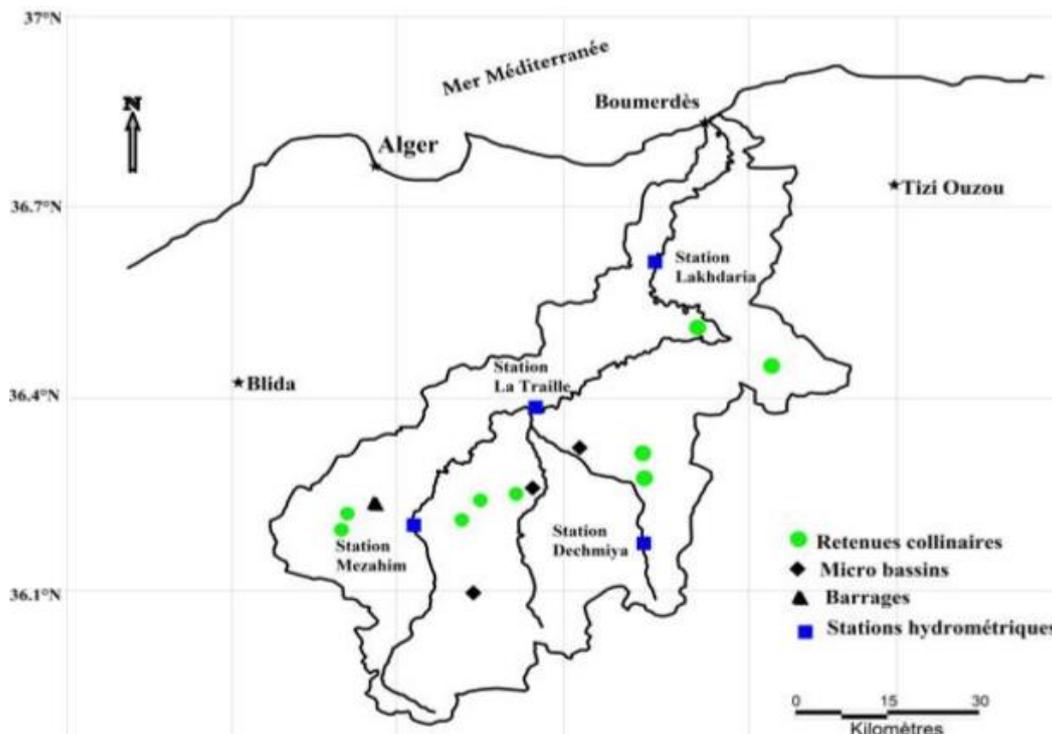


Figure 4-1 : Plan de situation du bassin versant de l'Oued Isser

### **IV.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.

#### **IV.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.

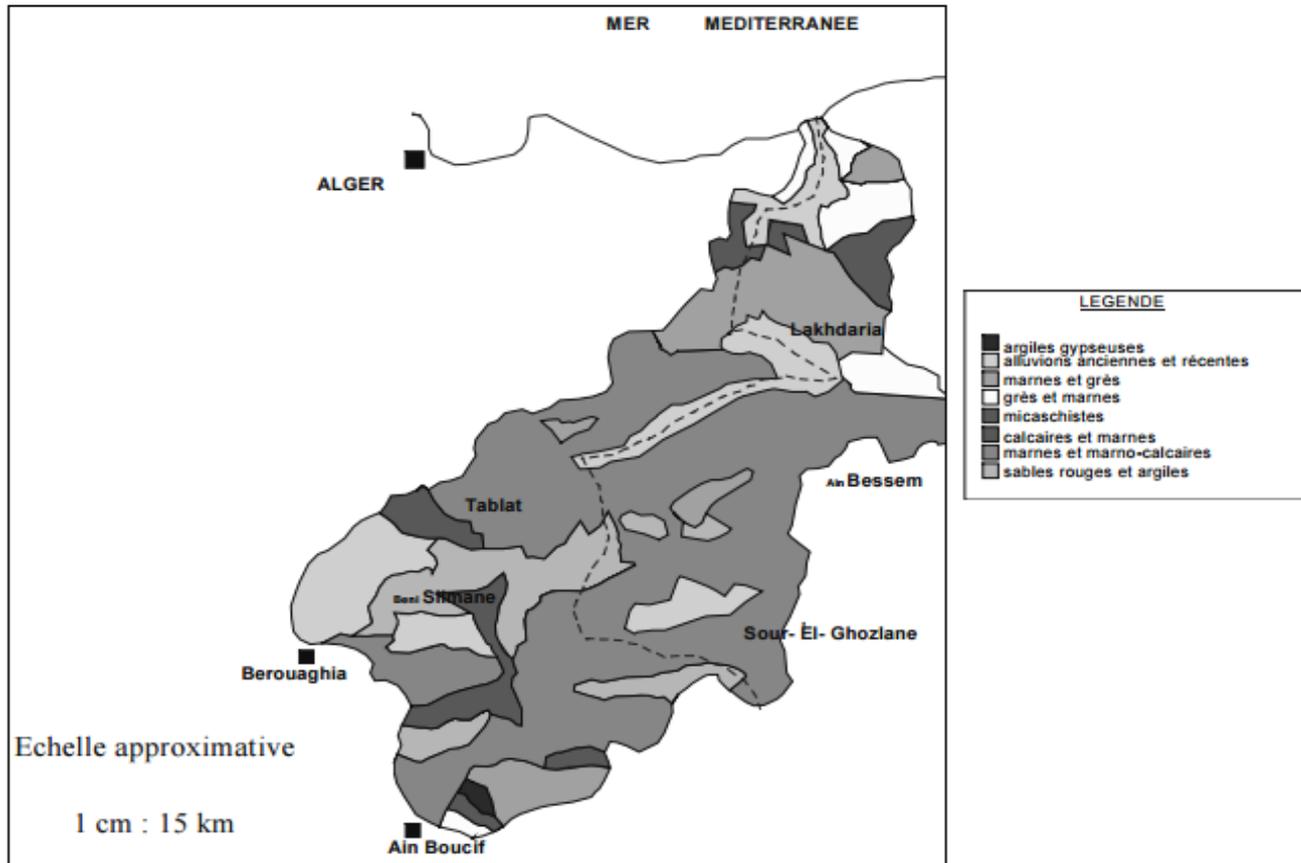


Figure 4-2 : Carte schématique des formations lithologiques du bassin versant de l'Oued Isser

### IV.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.

- **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

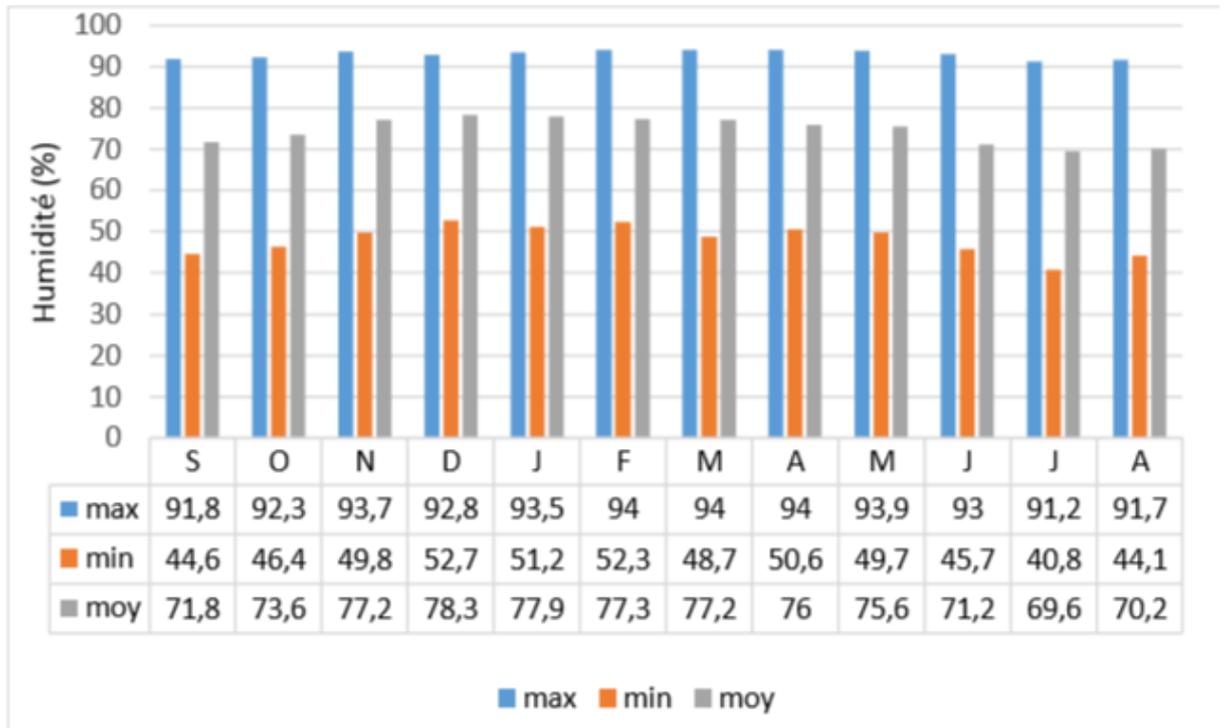


Figure 4-3: Caractéristiques de l'humidité à la station de Dar el Beïda (ONM 1975-94)

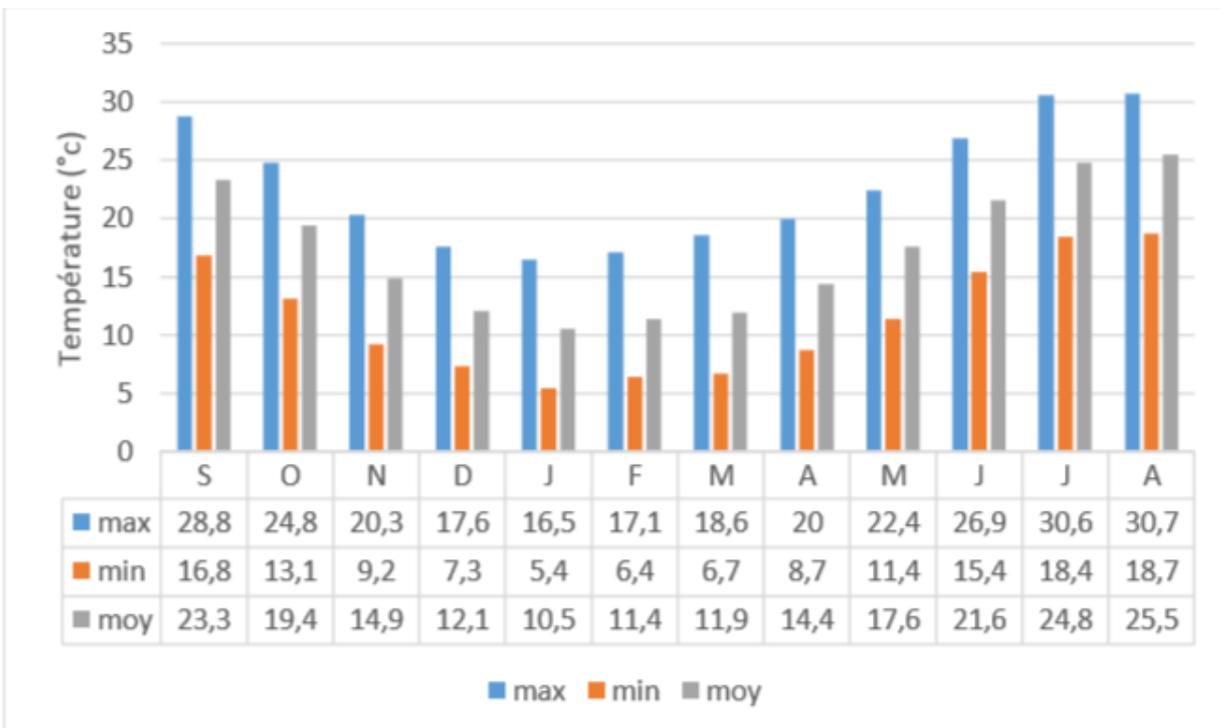


Figure 4-4: La Température mensuelle à la station de Dar el Beïda (ONM 1975-94)

### IV.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.

### IV.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).

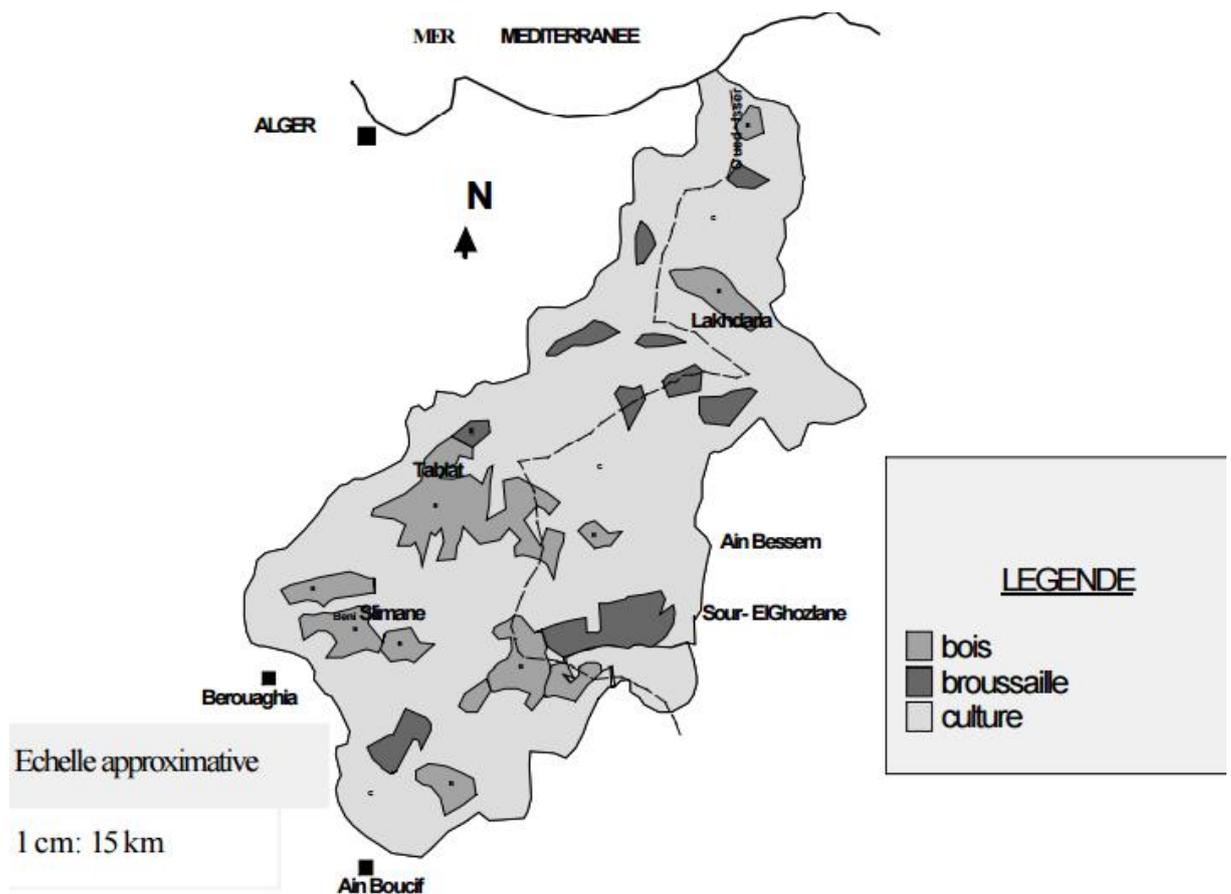


Figure 4-5: Carte schématique de végétation du bassin versant de l'Oued Isser

#### IV.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 11,85Hm<sup>3</sup>, 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 35,17Hm<sup>3</sup> tandis que la surface était de 303,3ha.

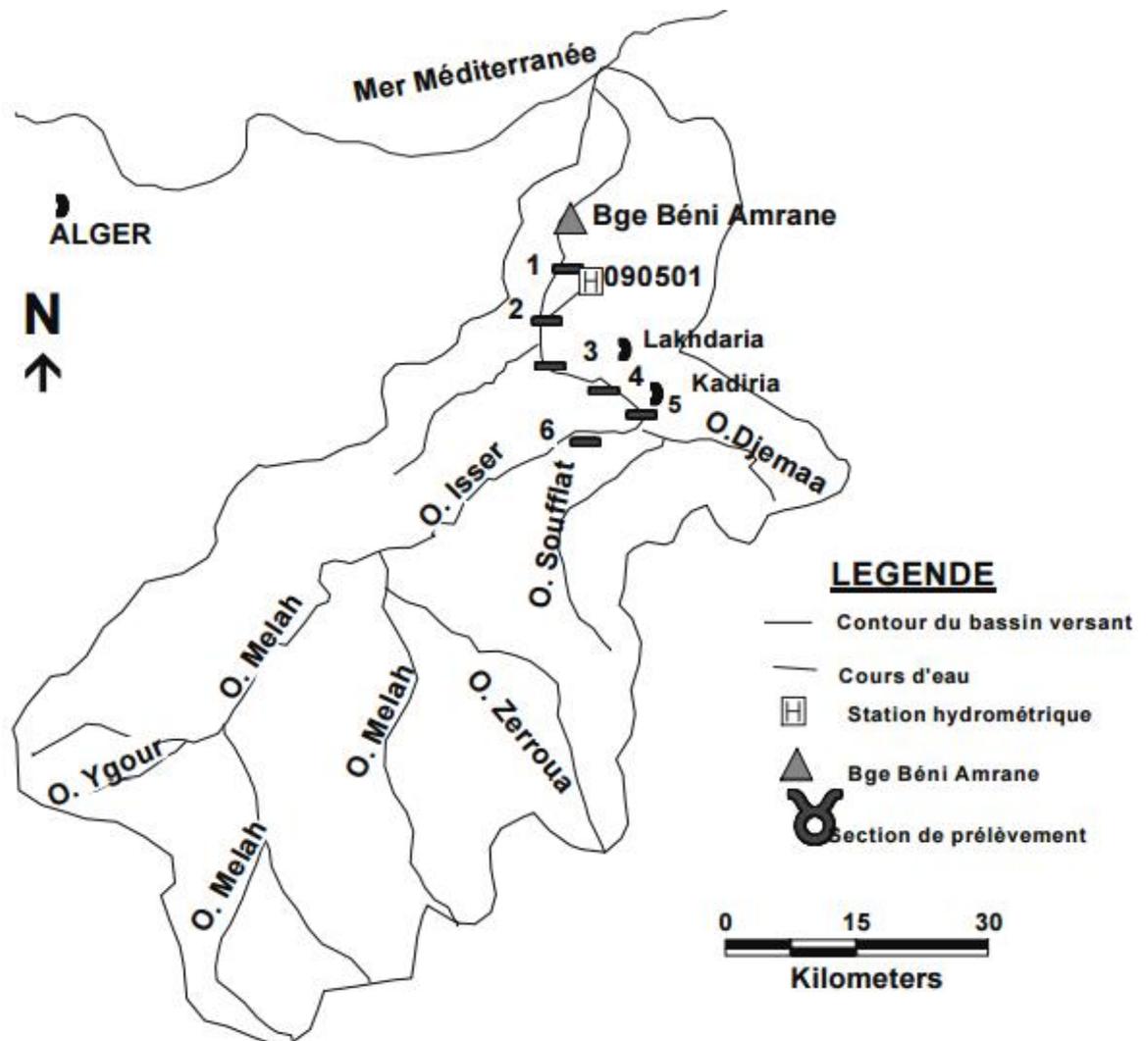


Figure 4-6 : Situation des prélèvements dans le barrage de Béni Amrane

**IV.5. 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 et le Colorado afin de valider le modèle et le Nord Algérien pour le test , ce dernier étant déjà présenté , nous allons présenter globalement la région du Colorado afin de mettre en contexte et bien analyser les résultats obtenus par la modélisation.

**IV.5.1 Bassin versant du Colorado**

Les données dont on dispose représentent deux séries de débits solide et liquide en pas de temps journalier, c'est-à-dire 10228 données . La surface du bassin versant est de 629 100 kilomètres carrés , le fleuve Colorado naît dans les montagnes Rocheuses au nord de l'État du Colorado, sur les flancs du mont Richthofen, et se jette dans le golfe de Californie devant l'île Montague, au Mexique, après avoir parcouru environ 2 330 km. Il traverse une région élevée (1 600 mètres en moyenne) et aride. Il coule dans les États du Colorado, de l'Utah et de l'Arizona. Plus au sud, il marque la limite entre le Nevada et l'Arizona puis entre la Californie et l'Arizona.



Figure 4-7 : Positionnement du fleuve Colorado ainsi que le Bassin Versant

### IV.5.2 Bassin versant de Oued Isser

Il contient un réseau hydrométrique implanté par l'ANRH équipé de 07 stations de jaugeage : El Omaria (091205); Dechmia (090309); Beni Slimane (090305); Mezahim (030191); Aomar Gare (090416); Pont de la trailla (090408) ; Lakhdaria (090501).

Dans cette étude, nous avons utilisé les données de la station de Lakhdaria (Code : 090501) de Oued Isser et qui draine un bassin versant de 3620 km<sup>2</sup> et qui présente une qualité de mesure raisonnable.

Les données de cette station, fournies par l'ANRH, 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 4000 données observées sur 14126 au total ce qui nous laisse 10126 vides, par conséquent nous avons établi un programme qui simule ces derniers, voici son organigramme :

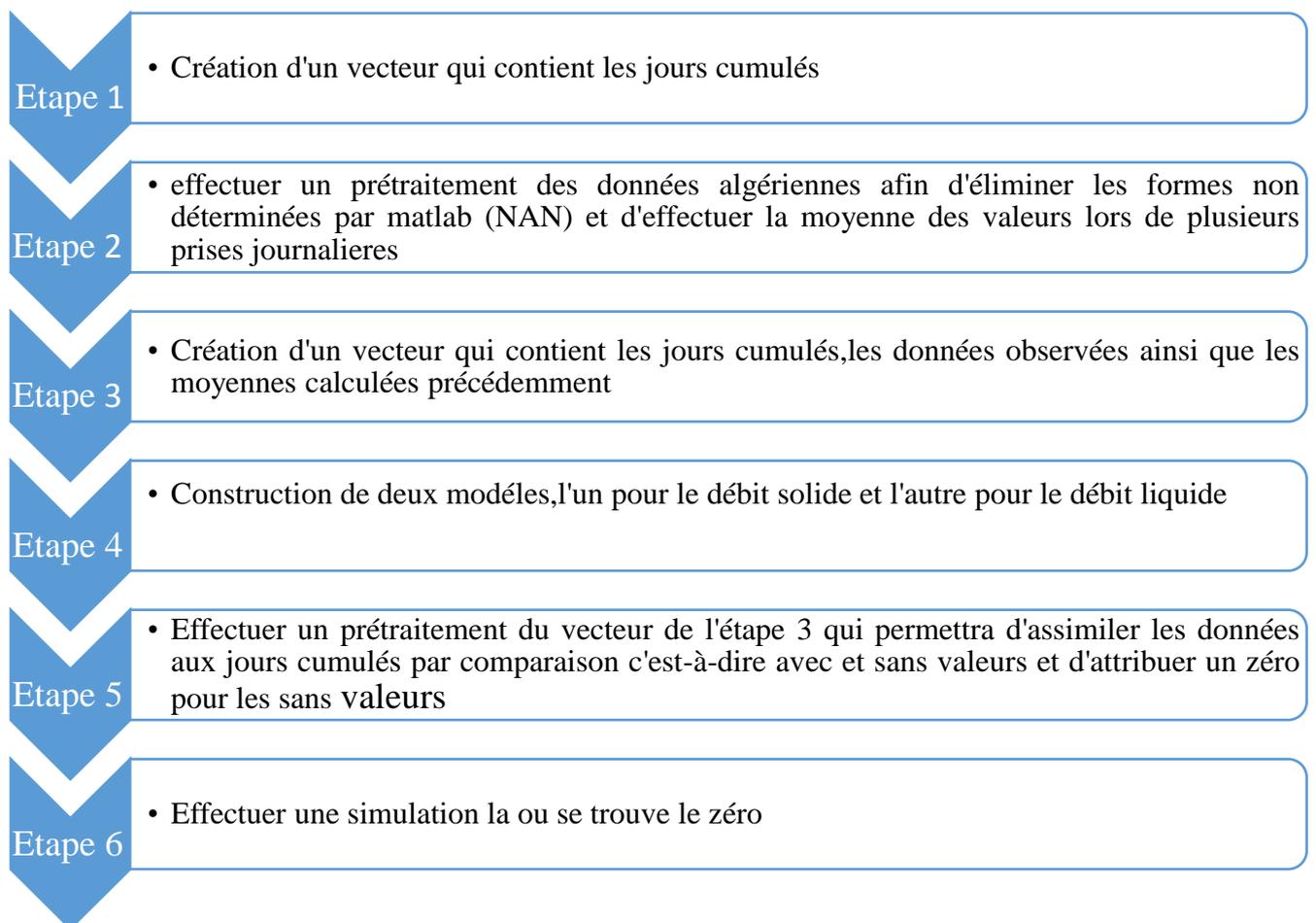


Figure 4-8 : Simulation des données pour le bassin versant de Oued Isser

## IV.6. 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 Beeck.

### 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.

Les résultats du test avec XLSTAT sont les suivants :

Tableau 4-1 : Résultats du test de Grubbs et Beck pour le bassin versant du Colorado

Paramètres	G (Valeur observée)	Gc (Valeur critique)	p-value (unilatéral)	alpha
Débit liquide	0,300	4,420	1	0,05
Débit solide	0,096	4,420	1	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

Tableau 4-2 : 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	0,760	4,490	1	0,05
Débit solide	0,379	4,490	1	0,05

Interprétation du test :

$H_0$  : Il n'y a pas de valeur extrême dans les données

$H_a$  : 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  $H_0$ .

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle  $H_0$  alors qu'elle est vraie est de 100,00%.

Donc il n'y a aucune valeur aberrante

#### **IV.7. Conclusion**

Après un comblement des vides et une vérification statistique des données fournies par l'ANRH de la station hydrométrique 090501 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 des deux bassins .

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

# **Chapitre 5 :Analyses et interprétations des résultats**

## V.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 procédera par la suite :

- Au couplage ANN Wavelet avec un découpage calage test automatique tout en variant le nombre de neurones en couche cachée allant de 10 à 30 ;
- Au couplage ANN Wavelet avec un découpage calage test manuel tout en variant le nombre de neurones en couche cachée allant de 10 à 30 et le nombre d'itération 50 et 100 ;
- Au couplage ANFIS Wavelet en variant le nombre de fonctions d'appartenances de 3 à 5.

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 des régions de la Californie et du Nord Algérien , l'application sur les données du Colorado n'a pour but que de prouver le bon fonctionnement du couplage filtre modèle en s'assurant de leur excellente qualité . Cependant, l'application sur les données Algériennes, initialement connues pour être douteuses, va trancher entre le meilleur filtre ainsi que son couplage avec le modèle qui s'adaptera le mieux aux problèmes liés à la qualité de ces données.

## V.2. Les différentes étapes de programmation

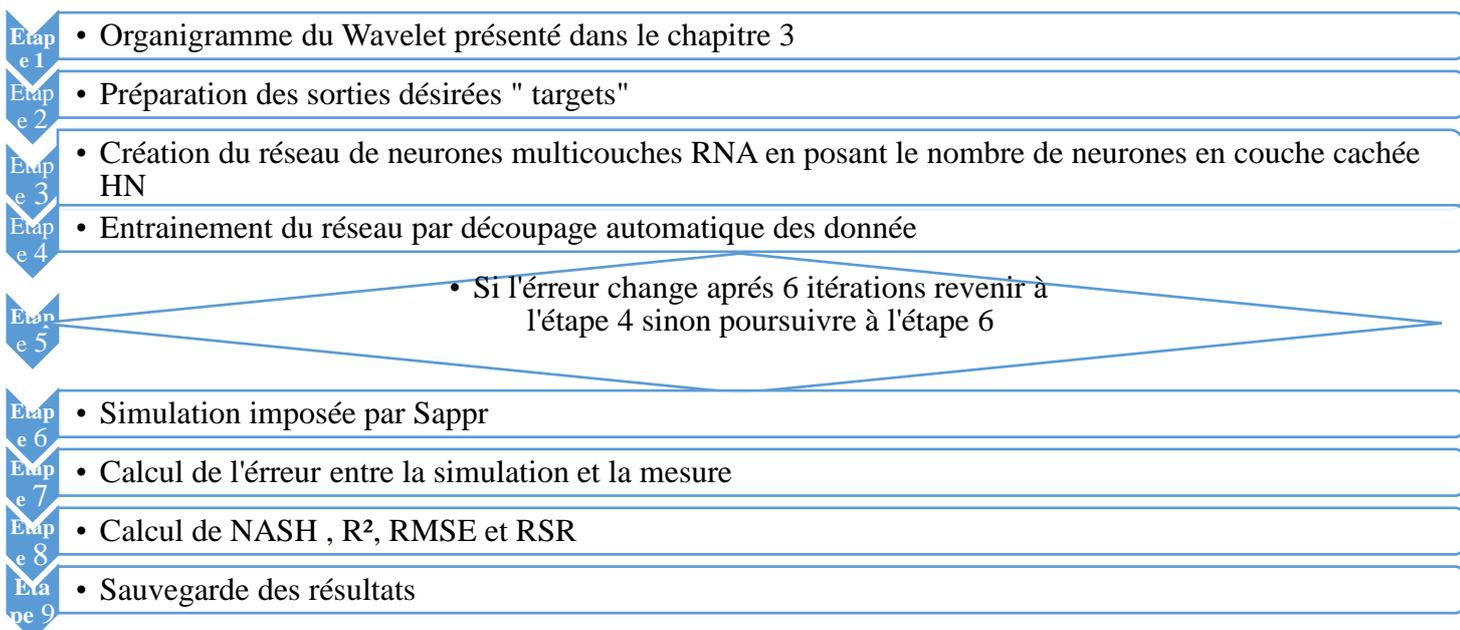


Figure 5-1 : Organigramme du programme WANN au découpage automatique

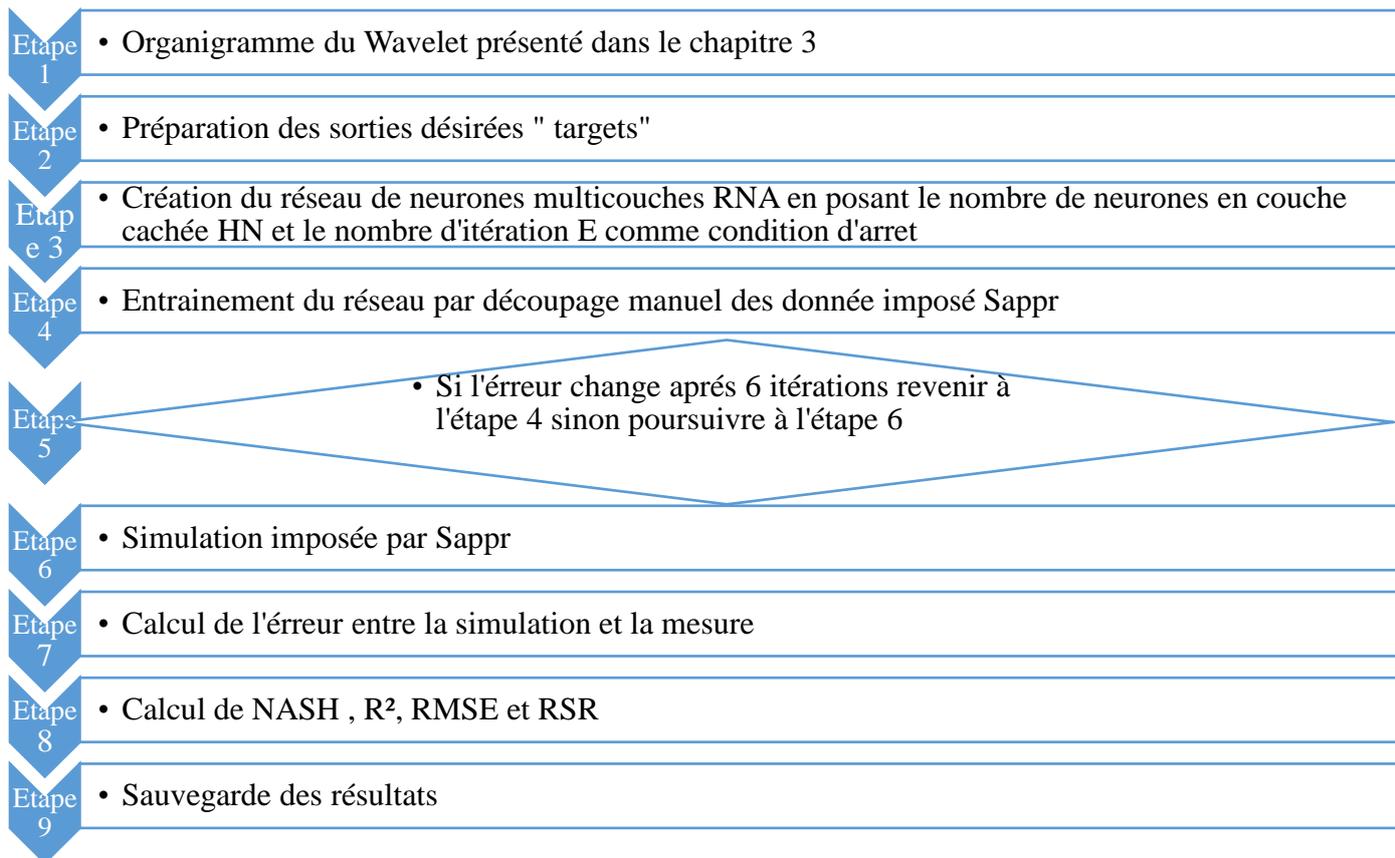


Figure 5-2 : Organigramme du programme WANN au découpage manuel

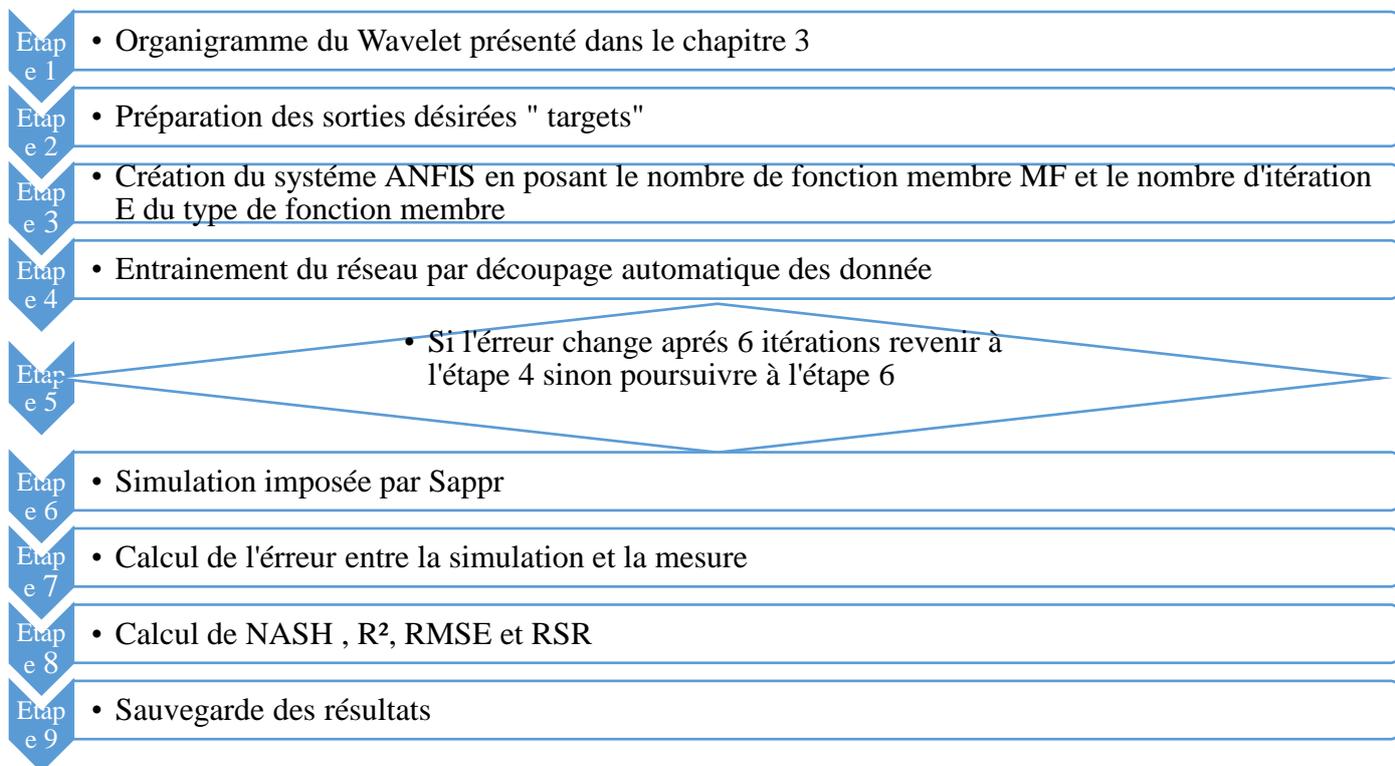


Figure 5-3 : Organigramme du programme WANFIS

### V.3. Modélisation avec les données du Colorado

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

#### V.3.1 WANN au découpage automatique

##### ❖ Réseau de neurones avec 10 N en couches cachées

Tableau 5.1 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN avec 10 N couches cachées avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,98	0,04	238,3	0,77	0,98	-10,60	828,04	0,85
Harr	2	0,91	0,14	225,7	0,85	0,89	-0,31	278,42	0,80
Harr	3	0,99	-0,18	264,3	0,81	0,94	-2,52	456,33	0,79
Harr	4	0,90	-3,59	521,1	0,82	0,98	-4,23	555,76	0,82
Harr	5	0,99	-1,17	357,8	0,82	0,95	0,06	236,24	0,98
Db2	1	0,99	-18,31	1068,4	0,85	0,99	0,08	233,16	0,84
Db2	2	0,95	-2,52	455,94	0,77	0,83	-0,53	300,43	0,86
Db2	3	0,00	-11,20	849,25	1,04	0,93	0,06	235,59	0,79
Db2	4	0,97	-0,25	271,92	0,88	0,36	-5,18	604,24	0,94
Db2	5	0,86	-0,24	271,17	0,94	0,89	-5,34	612,12	0,85
Sym3	1	0,02	-1,91	414,7	1,29	0,96	-1,63	394,68	2,05
Sym3	2	0,99	-0,24	270,6	0,81	0,99	-0,14	260,17	0,79
Sym3	3	0,87	0,01	241,3	0,93	0,95	-6,29	656,40	0,82
Sym3	4	0,73	-0,65	312,3	0,92	0,96	-0,17	262,52	0,76
Sym3	5	0,93	-11,49	859,3	0,86	0,94	0,03	239,17	0,79
Coif1	1	0,97	-0,11	256,0	0,79	0,91	-0,40	295,05	0,86
Coif1	2	0,95	0,28	207,0	0,80	0,66	-4,32	560,58	1,39
Coif1	3	1,00	0,08	232,6	0,76	0,98	-1,22	362,10	0,78
Coif1	4	0,93	-20,60	1129,9	0,89	0,95	0,32	200,85	0,83
Coif1	5	1,00	-3,64	523,6	1,54	0,00	-1,86	411,41	1,26
Le meilleur filtre : coif 8 de degré 2		0,95	0,42	186,1	0,72	0,97	0,55	176,30	0,90

Sans filtre	0,96	0,16	223,5	0,81	0,96	-62,99	194.5	1,1
-------------	------	------	-------	------	------	--------	-------	-----

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.1, on remarque qu'en période de calage 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 50% avec un  $R^2$  de 95% et un RSR 0,72.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une différence remarquable entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le coif 8 avec un degré de décomposition de 2 où le  $R^2$  est de 97% et un NASH de 55% , et la modélisation sans filtrage où  $R^2$  est de 96% avec un NASH très négatif.

Néanmoins le RSR reste tout de même élevé ce qui par conséquent nous pousse à augmenter plus le nombre de couche cachée.

### ❖ Réseau de neurones avec 20 N en couche cachée

Tableau 5.2 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN avec 20 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		$R^2$	NASH	RMSE	RSR	$R^2$	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,09	-3,07	490,7	1,30	0,43	-13,27	918,67	0,90
Harr	2	0,94	-10,05	808,4	0,84	1,00	0,24	212,58	0,70
Harr	3	0,99	0,18	220,2	0,71	0,96	-6,81	679,68	0,83
Harr	4	0,44	-2,47	453,0	1,01	0,98	-4,19	553,71	0,77
Harr	5	0,30	-0,22	268,6	1,24	0,43	-9,63	792,67	0,94
Db2	1	0,11	-7,95	727,4	1,02	0,99	-18,31	1068,47	0,85
Db2	2	0,03	-20,19	1119,2	1,00	0,95	-2,52	455,94	0,77
Db2	3	0,97	0,12	228,2	0,72	0,00	-11,20	849,25	1,04
Db2	4	0,21	-76,70	2143,1	1,04	0,97	-0,25	271,92	0,88
Db2	5	0,15	-48,54	1711,2	0,98	0,86	-0,24	271,17	0,94
Sym3	1	0,69	-3,28	503,2	0,87	0,63	-11,84	871,29	0,95
Sym3	2	0,80	-0,79	325,0	0,82	0,98	0,05	236,65	0,76

Sym3	3	0,61	-5,37	613,4	0,90	0,85	-3,70	526,94	0,78
Sym3	4	0,65	-3,77	531,0	0,82	0,58	-1,52	386,13	0,96
Sym3	5	0,99	-13,93	939,3	1,17	0,95	-0,26	272,47	0,65
Coif1	1	0,99	0,44	182,7	0,70	0,82	-0,82	328,30	0,78
Coif1	2	0,99	-0,39	287,1	0,79	0,32	-4,71	580,93	0,91
Coif1	3	0,21	-2,01	421,8	1,01	0,94	-0,62	309,29	0,81
Coif1	4	0,99	-6,38	660,6	0,80	0,08	-13,14	914,07	1,09
Coif1	5	0,99	0,63	147,4	0,67	0,98	0,69	109,01	0,71
Le meilleur filtre : Coif1 avec n = 5		0,99	0,63	147,4	0,67	0,98	0,69	109,01	0,71
Sans filtre		0,96	-4,8	550,8	0,96	0,43	-13,27	918,67	0,89

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.2, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont très satisfaisants avec et sans filtre, en effet avec le meilleur filtre, le Nash dépasse les 60% avec un  $R^2$  de 99% et un RSR 0,67.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une différence remarquable entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le Coif1 avec un degré de décomposition de 5 où le  $R^2$  est de 98% et un NASH de 69%, et la modélisation sans filtrage où  $R^2$  est de 43% avec un NASH toujours négatif mais qui se rapproche de plus en plus de 0.

De plus les Critères du meilleur filtre Wavelet pour 20 neurones en couche cachée sont meilleurs que celui pour 10 couches, en effet tous s'est amélioré  $R^2$  de 97% à 98%, le NASH s'est amélioré de 55% à 69%, ainsi que le RMSE de 176,30 à 109,01 et enfin le RSR a diminué de 0,90 à 0,71.

Nous pouvons donc déduire que le WANN à 20 neurones en couche cachée est meilleur que WANN à 10 neurones en couche cachée avec des résultats optimaux.

### ❖ Réseau de neurones avec 30 N en couche cachée

Tableau 5.3 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN avec 30 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,19	-15,32	982,3	0,98	0,52	-4,44	566,92	1,39
Harr	2	0,67	-1,29	367,8	0,91	0,69	-29,75	1348,33	0,93
Harr	3	0,86	0,16	222,2	0,74	0,35	-33,40	1426,04	1,08
Harr	4	0,25	159,21	3077,3	1,03	0,89	-19,43	1098,98	1,18
Harr	5	0,64	-0,34	281,3	0,84	0,29	-26,64	1278,10	0,95
Db2	1	0,70	-2,69	467,2	0,90	0,14	-24,39	1225,33	0,97
Db2	2	0,07	-17,23	1038,3	0,98	0,08	-45,81	1663,54	0,98
Db2	3	0,77	-16,14	1006,5	0,90	0,93	-3,24	500,53	0,88
Db2	4	0,49	-73,17	2093,9	0,96	0,00	-55,94	1834,60	1,00
Db2	5	0,75	-75,24	2122,8	1,07	0,92	-158,3	3068,93	0,95
Sym3	1	0,25	-45,07	1650,4	0,98	0,01	-13,90	938,60	1,02
Sym3	2	0,87	-17,29	1039,8	0,89	0,10	-16,55	1018,67	0,98
Sym3	3	0,00	-30,33	1360,7	1,02	0,93	-1,06	349,06	0,79
Sym3	4	0,00	-68,88	2032,4	1,00	0,12	-13,99	941,42	1,09
Sym3	5	0,90	-1,81	407,6	0,77	0,71	-3,40	510,18	0,83
Coif1	1	0,20	-2,69	466,9	0,98	0,06	-17,46	1044,56	1,07
Coif1	2	0,03	-6,23	653,9	1,03	0,07	-16,02	1003,15	0,99
Coif1	3	0,03	-60,16	1901,4	0,99	0,37	-31,55	1387,17	1,09
Coif1	4	0,47	363,93	4644,5	0,99	0,37	-22,83	1186,81	0,94
Coif1	5	0,30	-20,99	1140,2	0,96	0,65	-14,76	965,20	0,91
Le meilleur filtre : Sym5 avec n= 3		0,97	0,46	191,5	0,81	0,99	0,36	193,66	0,75
Sans filtre		0,82	-45,4	1673,2	0,96	0,51	-4,43	566,92	1,39

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.3, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont moyennement satisfaisants avec le meilleur filtre, le Nash est moins de 50% avec un  $R^2$  de 96% et un RSR 0,96.

En ce qui concerne la période de validation les résultats des critères d'évaluation sont mauvais par rapport aux résultats précédents c'est-à-dire pour 20 N en couches cachées.

En effet bien qu'il y'ai une faible augmentation du  $R^2$  pour le filtre Sym5 de degré 3 De 98% à 99% , tout le reste est insatisfaisant , un NASH de 36% alors qu'il était à 69% , un RMSE de 193,66 au lieu de 109,62 et un RSR de 0,71 à 0,75 ceci est dû à un phénomène d'Over-fitting ; sachant que la corrélation entre nombre de neurones en couche cachée et fiabilité du modèle est de type exponentiel et que suite à l'atteinte d'un nombre optimal, l'augmentation du nombre de neurones en couche cachée n'apportera pas une amélioration positive et significative aux résultats du modèle et ne fera qu'augmenter le temps de calcul.

### ❖ Conclusion des interprétations

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

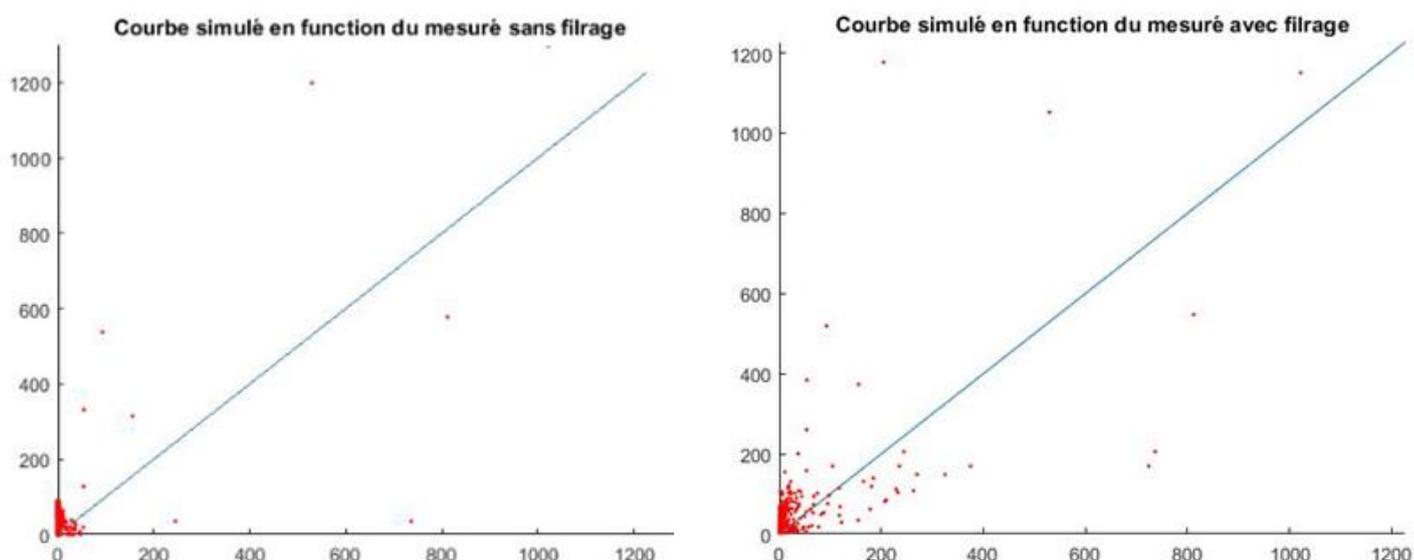


Figure 5.4 : Représentation de la corrélation ( $Q_s$  simulé- $Q_s$  mesuré en [g/s]) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage

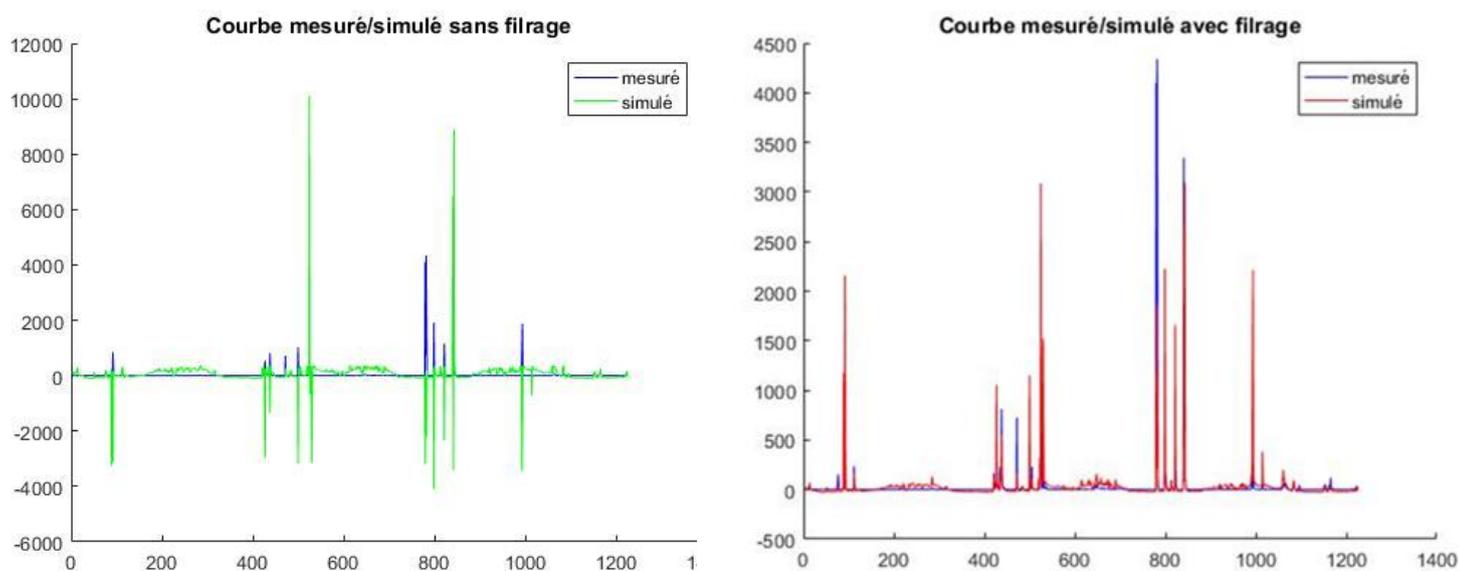


Figure 5.5: Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones (Qs, Ql) sans et avec filtrage

On peut remarquer très clairement que les graphes obtenus par modélisation avec filtrage sont plus convergents aux résultats observés.

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

### V.3.2 WANN au découpage manuel

#### ❖ Réseau de neurones avec 10 N en couche cachée

#### Pour 50 itérations

Tableau 5.4 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN avec 10 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,99	-0,09	254,3	0,80	0,98	-0,17	262,8	0,79
Harr	2	0,98	-0,23	269,5	0,81	0,99	-0,21	268,0	0,77
Harr	3	0,92	-0,20	266,5	0,78	0,99	-0,17	263,1	0,77
Harr	4	0,99	-0,27	274,3	0,78	0,98	-0,17	262,4	0,80
Harr	5	0,98	0,07	234,5	0,78	0,42	-0,75	321,4	1,98
Db2	1	0,97	0,24	212,6	0,77	0,98	-0,77	323,2	0,77

Db2	2	0,99	-0,35	283,0	0,83	0,99	0,20	217,9	0,75
Db2	3	1,00	-0,33	280,1	0,83	0,99	0,31	201,9	0,97
Db2	4	1,00	-0,53	300,3	0,78	0,99	-0,34	281,9	0,86
Db2	5	0,95	0,14	225,1	0,86	0,81	0,04	238,5	1,28
Sym3	1	0,99	-2,03	423,4	0,83	0,99	0,07	234,0	0,79
Sym3	2	0,99	-0,36	283,1	0,81	0,94	-0,41	289,1	0,78
Sym3	3	0,99	-0,09	253,7	0,78	0,99	-0,53	300,9	0,84
Sym3	4	0,98	-0,01	243,8	0,78	0,23	-1,72	400,9	1,04
Sym3	5	0,97	-0,07	251,6	0,74	0,98	0,11	229,2	0,84
Coif1	1	0,99	0,03	240,0	0,81	0,49	-0,72	318,7	1,00
Coif1	2	0,93	0,24	211,3	0,86	0,99	-0,15	260,7	0,82
Coif1	3	0,92	-0,82	327,5	0,84	0,98	0,04	238,1	0,79
Coif1	4	0,99	-0,78	324,4	0,78	0,98	-0,02	245,8	0,84
Coif1	5	0,99	0,06	235,9	0,82	0,99	-0,74	321,1	0,85
Le meilleur filtre : Bior3.1 avec n=4		0,99	0,51	186,4	0,69	0,97	0,65	187,4	0,90
Sans filtre		0,96	-0,18	263,6	0,80	0,94	-0,43	291,2	0,76

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.4, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont satisfaisants, que ça soit pour le  $R^2$ , NASH, RMSE, et acceptable pour le RSR.

En effet, le Nash de la meilleure fonction mère est de 51 % avec un  $R^2$  de 99% un RMSE de 186,4 et un RSR de 0,69 qui est moyennement meilleur sans filtrage ce qui prouve une bonne adéquation des paramètres.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une différence remarquable entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le Bior3.1 avec un degré de décomposition de 4 où le  $R^2$  est de 97 % et un NASH de 65 %, et la modélisation sans filtrage où  $R^2$  est de 94 % avec un NASH négatif.

Passons maintenant au WANN avec 100 itérations.

**Pour 100 itérations**

Tableau 5.5 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN avec 10 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,99	-0,22	268,2	0,81	0,99	0,16	222,9	0,86
Harr	2	0,99	0,15	223,6	0,90	0,99	0,04	238,1	0,80
Harr	3	1,00	0,09	232,2	0,80	0,99	0,12	227,7	0,78
Harr	4	0,98	-0,10	254,7	0,80	0,99	0,15	224,2	0,79
Harr	5	0,99	-0,07	251,6	0,78	0,99	0,08	232,6	0,77
Db2	1	0,97	0,01	241,5	0,81	0,98	0,23	213,8	0,78
Db2	2	0,99	-0,02	245,3	0,77	0,98	-0,09	254,4	0,83
Db2	3	0,99	-0,07	251,7	0,78	0,99	0,10	231,1	0,77
Db2	4	1,00	-0,26	272,5	0,80	0,99	0,24	211,8	0,78
Db2	5	0,98	0,23	213,3	0,77	0,99	0,16	223,5	0,76
Sym3	1	0,99	0,06	235,5	0,77	0,99	0,08	233,5	0,79
Sym3	2	1,00	0,00	242,8	0,74	0,99	-0,04	247,8	0,80
Sym3	3	0,99	-0,01	244,3	0,77	0,99	0,20	218,1	0,83
Sym3	4	0,99	-0,03	247,3	0,80	0,99	0,08	232,9	0,77
Sym3	5	0,99	0,00	242,8	0,78	0,98	-0,13	258,5	0,78
Coif1	1	0,99	0,01	242,1	0,77	0,99	0,13	226,2	0,75
Coif1	2	0,98	-0,18	264,6	0,80	0,98	0,00	243,6	0,82
Coif1	3	0,99	-0,02	245,5	0,78	0,91	-0,12	257,8	0,85
Coif1	4	0,99	0,05	237,3	0,77	0,99	0,04	238,5	0,79
Coif1	5	0,99	0,06	236,2	0,78	0,99	0,08	233,5	0,77
Le meilleur filtre : Rbio1.1 avec n=2		0,98	0,63	204,1	0,69	0,98	0,52	183,2	0,83
Sans filtre		0,95	0,20	217,3	0,79	0,93	0,10	231,9	0,76

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.5, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont satisfaisants, que ça soit pour le  $R^2$ , NASH, et RMSE et acceptable pour le RSR.

En effet, le Nash de la meilleure fonction mère est de 63 % avec un  $R^2$  de 98% un RMSE de 204,1 et un RSR de 0,69 qui est moyennement meilleur sans filtrage ce qui prouve une bonne adéquation des paramètres.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une différence remarquable entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le Rbio1.1 avec un degré de décomposition de 2 où le  $R^2$  est de 98 % et un NASH de 52 % , et la modélisation sans filtrage où  $R^2$  est de 93 % avec un NASH de 0,1.

De plus on remarque une légère amélioration des résultats en comparaison avec 50 itérations.

Passons maintenant au WANN avec 20 N en couche cachée.

### ❖ Réseau de neurones avec 20 N couche cachée

#### Pour 50 itérations

Tableau 5.6 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN avec 20 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		$R^2$	NASH	RMSE	RSR	$R^2$	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,93	-0,50	297,9	0,73	0,84	0,08	233,3	1,11
Harr	2	0,99	-0,23	269,5	0,73	0,99	-13,60	928,9	0,88
Harr	3	0,36	-1,19	359,5	0,97	0,99	0,56	160,7	0,75
Harr	4	0,50	-11,49	859,2	0,91	0,21	-2,43	450,4	1,05
Harr	5	0,92	-1,83	409,3	0,86	0,99	0,46	179,2	0,69
Db2	1	0,41	-9,49	787,4	1,20	0,99	0,49	172,8	0,67
Db2	2	0,87	-3,10	492,2	0,93	0,96	-0,21	267,9	0,76
Db2	3	0,11	-6,18	651,5	1,18	0,02	-1,43	378,8	1,21
Db2	4	0,55	-24,93	1238	1,12	0,85	-17,19	1037,0	0,91
Db2	5	0,06	-9,03	769,9	1,00	0,87	-6,85	681,4	0,86
Sym3	1	0,67	-9,38	783,4	0,88	0,55	-10,55	826,5	1,25
Sym3	2	0,87	-2,63	463,3	0,82	0,93	0,34	197,5	0,91

Sym3	3	1,00	0,31	201,4	0,70	0,01	-2,24	437,6	1,26
Sym3	4	0,91	-2,71	468,3	0,85	0,23	-0,72	318,9	1,10
Sym3	5	0,68	-1,99	420,7	0,89	0,01	-7,21	696,5	1,05
Coif1	1	0,80	0,37	192,6	0,97	0,78	-18,93	1085,5	0,93
Coif1	2	0,51	-12,08	879,2	0,96	0,62	-1,19	359,7	0,88
Coif1	3	0,36	-1,71	399,9	0,97	0,56	-2,85	476,8	0,89
Coif1	4	0,08	-16,68	1022,2	1,08	0,99	-12,41	890,3	0,85
Coif1	5	0,62	-29,86	1350,9	1,10	0,99	0,28	206,8	0,71
Le meilleur filtre : coif2 avec n=3		0,99	0,54	192,7	0,61	0,98	0,62	146,5	0,70
Sans filtre		0,55	-0,60	414,2	0,89	0,89	-0,10	249,8	0,90

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.6, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont satisfaisants, que ça soit pour le  $R^2$ , NASH, et RMSE et acceptable pour le RSR.

En effet, le Nash de la meilleure fonction mère est de 54 % avec un  $R^2$  de 99% un RMSE de 192,7 et un RSR de 0,61, qui sont largement meilleurs sans filtrage ce qui prouve une bonne adéquation des paramètres.

De plus les résultats semblent s'améliorer avec l'augmentation du nombre de neurones en couche cachée dû à l'augmentation du nombre de neurones en couche cachée.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une différence remarquable entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le Coif2 avec un degré de décomposition de 3 où le  $R^2$  est de 98 % et un NASH de 65 %, et la modélisation sans filtrage où  $R^2$  est de 89 % avec un NASH négatif.

Passons maintenant au WANN avec 100 itérations.

**Pour 100 itérations**

Tableau 5.7 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN avec 20 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,97	0,12	227,8	0,72	0,96	0,40	188,5	0,67
Harr	2	0,99	0,05	237,2	0,75	0,97	-0,37	284,4	0,79
Harr	3	0,99	-1,51	385,3	0,83	0,99	0,23	213,6	0,74
Harr	4	0,99	0,10	230,5	0,73	0,94	0,16	222,2	0,71
Harr	5	0,96	-2,22	436,6	0,82	0,97	-1,45	380,5	0,75
Db2	1	0,97	0,14	225,2	0,75	0,98	-0,29	276,6	0,99
Db2	2	0,94	-0,75	322,1	0,81	0,99	-0,30	277,2	0,87
Db2	3	0,96	0,01	241,8	0,78	0,99	0,26	209,5	0,72
Db2	4	0,99	-1,56	389,1	0,77	0,83	-1,17	358,5	0,90
Db2	5	0,99	0,43	184,0	0,92	0,99	0,22	214,3	0,74
Sym3	1	0,89	-0,22	269,1	0,71	0,99	0,29	205,2	0,72
Sym3	2	0,99	0,13	226,5	0,71	0,96	0,24	211,7	0,69
Sym3	3	0,99	0,00	242,6	0,75	0,85	-7,15	693,9	0,85
Sym3	4	0,91	-0,05	249,1	0,75	0,99	0,22	214,8	0,73
Sym3	5	0,93	-0,05	249,0	0,74	0,99	0,31	202,1	0,71
Coif1	1	0,99	-0,71	317,6	0,80	0,99	-0,44	292,2	0,77
Coif1	2	0,99	0,10	230,3	0,73	0,95	0,07	234,0	0,66
Coif1	3	0,99	0,26	209,5	0,72	0,99	0,36	194,3	0,74
Coif1	4	0,99	-0,04	248,1	0,70	0,97	0,24	212,2	0,75
Coif1	5	0,96	-0,08	252,9	0,71	0,44	-1,82	408,7	0,93
Le meilleur filtre : Sym7 avec n=2		0,99	0,72	211,1	0,69	0,99	0,66	144,5	0,68
Sans filtre		0,97	-0,11	255,2	0,73	0,97	0,26	171,7	0,70

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.7, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont satisfaisants, que ça soit pour le  $R^2$ , NASH, et RMSE et acceptable pour le RSR.

En effet, le Nash de la meilleure fonction mère est de 72 % avec un  $R^2$  de 99% un RMSE de 211,1 et un RSR de 0,69 qui sont largement meilleurs sans filtrage ce qui prouve une bonne adéquation des paramètres.

De plus les résultats semblent s'améliorer avec l'augmentation du nombre d'itérations.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une différence remarquable entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le Sym7 avec un degré de décomposition de 2 où le  $R^2$  est de 99 % et un NASH de 66 %, et la modélisation sans filtrage où  $R^2$  est de 97 % avec un NASH de 26% .

De plus les résultats  $R^2$ , NASH et RMSE sont optimaux, d'une part conséquence de sa configuration, et d'autre part d'un meilleur apprentissage vis-à-vis du réseau de neurones de même configuration.

Passons maintenant au WANN avec 30 N en couche cachée.

### ❖ Réseau de neurones avec 30 neurones en couche cachée

#### Pour 50 itérations

Tableau 5.8 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN avec 30 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		$R^2$	NASH	RMSE	RSR	$R^2$	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,73	-13,99	941,5	0,89	0,35	-3,35	507,2	0,94
Harr	2	0,25	-11,31	853,2	0,95	0,00	-19,05	1088,8	1,02
Harr	3	0,25	-4,57	573,6	0,97	0,25	-2,45	451,6	1,41
Harr	4	0,35	-7,56	711,5	0,93	0,62	-7,24	697,8	1,25
Harr	5	0,92	-0,60	307,7	0,72	0,97	-0,41	288,3	0,89
Db2	1	0,53	-1,71	400,2	0,96	0,39	-2,31	442,5	0,91
Db2	2	0,07	-4,93	592,2	1,02	0,51	-5,34	612,2	0,90
Db2	3	0,92	-24,32	1223,4	1,15	0,06	-7,01	687,9	1,14
Db2	4	0,93	-7,38	703,6	0,86	0,84	-1,56	389,3	0,85
Db2	5	0,97	-0,93	338,0	0,74	0,00	-2,47	452,7	1,17

Sym3	1	0,75	-0,37	284,9	0,76	0,27	-3,28	502,9	0,98
Sym3	2	0,65	-25,05	1241,0	0,91	0,16	-18,64	1077,6	1,09
Sym3	3	0,03	-4,71	580,8	1,17	0,02	-16,30	1011,2	1,01
Sym3	4	0,53	-17,73	1052,2	0,92	0,25	-9,14	774,0	0,97
Sym3	5	0,02	-14,60	960,3	1,05	0,29	-7,37	703,6	0,96
Coif1	1	0,90	-1,09	351,8	0,82	0,83	-4,43	566,4	0,86
Coif1	2	0,70	-35,48	1468,5	0,92	0,88	-48,17	1704,9	0,93
Coif1	3	0,40	-47,17	1687,3	1,05	0,23	-9,68	794,4	0,97
Coif1	4	0,86	-7,71	717,7	0,83	0,87	-1,10	352,3	0,75
Coif1	5	0,55	-45,09	1650,8	0,96	0,01	-13,78	934,9	1,02
Le meilleur filtre : Rbio3.3 avec n=4		0,74	0,31	201,61	0,93	0,98	0,50	177,9	0,69
Sans filtre		0,33	-10,24	815,3	1,09	0,92	-3,29	504,1	0,78

#### Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.8, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont moyennement satisfaisants.

En effet, le Nash de la meilleure fonction mère est de 31 % avec un  $R^2$  de 74% un RMSE de 201,61 et un RSR de 0,93 ,qui est sont largement meilleurs sans filtrage ce qui prouve une mauvaise adéquation des paramètres pour un WANN à 30 couches cachées.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une différence remarquable entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le Rbio3.3 avec un degré de décomposition de 4 où le  $R^2$  est de 98 % et un NASH de 50 % , et la modélisation sans filtrage où  $R^2$  est de 92 % avec un NASH négatif.

De plus on remarque légère dégradation des résultats dûs à un phénomène d'Overfitting ; sachant que la corrélation entre nombre de neurones en couche cachée et fiabilité du modèle est de type exponentiel et que suite à l'atteinte d'un nombre optimal, l'augmentation du nombre de neurones en couche cachée n'apporterait pas une amélioration positive et significative aux résultats du modèle.

Passons maintenant au WANN avec 100 itérations.

**Pour 100 itérations**

Tableau 5.9 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN avec 30 N en couche cachée avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,97	-1,16	357,8	0,78	0,83	-0,81	327,5	0,84
Harr	2	0,81	-0,50	297,3	0,79	0,99	0,34	198,1	0,79
Harr	3	0,98	0,26	209,3	0,69	0,98	0,32	200,4	0,71
Harr	4	0,46	-1,19	359,7	0,96	0,00	0,26	209,4	0,69
Harr	5	0,46	-0,49	297,1	0,99	0,93	0,20	216,9	0,69
Db2	1	0,99	0,37	192,3	0,76	0,96	0,46	178,3	0,70
Db2	2	0,57	-0,15	260,4	1,02	0,52	-1,20	360,7	0,98
Db2	3	0,89	-0,44	292,0	0,81	0,90	-1,79	406,2	0,87
Db2	4	0,89	-0,22	268,2	0,83	0,99	0,19	218,2	0,69
Db2	5	0,94	0,02	241,3	0,70	0,99	0,26	208,9	0,71
Sym3	1	0,82	-2,08	426,6	0,83	0,96	0,11	229,9	0,89
Sym3	2	0,99	-0,16	262,4	0,78	0,99	0,09	232,2	0,91
Sym3	3	0,97	-0,92	337,0	0,82	0,99	0,40	188,5	0,71
Sym3	4	0,99	0,46	178,3	0,74	0,99	0,35	195,7	0,67
Sym3	5	0,10	-2,74	470,4	1,16	0,74	-2,67	465,8	0,89
Coif1	1	0,95	-0,37	284,2	0,77	0,98	0,16	222,8	0,72
Coif1	2	1,00	0,29	204,8	0,72	0,94	-0,98	342,2	0,85
Coif1	3	0,95	-0,73	319,5	0,80	0,94	0,38	190,9	0,82
Coif1	4	0,89	-0,08	252,7	0,83	0,98	0,08	232,7	0,81
Coif1	5	1,00	0,34	197,7	0,73	0,98	-0,50	298,0	0,79
Le meilleur filtre : Bior2.4 avec n=3		0,99	0,52	167,5	0,78	0,97	0,55	172,5	0,65
Sans filtre		0,97	0,19	217,8	0,82	0,94	-0,91	334,3	0,91

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.9, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont moyennement satisfaisants, que ça soit pour le  $R^2$ , NASH, et RMSE et acceptable pour le RSR.

En effet, le Nash de la meilleure fonction mère est de 52 % avec un  $R^2$  de 99% un RMSE de 167,5 et un RSR de 0,78 qui sont largement meilleurs sans filtrage ce qui prouve une adéquation plutôt moyenne des paramètres.

De plus les résultats semblent s'améliorer avec l'augmentation du nombre d'itérations même s'ils ont considérablement diminué en augmentant le nombre de neurones en couche cachée.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une différence remarquable entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le Bior2.4 avec un degrés de décomposition de 3 où le  $R^2$  est de 97 % et un NASH de 55 % , et la modélisation sans filtrage où  $R^2$  est de 94 % avec un NASH négatif.

### III.2.1 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 est celui qui donne une meilleure simulation et donc qui montre une très bonne corrélation entre le débit solide et le débit liquide

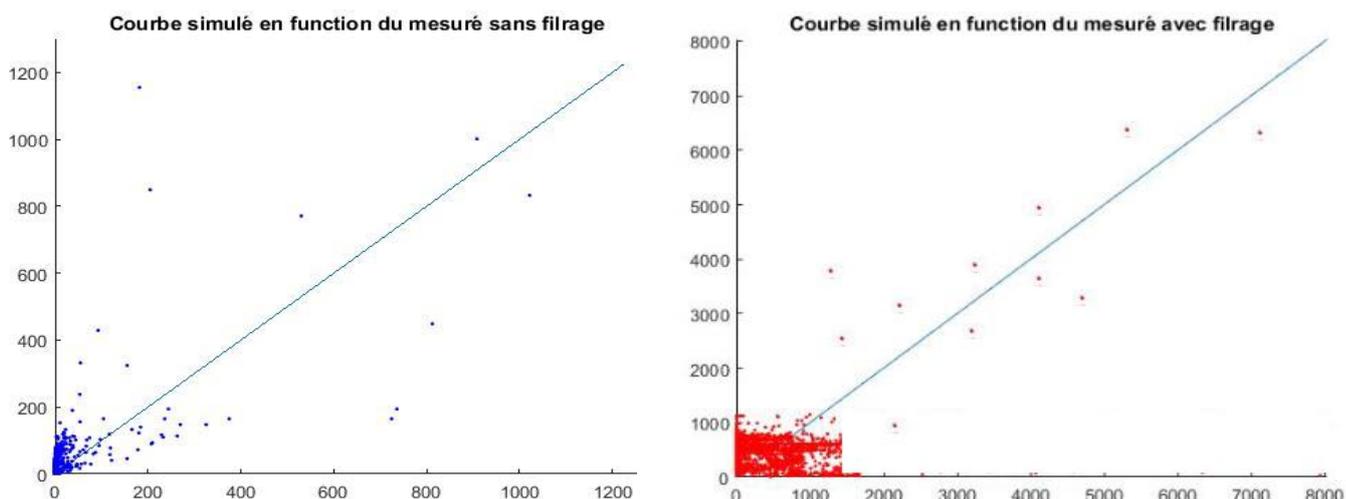


Figure 5.6 : Représentation de la corrélation ( $Q_s$  simulé- $Q_s$  mesuré en [g/s]) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage

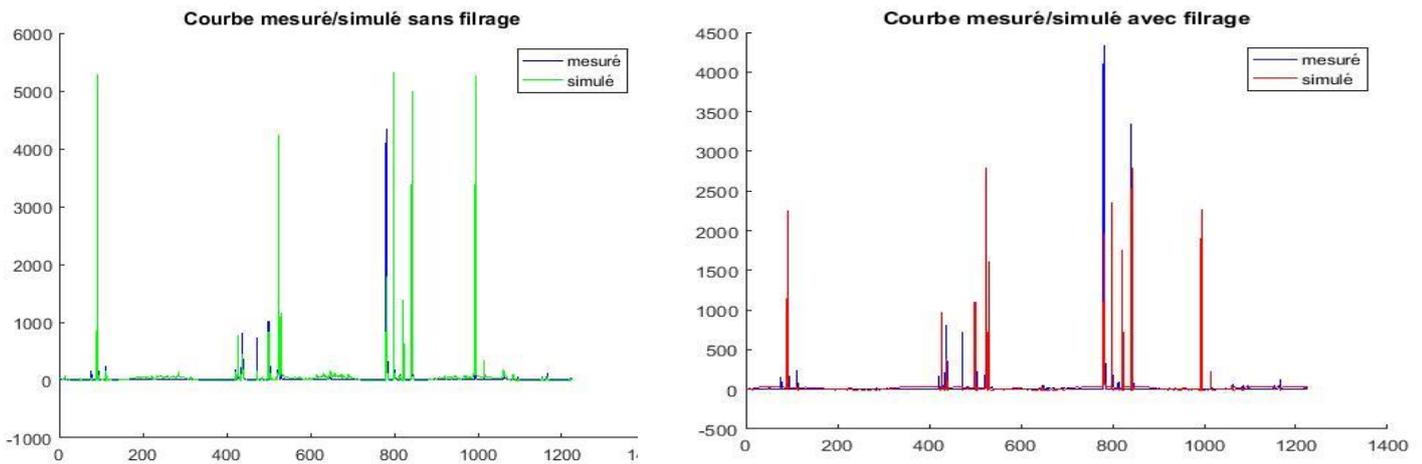


Figure 5.7: Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones Qs, Ql sans et avec filtrage

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.

### V.3.3 WANFIS

#### ❖ ANFIS avec 3 fonctions d'appartenance

#### Pour 20 itérations

Tableau 5.10 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec 3 fonctions d'appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Harr	2	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Harr	3	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Harr	4	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Harr	5	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Db2	1	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Db2	2	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78

Db2	3	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Db2	4	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Db2	5	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Sym3	1	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Sym3	2	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Sym3	3	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Sym3	4	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Sym3	5	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Coif1	1	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Coif1	2	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Coif1	3	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Coif1	4	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Coif1	5	0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Le meilleur filtre : Harr avec n = 1		0,98	0,57	195,3	0,78	0,98	0,57	195,3	0,78
Sans filtre		0,98	0,57	195,3	0,78	0,97	0,57	195,3	0,78

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.10, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont très satisfaisants, que ça soit pour le  $R^2$ , NASH, et RMSE et acceptable pour le RSR, avec ou sans filtre, qui sont exactement les mêmes que pour la validation ce qui prouve une bonne adéquation des paramètres.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une stabilité entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le harr avec un degré de décomposition de 1 où le  $R^2$  est de 98 % et un NASH de 57%, et la modélisation sans filtrage où la différence est de l'ordre de  $10^{-5}$ .

De plus tous les critères d'évaluation des fonctions mère se stabilisent pour les différents degrés de décomposition, la différence est d'ordre  $10^{-5}$ .

**Pour 30 itérations**

Tableau 5.11 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec 3 fonctions d'appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Harr	2	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Harr	3	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Harr	4	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Harr	5	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Db2	1	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Db2	2	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Db2	3	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Db2	4	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Db2	5	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Sym3	1	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Sym3	2	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Sym3	3	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Sym3	4	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Sym3	5	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Coif1	1	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Coif1	2	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Coif1	3	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Coif1	4	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Coif1	5	0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Le meilleur filtre : Harr avec n = 1		0,98	0,58	195,3	0,78	0,98	0,58	195,3	0,78
Sans filtre		0,97	0,58	195,3	0,78	0,97	0,58	195,3	0,78

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.11, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont très satisfaisants, que ça soit pour le  $R^2$ , NASH, et RMSE, et acceptable pour le RSR, avec ou sans filtre, qui sont exactement les mêmes que pour la validation ce qui prouve une bonne adéquation des paramètres.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une stabilité entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le harr avec un degré de décomposition de 1 où le  $R^2$  est de 98 % et un NASH de 58%, et la modélisation sans filtrage où la différence est de l'ordre de  $10^{-5}$ .

De plus tous les critères d'évaluation des fonctions mère se stabilisent pour les différents degrés de décomposition.

Si l'on compare les résultats de 20 itérations et 30 itérations nous remarquons une faible amélioration, ils sont carrément les mêmes.

Mais voyons la différence en variant le nombre d'itérations à 4.

### ❖ ANFIS avec 4 fonctions d'appartenance

#### Pour 20 itérations

Tableau 5.12 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec 4 fonctions membres avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		$R^2$	NASH	RMSE	RSR	$R^2$	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Harr	2	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Harr	3	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Harr	4	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Harr	5	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Db2	1	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Db2	2	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Db2	3	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Db2	4	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Db2	5	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Sym3	1	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62

Sym3	2	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Sym3	3	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Sym3	4	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Sym3	5	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Coif1	1	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Coif1	2	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Coif1	3	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Coif1	4	0,99	0,68	15,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Coif1	5	0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Le meilleur filtre : Harr avec n = 1		0,99	0,68	105,6	0,62	0,99	0,68	105,6	0,62
Sans filtre		0,98	0,68	105,6	0,62	0,98	0,68	105,6	0,62

Interprétation des résultats :

D’après le Tableau 5.12, on remarque qu’en période de calage les critères d’évaluation du modèle sont très satisfaisants, que ça soit pour le  $R^2$ , NASH, et RMSE, et acceptable pour le RSR, avec ou sans filtre, qui sont exactement les mêmes que pour la validation ce qui prouve une bonne adéquation des paramètres.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une stabilité entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le harr avec un degré de décomposition de 1 où le  $R^2$  est de 99 % et un NASH de 68%, et la modélisation sans filtrage où la différence est de l’ordre de  $10^{-5}$ .

De plus tous les critères d’évaluation des fonctions mère se stabilisent pour les différents degrés de décomposition, la différence est d’ordre  $10^{-5}$ .

### Pour 30 itérations

Tableau 5.13 : Critères d’évaluation pour le modèle WANFIS avec 4 fonctions d’appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Harr	2	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62

Harr	3	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Harr	4	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Harr	5	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Db2	1	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Db2	2	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Db2	3	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Db2	4	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Db2	5	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Sym3	1	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Sym3	2	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Sym3	3	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Sym3	4	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Sym3	5	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Coif1	1	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Coif1	2	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Coif1	3	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Coif1	4	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Coif1	5	0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Le meilleur filtre : Harr avec n = 1		0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62
Sans filtre		0,99	0,81	105,6	0,62	0,99	0,81	105,6	0,62

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.13, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont très satisfaisants, que ça soit pour le  $R^2$ , NASH, et RMSE, et acceptable pour le RSR, avec ou sans filtre, qui sont exactement les mêmes que pour la validation ce qui prouve une bonne adéquation des paramètres.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une stabilité entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le harr avec un degré de décomposition de 1 où le  $R^2$  est de 99 % et un NASH de 71 %, et la modélisation sans filtrage où la différence est de l'ordre de  $10^{-5}$ .

De plus tous les critères d'évaluation des fonctions mère se stabilisent pour les différents degrés de décomposition.

Si l'on compare les résultats de 20 itérations et 30 itérations nous remarquons une faible amélioration.

Mais voyons la différence en variant le nombre d'itérations à 5.

### ❖ ANFIS avec 5 fonctions d'appartenance

#### Pour 20 itérations

Tableau 5.14 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec 5 fonctions d'appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Harr	2	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Harr	3	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Harr	4	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Harr	5	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Db2	1	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Db2	2	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Db2	3	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Db2	4	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Db2	5	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Sym3	1	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Sym3	2	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Sym3	3	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Sym3	4	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Sym3	5	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Coif1	1	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Coif1	2	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Coif1	3	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Coif1	4	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Coif1	5	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01

Le meilleur filtre : Harr avec n = 1	0,99	0,65	108,8	1,01	0,99	0,65	108,8	1,01
Sans filtre	0,98	0,65	108,8	1,01	0,98	0,65	108,8	1,01

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.14, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont très satisfaisants, que ça soit pour le  $R^2$ , NASH, et RMSE, et acceptable pour le RSR, avec ou sans filtre, qui sont exactement les mêmes que pour la validation ce qui prouve une bonne adéquation des paramètres.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une stabilité entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le harr avec un degré de décomposition de 1 où le  $R^2$  est de 99 % et un NASH de 65%, et la modélisation sans filtrage où la différence est de l'ordre de  $10^{-5}$ .

De plus tous les critères d'évaluation des fonctions mère se stabilisent pour les différents degrés de décomposition, la différence est d'ordre  $10^{-5}$ .

### Pour 30 itérations

Tableau 5.15 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec 5 fonctions d'appartenance avec Calage Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Calage				Validation			
		$R^2$	NASH	RMSE	RSR	$R^2$	NASH	RMSE	RSR
Harr	1	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Harr	2	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Harr	3	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Harr	4	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Harr	5	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Db2	1	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Db2	2	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Db2	3	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Db2	4	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Db2	5	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90

Sym3	1	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Sym3	2	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Sym3	3	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Sym3	4	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Sym3	5	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Coif1	1	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Coif1	2	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Coif1	3	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Coif1	4	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Coif1	5	0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Le meilleur filtre : Harr avec n = 1		0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90
Sans filtre		0,99	0,66	109,1	0,90	0,99	0,66	109,1	0,90

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.15, on remarque qu'en période de calage les critères d'évaluation du modèle sont très satisfaisants, que ça soit pour le  $R^2$ , NASH, et RMSE, et acceptable pour le RSR, avec ou sans filtre, qui sont exactement les mêmes que pour la validation ce qui prouve une bonne adéquation des paramètres.

En ce qui concerne la période de validation nous remarquons une stabilité entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le harr avec un degré de décomposition de 1 où le  $R^2$  est de 99% et un NASH de 66%, et la modélisation sans filtrage où la différence est de l'ordre de  $10^{-5}$ .

De plus tous les critères d'évaluation des fonctions mère se stabilisent pour les différents degrés de décomposition.

Si l'on compare les résultats de 20 itérations et 30 itérations nous remarquons une dégradation qui se justifie à une surévaluation.

### ❖ Conclusion des interprétations

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

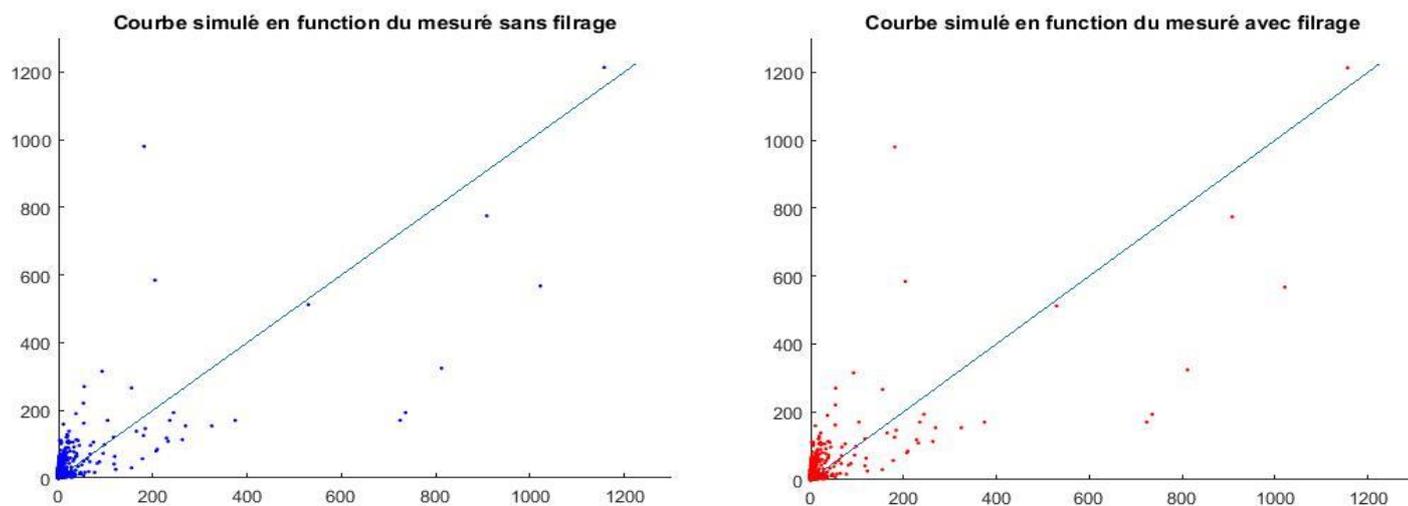


Figure 5.7 : Représentation de la corrélation ( $Q_s$  simulé- $Q_s$  mesuré [g/s]) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage

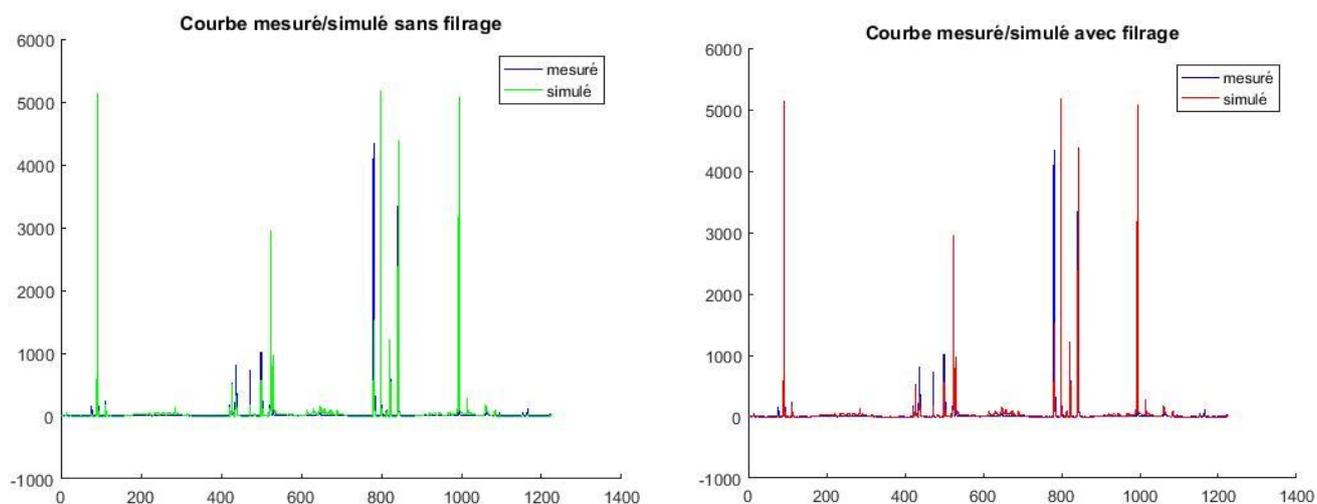


Figure 5.8: Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones  $Q_s$ ,  $Q_l$  sans et avec filtrage

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

### V.3.4 Comparaison des trois modélisations avec le meilleur filtre

#### Wavelet

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

Tableau 5.16 : Comparaison entre les différents types du modèle

Type de modèle	R <sup>2</sup>	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	<b>0,99</b>	<b>0,81</b>	<b>105,6</b>	<b>0,62</b>	<b>26 minutes et 46 secondes</b>

### V.3.5 Estimation de la robustesse des modèles

L'une des techniques les plus utilisées pour évaluer la robustesse des modèles est la technique du double échantillon. Elle permet de tester l'adaptabilité des modèles quelle que soit leur complexité. Si l'on dispose d'observations chronologiques, il suffira de subdiviser la période d'observation de chaque bassin versant en sous-périodes, avec calage sur une période et validation sur le reste des observations. Dans cette étude, la robustesse est évaluée en faisant la valeur absolue de la différence des valeurs des Nash obtenus en calage et en validation, plus la valeur se rapproche de 0 mieux le modèle est (Klemes, 1986 in Perrin, 2000).

Tableau 5.17 : Estimation de la robustesse des modèles

Modèle	Calage	Validation	Robustesse	Observation
	NASH	NASH		
WANN au découpage automatique avec 20 N en couche cachée	0,63	0,69	0,06	Très bon
WANN au découpage manuel avec 20 N en couche cachée et 100 itérations	0,72	0,66	0,06	Très bon
WANFIS avec 4 fonctions membres et 30 itérations	<b>0,81</b>	<b>0,81</b>	<b>0</b>	Parfait

### V.3.6 Conclusion

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 (Quesney, 1999).

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

### V.4 Modélisation avec les données Algériennes

Après avoir validé les modèles et trouver le meilleur modèle en terme de critère de validation et temps de calcul, essayons de les appliquer aux données de l'Isser qui sont connues pour être douteuses en simulant l'envasement à court terme, moyen terme et long terme puis le comparant avec l'envasement mesuré, et voyons si le meilleur modèle pour le Colorado reste le meilleur y compris pour l'Algérie

L'application des modèles nous donne les résultats suivants

Avec

- le court terme de 2004 à 2010 (6 ans) ;
- le moyen terme de 1988 à 2004 (16 ans) ;
- le long terme de 1988 à 2010 (22 ans).

#### V.4.1 WANN au découpage automatique avec 20N en couche cachée

Tableau 5.18 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN automatique avec Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Validation				L'erreur absolue entre l'envasement simulé et mesuré		
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	Court terme	Moyen terme	Long terme
Harr	1	0,03	-3,12	2893,4	1,11	0,27	0,92	1,20
Harr	2	0,18	-0,43	1702,9	1,68	1,16	1,25	0,08
Harr	3	0,01	-1,35	2186,2	1,27	2,66	1,90	-0,76
Harr	4	0,07	0,00	1427,0	8,24	1,32	1,32	0,00
Harr	5	0,00	-0,25	1596,5	2,20	1,17	1,33	0,16
Db2	1	0,00	-0,64	1827,8	1,60	0,87	1,16	0,29
Db2	2	0,01	-0,23	1583,4	2,39	1,17	1,04	0,12
Db2	3	0,02	-0,01	1435,8	6,33	1,32	1,24	0,08
Db2	4	0,04	-0,11	1502,0	2,77	1,21	1,25	0,04
Db2	5	0,17	-0,21	1569,7	2,00	1,60	1,58	0,01
Sym3	1	0,01	-9,07	4524,2	1,07	1,35	2,59	1,24
Sym3	2	0,00	-1,96	2452,8	1,22	1,22	1,64	0,42
Sym3	3	0,05	-0,71	1865,1	1,39	0,29	1,15	0,86
Sym3	4	0,18	-0,55	1773,7	1,56	1,25	1,23	0,01
Sym3	5	0,04	-2,04	2487,5	1,26	0,78	0,25	0,54
Coif1	1	0,01	-0,41	1692,8	1,81	0,81	1,12	0,31
Coif1	2	0,00	-0,70	1860,0	1,53	2,70	1,78	0,92
Coif1	3	0,00	-0,43	1703,7	1,82	1,69	1,39	0,30
Coif1	4	0,04	-0,28	1612,9	2,31	0,87	0,84	0,02
Coif1	5	0,00	-0,64	1827,4	1,57	1,61	1,32	0,29

Le meilleur filtre : Db6 avec n=1	0,52	0,01	1418,5	1,00	1,20	1,23	0,00
Sans filtre	0,19	-2,25	2573,6	1,25	3,05	3,04	0,00

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.18, on remarque qu'en période de validation une différence remarquable entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le Db6 avec un degré de décomposition de 1 où le  $R^2$  est de 52 % et un NASH de 1 % , et la modélisation sans filtrage où  $R^2$  est de 19 % avec un NASH de -2,25.

De plus l'erreur absolue entre l'envasement simulé et mesuré avec le filtre est moindre, en effet celle-ci est de 1,20 tonne à court terme, 1,23 tonne à moyen terme et enfin 0 en long terme.

### ❖ Conclusion de l'interprétation

A travers cette partie de résultats. On peut dire que les critères de validation pour le WANN au découpage automatique avec 20N en couche cachée sont mauvais dus aux données douteuses, malgré cela la simulation de l'envasement est parfaite à long terme et moyenne à court et moyen terme.

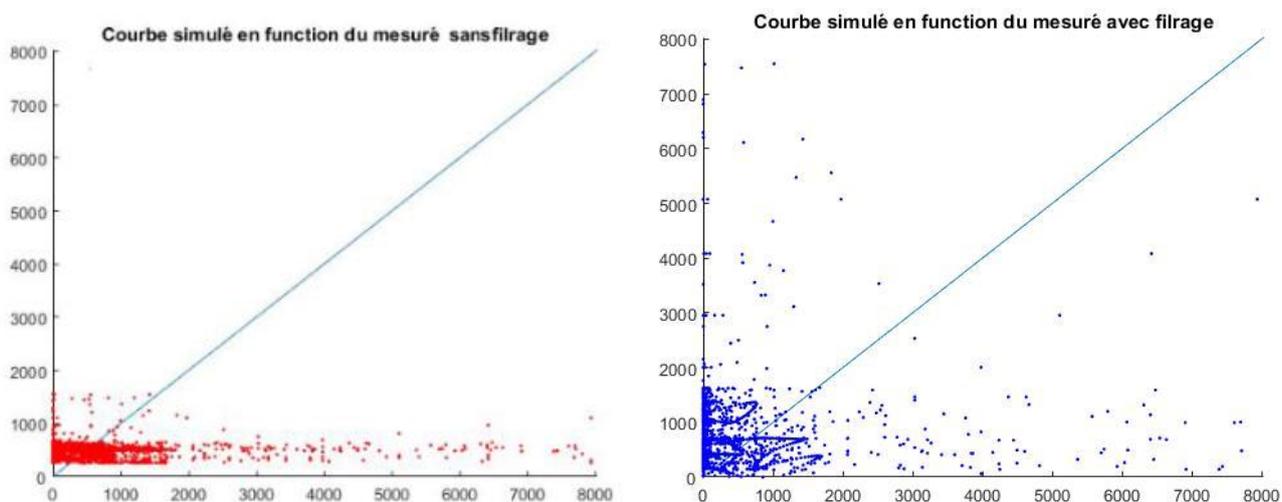


Figure 5.9 : Représentation de la corrélation ( $Q_s$  simulé- $Q_s$  mesuré [g/s]) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage

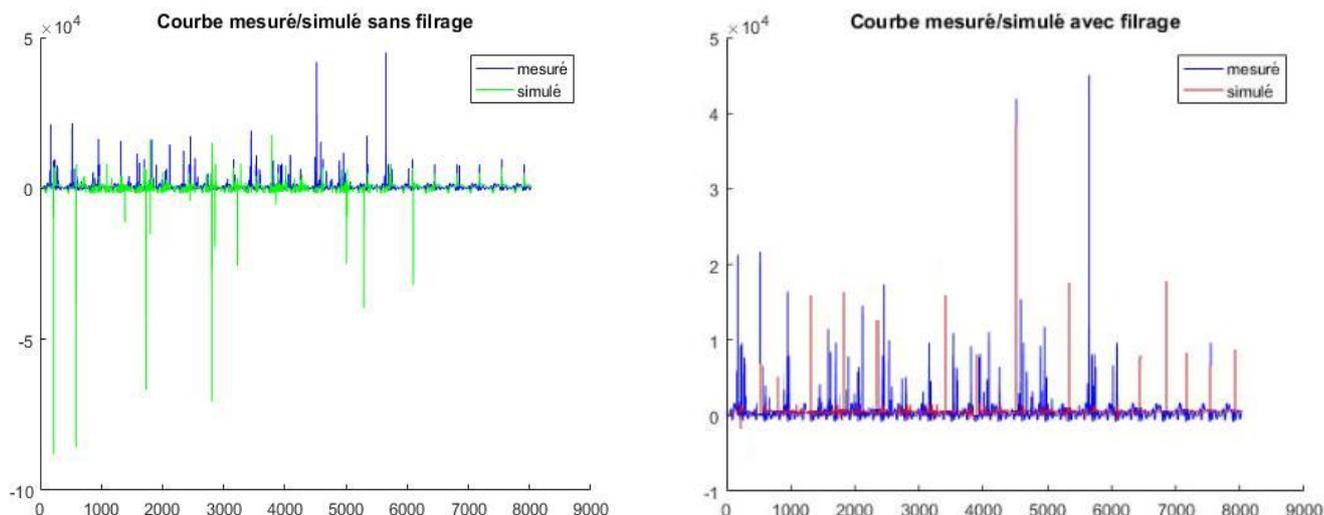


Figure 5.10: Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones Qs, Ql sans et avec filtrage

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, et cela malgré les critères d'évaluation.

#### V.4.2 WANN au découpage manuel avec 20N en couches cachées et 100 Itérations

Tableau 5.19 : Critères d'évaluation pour le modèle WANN manuel avec Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Validation				L'erreur absolue entre l'envasement simulé et mesuré		
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	Court terme	Moyen terme	Long terme
Harr	1	0,00	-0,26	1603,1	2,16	1,50	0,54	0,96
Harr	2	0,26	-0,89	1961,8	1,58	6,36	4,83	1,54
Harr	3	0,03	-0,02	1440,0	5,48	2,06	1,88	0,18
Harr	4	0,00	-0,39	1683,3	1,88	5,53	4,25	1,28
Harr	5	0,02	-0,03	1445,5	4,99	2,24	2,04	0,20
Db2	1	0,02	-0,02	1438,8	5,52	1,13	1,26	0,13
Db2	2	0,02	-0,13	1517,3	2,76	1,65	1,61	0,04
Db2	3	0,02	-0,03	1447,9	4,77	2,01	1,86	0,15

Db2	4	0,02	-0,01	1432,3	6,59	1,87	1,75	0,11
Db2	5	0,03	-0,12	1509,8	2,82	2,54	2,20	0,34
Sym3	1	0,01	-0,12	1506,2	2,97	2,25	2,05	0,20
Sym3	2	0,04	-0,10	1496,9	2,92	2,75	2,37	0,38
Sym3	3	0,00	-0,05	1457,6	5,14	1,59	1,56	0,03
Sym3	4	0,10	-0,15	1530,1	2,48	2,74	2,34	0,40
Sym3	5	0,00	-0,02	1440,9	6,75	1,54	1,54	0,01
Coif1	1	0,03	-0,03	1445,5	5,13	2,25	2,01	0,24
Coif1	2	0,03	-0,01	1435,9	5,75	1,76	1,70	0,06
Coif1	3	0,01	-0,02	1437,6	5,86	1,34	1,42	0,07
Coif1	4	0,01	-0,01	1431,8	6,92	1,44	1,47	0,02
Coif1	5	0,05	-0,08	1479,9	3,08	3,29	2,75	0,54
Le meilleur filtre : Sym8 avec n=3		0,43	0,00	1426,8	1,01	1,27	1,34	0,09
Sans filtre		0,11	-0,01	1435,4	2,32	1,94	1,82	0,13

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.19, on remarque qu'en période de validation nous remarquons une différence remarquable entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le Sym8 avec un degré de décomposition de 3 où le  $R^2$  est de 43 % et un NASH de 0 % , et la modélisation sans filtrage où  $R^2$  est de 11 % avec un NASH -0,01.

De plus l'erreur absolue entre l'envasement simulé et mesuré avec le filtre est moindre, en effet celle-ci est de 1,27 tonne à court terme, 1,34 tonne à moyen terme et enfin 0,09 en long terme et ce malgré de très mauvais critères.

### ❖ Conclusion de l'interprétation

A travers cette partie de résultats. On peut dire que le WANN au découpage manuel avec 20N en couche cachée et 100 Itérations a mauvais critères de validation mauvais dus aux données douteuses, mais malgré cela la simulation de l'envasement est très bonne à long terme et moyenne à court et moyen terme.

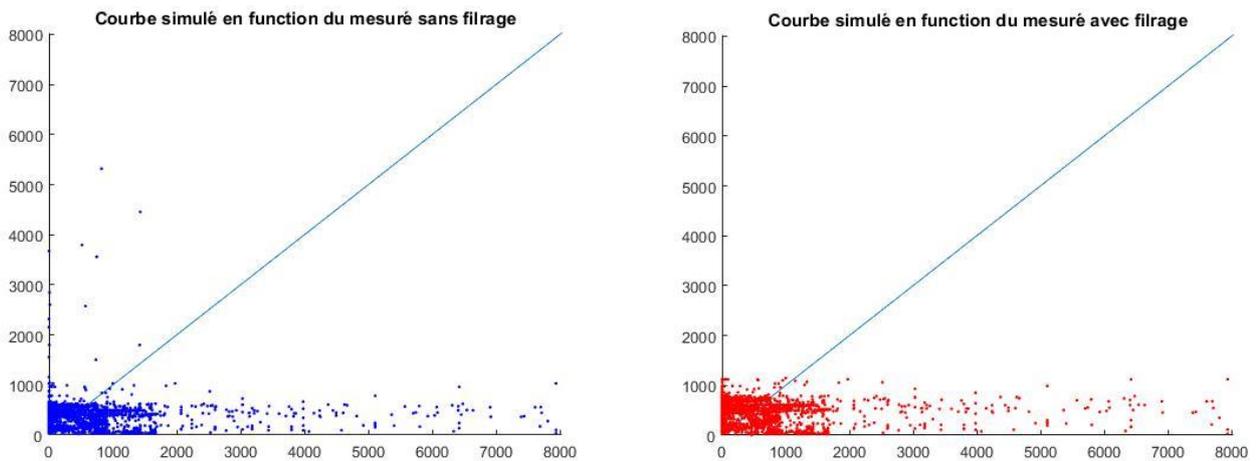


Figure 5.11: Représentation de la corrélation ( $Q_s$  simulé- $Q_s$  mesuré [g/s]) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage

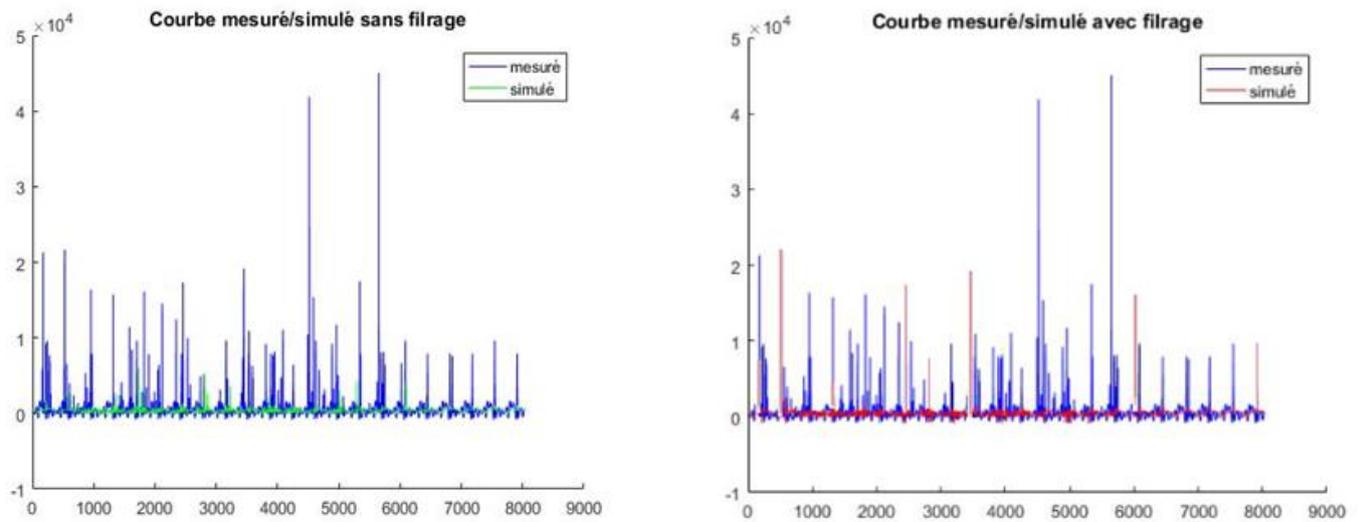


Figure 5.12: Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones  $Q_s$ ,  $Q_l$  sans et avec filtrage

### V.4.3 WANFIS avec 4 fonctions d'appartenances et 30 itérations

Tableau 5.20 : Critères d'évaluation pour le modèle WANFIS avec Validation au pas de temps journalier

Mother wavelet type	Level n	Validation				L'erreur absolue entre l'envasement simulé et mesuré		
		R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	Court terme	Moyen terme	Long terme
Harr	1	0,11	0,53	770,1	0,97	0,65	1,16	0,51
Harr	2	0,14	0,53	769,8	0,97	0,68	1,17	0,49
Harr	3	0,11	0,53	770,9	0,97	0,65	1,16	0,51
Harr	4	0,11	0,53	770,8	0,98	0,65	1,16	0,51
Harr	5	0,11	0,53	770,8	0,97	0,65	1,16	0,51
Db2	1	0,11	0,53	770,8	0,98	0,65	1,16	0,51
Db2	2	0,11	0,53	770,8	0,97	0,65	1,16	0,51
Db2	3	0,11	0,53	770,8	0,97	0,65	1,16	0,51
Db2	4	0,11	0,53	770,7	0,97	0,65	1,16	0,51
Db2	5	0,11	0,53	771,1	0,98	0,65	1,16	0,51
Sym3	1	0,11	0,53	770,5	0,97	0,65	1,16	0,51
Sym3	2	0,11	0,53	770,5	0,97	0,65	1,16	0,51
Sym3	3	0,11	0,53	770,5	0,98	0,65	1,16	0,51
Sym3	4	0,11	0,53	770,5	0,98	0,65	1,16	0,51
Sym3	5	0,11	0,53	771,3	0,98	0,65	1,16	0,51
Coif1	1	0,11	0,53	770,5	0,98	0,65	1,16	0,51
Coif1	2	0,11	0,53	770,5	0,97	0,65	1,16	0,51
Coif1	3	0,11	0,53	770,6	0,97	0,65	1,16	0,51
Coif1	4	0,11	0,53	770,5	0,98	0,65	1,16	0,51
Coif1	5	0,11	0,53	770,7	0,97	0,65	1,16	0,51
Le meilleur filtre : Harr avec n=1		0,11	0,53	770,1	0,97	0,65	1,16	0,51
Sans filtre		0,11	0,52	771,8	0,97	0,65	1,16	0,51

Interprétation des résultats :

D'après le Tableau 5.20, on remarque qu'en période de validation il y'a presque aucune différence entre la modélisation avec le meilleur filtrage Wavelet qui est le Harr avec un degré de décomposition de 1 où le  $R^2$  est de 11 % et un NASH de 53 % , et la modélisation sans filtrage où  $R^2$  est de 11 % avec un NASH de 52 % .

De plus l'erreur absolue entre l'envasement simulé et mesuré avec le filtre ou sans est pareille, avec 0,67 tonne à court terme, 1,16 tonne à moyen terme et enfin 0,51 en long terme et ce malgré des critères très mauvais.

### ❖ Conclusion de l'interprétation

A travers cette Troisième partie de résultats. On peut dire que le WANFIS avec 4 fonctions membres et 30 itérations a de mauvais critères de validation dus aux données douteuses, mais malgré cela la simulation de l'envasement est très bonne à court et long terme et moyenne à moyen terme.

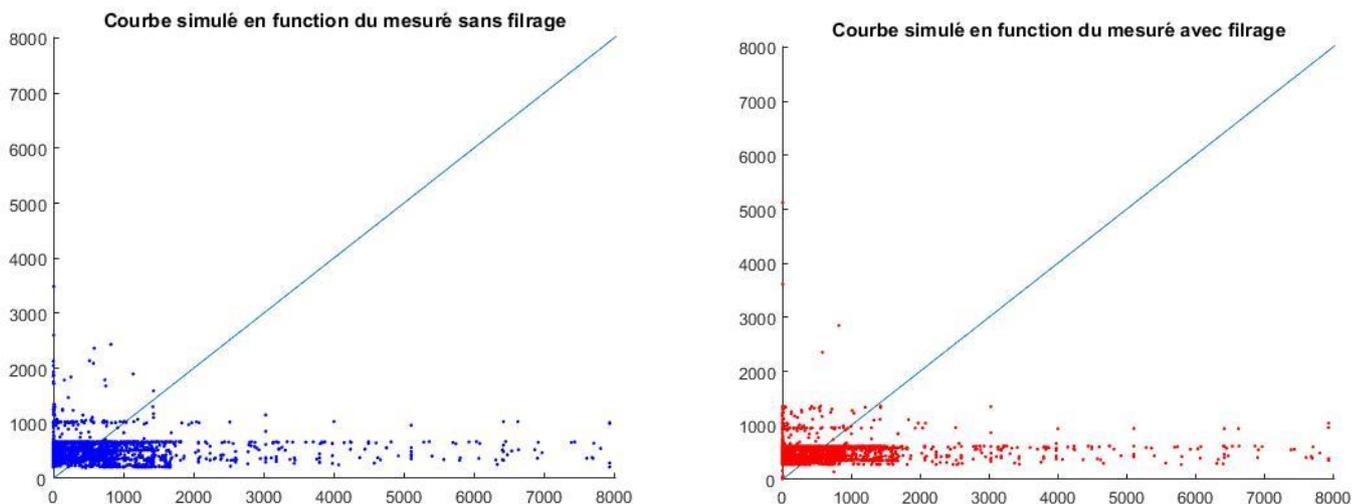


Figure 5.13: Représentation de la corrélation ( $Q_s$  simulé- $Q_s$  mesuré [g/s]) à un pas de temps journalier sans et avec filtrage

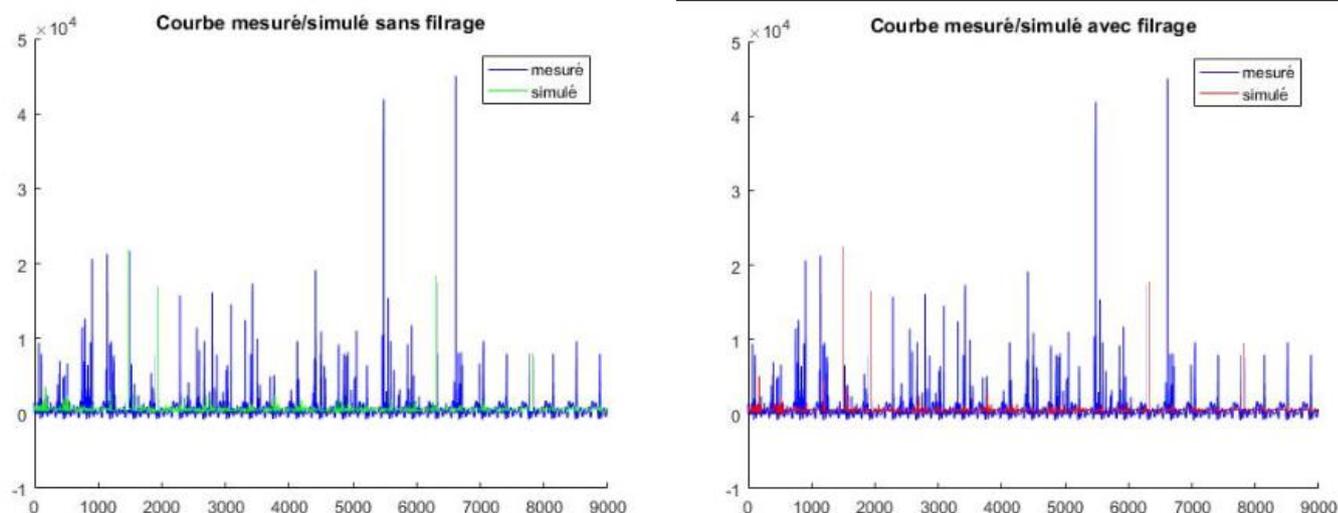


Figure 5.14: Simulation au pas de temps journalier par le modèle réseau de neurones Qs, Ql sans et avec filtrage

### V.4.4 Comparaison des trois modélisations avec le meilleur filtre Wavelet

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

Tableau 5.21 : Comparaison entre les différents types de modèle

Type de modèle	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RSR	L'erreur absolue entre l'envasement simulé et mesuré		
					CT	MT	LT
WANN au découpage automatique avec 20N en couche cachée	0,52	0,01	1418,5	1,00	1,20	1,23	0,00
WANN au découpage manuel avec 20N en couches cachée et 100 itération	0,43	0,00	1426,8	1,01	1,27	1,34	0,09
WANFIS avec 4 fonctions membres et 30 itérations	0,11	0,53	770,1	0,97	0,65	1,16	0,51

Interprétation des résultats :

Il est indéniable qu'en ce qui concerne les résultats d'appréciation des critères de l'approche des données laisse plus qu'à désirer; un tel éloignement serait explicable par l'accumulation des erreurs, la première étant l'erreur de simulation servant à pallier au manque considérable de données suivies d'erreur de simulation du modèle obtenu par WANN ou WANFIS.

On remarque que pour le premier modèle, le  $R^2$  est bon et dépasse les 50% contrairement aux autres critères qui sont mauvais, malgré cela il donne une bonne simulation de l'envasement à long terme, par contre pour le deuxième modèle, il y'a une diminution dans la performance, en effet tous les critères sont moins bons y compris la simulation de l'envasement comparé avec le premier modèle.

Enfin pour le troisième modèle, tous les critères s'améliorent à part pour le  $R^2$ , ainsi que la simulation à court terme et moyen terme.

On en conclut que pour une bonne estimation de l'envasement le WANFIS est le meilleur.

## **V.5 Conclusion du chapitre**

Les modèles utilisés précédemment sont validés en utilisant les données du Colorado et sont considérés comme robuste, mais pour ce qui est des données Algériennes, considérées douteuses et des critères de validation insuffisants, la simulation de l'envasement est parfaite en long terme avec le modèle WANN au découpage automatique avec 20 neurones en couche cachée et en court terme et moyen terme, la simulation qui se rapproche le plus à l'envasement mesuré se fait grâce au modèle WANFIS avec 4 fonctions d'appartenance et 30 itérations.

# 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 douteuses 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 ce qui donnera un accroissement considérable du temps de calcul, une baisse plus que significative des résultats, qui sont conséquence directe de l'instabilité des données d'entrée (débit liquide algérien) et des données de sorties (débit solide algérien) ; mais contre toute attente les approximations faites et déduites des résultats de simulation de l'envasement du barrage sont assez concluants et sont appréciables que ce soit sur le long terme (1988-2010) le court terme (2004-2010) mais un peu moins sur le moyen terme (1988-2004).

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 sur le plan effectif et exécutif comme il a été fait lors de l'approximation de l'envasement du barrage s'est avéré concluant ; 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 algériens rencontrent jour après jour, 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) Algérie 2013/214.
- **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- Prévission 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 atterissements. 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
  - **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.
- **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.
- **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.
- **Ozgur** : 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.
- **T. RAJAEI :** 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.
- **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'ingéniorat 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.