

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE



Projet de fin d'étude

Présenté par :

Fatima CHIHEB

Pour l'obtention du diplôme  
d'Ingénieur d'Etat en HYDRAULIQUE

Quantification du transport solide et protection du bassin  
versant de Koudiat Acerdoune

Devant le jury :

- Président : Pr. N.DECHEMI
- Encadreur : Dr. A. BERMAD
- Examineur : Mr M. NAKIB
- Examineur : Dr. A. LEFKIR
- Invité : Mr. M. HOUGLAOUENE

*Promotion Juin 2011*

# DÉDICACE

*JE DÉDIE CE MÉMOIRE EN PREMIER À MA MÈRE, MA MÈRE, MA MÈRE QUI A TOUT FAIT POUR QUE J'EN SOIS LÀ AUJOURD'HUI. LA FEMME QUI A TOUT DONNÉ POUR QUE JE DEVIENNE CE QUE JE SUIS.*

*À MON PÈRE QUI S'EST TANT SACRIFIÉ POUR MOI, À MON FRÈRE ISHAK, LE GÉNIE TIMIDE ET JE LE SOUHAITE BEAUCOUP DE SUCCÈS. À MA SCEUR ISMAHANE LA FLEUR DE LA MAISON QUI DEVIENDRA SANS DOUTE UNE GRANDE INFORMATICIENNE.*

*À MA GRANDE MÈRE (MÉMÉ) QUE JE LUI SOUHAITE UN BON RÉTABLISSEMENT*

*AU FINAL, JE VOUDRAIS DÉDIER MON TRAVAIL À TOUTE LA PROMOTION HYDRAULIQUE 2011 ET JE LEUR SOUHAITE TOUS UNE BONNE CONTINUATION*

# Remerciements

*Je tiens à remercier en premier lieu « ALLAH » Le Tout*

*Puissant, Qui m'a donné la force le courage et la volonté pour mener à bien ce modeste travail.*

*Qu'il me soit permis de remercier ici, profondément et sincèrement, tous ceux qui, de près comme de loin, se sont intéressés à cette recherche ou qui m'ont aidé à sa réalisation et en particulier :*

*Dr BERRMAD d'avoir assumé la lourde responsabilité de m'avoir dirigé tout au long de ce travail. Ainsi pour la confiance qui m'a accordé.*

*Pr DECHAMI de m'avoir orienté et conseiller durant ce travail*

*Mr Nakib pour l'aide précieuse qui m'a apporté durant ce travail*

*Madame Chekired pour son aide et son soutien moral*

*Je suis aussi redevable à Madame Souag et Mr Haddam qui ont  
accepté de m'accorder une partie de leurs temps*

*M. HOUGLAOUENE du département de la  
protection et gestion de la ressource hydrique à l'Agence Nationale  
des Barrages et Transfert (A.N.B.T) de Kouba, pour ses  
précieux conseils,*

*On remercie l'ensemble de mes enseignants d'hydraulique de l'Ecole  
Nationale Polytechnique.*

## Résumé

Le présent travail a pour objectif principal la protection du bassin versant de Koudiat Acerdoune contre l'érosion. Pour cela, une comparaison entre la quantification du transport solide par les formules empiriques et les données réelles recueillies sur terrain a été réalisée afin d'apprécier l'écart entre les deux démarches. Le manque de données recueillies nous obligés à modéliser les débits liquides et solides afin de mieux appréhender le problème. Les modèles développés dans ce travail sous Matlab, sont les modèles à réservoirs et le modèle ANFIS (Neuroflou), ceux-ci nous ont permis de mener un travail de recherche qui nous grandement aidé dans la recherche de solutions appropriées au problème du transport solide dans le bassin versant étudié.

Mots clés : érosion, transport solide, pluie-débit, Koudiat Acerdoune

## ملخص

هدف هذه الورقة الرئيسي هو حماية مستجمعات المياه كودية أسردون ضد التآكل. لهذا ، تم إجراء مقارنة بين الكمي للنقل الرواسب من الصيغ العملية والبيانات الفعلية التي يتم جمعها على الأرض لتقييم الفرق بين النهجين. أجبر عدم وجود بيانات لنا نموذج تدفق السائلة والصلبة من أجل فهم أفضل لهذه المشكلة. يسمح لهم النماذج المتقدمة في هذا العمل مع مطلب، هي نموذج من النماذج والدبابات ، لنا لإجراء المشروع البحثي الذي ساعد كثيرا منا في إيجاد الحلول المناسبة لمشكلة النقل في الرواسب درس مستجمعات المياه.  
الكلمات الرئيسية: تآكل, الرواسب النقل, تدفق- المطر, كودية أسردون

## Abstract

This paper's main objective is the protection of the watershed Koudiat Acerdoune against erosion. For this, a comparison between the quantification of sediment transport by the empirical formulas and the actual data collected on land was conducted to assess the difference between the two approaches. Lack of data forced us to model the flow of liquid and solid in order to better understand the problem. The models developed in this work with Matlab, are the models and model tanks ANFIS fuzzy neuro model, they allowed us to conduct a research project which greatly assisted us in finding appropriate solutions to the problem of sediment transport in the watershed studied.

Keywords: erosion, sediment transport, rain flow, Koudiat Acerdoune

# Sommaire

- Introduction
- Chapitre I : Recherche bibliographique

Introduction générale .....	1
1. L'érosion	
1.1. Les type de l'érosion.....	3
1.1.1. Erosion géologique .....	3
1.1.2. Erosion accélérée.....	3
1.2. Mécanisme de l'érosion .....	3
1.3. Les différentes formes de l'érosion.....	4
1.3.1 Erosion laminaire (érosion en nappe) .....	4
1.3.2 Erosion en rigole (érosion en griffe) .....	4
1.3.3 Erosion en ravines .....	4
1.3.4 Le mouvement de masse .....	4
1.3.5 Le sapement des berges (affouillement des berges) .....	4
1.4. Facteurs de l'érosion .....	4
1.4.1 Facteurs climatiques et hydrologiques.....	4
1.4.2 Facteurs pédologiques.....	5
1.4.3 Facteurs topographiques .....	5
1.4.4 Facteurs biologiques .....	6
1.5. Travaux effectués dans le monde et en Algérie .....	6
1.5.1 Dans le monde .....	6
1.5.2 En Algérie.....	9
1.6. Quantifications de l'érosion.....	11
1.6.1 Formule de Henin (1950) .....	11
1.6.2 Equation universelle de pertes de sols de Wischmeier (1960).....	11
1.6.3 Formule Tixeront (1960) .....	13
1.6.4 Formule de Fournier (1960) .....	14
1.6.5 Formule de Gravilovic .....	14
1.6.6 Formule de Sogreah (1969) .....	15
1.6.7 Formule de l'ANRH (Demmak , 1982) .....	16
1.6.8 Formule de Probst et Suchet (1992) .....	17
1.6.9 Formule de Kassoul et al (1997) .....	17
1.6.10 Formule de Touibia et Achit (2003) .....	17
2. Transport solide.....	18
2.1. Définition .....	18
2.2. Les principaux facteurs des apports solides d'un bassin versant .....	18
2.3. Les modes de transport .....	18
2.3.1 Transport solide par charriage .....	18
2.3.1.1 Les différents types de mouvement.....	19

2.3.1.2 Mesure du transport solide par charriage.....	19
2.3.2 Transport solide par suspension.....	19
2.3.2.1 Mesure du transport solide en suspension.....	20
3. L'envasement des barrages en Algérie .....	22
<b>■ Chapitre II : Présentation de la zone d'étude</b>	
1. Localisation et étendue de la zone d'étude .....	26
2. Description du bassin versant .....	27
2.1. Pluviométrie .....	27
2.2. Réseau hydrographique .....	27
2.3. Topographie et paramètres physiographiques.....	28
2.4. Géologies et géomorphologie.....	28
2.4.1 Géomorphologie et stratigraphie .....	28
2.4.2 Tectoniques .....	29
2.5. Couvert végétal.....	30
3. Description socio-économique du bassin versant .....	31
3.1. Caractéristiques socio-économique .....	31
4. Critique et traitement de données.....	32
4.1. Présentation des données.....	32
4.1.1 Les données hydrométriques.....	32
4.1.2 Les données pluviométriques .....	32
4.1.3 Les données d'ETP.....	33
4.2. Traitements statistiques des données.....	34
4.2.1 Détection de valeurs singulières : Test de Grubbs et Beck.....	34
4.2.2 Test d'indépendance .....	35
4.2.3 Tests d'homogénéité.....	36
<b>■ Chapitre III : Modélisation pluie-débit</b>	
1. Modélisation pluie-débit en hydrologie .....	38
2. Pourquoi des modèles pluie-débit ? .....	38
3. Classification des modèles pluie débits .....	39
3.1. Les modèles empiriques.....	39
3.2. Les modèles physiquement fondés.....	40
3.3. Les modèles conceptuels (à réservoirs) .....	40
3.3.1 Présentation des modèles GR .....	40
3.3.2 Le modèle GR2M (2002) .....	41
3.3.3 Le modèle GR3M .....	43
3.4. Les modèles 'boîte noire'.....	46
3.4.1 Optimisation neuroflou : le modèle ANFIS .....	46
4. Paramètres des modèles .....	48

5. Calage du modèle.....	49
6. Validation du modèle.....	49
7. Critères de validation des modèles pluie-débit.....	49
7.1. Le critère de Nash.....	49
7.2. Le critère RMSE (Root Mean Squared Error) .....	50
7.3. Le coefficient de corrélation .....	51
8. Résultats de la modélisation.....	51
8.1. Résultats de la simulation par les modèles GR2M et GR3M en période de calage .....	54
8.2. Résultats de la simulation par les modèles GR2M et GR3M en période de validation .....	55
8.3. Résultats de la simulation par les modèles neuroflous en période de calage.....	57
8.4. Résultats de la simulation par les modèles neuroflous en période de validation.....	59
▪ <b>Chapitre IV : Quantification du transport solide</b>	
1. Calcul du transport solide en suspension .....	62
1.1. Etablissement du rapport Débit liquide-Débit solide et calcul du transport solide mensuel.....	63
1.1.1 Echelle interannuelle.....	63
1.1.2 Echelle mensuelle .....	64
1.1.3 Echelle saisonnière.....	66
1.1.4 Echelle saison sèche-humide.....	67
1.2. Calcul du transport solide et l'estimation de l'érosion spécifique.....	68
2. Simulation du transport solide par la neurofloue .....	70
2.1. Simulation à deux règles floues .....	70
2.2. Simulation à trois règles floue .....	74
3. Comparaison entre les deux stations.....	79
4. L'estimation du taux d'envasement avec les différentes formules .....	80
4.1. Formule de Fournier (1960).....	80
4.2. Formule de Tixeront (1960).....	80
4.3. Formule de Gravilovic .....	80
4.4. Formule de Touaibia et Achite (2003) .....	81
4.5. Formule de Demmak (1982) .....	81
5. Comparaison des résultats pour les différentes méthodes .....	81
▪ <b>Chapitre V : Aménagement intégré du bassin versant</b>	
1. Caractéristiques du bassin versant.....	82
1.1. Synthèse géologique du bassin versant.....	82

---

1.2. Pédologie du bassin versant .....	84
1.3. Topographie .....	85
1.4. Occupation de la population active .....	87
1.7. La végétation naturelle .....	89
1.5. Occupation du sol.....	89
1.6. Climat .....	91
2. Les solutions proposées.....	94
2.1. L'amélioration des pratiques agricoles .....	94
2.2. Reboisement .....	95
2.2.1 Différentes plantes forestières possible .....	95
2.3 Plantations fruitières .....	96
2.4. Les cordons de pierre .....	97
2.5. Les Banquettes .....	98
2.6. Les Bourrelets .....	99
2.7. Les seuils.....	100
2.8. Les Murettes .....	101
3. Mise en valeur des terres .....	102
▪ Conclusion.....	104

## Introduction générale

Il existe actuellement en Algérie 98 ouvrages de retenues des eaux et bien que théoriquement ils doivent retenir une capacité totale de plus de 4.3 milliards de m<sup>3</sup> d'eau, ils ne contiennent que la moitié de ce volume compte tenu de leur envasement (Boudjadja et al. 2003). Il est nécessaire donc, pour les éventuelles retenues (143), de bien comprendre les enjeux associés à la dégradation de leur bassin versant.

La diminution progressive de la capacité de stockage de l'eau des barrages fait que la majorité a une durée de vie d'à peine une trentaine d'années. La durée de vie de 11 Barrages Algériens récemment mis en service pourrait être aussi courte que 20 ans (Kassoul et al, 1997). La courte durée de vie de certains barrages est causée par le taux élevé de capture des sédiments (plus de 90%) qui sont transportés continuellement par les Oueds alimentant les réservoirs. Une étude effectuée par Remini et al. (1996) conclue à une diminution d'environ 42% du volume initial de leur retenue en raison de l'envasement.

L'Algérie, caractérisée par un climat semi-aride, est menacée par l'érosion des terres agricoles qui provoque l'augmentation du transport solide. La dégradation du milieu a des conséquences très néfastes sur la productivité des terres et sur la qualité des eaux.

L'objectif principal de notre travail est de quantifier le transport solide et l'érosion spécifique du bassin versant de Koudiat Acerdoune afin de proposer les aménagements nécessaires pour sa protection.

Pour mener à bien cet objectif nous avons adopté la démarche suivante :

- Après une introduction générale où l'on a situé la problématique étudiée, nous avons consacré notre premier chapitre à la recherche bibliographique sur la même thématique ainsi qu'à la description du phénomène de l'érosion et du transport solide dans le monde et en Algérie.
- La présentation de la zone d'étude a fait l'objet du second chapitre, avec analyse et critique des données recueillies, tâche si nécessaire pour s'affranchir de l'objectif qui nous a été assigné.
- Le troisième chapitre a été réservé aux modèles pluies – débits élaborés pour pallier au problème de manque de données auquel on a été confronté dans cette étude, ainsi qu'à la présentation des résultats obtenus.

- La quantification du transport solide pour les mesures disponibles a été faite au chapitre quatre. En outre, une extension des données des débits solides par un modèle Neuroflou a été réalisée afin de quantifier le transport solide sur une période plus longue.
- Dans le dernier chapitre nous avons présenté les techniques et moyens appropriés pour la protection des bassins versants en général et les aménagements et solutions proposés pour Koudiat Acerdoune en particulier.
- Au terme de ce travail, nous avons souligné dans la conclusion générale l'intérêt et l'importance de traiter un tel sujet afin de comprendre d'abord la problématique et d'apporter ensuite les solutions nécessaires et adéquates qui permettront d'atténuer un tant soit peu de la raréfaction de la ressource en eau.

## Chapitre I : Recherche bibliographique

L'Algérie comptera prochainement un nombre important de barrages de toutes catégories et de toutes dimensions. Malheureusement cette richesse se dégrade de jour en jour par la sédimentation accélérée. L'érosion des bassins versants en amont des retenues, sous toutes ses formes ; laminaire, en rigole, en ravine, des berges, glissement de terrains, coulées de boue, etc..., est à l'origine de l'envasement de ces dernières.

Les conséquences de l'érosion ne se limitent pas seulement à l'envasement des retenues, mais contribue aussi à la perte de la couche arable, la plus fertile du sol, en diminuant sa productivité et dégradant la qualité des eaux de surface, ce qui affecte alors les infrastructures en aval telles que les usines de traitement d'eau potable, les centrales hydroélectriques et les barrages, ce dernier problème touche particulièrement les pays du Maghreb. En Algérie, une réduction de 20% de la capacité initiale de stockage était liée à l'envasement des retenues depuis la construction des barrages (Benblidia, et al 2001).

### **I-1 L'érosion**

L'érosion est un processus complexe et très vieux, il concerne l'arrachement, le transfert et la sédimentation des particules par l'eau, le vent ou la gravité. Depuis l'origine de la terre, l'érosion façonne les reliefs et construit les plaines, lesquelles nourrissent la majorité des populations du monde (Roose et al, 1998), l'érosion du sol peut se diviser en 2 types

#### **I-1-1 Les type de l'érosion**

##### **I-1-1-1 Erosion géologique**

C'est un processus naturel d'équilibrage du relief, ce type d'érosion dépend du climat et de la lithologie, elle est très élevée dans les régions semi aride car les précipitations sont assez fortes.

##### **I-1-1-2 Erosion accélérée**

Ce type d'érosion survient lorsque les humains perturbent les sols et le couvert végétal par des activités forestières, agricole et des travaux de construction.

#### **I-1-2 Mécanisme des l'érosion**

Quelque soit le type d'érosion géologique ou accélérée, elle passe par deux étapes :

- Le détachement des particules de la surface du sol

- Le déplacement des particules des bassins versant vers les Oueds.

### **I-1-3 Les différentes formes de l'érosion**

Nous pouvons présenter l'érosion sous 5 formes :

#### **I-1-3-1 Erosion laminaire (érosion en nappe)**

Lorsque le sol est saturé, l'eau ne peut plus s'infiltrer donc elle ruisselle et déplace les particules arrachées sous l'effet de la battance de la pluie, donc ces particules avec l'accélération de la vitesse de l'eau peuvent entraîner un détachement d'autres particules.

#### **I-1-3-2 Erosion en rigole (érosion en griffe)**

Cette forme d'érosion est active au début du ruissellement, mais diminue au cours de l'événement. Les rigoles ne provoquent pas l'érosion mais plutôt des symptômes. Ces derniers peuvent s'effacer par des pratiques agricoles mais si nous avons des événements pluvieux successifs, les rigoles deviennent profondes et créent des ravines.

#### **I-1-3-3 Erosion en ravines**

Lorsque les pratiques agricoles ne peuvent pas effacer les rigoles qui sont profondes on aura une érosion en ravines, donc le ravinement est un facteur prédominant dans le processus de l'érosion.

#### **I-1-3-4 Le mouvement de masse**

Dans ce processus, le mouvement du sol n'est pas produit par le mouvement de l'eau mais plutôt suite à un stress gravitationnel si les sols sont situés sur de fortes pentes avec un sous-sol imperméable, ils peuvent glisser spontanément dans un mouvement d'ensemble.

#### **I-1-3-5 Le sapement des berges (affouillement des berges)**

La vitesse de l'écoulement de l'eau peut exercer un stress sur les berges et y éroder les matériaux les plus fragiles. Ce type d'érosion provoque l'éboulement d'une masse importante des sols dans les cours d'eau dans lesquels ces masses s'incorporent à la charge du cours d'eau.

## **I-1- 4 Facteurs de l'érosion**

### **I-1-4-1- Facteurs climatiques et hydrologiques**

Il s'agit de l'élément moteur de l'érosion, sans précipitation atmosphérique il n'y a pas d'érosion hydrique. Les paramètres de la pluie liés à l'érosion sont :

- **L'intensité de la pluie** : Wischmeier et Smith (1962) ont constaté que les fortes intensités provoquent une forte perte du sol. Ceci a été aussi constaté avec de faibles intensités mais d'une durée assez longue sur des sols instables et nus.  
Le ruissellement dépend essentiellement de la lame précipitée, de son intensité, de l'humidité du sol et de l'état de surface. Il diminue de 75 à 80% sur les parcelles cultivées que sur les jachères (Nasri et al, 1997).
- **Hauteur de la pluie** : Elle peut être un bon estimateur de l'érosivité du sol par la pluie. On pourrait croire à l'existence d'une relation entre la hauteur de pluie et le ruissellement mais dans la réalité le phénomène est complexe. (Touibia, 2000).
- **Energie cinétique de la pluie** : L'énergie cinétique de la pluie est le facteur de base pour expliquer l'agressivité de la pluie, c'est l'énergie des gouttes qui déclenche le processus de destruction des agrégats du sol sur les versants de pente faible à moyenne, tandis que le ruissellement assure le transport des particules détachées. (Touibia, 2000).

### **I-1-4-2- Facteurs pédologiques**

Le processus pédologique joue un rôle essentiel sur le processus du ruissellement et d'érosion à travers sa capacité d'infiltration et de son érodibilité ( King et al, 1992). Sous l'action des pluies, la surface du sol passe d'un état fragmentaire poreux et meuble à un état compact, la couche superficielle forme une croûte de battance qui diminue en effet, la vitesse d'infiltration favorisant donc le ruissellement. Ces croûtes de battance se développent surtout dans les sols à perméabilité faible (argile, limon...).

### **I-1-4-3- Facteurs topographiques**

**La pente** : c'est un facteur important d'érosion, le ruissellement et l'érosion commencent sur des pentes faibles (1 à 2 %).

- **La longueur de la pente** : En principe, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse et de l'énergie et plus l'érosion s'intensifie.

#### **I-1-4-4- Facteurs biologiques**

La végétation permet de réduire l'ampleur de l'érosion hydrique en jouant un rôle d'interception des gouttes de pluie grâce aux parties aériennes des plantes. Cette interception est fonction de la densité de la surface et de la structure du couvert végétal.

#### **I-1-5- Travaux effectués dans le monde et en Algérie**

##### **I-1-5-1- Dans le monde**

Plusieurs travaux ont été effectués dans le cadre de la quantification de l'érosion, du transport solide et de la protection des bassins versants, nous allons citer quelques unes ci-dessous :

- **Liopold et al (1953)** ont essayé d'établir des formules empiriques qui permettent d'évaluer le débit du transport des sédiments en suspension à partir des débits liquides en se basant sur des études qui ont été faites aux Etats unis, ils ont obtenu la forme suivante :

$$C = K * Q^J \dots\dots\dots(1)$$

Avec : C : la concentration de matières en suspension (Kg/m<sup>3</sup>) ;

Q : le débit liquide (m<sup>3</sup>/s) ;

K, J constantes.

- **Fleming (1969)** a exploité les données de 250 points de piégeage dans le monde entier, il a obtenu une relation statistique liant l'apport solide moyen annuel(Q<sub>s</sub>) et le débit liquide moyen annuel(Q<sub>l</sub>) de la forme :

$$Q_s = a(Q_l)^n \dots\dots\dots(2)$$

Où : a et n sont des coefficients donnés en fonction du type et de la densité du couvert végétal.

- **Milliman et al (1983)** ont proposé une carte mondiale des transports solides spécifiques, établi d'après les flux de matières en suspensions mesurés à l'exutoire des grands fleuves et ramenés à la surface totale de chaque bassin versant.

- **Julien et al (1985)** ont évalué la charge solide en suspension dans les cours d'eau du Nord à partir de l'érosion superficielle pluviale à l'échelle de grands bassins versants, ils ont développé le modèle LAVSED-II, et ont obtenu deux relations fondamentales :

$$A_s = 30,7 \cdot C_s \cdot A^{1,137} \cdot D_c \cdot S^{1,66} \cdot L^{1,035} \cdot F^{1,65} \left(\frac{F_n}{F_{nt}}\right)^{0,37} \dots\dots\dots(3)$$

Avec :  $A_s$  : Apport solide annuel (Tonnes) ;

$C_s$  : Concentration de matière en suspension (g/l) ;

$S$  : Surface du bassin versant (Km<sup>3</sup>) ;

$D_c$  : Densité du couvert végétal (%) ;

$L$  : Lamé d'eau ruisselée (m) ;

$L_m$  : Pente moyenne du bassin versant (%) ;

$F_n$  : Volume mensuel de neige (m<sup>3</sup>) ;

$F_{nt}$  : volume totale de neige (m<sup>3</sup>).

- **Tanguy et al (1989)**, ont travaillé sur le transport solide et plus particulièrement au transport solide par charriage, ils ont utilisé un modèle numérique bidimensionnel de charriage en utilisant la méthode des différences finies pour simuler ce processus. Ils ont conclu que ce modèle consiste au couplage original d'un modèle hydrodynamique, qui comprend une actualisation spatio-temporelle du coefficient de rugosité d'une équation d'état et un modèle d'évolution du fond. Les résultats obtenus sont comparables aux valeurs observées.
- **Moukhchane et al (1998)**, ont utilisé une technique qui s'appelle la technique de Cesium 137 pour quantifier l'érosion dans le bassin versant de Tanger au Maroc, ils ont pu délimiter les zones d'érosion grâce à cette technique. La dégradation spécifique quantifiée est de l'ordre de 49,1 t/ha/an, cela peut justifier la sensibilité de la zone à l'érosion. La comparaison des résultats a été faite par rapport aux levés bathymétriques du barrage d'Ibn Battota, cela confirme la fiabilité des résultats.
- **Albergel et al (2000)**, ont pu montrer l'intérêt qu'il faut porter à la quantification de l'érosion hydrique à partir d'un suivi bathymétrique continu sur 26 retenues collinaires implantées dans la dorsale semi aride tunisienne. Ces retenues ont été choisi de telle sorte d'avoir un gradient pluviométrique représentatif de la zone semi aride qui varie de 250 mm à 500 mm. A la fin, l'érosion quantifiée varie de 2t/ha/an à 46t/ha/an.

- **Selon Lienon et al (2005)**, des mesures du transport solide ont été faites au Cameroun qui ont constitué pour les auteurs un support pour une approche globale afin d'appréhender l'intensité du transport solide dans les rivières. Ils ont conclu que les fortes pentes, la densité de la population, le travail du sol et l'élevage sont des facteurs très importants pour l'évolution de la charge solide dans ces rivières. Cette dernière croît du Sud vers le Nord en fonction de l'altitude par l'expression suivante :

$$C = 17X + 21$$

C : Concentration de la matière en suspension (g/l) ;

X : La latitude (degré)

- **Heusch (1971)**, a travaillé sur la quantification de l'érosion hydrique au Maroc, il a trouvé des relations entre le débit liquide et le débit solide, aussi bien pour les bassins versants que sur les parcelles expérimentales :

Pour les bassins versants :  $Q_s = a - HQ_1 a^{1,8}$

Pour les parcelles expérimentales :  $Q_s = a - HQ_1 a$

Avec :  $Q_s$  : débit solide moyen annuel en Kg/h ;

$Q_1$  : débit liquide moyen en m<sup>3</sup>/h ;

H : hauteur annuelle moyenne de la pluie en mm ;

a : constante expérimentale.

Des mesures de concentration en matières solides et du débit dans les Oueds ont été effectués durant plusieurs années (4-10 ans) sur 13 stations du bassin versant du SABDOU au Maroc, Heusch a essayé de quantifier l'érosion en travaillant aussi bien sur approches analytiques que synthétiques.

- **Meunier et al (1994)**, ont montré dans leur études de trois bassins versants (bassins de Draix, côte d'Azur) de taille, de végétation, de pente et de production d'érosion différentes, situés sur les terres noires des Alpes du Sud (très sensible à l'érosion), qu'à chaque événement de crue, les volumes érodés peuvent être expliqués par les débits

maximums et l'intensité de la pluie. Il a constaté que l'érosion à l'exutoire est 80 fois moindre sur les terres boisées si on l'a ramène à un hectare de terrain nu, L'érosion reste faible et n'a jamais excédée 2T/ha.an par contre une variabilité temporelle significative est apparue aussi bien d'année en année, que de saison en saison, cette variabilité temporelle a été étudiée par **Meunier et al (1996)**, sur 18 bassins versants de superficies variant entre 103 et 835 km<sup>2</sup>, aux différents milieux physico climatiques. Cette hypothèse est aussi confirmée par les travaux de **Bourouba (1997)**. Il a quantifié l'érosion dans trois bassins versants de zones semi arides à partir des mesures de concentration en éléments fins sur une période de 10 ans et il a remarqué que l'érosion spécifique est influencée par les caractéristiques pluviométriques et les variations de l'écoulement durant l'été et l'automne d'une part et les caractéristiques morphologiques des bassins versants d'autre part.

### I-1-5-2- En Algérie

- **Capolini et al (1969)**, ont étudié la géomorphologie régionale du bassin versant de l'oued Chélif et de ses affluents en Algérie et de la relation entre l'érosion et le transport solide. Il a conclu l'existence d'une bonne corrélation entre la torrencialité et la géomorphologie, et a abouti à plusieurs conclusions :
  - ✓ Une quantification du débit solide à partir de la lithologie ;
  - ✓ Existence d'une relation statistique entre l'érosion spécifique et la torrencialité ;
  - ✓ Proposition d'une méthode de cartographie de la susceptibilité à l'érosion à partir de la cartographie du coefficient de torrencialité.
  
- **Arabi (1991)**, a confirmé la faiblesse de l'érosion pluviale et par conséquent, le fait que le ruissellement constitue un facteur essentiel pour la détermination du transport solide dans les bassins versants. Il propose les mesures de protection suivantes :
  - ✓ Stocker les eaux d'écoulement ;
  - ✓ Favoriser l'infiltration au maximum ;
  - ✓ Limiter la concentration des eaux de ruissellement ;
  - ✓ Travailler le sol chaque fois que c'est possible ;
  - ✓ Améliorer la structure du sol ;

✓ Corriger les ravins.

- **Saidi (1991)**, a étudié l'envasement de 18 barrages algériens en exploitation et a proposé deux équations pour estimer les apports solides ( $q_s$  en  $m^3/km^3/an^{-1}$ )

$$q_s = 19M_0^{1,246} C_e^{-0,885} \dots\dots\dots(4)$$

Avec :  $M_0$  c'est débit moyen d'un cours d'eau calculé en litres par seconde et rapporté au  $km^2$  de bassin versant ;

$C_e$  : coefficient d'écoulement.

- **Kouri (1993)**, a étudié de manière détaillée l'évolution des ravins de la zone pilote Taasselet décrit les processus d'érosion observables. Il a établi une typologie des types de fonctionnement en fonction de la lithologie, de la pente, de l'exposition, de la morphologie des ravins et de la mise en valeur des bassins versants respectifs. Cinq types de ravins sont obtenus, ce qui permet pour des zones à précipitation et débit analogues, d'évaluer qualitativement les formes d'érosions dominantes au moyen des caractères géographiques.
- **Touaibia et al (2003)**, ont essayé de cartographier l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Mina en appliquant l'approche géostatistique.

Cette étude a pour objectif de décélérer le phénomène d'érosion en faisant un aménagement anti érosif. Ils ont aboutit au modèle suivant avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0,94$  :

$$Es = 19,36 S^{0,134} C_{veg} \dots\dots\dots(5)$$

Avec :  $Es$  : Erosion spécifique ;

$S$  : Superficie du bassin versant ;

$C_{veg}$  : Densité du couvert végétal.

Avec ce modèle ils ont pu déterminer deux zones distinctes dans la région, une zone caractérisée par une érosion élevée qui dépasse les 20t/ha/an au nord et une zone moins érodée dans la partie sud.

- **Achite (2007)**, a définit différentes approches statistiques pour l'homogénéité, l'extension et l'évaluation du transport solide dans deux sous bassins versants jaugés.

L'approche basée sur l'homogénéisation et l'extension des données à partir de celles des hauteurs d'eau instantanées convertis en débit liquides en utilisant la relation pluie débit liquide développé à l'échelle des crues parait meilleure que les autre approches proposées.

**I-1-6- Quantifications de l'érosion**

Il existe plusieurs formules et méthodes pour la quantification de l'érosion hydrique que nous allons citer ci-dessous :

**I-1-6-1- Formule de Henin (1950)**

Elle symbolise la relation existante entre l'érosion pluviale et les facteurs susceptibles de la favoriser ou de la limiter. La formule de l'érosion spécifique est donnée comme suit :

$$E_s = \frac{I_p L S}{K V_e} \dots\dots\dots(6)$$

- Avec :  $I_p$  : Intensité de la pluie ;
- $I$  : Pente du bassin versant ;
- $S$  : Facteur de susceptibilité du sol ;
- $K$  : Facteur de perméabilité ;
- $V_e$  : Facteur de végétation.

**I-1-6-2- Equation universelle de pertes de sols de Wischmeier (1960)**

L'intensité de l'érosion peut être caractérisée par la mesure des pertes de terres subit par le sol. Ces pertes de terre peuvent être estimées par une équation mise au point par les services américains de conservation des sols. Il s'agit d'un modèle empirique réuni aux cinq facteurs ayant une incidence sur l'importance de l'érosion. L'équation se présente comme suit :

$$A = R * K * L_s * C * P \dots\dots\dots(7)$$

- Avec :
- $R$  : Facteur d'érosivité de la pluie ;

K : Facteur d'érosibilité du sol ;

Ls : Facteur topographique intégrant la dénivelé et la longueur du versant ;

C : Facteur de protection du sol par le couvert végétal ;

P : Facteur de protection du sol par les pratiques agricoles.

Ainsi ce modèle se présente comme une multiplication des coefficients dont le produit est un estimé du taux de pertes de sol. Arabi (1991), a examiné la relation entre les différents paramètres de l'équation universelle et l'érosion des sols mesurée pour 15 parcelles combinant trois types de sol (vertisol, fersiallitique et brun calcaire) et quatre systèmes de production (agro-pastoral, vigne, arboriculture et sylvopastorel).

Il (1991) a distingué deux types de pluie : les pluies automnales d'intensité élevée mais de faibles fréquences et des pluies hivernales et printanières moins intenses que celle de l'automne, mais plus fréquentes. Pour le facteur K, Arabi (1991), a remarqué que les vertisols sont les sols les plus résistants. Concernant le facteur C, il a démontré que l'érosion est faible en milieu cultivé et naturel comparativement aux sols nus (Arabi,1991 ; Gomer et Touibia, 1991). Arabi (1991), n'a pas observé de liens significatifs entre l'érosion et les facteurs R et Ls représentant l'agressivité des pluies et la pente. Morsli et al (2004) ont également observé des risques modestes d'érosion en nappe pour des pentes de 10 à 45%. Par contre Brahmia (1993), a également travaillé en parcelles et a démontré que l'érosion est sensible à l'augmentation de la pente et à la longueur du versant.

Finalement Arabi (1991) et Brahmia (1991) ont appliqué l'équation universelle sur une partie de leurs parcelles. Arabi (1991) a mentionné que les estimations calculées par le modèle furent comparables aux mesures réelles alors que Brahmia (1993) a jugé que les valeurs estimées sont nettement inférieures à celles mesurées. Dans ce contexte Meddi et Morsli (2001) ont développé de nouvelles équations pour modéliser l'érosion spécifique (Es). Ils ont trouvé que Es peut être estimée en utilisant la pluviométrie (P en mm) et l'état de l'humidité du sol selon la formule suivante :

$$E_s = aP^b + cIPA^d - e \dots\dots\dots(8)$$

Les valeurs des coefficients a , b, c, d et e varient en fonction de la saison et du sol.

**I-1-6-3- Formule Tixeront (1960)**

Ce modèle est basé sur deux équations reliant les apports solides à l'écoulement annuel total selon la position géographique.

$$E_s = [S_1 \cdot Ta_1 + S_2 \cdot Ta_2 + \dots + S_n \cdot Ta_n] \dots \dots \dots (9)$$

Avec :

$E_s$  : érosion spécifique (t/Km<sup>2</sup>/an) ;

$Ta_1, Ta_2, Ta_n$  : taux d'abrasion en fonction de la perméabilité dans les sous bassin (t/km<sup>2</sup>).

$S$  : superficie totale du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

$S_1, S_2, \dots, S_n$  : surfaces des sous bassins versants (Km<sup>2</sup>).

Si nous considérons que la totalité des sous bassins versants ont la même perméabilité, la formule de Tixeront devient :

$$E_s = K \cdot L_e^{0.15} \dots \dots \dots (10)$$

Avec :

$L_e$  : lame d'eau ruisselée moyenne interannuelle en mm.

$$L_e = P_{an} - D_m \dots \dots \dots (11)$$

Avec :

$D_m$  : le déficit annuel de l'écoulement ;

$P_{an}$  : Pluie moyenne annuelle

$$D_m = \frac{P_{an}}{\sqrt{0.9 + \frac{P_{an}^2}{L}}} \dots \dots \dots (12)$$

Avec :

$$L = 300 + 25 \cdot T + 0.05T^2$$

$K$  est un coefficient déterminé en fonction de la perméabilité des terrains. Il est égale à :

K= 8.5 pour les terrains d'une perméabilité élevée ;

K= 75 pour les terrains d'une perméabilité moyenne ;

K= 350 pour les terrains d'une perméabilité faible à moyenne ;

K= 1400 pour les terrains d'une perméabilité faible ;

K= 3200 pour les terrains imperméable.

#### I-1-6-4- Formule de Fournier (1960)

Fournier(1960), a développé un modèle pour prédire les apports solides à l'exutoire d'un cours d'eau quelque soit son emplacement géographique en utilisant les données de 104 bassins versants provenant de différentes régions :

$$E = \frac{1}{36} \left( \frac{P_m^2}{P_{an}} \right)^{2,65} \left( \frac{h^2}{S} \right)^{0,46} \dots\dots\dots(13)$$

Avec :

E : Apports solides spécifiques moyens annuels (t/Km<sup>2</sup>/an) ;

P<sub>m</sub> : Pluie mensuelles moyenne du mois le plus pluvieux (mm) ;

P<sub>an</sub> : Pluie moyenne annuelles (mm) ;

h : Dénivelée moyenne (m) ;

S : Superficie du bassin ( Km<sup>2</sup>).

#### I-6-5- Formule de Grivilovic

Cette formule a été mise au point en Yougoslavie et a été utilisée en Algérie.

$$P_e = T \cdot P_{an} \cdot \Pi \cdot \sqrt{Z^3} \dots\dots\dots(14)$$

Avec :

P<sub>e</sub> : Production spécifique moyenne annuelle de sédiments ;

P<sub>an</sub> : Pluviométrie moyenne annuelle ;

Z : Coefficient d'érodabilité.

T : Température, où :  $T = \sqrt{\frac{t^\circ}{10}} + 0,1$

t° : Température moyenne annuelle.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs du coefficient d'érodabilité en fonction du type d'érosion :

**Tableau I-1 : les valeurs du coefficient d'érodabilité en fonction du type d'érosion**

Erosion	Z
Extrêmement sensible	1,00 à 1,50
Très sensible	0,70 à 1,00
Moyennement sensible	0,40 à 0,70
Sensible	0,20 à 0,40
Peu sensible	0,10 à 0,20

De plus, une équation déterminant le taux de rétention ( $R_m$ ) des sédiments produits dans un bassin a été ajouté à l'équation de Graviovic :

$$R_m = \frac{H \cdot \sqrt{P_r}}{0,2(L+10)} \dots\dots\dots(15)$$

Avec :

$P_r$  : Périmètre du bassin versant ;

H : Altitude moyenne de bassin versant où  $H = \frac{\sum_{i=1}^n A_i H_i}{A}$

$A_i$  : L'aire comprise entre deux courbes de niveau successives ( $km^2$ ) ;

$H_i$  : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau successives (m) ;

A : L'aire totale du bassin de drainage ( $km^2$ ) ;

L : Longueur du thalweg principal ;

La dégradation spécifique est donnée par :  $Es = P_e \cdot R_m \dots\dots\dots(16)$

**I-1-6-6- Formule de Sogreah (1969)**

Ce modèle est basé sur cinq équations reliant les apports (A en  $t/km^2/an$ ) en fonction du ruissellement annuel de crue (R en mm). Le choix d'une équation est fondé sur la perméabilité du bassin. Les équations de Sogreah sont exprimées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau I-2 : le taux d'érosion en fonction de la perméabilité du sol**

Perméabilité	équation
Elevée	$A=8,5R^{0,15}$
Moyenne à élevée	$A=75R^{0,15}$

Faible a moyenne	$A=350R^{0,15}$
Faible	$A=1400R^{0,15}$
Imperméable	$A=3200R^{0,15}$

**I-1-6-7- Formule de l'ANRH (Demmak , 1982)**

Il a choisi 30 bassins versants de l'Algérie du Nord représentatifs de différentes conditions physiques, géomorphologiques et hydro climatologiques :

- ✓ Il a abordé le problème à l'échelle de la crue ;
- ✓ Il a associé une étude cartographique des formes d'érosion et des facteurs géomorphologique à l'analyse hydrologique ;
- ✓ Il a séparé les crues suivant deux catégories (crue d'automne et crue de printemps) ;
- ✓ Il a montré que les eaux de ruissellement provenant des bad-lands et ravines hiérarchisées sont chargées à 150g/l et que la zone des mouvements de masses fournit en moyenne 70g/l ;
- ✓ Il a démontré que la majorité des apports sont dûs aux crues généralisées de printemps ;
- ✓ Puis il a confirmé que l'agressivité des pluies est faible en Algérie et par conséquent aussi l'érosion pluviale.
- ✓ A la fin il a développé un modèle pour prédire le transport solide spécifique moyen annuel (TSs) pour des bassins versants variant de 100 à 3000 km<sup>2</sup>

$$TS_s = 26,62 IL + 5,07 IP + 9,77CT - 593,56 \dots\dots\dots(17)$$

Avec :

TSs : Transport solide spécifique moyen annuel, exprimé en T/Km<sup>2</sup>/an ;

IL : Indice lithologique ;

IP : Indice de précipitations érosives =  $b * \frac{c}{p_a}$  ;

b : Nombre annuelle des précipitations journalières supérieures à p<sub>0</sub> ;

c : Somme annuels de ces précipitations ;

P<sub>0</sub> : Seuil égale à 20 mm pour les bassins imperméables et à 30mm pour les bassins moyennement perméables ;

CT : Coefficient de torrentialité ;

Dd : Densité de drainage.

**I-1-6-8- Formule de Probst et Suchet (1992)**

Cette équation relie les taux de rendement annuel des sédiments en suspension dans les Oueds ( $T_{SS}$  en  $t/km^2/ an$ ) en fonction du coefficient d'érosivité de la lithologie, le débit annuel et la superficie du bassin versant :

$$\ln(T_{SS}) = 4,79 + (54 * 10^{-3} K_{ER}) + (4 * 10^{-3} R) - (5,6 * 10^{-5} S) \dots\dots\dots(18)$$

Avec :

$K_{ER}$  : Coefficient d'érosivité de la lithologie ( $t/km^2$ ) ;

R : Débit annuel (mm/an) ;

S : Superficie du bassin versant ( $km^2$ ).

**I-1-6-9- Formule de Kassoul et al (1997)**

Ils ont examiné l'envasement de 19 barrages algériens et ont proposé trois équations pour estimer le taux d'abrasion. La sélection de l'équation s'effectue principalement par la taille du bassin versant. Mais pour les bassins versants possédant une superficie inférieure à  $1000 km^2$ , l'indice d'altitude (dénivelée/altitude moyenne) est utilisée comme deuxième critère de sélection de l'équation. Le tableau ci-dessous représente le taux d'abrasion en fonction de la superficie du bassin versant.

**Tableau I-3 : Le taux d'abrasion en fonction de la superficie du bassin versant**

Superficie	Indice d'altitude	Equation
S<1000	<1	$T_a = 1433S^{0,43} - 15,24$
S>1000	1 à 2	$T_a = 1846S^{0,15} - 360$
S<1000	1,5 à 2	$T_a = 0,463S + 2026$

**I-1-6-10- Formule de Touibia et Achit (2003)**

Cette équation estime l'érosion spécifique en utilisant plusieurs paramètres :

$$E_s = 34,12 S^{-0,164} * D_d^{-284} * C_e^{0,563} * C^{-0,329} \dots\dots\dots(19)$$

Avec :

Es : Erosion spécifique en (t/ha) ;

S : Superficie du bassin versant ;

D<sub>d</sub> : Densité de drainage ;

C<sub>e</sub> : Coefficient d'écoulement ;

C : Pourcentage du bassin possédant un couvert végétal.

## **I-2- Transport solide**

### **I-2-1- définition**

Le transport solide est par définition la quantité de sédiment transportée par un cours d'eau, il constitue la seconde phase de l'érosion. Il existe différents modes de transport solide dans les cours d'eau, ils dépendent essentiellement de la morphologie du cours d'eau et des terrains traversés. On définit deux modes de transport des sédiments : la suspension et le charriage (Degoutte ,2005)

### **I-2-2- Les principaux facteurs des apports solides d'un bassin versant**

Les apports solides venant de l'amont, sont fonction essentiellement des facteurs suivants :

- ✓ Volume et intensité des précipitations ;
- ✓ Géologie et nature du sol ;
- ✓ Couverture du sol (végétation, fragment de roches) ;
- ✓ Utilisation et exploitation de sol (méthode de culture, exploitation forestières, chantiers de construction) ;
- ✓ Géomorphologie et topographie ;
- ✓ Réseau hydrographique (pente, forme, dimensions et tracé des canaux) ;
- ✓ Ruissellement ;
- ✓ Caractéristiques des sédiments (granulométrie, minéralogique...) ;
- ✓ Hydraulique du lit (rugosité, rayon hydraulique...) (Degoutte, 2005)

### **I-2-3- Les modes de transport**

#### **I-2-3-1- Transport solide par charriage**

Le mouvement des particules restant en contact étroit avec le fond ; elles se déplacent en glissant, roulant ou sautant ; ce mode de transport concerne les particules relativement grandes. (Graf et Altinakar, 2001).

### **I-2-3-1-1- Les différents types de mouvement**

Nous distinguons trois types de mouvement pour les particules en charriage : glissement, roulement et saltation.

- ✓ les particules en glissement ou en roulement se déplacent relativement lentement en restant en contact avec le lit ;
- ✓ les particules en saltation se déplacent par sauts à une vitesse relativement grande.

### **I-2-3-1-2- Mesure du transport solide par charriage**

**DU Boys (1879)** a été l'un des pionniers de la recherche sur le charriage, ce n'est qu'en 1930 que cette recherche s'intensifie avec Mayer Peter, Einstein...etc. Ils se sont basés dans leurs travaux sur l'équilibre d'une particule au sein d'un liquide en régime fluviale pour un canal de forme régulière. Ces théories ne peuvent pas s'appliquer directement à des transports des particules non homogènes pour des formes de lit de l'Oued non homogènes (Touaibia, 2004). La mesure du charriage peut être effectuée par différentes méthodes que nous allons citer ci-dessous :

#### ✓ **Détecteur hydrographiques**

C'est une sorte de boîte déposée sur un lit de la rivière, la face amont de cette boîte est constituée par une plaque vibrante qui est orientée normalement au courant grâce à un gouvernail de direction. A l'intérieur de la boîte, se trouve un microphone qui transmet les percussions reçues par la plaque vibrante par un câble souple au casque de l'opérateur.

#### ✓ **Traceurs radioactifs**

La vitesse de déplacement des particules en rivière peut être estimée en mesurant celles des traceurs radioactifs. Nous mélangeons une faible quantité d'alluvions à un certain pourcentage d'un corps radioactif, après passage de l'échantillon dans une pile métallique. Le déplacement de ce sable est détecté au compteur Geiger-Muller, cette méthode est prometteuse et très couteuse.

### **I-2-3-2- Transport solide par suspension**

Le transport par suspension est le deuxième type du transport dans un cours d'eau, la charge en suspension constituée de matériaux dont la taille et la densité leur permet dans des conditions d'écoulement déterminées de se déplacer sans toucher le fond du lit. Il

concerne les matériaux fins, argiles et colloïdes et quelque fois de silts. Ces éléments fins sont maintenus en suspension par la turbulence et la quantité de ces matériaux, qui proviennent de l'érosion des bassins versants, due au ruissellement des eaux de pluie (Degoutte, 2005)

### **I-2-3-2-1- Mesure du transport solide en suspension**

Les méthodes de mesure du transport solide en suspension sont généralement basées sur la détermination par échantillonnage de la concentration du matériau solide en suspension en nombre adéquat de points, ces méthodes sont :

#### **✓ Méthodes directes**

Nous avons plusieurs instruments de mesures par échantillonnage direct qui sont utilisées pour l'étude des phénomènes permanent ou très lentement variables dans le temps que nous allons citer ci-dessous :

- Echantillonneurs à bouteille : ils permettent souvent d'avoir un échantillon qui considère implicitement les fluctuations de la vitesse ;
- Echantillonneurs séparateurs : ils sont basés sur la division directe du matériau en suspension de l'eau au moment même de prise de l'échantillon, son fonctionnement consiste en l'envoi de l'eau et des sédiments dans une retenue de sédimentation ou dans un récipient filtre à travers lequel, l'eau sort sans sédiments car ces derniers restent piégés ;
- Echantillonneurs autonomes : se sont des aspirateurs qui sont programmés pour effectuer automatiquement un prélèvement du liquide à des intervalles de temps fixés où dépendent d'un signal provenant d'un appareil de mesure de débit externe.

Afin de surmonter cette limitation, il a été proposé, au cours de ces dernières années, de nouveaux dispositifs de mesure capables de fournir des valeurs ponctuelles et instantanées de la concentration du matériau transporté.

Le grand avantage de ces dispositifs de mesure réside dans le fait qu'ils ont la possibilité de fournir et de télétransmettre les données en forme digitale à un compteur central, data logger ou enregistreur, la donnée en outre, peut être relevée en continu, même en l'absence d'opérateur.

Le fonctionnement de ces dispositifs se base sur l'atténuation, de la part des particules en suspension, des radiations de différents types nucléaires lumineuses ou vibrations mécaniques ultrasonore.

✓ **Méthode par exploration du champ de concentration**

La méthode consiste à explorer à travers une section droite du cours d'eau le champ de concentration de matière en suspension et de déterminer le débit solide par intégration. Nous procédons à des prélèvements d'échantillons en différents points de la section de mesure, vu que la concentration des sédiments varie souvent de la surface vers le fond et d'une rive à l'autre. La détermination du champ de concentration de vitesse pour la mesure du débit liquide est effectuée simultanément.

Le déploiement d'un jaugeage de débit solide se fait de la même façon que celui du débit liquide. Un certain nombre de points sont répartis sur plusieurs verticales pour lesquelles on dispose d'une mesure de vitesse (V) et d'une mesure de concentration des matériaux en suspension (C). Pour une verticale i, nous reportons le produit C.V en fonction de la profondeur  $h_i$ , nous traçons les épures des vitesses de chaque verticale

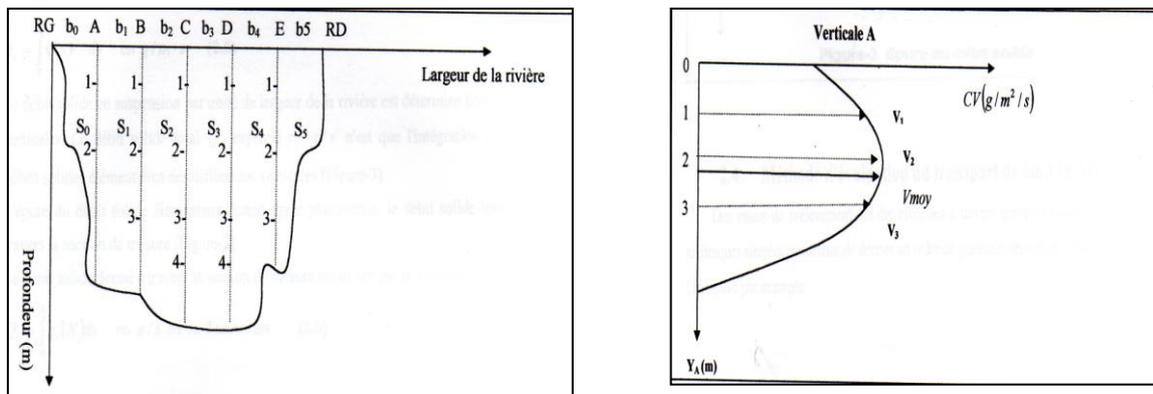
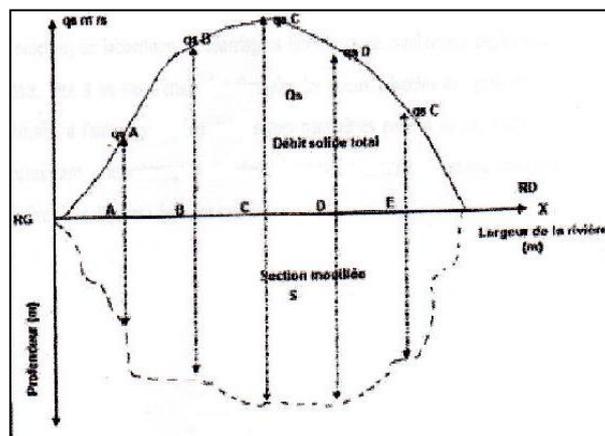


Figure I-1: Epure



du débit solide

D'où :

$$q_s = \int_0^{h_i} C*V dh \dots\dots\dots(20)$$

Avec :

h : profondeur du point de prélèvement (m) ;

h<sub>i</sub> : profondeur de la verticale i (m).

C'est le même procédé pour toutes les verticales.

Le débit solide à travers toute la section de mesure est obtenu par intégration des débits solides unitaires.

$$Q_s = \int_0^L q_s dl = \int_0^L \int_0^h C*V dh dl \dots\dots\dots(21)$$

Avec :

l : abscisse de la verticale i (m) ;

L : largeur totale de la section (m).

### I-3- L'envasement des barrages en Algérie

L'envasement a beaucoup varié durant la dernière décennie, ainsi, la comparaison des nivellements de 1986 à 2006 montre un doublement des taux d'envasement pour les barrages de Djorf Torba et Ksob, passant de 1,3 à 2,6 Mm<sup>3</sup>/an et de 0,3 à 0,6 Mm<sup>3</sup>/an respectivement (Remini, 2009). Le tableau ci-dessous présente les barrages Algériens les plus touchés par l'envasement.

**Tableau I-4 : Les barrages Algériens les plus touchés par l'envasement**

Barrage	Année de mise en eau	Capacité initiale (Mm <sup>3</sup> /an)	Comblement en 2006 ( %)	Dévasement effectué (Mm <sup>3</sup> )
Fergoug	1970	18	100	7
Beni Amrane	1988	16	80	3
Meurad	1860	1	80	
Foum El Gherza	1950	47	70	4
Foum El Gueiss	1939	3	67	
Ghrib	1939	280	60	
Ksob	1977	30	60	4
Oued Fodda	1932	228	57	45
Bouhanifia	1940	73	57	
Boughezoul	1934	55	56	
Zardezas	1977	27	54	10
Ighil Emda	1953	155	35	47
Hamiz	1935	21	27	8
Djorf Torba	1969	350	27	
Sarno	1954	22	24	
Bakhada	1963	56	20	
Beni Bahdels	1952	63	17	
Merdja	1984	55	14	5

Source : Remini, 2009

Dans le domaine de la protection des bassins versants plusieurs travaux ont été réalisés dans le monde et au Maghreb, nous allons présenter les plus importants effectués en Tunisie et en Algérie dans ce qui suit :

- **La Tunisie** a élaboré en 1991 une stratégie de conservation des eaux et du sol dans laquelle le choix des aménagements anti érosifs s'effectue en fonction de cartes de classement des terres. En effet, les sols ont été classés en 4 groupes :
  - Les terres de culture.
  - Les terres à vocation pastorale.
  - Les terres forestières.

Ces groupes ont été subdivisés par la suite en classes pour un grand total de 14 classes possédant des interventions spécifiques (Bouزيد, 1991)

Quelque année plus tard (1994), le Ministère de l'Agriculture tunisien a collaboré avec l'ORSTOM pour réaliser des études traitant de l'envasement des lacs et des barrages colinéaire.

**En Algérie**, au cours des années 80, trois grands projets d'étude de lutte contre l'érosion ont été réalisés. Le premier projet 'ressources en eau dans les pays d'Afrique du Nord' (RAB 80/011), les deux autres projets ont été des projets de collaboration avec des chercheurs français et Allemands.

- **Le projet RAB 80/011** s'est réalisé en Algérie (Ministère de l'Hydraulique, de l'Environnement et des forêts). Le Maroc, la Tunisie sous la tutelle du programme des nations Unies pour Développement. L'un des objectifs de ce projets était de contribuer à la définition d'une stratégie de lutte contre l'érosion et le transport solide, sur la base de l'expérimentation des différents traitements antiérosifs d'une part et de la mesure de l'efficacité des ces traitement de l'autre. Pour ce faire, quatre couples de micro bassins expérimentaux ont été implantés sur le bassin versant d'Oued Isser (Ain Raouraoua, Saouaghi, Ouled Amar et Chaabet Touriah). Pour chacun de ses micro-bassins, un traitement anti-érosif a été appliqué uniquement sur un des bassins du couple.
- **Le deuxième** projet est le fruit d'une collaboration entre INRF et des chercheurs français de L'ORSTOM entre 1984 à 1989.

La quantification de l'érosion en nappe a été examinée à l'aide de parcelles expérimentales mises en place à Ouzera et Beni Slimane en 1983. L'érosion en ravine a été examinée sur des zones pilotes autour de Médea.

- **Le troisième** projet s'est réalisé à la fin des années 80 par le biais d'un projet de coopération entre le ministère et une agence fédérale allemande.

Ce regroupement a utilisé le bassin d'oued Mina comme zone de test pour développer un schéma directeur d'utilisation des sols pour favoriser la conservation des sols et de l'eau en Algérie. Pour ce faire, l'efficacité des techniques anti-érosives a été examinée suivie de la mise en place des ateliers de démonstration en vue de sensibiliser les populations.

## Chapitre II : présentation de la zone d'étude

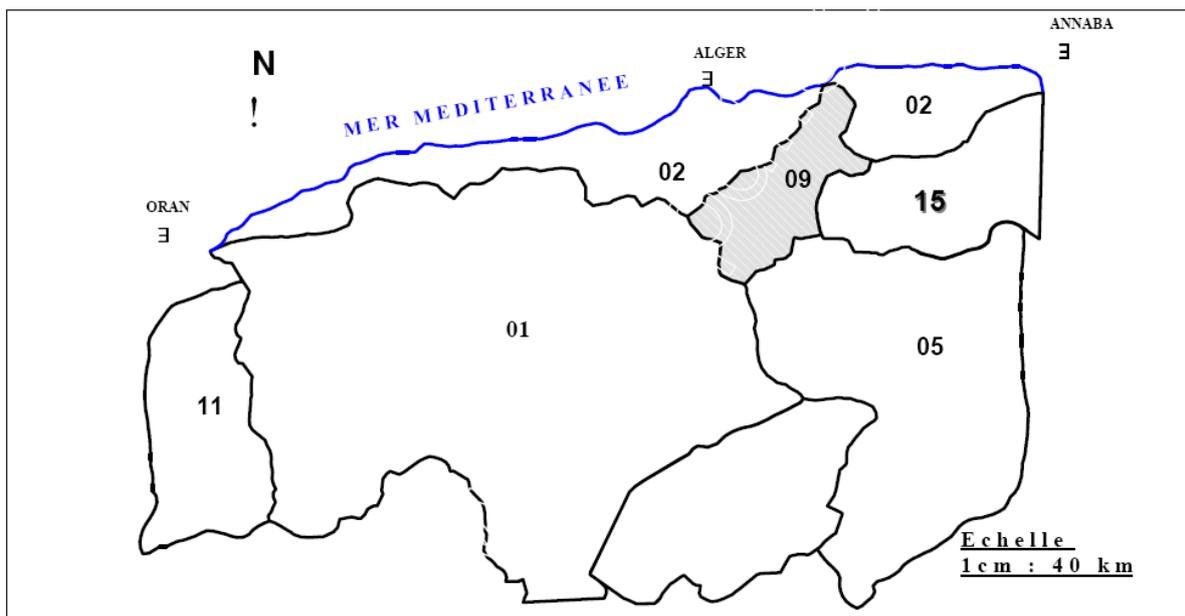
### II -1 Localisation et étendue de la zone d'étude

Le bassin à l'étude est localisé en Algérie du Nord entre les 35<sup>ème</sup> et 37<sup>ème</sup> parallèles Nord et les méridiens 2°45' et 3°45' Est. L'oued Isser est le cours d'eau qui draine ceci depuis les versants Nord du tell méridional jusqu'au réservoir du bassin de Koudiat Acerdoune. Plusieurs villes et villages d'importance significative sont situés dans ce site tel que Beni Slimane, Sidi Maamane, Khamas Djouamaa, Bouchrahil, et Ain Dalia.

Il est important de souligner que le bassin versant à l'étude possède déjà un barrage en amont ( Ladrat) dont le sous- bassin versant couvrent près de 2,6% de la superficie totale de ceci. En raison de la petite superficie du bassin versant en amont du barrage. Ladrat (72 km<sup>2</sup>), l'étude de celui du barrage de Koudiat Acerdoune sera effectué d'un seul tenant comme si le barrage de Ladrat n'était pas présent.

De plus le réservoir du barrage de Ladrat est comblé à 100% de sédiment et possède donc un faible pouvoir de capture de sédiments. Ainsi, le barrage de Ladrat aura peu d'impact sur les volumes de sédiments qui s'achemineront vers le réservoir de Koudiat Acerdoune.

L'ensemble du bassin couvre une superficie de près de 2831 km<sup>2</sup> s'étendant sur les milieux naturels socio- économique d'une grande diversité (Fig.II-1).



**Figure II-1** : Présentation géographique de la zone d'étude



**Figure II-2 : Le réseau hydrographique du bassin versant****II -2-3 Topographie et paramètres physiographiques**

Le bassin versant du barrage de Koudiat Acerdoune couvre une superficie de 2831 km<sup>2</sup> avec un périmètre totalisant 332,8 km et un indice de compacité de Gravelius de 1,76. Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques physiographiques du bassin.

**Tableau II-1 : Caractéristiques physiographique du bassin versant**

Superficie du bassin versant	2831 km <sup>2</sup>
Périmètre du bassin versant	332,8 km
Longueur du rectangle équivalent	146,8 m
Largeur du rectangle équivalent	19,6 m
Indice de compacité de Gravelius	1,76
Dénivelée moyenne	646
Dénivelée spécifique (H5%-H95%)	713 m
Pente moyenne du bassin	12,27 m/km
Indice globale de pente(I <sub>G</sub> )	4,86
Pente moyenne de l'oued principal	6,11 m/km
Densité du drainage	2,97 km/km <sup>2</sup>

Le bassin de Koudiat Acerdoune comporte deux grandes unités de paysage, soit, une région montagneuse dans la portion Sud tandis que la portion Nord est relativement plane. La dénivelée maximale du bassin atteint 1579 m, en débutant à environ 141 m à l'embouchure, pour culminer à 1720 m sur la limite Sud du bassin. Bien entendu, la dénivelée des terres principales (H 5% à H 95%) est beaucoup moins importante, n'atteignant qu'environ 713 m. Cette valeur d'altitude correspond aussi au niveau moyen des terres.

**II -2-4 Géologies et géomorphologie****II -2-4-1- Géomorphologie et stratigraphie**

Les cartes géologiques et topographiques consultées indiquent que le bassin versant présente un relief moyen. Un relief accidenté est présent dans la partie nord, nord-ouest, centre-est ainsi que dans la partie extrême sud du bassin versant. Une large plaine, d'orientation est-ouest caractérise la région Beni Slimane. Le bassin versant présente une orientation générale NNE-SSO.

Au Nord de la ville de Tablat, le bassin versant est caractérisé par une plaine alluviale longeant l'oued Isser, des piedmonts et des montagnes. Les terrasses alluviales sont de nature limoneuse ou sablo-graveleuse. Les affleurements rocheux se présentent sous forme d'argiles

rouges et de sable. Un ravinement généralisé de type badland marque ces lithologies. A l'emplacement du barrage, le substratum est formé de schistes marneux. la présence de schistes avec calcaires, de schistes avec grès, d'argilites et d'argile dans la partie moyenne et haute du bassin versant de l'Oued Isser.

La partie du bassin versant drainée par l'Oued Melah comprend d'une part la plaine de Beni Slimane où affleurent les grès rouges et les conglomérats et d'autre part les formations rocheuses allochtones représentées par des schistes avec des calcaires. Les dépôts quaternaires présents dans la plaine de Beni Slimane sont essentiellement constitués de formations sableuses.

#### **II-2-4-2- Tectoniques**

Du point de vue géologique, le bassin versant de Koudiat Acerdoune est situé dans l'ensemble structuro-sédimentaire de l'Atlas tellien. L'Atlas tellien est une zone orogénique complexe constituée de nappes de charriage à vergence sud mises en place au Miocène inférieur. Les mouvements orogéniques ont entraîné notamment la formation de plans de chevauchement et de failles.

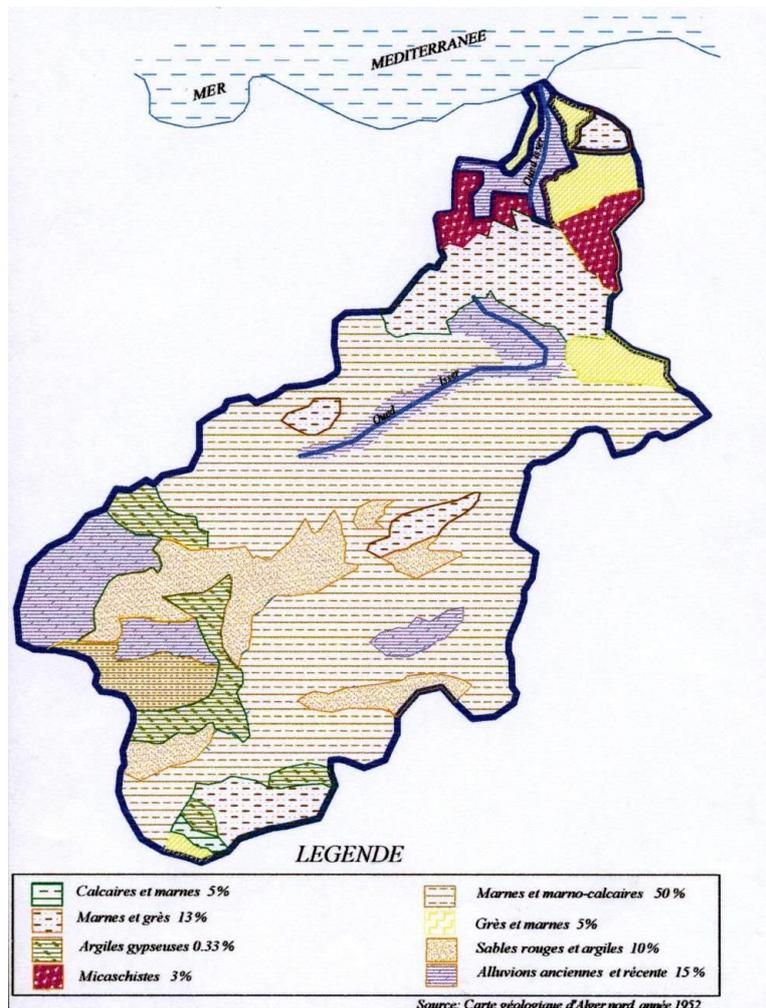


Figure II-3 : Carte géologique du bassin versant

### II -2-5- Couvert végétal

Le bassin de Koudiat Acerdoune est utilisé à environ 60% pour l'agriculture intensive, en l'occurrence les grandes cultures céréalières et fourragères. Cette utilisation reflète clairement la présence d'un plateau au centre du bassin versant. En contrepartie, les zones plus accidentées sont généralement couvertes de forêts (14,6%), de matorrals (7 %) et de maquis/garrigues (6,6 %).

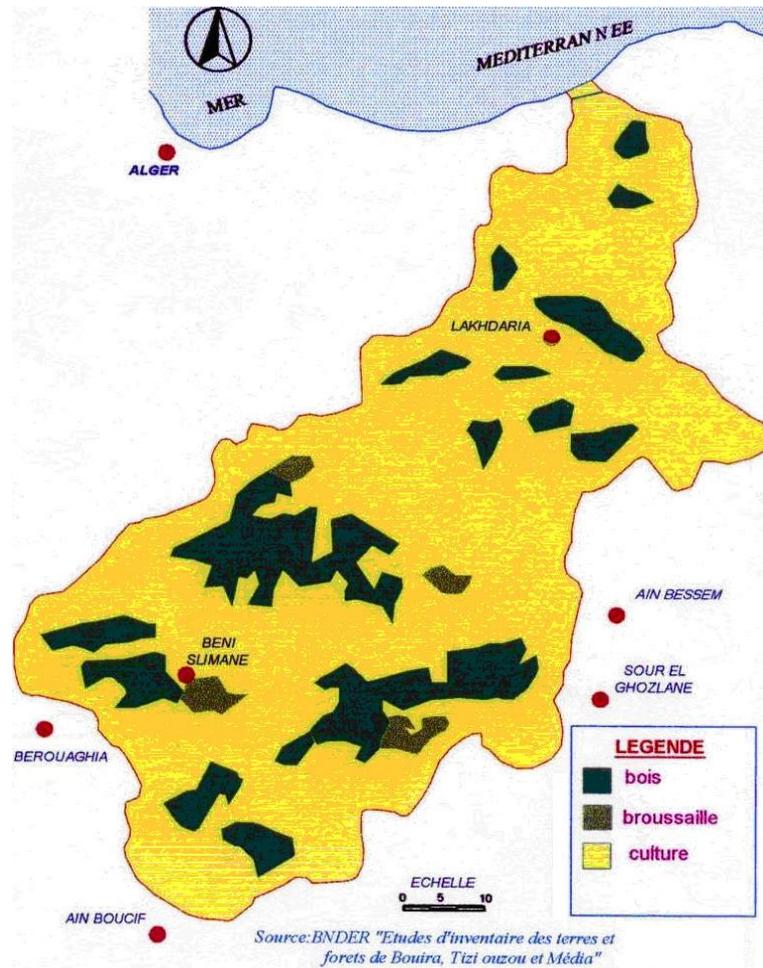


Figure II-4 : Couvert végétal

## II –3 Description socio-économique du bassin versant

### II -3-1 Caractéristiques socio-économique

Les populations du bassin versant du barrage de Koudiat Acerdoune sont généralement issues de zones montagneuses enclavées, dépourvues de nombreuses infrastructures et qui se caractérisent par une pauvreté souvent importante. La vulnérabilité de ces populations est aggravée par les effets induits d'une situation sécuritaire dégradée au cours de la décennie écoulée ainsi que par la faiblesse d'une agriculture de subsistance qui reste à la merci d'une pluviométrie irrégulière. Le bassin versant s'étend sur 8 ensembles géographiques qui sont respectivement :

- ✓ Pour la wilaya de Médéa qui en compte 5 : le Tiitteri médéa et le haut piémont Sud de l'Atlas pour la typologie sylvo-agricole et la plaine de Beni-Slimane ainsi que le plateau de Médéa pour la typologie agricole (pour cette dernière typologie, l'ensemble dénommé Zone Médéa semi-aride, est représenté dans une proportion très faible)

- ✓ Pour sa part, la wilaya de Bouira s'étend sur 3 ensembles géographiques : Le Titteri Bouira et l'Atlas Bouira pour la typologie agro-sylvicole et le plateau de Bouira pour la typologie agricole.

Les populations de ces ensembles géographiques font en général partie des groupes vulnérables où la pauvreté est observée des proportions importantes. Du point de vue de la taille, la population résidant dans le territoire du bassin versant du barrage de Koudiat Acerdoune est estimée à environ 600 000 habitants: celle-ci connaît, par ailleurs, des taux d'accroissement entre 1987 et 1998 variant de 7,62 % (Sidi Ziane), dans la wilaya de Médéa à 5,28 % (Khams Djouamaa, dans la wilaya de Médéa également).

## II-4 Critique et traitement de données

### II -4-1-Présentation des données

Les données utilisées nous ont été fournies par l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) et l'office national de météorologie (ONM).

#### II-4-1-1 Les données hydrométriques

Les données utilisées dans cette étude sont issues de deux stations hydrométriques : Lakhdaria et la Traille. La station de la Traille dispose d'une période de mesures Hauteurs d'eau – Débits liquides (1971 –1985). La station de Lakhdaria dispose d'une longue période de mesure (1954/1957 – 1965 jusqu'à 2001).

Les données obtenues ont été classées donc par année où se retrouve la date du prélèvement, son heure, sa hauteur (en cm), son débit instantané (en m<sup>3</sup>/s) et sa concentration en élément en suspension (en g/l) et les débits solides (Kg/s)

**Tableau II-2 : Caractéristiques des stations hydrométriques**

Code	Nom de la station	Période d'observation
090408	La Traille	1971 /1985
090501	Lakhdaria	1971/2001

#### II -4-1-2 Les données pluviométriques

On dispose de deux stations pluviométriques : La station de Tablat dispose d'une série de mesure de (1954 jusqu'à 2008) et la station du pont de la Traille dispose d'une série de mesures de (1945/1956 – 1968 jusqu'à 2007).

**Tableau II-3 : Caractéristiques des stations pluviométriques**

Code	Nom de la station	X	Y	Z	Période d'observation
090203	Tablat	554,75	345,80	450	1954/2008
090304	Pont de la Traille	559,15	343,00	370	1945/1956 et 1968/2007

**Figure II-5 : Présentation des stations hydrométriques et pluviométriques de la zone d'étude.**

#### II-4-1-3 Les données d'ETP

Nous disposons de relevés complets de pluviométrie, températures, insolation, vitesses du vent et l'humidité relative qui s'étalent de 1995 jusqu'à 2004 de la station de Bouira. En analysant ses données, on remarque que la majorité d'entre elles sont incomplètes, présentent des lacunes. Pour y remédier, on peut utiliser plusieurs méthodes:

- ✓ Remplacer la valeur manquante par celle de la station la plus proche ;
- ✓ Remplacer la valeur manquante par la moyenne des stations voisines. Cette méthode est utilisée lorsque les valeurs moyennes annuelles de la station à compléter ne diffèrent pas plus de 10 % des valeurs moyennes annuelles des stations de référence ;
- ✓ Remplacer la valeur manquante par la moyenne interannuelle de la série considérée ;

- ✓ Les méthodes basées sur l'analyse de régressions et de corrélations: Le calcul de régression se fait en déterminant les valeurs des paramètres de la relation entre deux variables. Cette régression peut être simple ou multiple.

Dans ce travail, on a comblé les lacunes avec la méthode de la moyenne interannuelle.

## II-4-2 Traitements statistiques des données

### II-4-2-1 Détection de valeurs singulières : Test de Grubbs et Beck

C'est la première étape de toute étude, elle consiste à vérifier la présence de certaines valeurs douteuses ou particulières, afin que l'on puisse effectuer une analyse plus fine pour décider si cette donnée douteuse est aberrante et doit donc être éliminée, ou si c'est une donnée exceptionnelle, qui par conséquent doit être au contraire précieusement conservée (Bermad, 2004). Le test de Grubbs et Beck permet de détecter les points singuliers de la série en calculant la statistique suivante :

$$X_h = \text{Exp}(\bar{x} + K_n * s)$$

$$X_l = \text{Exp}(\bar{x} - K_n * s)$$

Où :  $\bar{x}$  et  $s$  sont respectivement la moyenne et la variance des logarithmes naturels des éléments constituant l'échantillon.

$K_n$  : représente une valeur statistique de Grubbs et Beck, tabulée pour différentes tailles d'échantillons et de niveaux de signification.

Au niveau de risque de 10%, l'approximation polynomiale suivante a été proposée par Bobée (1991) :

$$K_n = 3.62201 + 6.28446 * n^{1/4} - 2.49835 * n^{1/2} + 0.491436 * n^{3/4} - 0.037911 * n$$

Où  $n$  représente la taille de l'échantillon.

L'application de ce test considère tous les points supérieurs à  $X_h$  et inférieurs à  $X_l$  comme des points singuliers ou valeurs aberrantes.

**Tableau II -4 : Résultats du test de Grubbs et Beck**

Paramètres	Nom de station	n	$\bar{x}$	$s_x$	$K_n$	$X_l$	$X_h$
Pluie	Pont de la Traille	463	2,14	1,26	10,56	1,47E-5	4966238
	Tablat	456	2.32	1.32	10.52	8.63E-6	1.22e+007

Débit liquide	La Traille	179	0,52	1,60	10,44	8,65E-5	32572384,63
	Lakhdaria	7517	62,686	117,762	-42,71	3,87E-36	3,42E+37

Les résultats du test, confirment qu'il n'y a pas de valeurs singulières ou aberrantes, excepté certaines valeurs nulles des données de pluie. Pour notre part, nous n'avons pas rejeté ces valeurs, elles reflètent le caractère sec de certains jours ou mois.

#### II-4-2-2 Test d'indépendance

Les tests d'indépendance permettent de vérifier si les observations sont indépendantes. C'est à dire qu'elles ne dépendent pas de leur rang et que la moyenne de la répartition étudiée ne doit pas subir de déplacement de nature monotone ou cyclique. L'objectif du test est de ne pas introduire de multiples fois la même information. Plusieurs tests permettent de vérifier l'indépendance des événements, nous pouvons citer le test d'Anderson, le calcul du coefficient d'auto-corrélation, ou encore le test de Wald-Wolfowitz.

##### ✓ Test de Wald-Wolfowitz

Il est basé sur l'hypothèse qu'aucune observation ne devrait influencer la valeur suivante. Pour un même échantillon de taille n, le test de Wald-Wolfowitz considère la valeur statistique.

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} + x_n x_1$$

Pour n suffisamment grand, cette statistique suit une distribution normale de moyenne et de variance :

$$E[R] = \frac{(S_1^2 - S_2)}{n-1}$$

$$Var[R] = \frac{(S_2^2 - S_4)}{n-1} + \frac{(S_1^4 - 4S_1^2 S_2 + 4S_1 S_3 + S_2^2 - 2S_4)}{(n-1)(n-2)} - \{E[R]\}^2$$

$$S_k = \sum_{i=1}^n x_i^k$$

$S_k$  : Moment d'ordre k de l'échantillon.

La valeur statistique  $T = \frac{R - E[R]}{\sqrt{Var(R)}}$  suit une distribution normale centrée réduite

$N(0,1)$ , et est utilisée pour tester à un niveau de signification, l'hypothèse d'indépendance en comparant la valeur absolue de T avec la valeur normale centrée réduite  $U_{\alpha/2}$  correspondant à

la probabilité de dépassement de  $\frac{\alpha}{2}$ . Si  $|T|$  est inférieure à  $U_{\alpha/2}$  l'hypothèse d'indépendance est vérifiée, celle-ci est rejetée dans le cas contraire. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau II-5 : Résultats du test de Wald-Wolfowitz**

paramètres	Noms des stations	T	$U_{\alpha/2}(\alpha = 5\%)$
Pluie	Tablat	4.43	1,96
	Pont de la Traille	6.59	
Débit liquide	La Traille	8,27	
	Lakhdaria	9,5	

Les résultats obtenus par le test de Wald-Wolfowitz montrent que les données mensuelles sont dépendantes.

#### II-4-2-3 Tests d'homogénéité

L'hypothèse d'homogénéité exprime que les échantillons extraits de la même population sont identiques et par conséquent ont les mêmes fonctions de répartition (Aivazian, 1983). L'objectif des tests d'homogénéité est de détecter la non-homogénéité des données que ce soit entre deux échantillons d'une même station, ou entre deux séries homologues de deux stations différentes. Une série de données est dite homogène, si les propriétés statistiques de l'erreur de mesure affectant les données sont restées invariables au cours de la période d'observation.

##### ✓ Test de Wilcoxon-Mann-Whitney

Ce test utilise les numéros d'observations dans la série de données obtenue en ordonnant l'échantillon global de taille  $n$ . Le numéro d'observation  $x_i$  dans l'échantillon ordonné s'appelle ordre ou rang, et sera désigné par  $R_{i,n}$ . La série  $x_i$  ( $i=1, n$ ) classée par ordre croissant est subdivisée en deux échantillons de tailles  $n_1$ , et  $n_2$ , où  $n=n_1+n_2$  et  $n_1 > n_2$ .

Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney considère les quantités suivantes :

$$\begin{cases} V = R - \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} \\ W = n_1 n_2 - V \end{cases}$$

Avec :

$R$  : Somme des rangs des éléments du premier échantillon de taille  $n_1$  dans la série de base.

$V$  : Somme des nombres de dépassements de chaque élément du second échantillon par ceux du premier.

$W$  : Somme des nombres de dépassements des éléments du premier échantillon par ceux du second.

Lorsque  $n$ ,  $n_1$  et  $n_2$  sont suffisamment grands,  $V$  et  $W$  suivent une distribution normale:

$$\text{De moyenne : } moy(V) = moy(W) = \frac{n_1 n_2}{2}$$

$$\text{Et d'écart type } Sv = Sw = \left(\frac{n_1 n_2}{12} (n_1 + n_2 + 1)\right)^{1/2}$$

Nous pouvons alors tester si les deux échantillons proviennent de la même population au niveau de signification  $\alpha$  en comparant la grandeur statistique

$$T = \left| \frac{V - moy(V)}{Sv} \right|$$

Avec la variable normale centrée réduite  $U$  de probabilité de  $\alpha/2$ . Si  $T < U_{\alpha/2}$  alors les deux échantillons proviennent de la même population, sinon les deux échantillons ne sont pas homogènes. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau II-6 : Résultats du test de Wilcoxon-Mann-Whitney**

Paramètres	Noms des stations	T	$U_{\alpha/2}(\alpha = 5\%)$
Pluie	Tablat	23.82	1,96
	Pont de la Traille	23.24	
Débit liquide	La Traille	7,44	
	Lakhdaria	6.78	

Les résultats du test de Wilcoxon-Mann-Whitney présentés dans le tableau ci-dessus montrent que les observations des pluies et des débits ne sont pas homogènes.

### Conclusion

Les données de la station hydrométrique représentatif du bassin versant de l'étude sont insuffisantes pour quantifier le transport solide, pour cela nous allons faire une extension de la série de mesure des débits liquides par le biais des modèles pluie débit que nous allons traiter dans le chapitre suivant

## CHAPITRE III : MODELISATION PLUIE-DEBIT

Pour pouvoir protéger le bassin versant de Koudiat Acerdoune contre le phénomène de l'érosion, il faut tout d'abord quantifier le transport solide de la région. Pour ce faire nous disposons de la station hydrométrique de la Traille qui se trouve à l'amont du barrage mais dont la taille n'est pas adéquate pour mener à bien cette opération. En effet, cette station n'a fonctionné que de 1971 à 1985 soit 15 années de mesures seulement. Pour actualiser et mettre à jour ces données nous nous sommes attelés dans ce chapitre à faire l'extension de cette série de mesures de débits liquides et ce par le biais de la modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel.

### Qu'es ce qu'une modélisation?

Un modèle est par définition une représentation simplifiée d'un système complexe (Dassargues A, 1991). Cette représentation doit être la plus conforme possible à la réalité du point de vue des mécanismes et processus simulés ; elle repose cependant sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Son degré de conformité à la réalité peut aussi dépendre des objectifs assignés à la modélisation. Le rôle d'un modèle peut ainsi être d'intégrer l'ensemble des données disponibles sur un système et d'utiliser le modèle comme outil de synthèse et de vérification de la cohérence de ces données et des hypothèses qui peuvent être formulées sur la structure et le fonctionnement du système étudié. Le rôle d'un modèle peut aussi être purement opérationnel, afin de fournir une réponse pertinente à une problématique posée.

### III- 1- Modélisation pluie-débit en hydrologie

L'étude de la transformation de la pluie en débit est une des nombreuses disciplines hydrologiques, à laquelle nous nous sommes intéressés plus particulièrement dans ce travail. Elle est assez naturelle puisqu'elle essaie de trouver un lien entre les débits et les phénomènes qui en sont la cause directe, les pluies. Nous nous proposons ici de définir brièvement l'objet de l'étude et les objectifs de la construction des modèles pluie-débit.

### III- 2- Pourquoi des modèles pluie-débit ?

La modélisation pluie-débit peut réussir à répondre à de nombreuses questions centrées sur l'eau, sur la gestion des risques et de la ressource notamment. Michel (1989) et

Refsgaard et Abbott (1996) répertorient l'essentiel de ces problématiques. Nous nous intéresserons ici uniquement à une modélisation pluie-débit quantitative, en citant quelques-unes de ces problématiques:

- ✓ Simulation de débits, pour le comblement de lacunes dans des séries de données, la reconstitution de débits historiques (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits);
- ✓ Prédétermination des débits de crue ou d'étiage : on désire savoir avec quelle fréquence des débits de crue (supérieurs à un seuil de risque par exemple) ou des faibles débits (en deçà d'un débit réservé par exemple) risquent de se produire, et sur quelle durée. On se place ici dans une démarche d'analyse fréquentielle. Cette connaissance peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou d'aménagements dans le lit (mineur à majeur) du cours d'eau;
- ✓ Prévision des crues et des étiages: il s'agit d'évaluer par avance (avec un délai de quelques heures à quelques jours), connaissant l'état du bassin, des débits de crues susceptibles de présenter des risques (inondation) ou des débits d'étiages pouvant nécessiter la mise en place d'une gestion particulière de la ressource (par des barrages-réservoirs par exemple) pour assurer l'approvisionnement en eau ou la préservation de la vie halieutique. On s'inscrit ici dans une démarche d'analyse en continu du bassin;
- ✓ Influence d'aménagements sur l'hydrologie: on désire pouvoir prédire les changements de la réponse du bassin suite à des modifications des caractéristiques du bassin, d'origine humaine ou à des changements environnementaux.

### III-3- Classification des modèles pluie débits

Depuis leur première conception, plusieurs modèles pluie-débit sont apparus, et vu les différents objectifs des modélisateurs, ceux-ci se sont diversifiés, et leur classification peut se baser sur les critères suivants : (Higy, 2000)

- ✓ Système à modéliser ;
- ✓ Degrés de causalité ;
- ✓ Discrétisation spatio-temporelle.

#### III-3-1- Les modèles empiriques

Dans ces modèles, la transformation pluie-débit se fait non pas par l'application des lois physiques à un milieu et ses conditions aux limites, mais par l'examen des enregistrements des pluies et des débits. (Nash & Sutcliffe, 1970) .

### III-3-2- Les modèles physiquement fondés

Un modèle physique peut être défini comme un modèle dont les relations fonctionnelles sont des équations phénoménologiques basées sur des principes physiques fondamentaux tels que les lois de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. (Higy, 2000).

Ces modèles ont été développés à l'échelle microscopique, et dans certaines conditions aux limites telles l'homogénéité et l'isotropie. Leur validation à l'échelle macroscopique (bassin versant) est confrontée à la limite physique de certains paramètres.

### III-3-3- Les modèles conceptuels (à réservoirs)

Les modèles à réservoirs c'est la modélisation d'un système hydrologique par un ou un jeu de réservoirs qui emmagasine la pluie pour la distribuer après. Ces modèles essayent de représenter le cycle hydrologique par une conceptualisation des différents mécanismes, en introduisant des hypothèses jugées capables de traduire la physique de la relation pluie-débit et reliées dans leur ordre conceptuel logique. (Soroshian & Gupta, 1983).

#### III-3-3-1- Présentation des modèles GR

L'idée de la modélisation 'GR' a été lancée par C. Michel en 1983 après l'analyse d'un modèle conceptuel CREC (Cormary et Guilbot, 1973) à neuf paramètres sur le bassin expérimental de l'Orgeval. Il a été constaté que ce modèle présentait des difficultés au niveau de la mise en œuvre et du calage.

L'idée s'est développée alors, en partant du modèle le plus élémentaire possible (un unique paramètre lié à un unique réservoir) et en ne compliquant cette architecture que pour faire face aux difficultés à reproduire les débits réels et non pour satisfaire des conceptions à priori sur le cycle hydrologique. (Safouane Mouelhi, 2002).

La modélisation pluie débit se fait par deux processus différents qui sont la fonction de production et la fonction de transfert :

- ✓ La fonction de production : représente l'interaction pluie-sol, elle traduit l'aptitude du bassin à produire des écoulements, après un ensemble de pertes, telles que l'évapotranspiration ou la rétention végétale. La pluie brute est donc transformée en

pluie nette, après soustraction de l'évapotranspiration. Cette fonction de production est assurée par un réservoir, ou une fonction ;

- ✓ la fonction de transfert : une partie de la pluie nette va s'infiltrer dans le réservoir inférieur et l'autre partie va ruisseler vers l'exutoire, elle a pour objectif la distribution de l'écoulement et le décalage dans le temps des débits vers l'exutoire.

Nous allons présenter ci-dessous deux modèles GR au pas de temps mensuel.

### III-3-3-2. Le modèle GR2M (2002)

C'est un modèle issu des travaux de Mouelhi (2002), il a été conçu après une comparaison de plusieurs modèles mensuels, et une adaptation du modèle conceptuel journalier GR4J (Perrin, 2000) à l'échelle mensuelle.

Le modèle GR2M comporte deux réservoirs et deux paramètres X1 et X2, il est caractérisé par deux fonctions :

- ✓ Une fonction de production assurée par le réservoir sol S qui est limité par une capacité maximale X2 (paramètre à caler) ;
- ✓ Une fonction de transfert représentée par le réservoir R, dont le niveau est modifié par l'échange souterrain en fonction du paramètre X1.

En premier lieu, le niveau du réservoir sol S devient S1 sous l'action de la pluie :

$$S1 = \frac{S + X2V}{1 + \frac{S}{X2}V}$$

V : Tangente hyperbolique de (P/X2).

Une partie de la pluie Pr participe à l'écoulement :

$$Pr = S + P - S1$$

Le niveau de ce réservoir est modifié sous l'effet de l'évapotranspiration potentielle, et devient S2(i) :

$$S2 = \frac{S1(1 - w)}{1 + w(1 - \frac{S1}{X2})}$$

w = Tangente hyperbolique de (ETP/X2)-

A la fin du mois, le réservoir sol S en fonction du paramètre X2 évacue par percolation une quantité d'eau, le niveau de ce réservoir diminue :

$$S3 = \frac{S2}{\left[1 + \left(\frac{S2}{X2}\right)^{2.5}\right]^{0.4}}$$

La percolation souterraine Ps est exprimée :

$$Ps = S2 - S3$$

Quand le réservoir R reçoit Pr et Ps, son niveau initial change et devient :

$$R' = R + Ps + Pr$$

Le niveau du réservoir R' change et devient R1 sous l'effet de la vidange et des échanges souterrains :

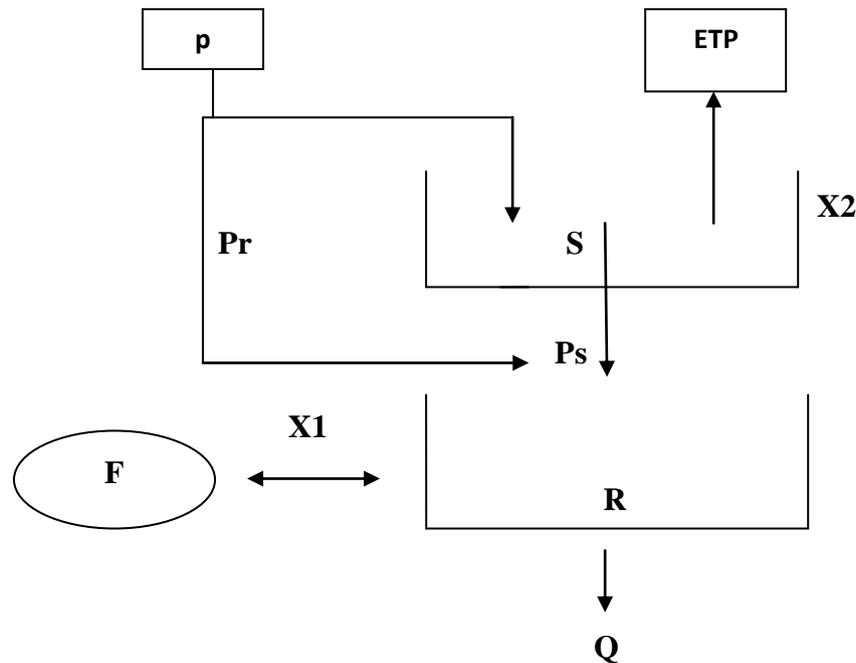
$$R1 = \frac{R'}{X1 + \frac{R'}{50}}$$

L'échange souterrain F agit sur le réservoir de routage R, il est exprimé par :

$$F = 50 X1 \ln\left(1 + \frac{R'}{50 X1}\right)$$

A la fin nous aurons le débit total calculé par le modèle qui s'exprime comme suit :

$$Q = R' + F - R1$$



**Figure III-1** : Architecture du modèle GR2M (2002)

### III-3-3-3 Le modèle GR3M

Suite aux travaux de Kabouya (1990, 1991) et de Makhlouf (1994), une variante à trois paramètres GR3M a été proposée. Ce modèle est très proche du modèle GR2M déjà présenté. Il est caractérisé par :

- ✓ Une phase partielle ‘d’ajustement’ des données qui se traduit par un paramètre lié seulement à l’évapotranspiration. Contrairement au modèle GR2 (Michel et Edijatno, 1989) où le paramètre concerne la pluie et l’évaporation.
- ✓ Une nouvelle forme d’interception **Z**.

Il s’agit d’un modèle à deux réservoirs. Un réservoir ‘Sol’ caractérisé par le paramètre **A** qui représente sa capacité maximale **X2** et un réservoir quadratique de routage caractérisé par le paramètre **B**. En revanche, le troisième paramètre **C** est introduit plutôt pour ‘corriger’ l’évapotranspiration **E**, et non pas au niveau de l’interception.

Donc l’évapotranspiration devient :

$$E1 = C \cdot E$$

Une nouvelle phase d’interception présentée par la fonction ‘Z’ qui modifie l’impact de l’évapotranspiration :

$$Z = \frac{P \cdot E1}{P + E1}$$

Cette quantité est soustraite aux entrées :

$$PN = P - Z$$

PN : pluie nette

Et

$$EN = E1 - Z$$

EN : évapotranspiration nette

- **Effet de réservoir sol**

Le niveau du réservoir au début du mois prend une valeur initiale **S**. La valeur du stock d’humidité du réservoir sol, avec la valeur initiale **S**, au début du mois, prendra successivement différentes valeurs. D’abord sous l’effet de la pluie le niveau **S** devient **S1**.

$$S1 = \frac{S + A \cdot V}{1 + V \frac{S}{A}}$$

V: Tangente hyperbolique de (PN/A).

L'excès de la précipitation est donné par :

$$P1 = PN + S - S1$$

Sous l'effet de l'ETP le niveau de réservoir sol devient :

$$S2 = \frac{S1(1 - W)}{1 + W \left(1 - \frac{S1}{A}\right)}$$

W: Tangente hyperbolique de (EN/A).

- **Routage et écoulement pseudo direct**

Le modèle est caractérisé par un écoulement pseudo-direct défini par un coefficient noté F=0,5. Donc le niveau de réservoir de routage va être modifié et il devient :

$$R1 = R + 0,5P1$$

Le volume libéré par R au cours de la vidange est donné par

$$Qr = BR1$$

Le débit total est alors

$$Qt = Qr + 0,5$$

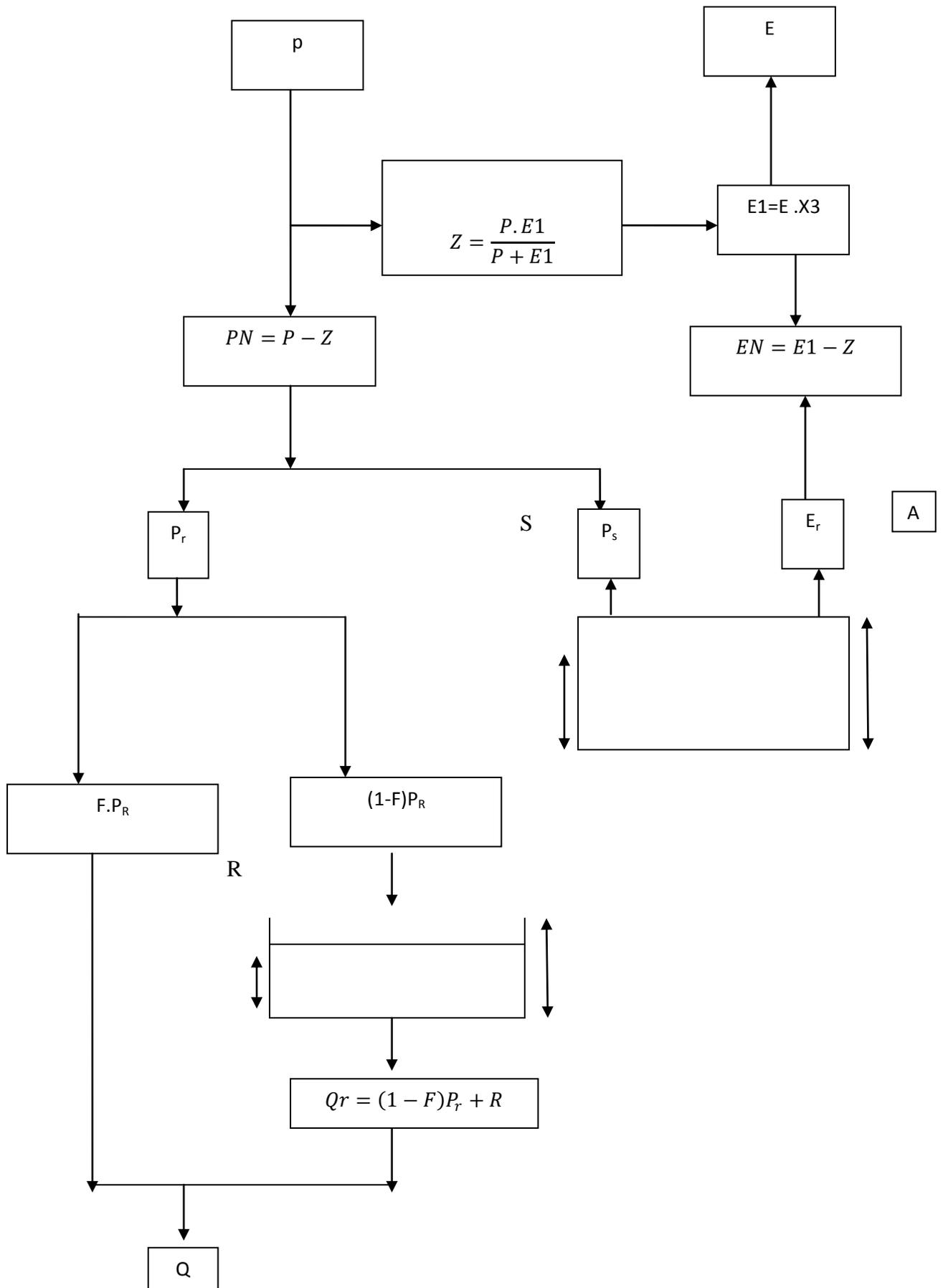


Figure III-2: Architecture du modèle GR3M (2002)

### III-3-4- Les modèles ' boîte noire'

Dans une telle modélisation les bassins versants sont considérés comme des boîtes noires qui essaient de représenter théoriquement le prototype hydrologique en utilisant le système matriciel pour modéliser certains mécanismes comme le ruissellement.

Ces modèles ne conviennent pas à une analyse du fonctionnement interne du bassin versant, et sont donc peu utiles à cette échelle. Dans cette catégorie de modélisation pluie débit il existe plusieurs modèles :

- ✓ L'hydrogramme unitaire ;
- ✓ Le modèle DPFT (Différence Première de la Fonction de Transfert) ;
- ✓ Les modèles ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs) ;
- ✓ Les réseaux de neurones artificiels ;
- ✓ La logique floue ;
- ✓ La neurofloue.

Nous allons présenter ci-dessus le modèle neuroflou ANFIS qui va être utilisé par dans ce présent travail.

#### III-3-4-1- Optimisation neuroflou : le modèle ANFIS

Les réseaux de neurones artificiels présentent l'avantage d'être des approximateurs universels qui procèdent par apprentissage pour minimiser l'erreur entre un système d'entrée/sortie.

Les techniques d'apprentissage neuronal utilisant différentes architectures neurofloues permettent d'allier le symbolique au numérique et d'en réduire les inconvénients mutuels.

C'est dans cette optique que plusieurs chercheurs (Glorennec et al., 1992, Bersini, 1993, Jang, 1993) ont exploité les réseaux de neurones artificiels et combiné les deux approches floue et neuronale d'où le modèle neuro-flou. Cette propriété permet alors d'exploiter des mécanismes d'optimisation numériques pour la synthèse de contrôleurs flous. Ainsi, Sugeno voit la solution dans les algorithmes des moindres carrés, alors que Bersini utilise une méthode de descente de gradient pour minimiser un critère quadratique (Boukezzoula, 2000).

Considérons un modèle composé des deux règles suivantes :

$$\text{si } x_1 \text{ est } A_1 \text{ et } x_2 \text{ est } B_1 \text{ alors } y_1 = f_1(x_1, x_2) = a_1x_1 + b_1x_2 + C_1$$

$$\text{si } x_1 \text{ est } A_2 \text{ et } x_2 \text{ est } B_2 \text{ alors } y_2 = f_2(x_1, x_2) = a_2x_1 + b_2x_2 + C_2$$

Le modèle neuroflou est représenté par le réseau adaptatif proposé par Jang (1993). Il s'agit d'un réseau adaptatif multicouche dont les connexions ne sont pas pondérées, ou ont toutes un poids de 1. Les nœuds sont de deux types différents selon leur fonctionnalité : les nœuds carrés (adaptatifs) contiennent des paramètres, et les nœuds circulaires (fixes) n'ont pas de paramètres. Toutefois, chaque nœud (carré ou circulaire) applique une fonction sur ces signaux d'entrées.

La sortie  $O_i^k$  du nœud  $i$  de la couche  $k$  (appelé nœud  $(i,k)$ ) dépend des signaux provenant de la couche  $k-1$  et des paramètres du nœud  $(i,k)$ , c'est-à-dire :

$$O_i^k = f(n^{k-1}, \dots, O_{n^{k-1}}^{k-1}, a, b, c \dots)$$

Où  $n^{k-1}$  est le nombre de nœuds dans la couche  $k-1$ .

$a, b, c, \dots$  sont les paramètres du nœud  $(i, k)$ . Pour un nœud circulaire ces paramètres n'existent pas.

Ainsi les nœuds de chaque couche réalisent une fonction :

- ✓ Couche 1 : Chaque nœud est donc un nœud carré avec une fonction

$$O_i^1 = u_{Ai}(x)$$

Où  $x$  est l'entrée du nœud  $i$ , et  $A_i$  le terme linguistique associé à chaque fonction. En d'autres termes,  $Q_i^1$  est le degré d'appartenance de  $x$  à  $A_i$ . Les paramètres d'un nœud de cette couche sont ceux de la fonction d'appartenance correspondante.

- ✓ Couche 2 : Chaque nœud  $i$  de cette couche est un nœud circulaire appelé  $\Pi$  qui engendre en sortie le produit de ses entrées. Ce produit représente le degré d'activation d'une règle :

$$w_i = u_{Ai}(x_1) \cdot u_{Bi}(x_2) \quad i = 1, \dots, 2$$

- ✓ Couche 3 : Chaque nœud de cette couche est un nœud appelé  $N$ . La sortie du nœud  $i$  est le degré d'activation normalisé de la règle  $i$  :

$$V_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}$$

- ✓ Couche 4 : Chaque nœud de cette couche est un nœud carré avec une fonction réalisant le calcul :

$$O_i^4 = v_i f_i = v_i (a_i x_1 + b_i x_2 + c_i) \quad i = 1 \dots 2$$

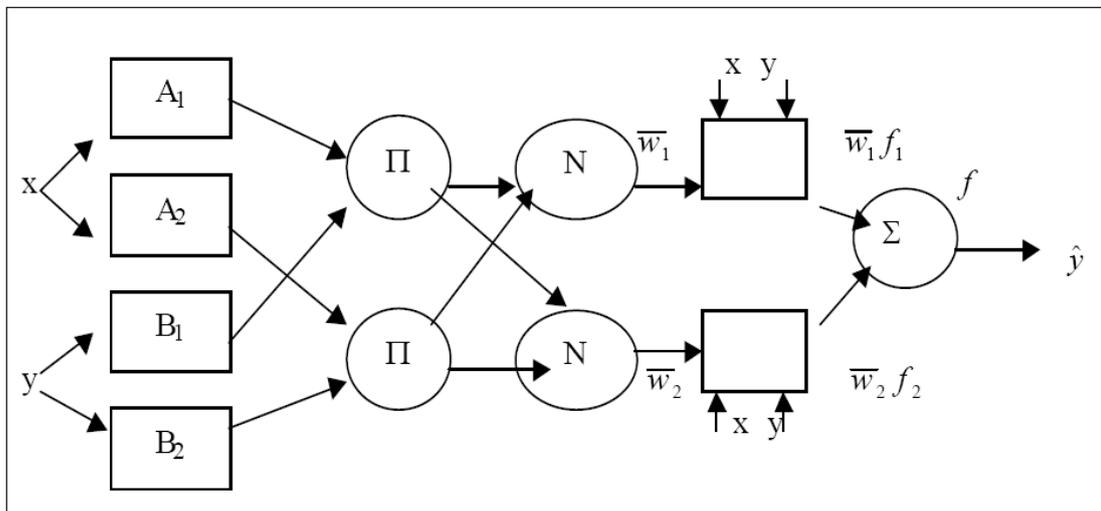
Où  $v_i$  est la sortie de la couche 3.

$\{a_i, b_i, c_i\}$  est l'ensemble des paramètres de sortie de la règle  $i$ .

- ✓ Couche 5 : Le seul nœud de cette couche est un nœud circulaire qui effectue la somme des signaux provenant de la couche 4, c'est-à-dire :

$$O_l^5 = y = \sum_l v_l \cdot f_l$$

La généralisation du réseau à un système à  $r$  entrées ne pose aucun problème particulier. Le nombre de nœuds de la couche 1 est toujours égal au nombre total de termes linguistiques définis.



**Figure III-3 :** Réseau adaptatif du modèle ANFIS

#### III-4- Paramètres des modèles

Pour pouvoir dire qu'un modèle est robuste on doit établir la relation entre les variables d'entrées (observées) et les variables de sorties (simulées), et cela ne peut se faire que par l'estimation des paramètres du modèle.

### **III-5- Calage du modèle**

Certains auteurs (Perrin, 2000, Duan et al, 1992) s'accordent à dire que la qualité de l'estimation des paramètres d'un modèle dépend notamment de la puissance et de la robustesse de l'algorithme utilisé.

Des analyses de sensibilité, ont montré que trois à quatre paramètres étaient en fait suffisants pour calibrer correctement des modèles conceptuels globaux (Sorooshian, 1991). Lors du calage, le problème qui se pose est le nombre de données à caler, à ce propos il n'existe pas une règle commune entre tous les bassins, en générale, la calibration se fait sur les deux tiers de la série de base.

### **III-6- Validation du modèle**

Cette période permet de vérifier la robustesse du calage en terme d'indépendance du jeu de paramètres vis à vis des données d'entrées et donc l'aptitude du modèle à fournir des simulations (ou des prévisions) dans diverses situations hydrologiques (Quesney, 1999). Durant plusieurs années, les hydrologues ne se sont intéressés qu'aux résultats du modèle obtenu lors du calage, et donc la validation de ces modèles a été faite sur des bases erronées.

Cependant, il est important de distinguer le calage de la validation, la première opération assurant l'adéquation des paramètres alors que la seconde évalue l'adéquation du modèle tout entier (Fortin 1989, v. Rakem, 1999).

Plusieurs hydrologues se sont posé la question sur la stratégie de la validation d'un modèle, c'est pour cela qu'ils ont proposé plusieurs tests de validation, mais en règle générale on prend un tiers de la série observée.

### **III-7- Critères de validation des modèles pluie-débit**

Pour tester la robustesse du modèle nous devons calculer des critères qui estiment la différence entre les données observées et les données simulées.

#### **III-7-1- Le critère de Nash**

Nash et Sutcliffe (1970) ont proposé un critère, adimensionnel qui est considéré comme la base des critères de performance des modèles pluie-débit. Ce critère exprime le pourcentage de la variance naturelle que l'on gagne par rapport à un modèle de référence qui donnerait comme débits calculés la moyenne des débits observés. Il est défini par :

$$Nash = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{isim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{moy})^2} \right) \cdot 100$$

En fonction de la valeur du critère de Nash-Sutcliffe, on peut définir des performances des modèles pluie-débit.

**Tableau III-1** : Qualité des modèles en fonction des valeurs du critère de Nash

Nash(%)	Qualité
Nash < 70	Très insuffisant
70 < Nash < 80	Insuffisant
80 < Nash < 85	Médiocre
85 < Nash < 90	Correcte
90 < Nash < 95	Bon
Nash > 95	Très bon

Cependant, ces appréciations ont été définies pour des petits bassins versants homogènes, dont les débits ne présentent pas de fluctuations importantes. La validation d'un modèle pluie-débit reste donc problématique, du fait que les appréciations du modèle en fonction d'un critère sont étroitement liées aux caractéristiques statistiques (notamment la variance) des débits modélisés.

En effet, pour la plupart des critères, l'erreur de simulation est plus importante dans le cas des hautes eaux (débits élevés) que dans le cas des étiages où les débits sont généralement inférieurs à 1.0 m<sup>3</sup>/s. On note donc que l'appréciation d'un modèle reste tributaire des expériences de chaque hydrologue, où la validation d'un modèle est déterminée en fonction des valeurs du critère choisi.

Au pas de temps mensuel, les écarts entre les données simulées et observées sont tels que la validation d'un modèle à cette échelle est problématique, d'autant plus que la durée de calage est longue.

### III-8-2- Le critère RMSE (Root Mean Squared Error)

Il est défini comme étant la racine carrée de l'erreur quadratique, l'introduction de la racine carrée a pour but d'homogénéiser les écarts entre les débits simulés et observés en particulier dans les cas extrêmes (débits faibles ou élevés), du fait que cette erreur est élevée au carré dans le cas du critère quadratique. Le critère RMSE exprimé en m<sup>3</sup>/s est défini comme suit :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{isim})^2}$$

Les modèles sont optimisés si les valeurs des critères sont proches de zéro. Cependant les résultats sont fortement influencés par les valeurs importantes des écarts, correspondants souvent aux crues.

### III-8-3- Le coefficient de corrélation

Il est exprimé par :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n ((Q_{iobs} - Q_{moy obs}) * (Q_{isim} - Q_{moy sim}))^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{moy obs})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{isim} - Q_{moy sim})^2}}$$

### III-9- Résultats de la modélisation

Nous avons développé un programme sous Matlab afin de faire des simulations par les modèles GR2M et GR3M. Les différentes étapes des programmes sont présentées dans les organigrammes ci-dessous :

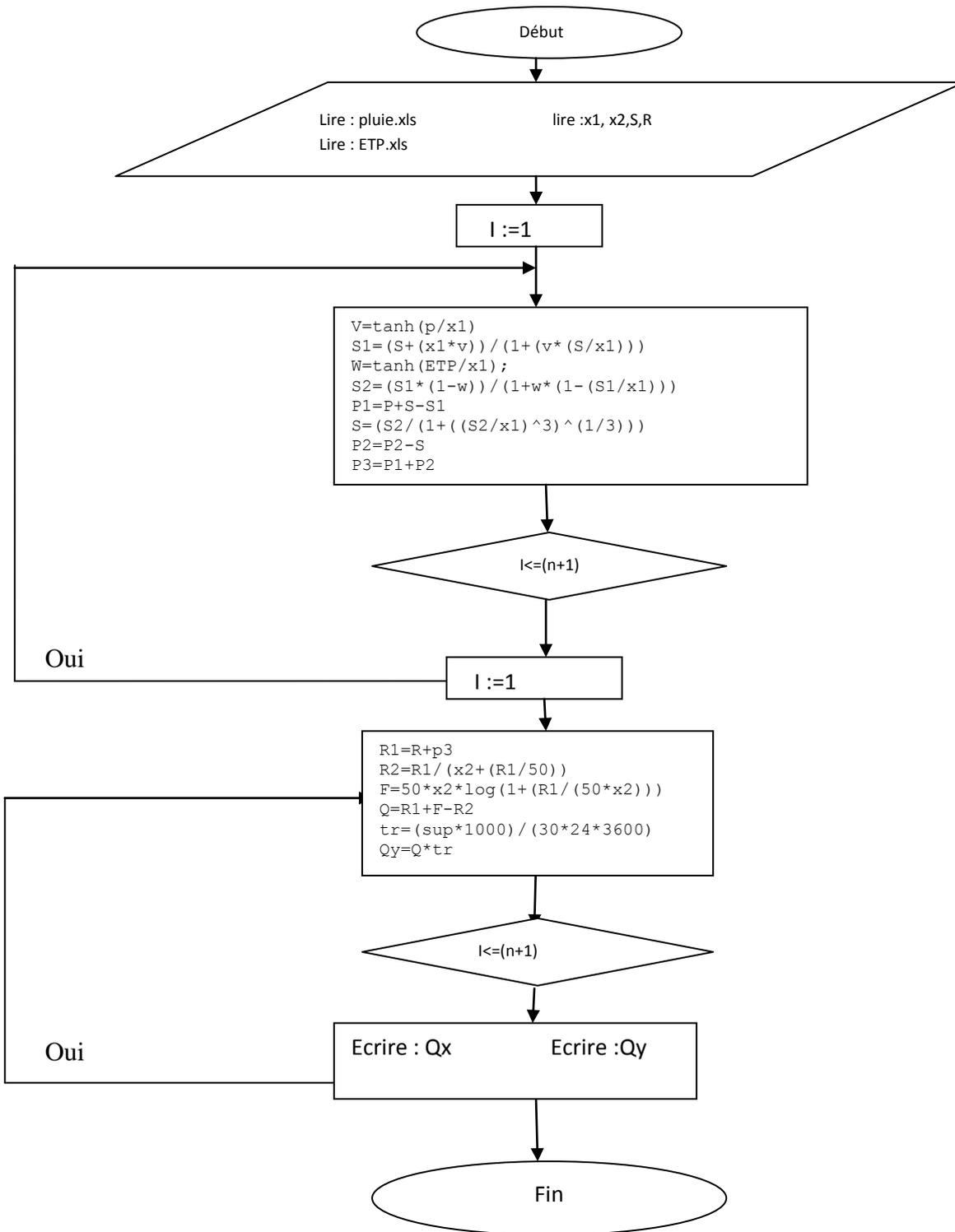


Figure III-4 : Organigramme du modèle GR2M

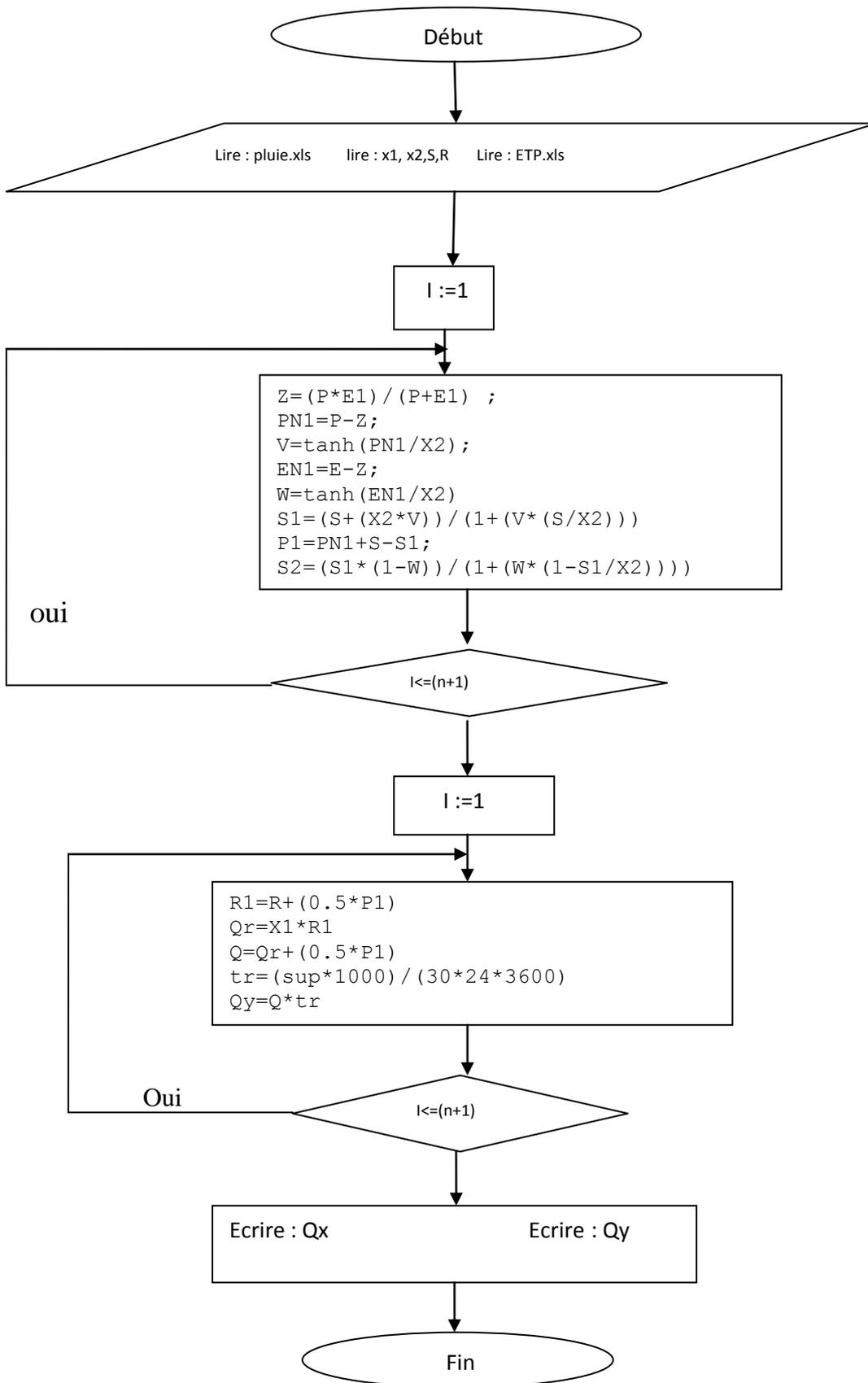


Figure III-5: Organigramme du modèle GR3M (2002)

### III-9-1-Résultats de la simulation par les modèles GR2M et GR3M en période de calage

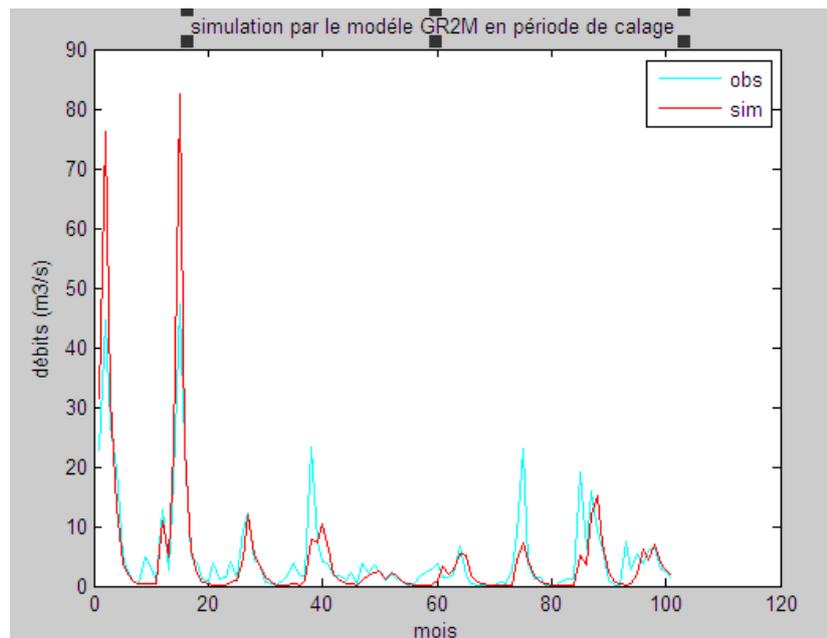
Les résultats obtenus par les modèles GR2M et GR3M en période de calage sont présentés ci-dessous :

**Tableau III-2** : Résultats des modèles conceptuels en période de calage

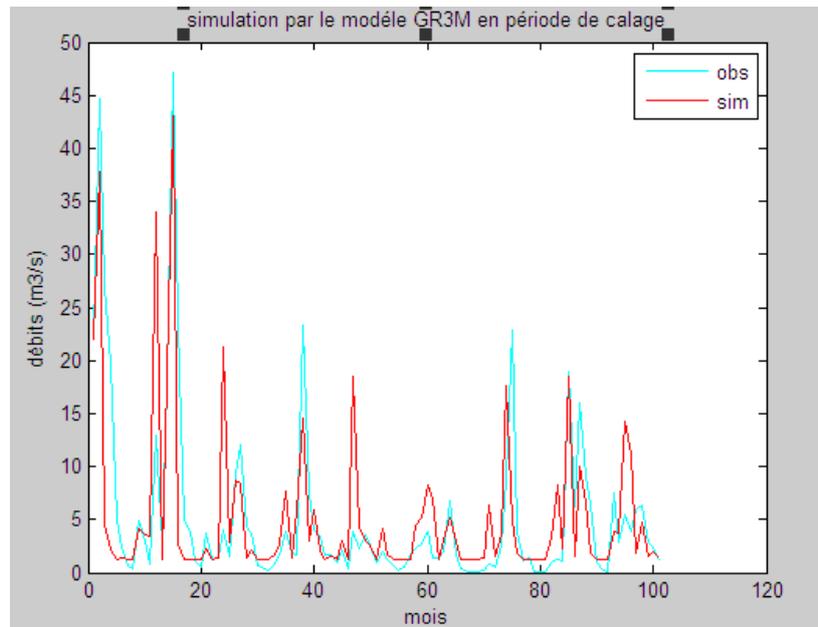
Critères	Nash (%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	R
GR2M (2002)	50,02	4,39	0,74
GR3M (2002)	52,35	4,29	0,89

L'analyse de ces résultats montre que les deux modèles donnent un critère de Nash très insuffisants en période de calage, un RMSE élevé mais un bon coefficient de corrélation surtout pour le modèle GR3M.

Dans le cadre de notre analyse des modèles nous avons introduit un autre critère de performance pour l'acceptation ou le rejet des résultats obtenus, c'est le critère graphique, qui permet de nous renseigner sur la fiabilité des modèles à reproduire fidèlement l'évolution des valeurs simulés par rapport à celles de l'historique.



**Figure III -6** : Simulation des débits par GR2M en période de calage



**Figure III -7** : Simulation des débits par GR3M en période de calage

D'après les figures ci-dessus, nous remarquons que les deux modèles reproduisent correctement l'allure des débits observés avec une sous-estimation des débits extrêmes excepté le début de la représentation du modèle GR2M.

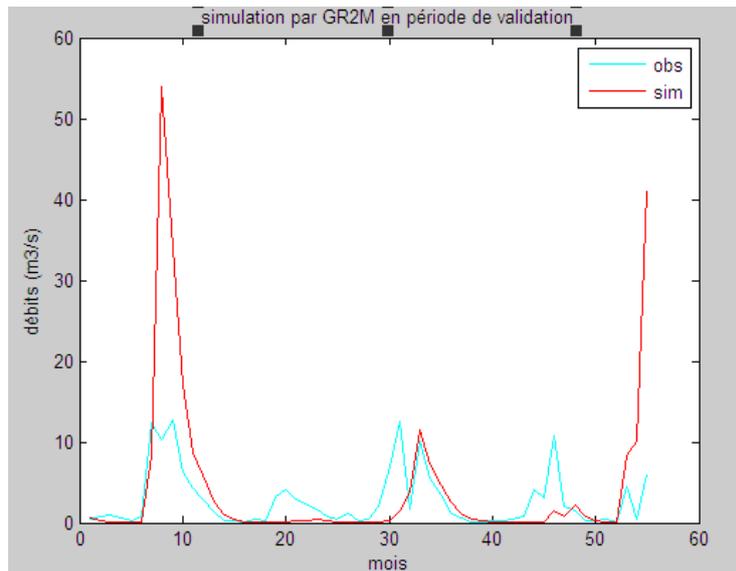
### III-9-2-Résultats de la simulation par les modèles GR2M et GR3M en période de validation

Les résultats des modèles développés GR2M et GR3M appliqués aux données de la station de la Traille en période de validation son résumés dans le tableau suivant :

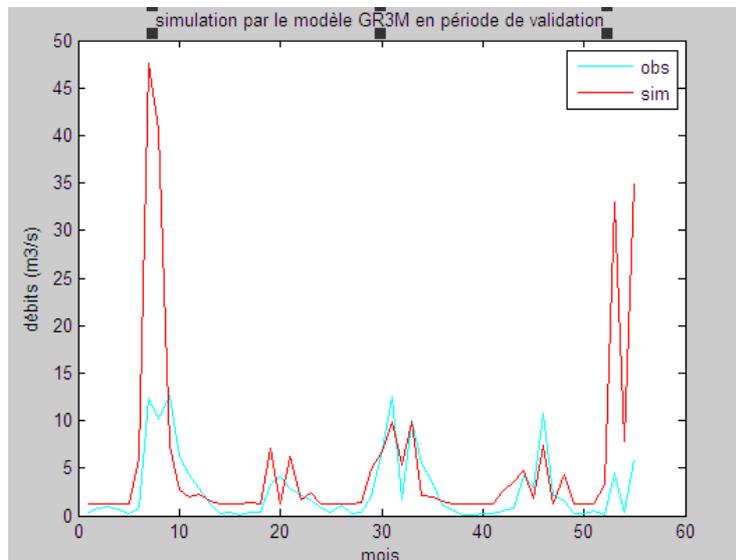
**Tableau III-3** : Résultats des modèles conceptuels en période de validation

Critères	Nash (%)	RMSE ( $m^3/s$ )	R
GR2M (2002)	-521.58	4,84	0,57
GR3M (2002)	-501,33	4,76	0,63

Nous remarquons une baisse significative du niveau de simulation du critère de Nash et ce pour les deux modèles, un RMSE élevé et un coefficient de corrélation très insuffisant pour la période de validation.



**Figure III -8 :** Simulation des débits par GR2M en période de validation



**Figure III-9 :** Simulation des débits par GR3M en période de validation

Il est à noter ici aussi que le critère graphique n'est pas meilleur que les critères numériques en ce sens que les figures obtenues montrent des courbes simulées totalement en décalage par rapport à celles de l'historique et ce pour les deux modèles.

Vu l'étendue de la superficie du bassin versant de Koudiat Acerdoune qui est de 2831 Km<sup>2</sup>, le nombre de stations pluviométriques qui est de deux, est très insuffisant pour couvrir toute cette superficie, d'où la question de la non représentativité de la pluie introduite dans les modèles pluie-débit, et par conséquent la faiblesse des modèles GR2M et GR3M à reproduire une telle problématique.

Pour s'affranchir de cette situation nous avons fait appel à un modèle Neuroflou (ANFIS) pour améliorer nos résultats tout en exploitant ceux obtenus par les modèles et GR3M, en introduisant la pluie, l'ETP et l'humidité du sol dans le nouveau modèle.

Le modèle neuroflou que nous avons utilisé été développé sous Matlab par Dechemi.N

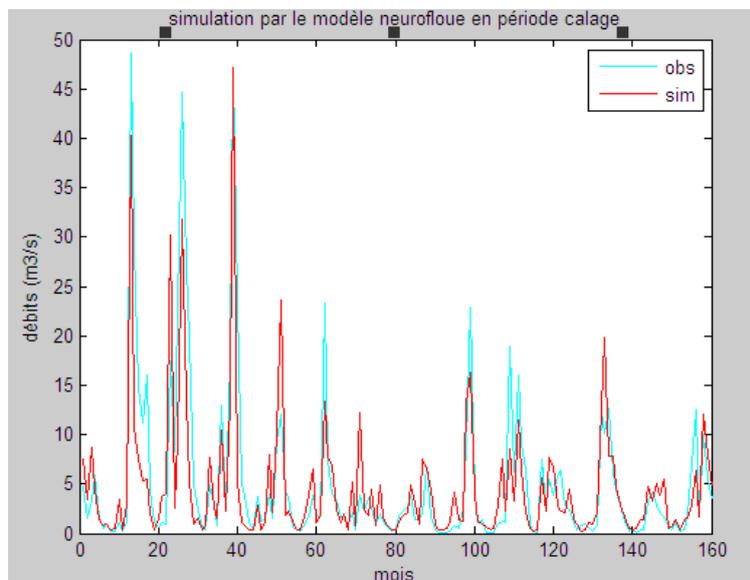
Deux modèles ont été testés : un modèle à deux règles floues et un autre à trois règles floues tout en faisant varier à chaque fois les périodes de calage et de validation.

### III-9-3-Résultats de la simulation par les modèles neuroflous en période de calage

L'application des modèles Neuroflous à 2 et 3 règles aux données de la station de la Traille nous ont permis d'avoir les résultats suivants en période de calage :

**Tableau III-4** : Résultats du modèle neuroflou à deux règles floues en période de calage

Nombre de mois	Nash(%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	R
60	93,41	0,54	0.92
90	84,60	0,74	0.85
120	85,81	0,66	0.85
160	81,00	0,70	0.81



**Figure III-10** Simulation par le modèle neuroflou à deux règles en période de calage

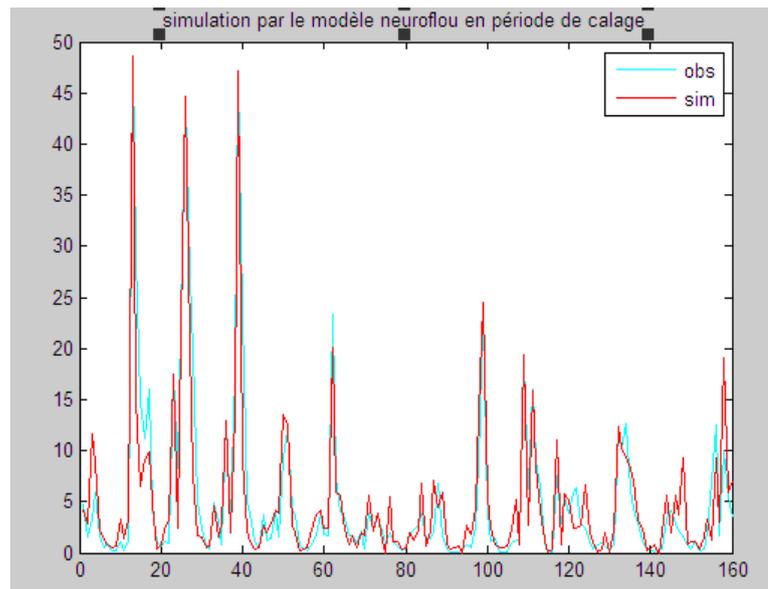
La figure ci-dessus représente les résultats du modèle neurofloue à 2 règles pour une période de calage de 160 mois. Nous remarquons que le modèle de simulation reproduit de façon correcte l'allure des débits observés.

**Tableau III-5 :** Résultats du modèle neuroflou à trois règles floues en période de calage

Nombre de mois	Nash(%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	R
60	97,90	0,29	0.96
90	98,98	0,26	0.98
120	91,66	0,54	0.92
160	86,80	0,59	0.86

D'après les résultats obtenus nous remarquons que tous les critères numériques sont bons, en effet, le critère de Nash est correct voir bon, le RMSE et le coefficient de corrélation sont proches de 1 et ce en période de calage.

Il est à noter que les résultats des modèles sont sensiblement différents en fonction du nombre de règles floues. En effet, tous les critères numériques sont meilleurs pour 3 règles que pour 2 règles floues.



**Figure III-10:** Simulation par le modèle neuroflou à trois règles en période de calage

La figure ci-dessus représente les résultats du modèle neurofloue à 3 règles pour une période de calage de 160 mois. Nous remarquons que le modèle de simulation reproduit de

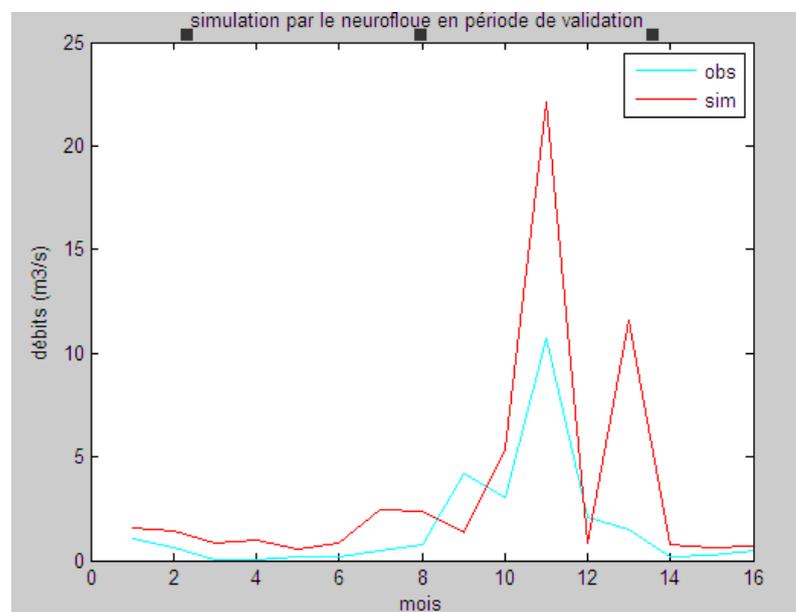
façon correcte l'allure des débits observés, mais n'arrive pas à bien simuler toutes les valeurs maximales durant la période de calage.

#### III-9-4-Résultats de la simulation par les modèles neuroflous en période de validation

Les résultats de l'application des modèles Neuroflous à 2 et 3 règles aux données de la station de la Traille en période de validation dont résumés dans les tableaux suivants :

**Tableau III-6:** Résultats du modèle neuroflou à deux règles floues en période de validation

Nombre de mois	Nash(%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	R
116	-308965,19	1,40	0.00
86	-2822,03	0,84	0.00
56	-3143,66	1,29	0.30
16	-2087,57	0,33	0.07



**Figure III-11 :** Simulation par le modèle neuroflou à deux règles en période de validation

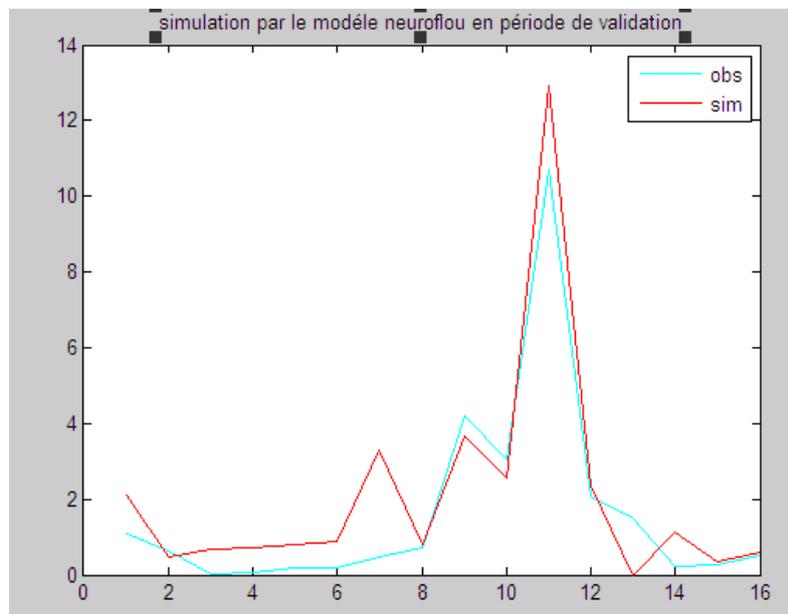
La figure ci-dessus présente la période de validation pour le modèle neuroflou à 2 règles pour une période de validation de 116 mois, nous remarquons que le niveau de simulation se détériore, les débits simulés ne correspondent pas vraiment aux débits observés.

**Tableau III-7:** Résultats du modèle neuroflou à trois règles floues en période de validation

Nombre de mois	Nash(%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	R
116	-16835,38	0,60	0.03
86	-329537,68	1,23	0.01
56	-236727,67	0,59	0.09
16	79,00	0,52	0.86

Nous remarquons que le niveau de simulation se détériore en période de validation pour tout les critères de Nash malgré le changement de la longueur de la période de validation, par contre le RMSE obtenu pour les deux modèles est bon alors que les coefficients de corrélation sont très insuffisants excepté pour le modèle à trois règles floues et pour une période de validation de 16 mois, où l'on note une nette amélioration dans les critères de validation numériques du modèle, avec un Nash de 79%, un RMSE de 0,52 et un coefficient de corrélation de 93%.

Le résultat graphique présenté ci-dessous représente le meilleur modèle neuroflou obtenu en période de validation, le reste des graphes va être présenté dans l'annexe II-1.



**Figure III-11 :** Simulation des débits par le modèle neuroflou à trois règles en période de validation

Nous remarquons que le critère graphique n'est pas aussi bon que les critères numériques, en ce sens qu'il n'arrive pas à reproduire fidèlement les valeurs de l'historique, et l'on note une baisse sensible du niveau de simulation en période de validation.

Pour la suite de ce travail, l'extension de la série de débit liquide va se faire donc par le biais du modèle neuroflou à trois règles.

### **Conclusion**

Pour pouvoir faire l'extension des débits liquides pour la période (1986/2007), nous avons effectué des simulations avec deux approches : les modèles conceptuels (à réservoir) et les modèles boîtes noirs qui sont basés sur les réseaux de neurones artificiels et la logique floue.

En comparant ces deux approches, les résultats obtenus ont montré que le modèle neuroflou est plus performants que les modèles conceptuels, cela a été confirmé par l'analyse des critères de validation numériques et graphique.

## Chapitre IV : Quantification du transport solide

Le suivi de l'évolution quantitative des processus du transport solide et la quantification de l'érosion spécifique se présente comme très utile dans l'aboutissement au succès des interventions d'aménagement dans le bassin versant, pour ce faire nous avons adopté deux méthodes : les modèles de régressions et les formules empiriques...

Dans ce travail nous allons quantifier le transport solide par une modélisation de la relation débit liquide-débit solide et les valeurs obtenues vont être comparées aux résultats des méthodes empiriques.

Le bassin versant de l'étude dispose de deux stations hydrométriques, la station de la Traille et celle de Lakhdaria, les données consistent en des séries de mesure de débits liquides et solides à l'échelle instantanée concomitantes.

Les données de la station de la Traille s'étendent de 1971 à 1985, par contre, pour la station de Lakhdaria nous disposons d'une série de mesure de 1971 jusqu'à 2001.

La station hydrométrique représentative du bassin versant de Koudiat Acerdoune est celle de la Traille, malheureusement la série de mesure de cette station n'est plus mise à jour et ce depuis 1985, c'est pour cela que nous sommes dans l'obligation d'actualiser ces données par une extension des débits solides par le modèle neuroflou, les résultats obtenus par ce modèle seront comparés aux mesures de Lakhdaria pour confirmer la fiabilité du modèle.

### IV-1- Calcul du transport solide en suspension

#### IV-1- 1-Etablissement du rapport Débit liquide-Débit solide et calcul du transport solide mensuel

La démarche que nous avons adoptée pour quantifier le transport solide ainsi que l'érosion spécifique est la suivante :

Nous disposons de deux séries de mesures de 2275 valeurs pour la station de la Traille et de 8649 valeurs pour la station de Lakhdaria comprenant les débits liquides ( $m^3/s$ ), les hauteurs d'eau (H en cm), et les concentrations en matières en suspension (C en g/l).

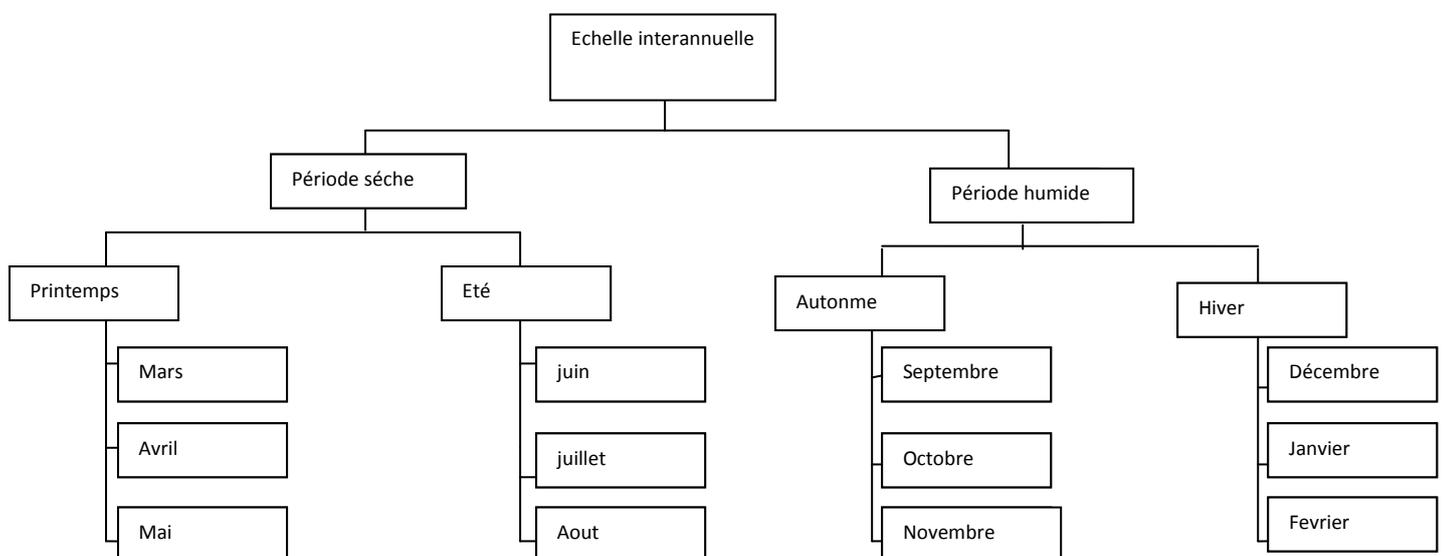
$$\text{Sachant que : } Q_s = Q_l * C_s$$

Cette étape de collecte et de diagnostic des données est importante à effectuer d'autant plus que celles-ci constituent la base de notre approche.

Dans le but de trouver une formulation mathématique au phénomène de transport solide nous avons procédé comme suit :

- Préparation d'un tableau comprenant la date, l'heure, la hauteur d'eau (en cm), le débit liquide (en m<sup>3</sup>/s), la concentration de matière en suspension (en g/l) et le débit solide (en kg/s) de chacun des prélèvements effectués. Ce tableau constitue le fichier global duquel a été extrait un autre fichier rapportant les crues bien observées et bien suivies.
- Les fichiers ainsi préparés ont été soumis à des corrélations ( $Q_{l\ inst}/Q_{s\ inst}$ ) linéaire, logarithmique, polynomiale, puissance et exponentielle à différentes échelles temporelles (mensuelle, saisonnière, saison sèche et humide)
- les relations puissances et polynomiales semblent donner les meilleurs coefficients de corrélation.

Nous allons présenter ci-dessous les différentes échelles temporelles utilisées



**Figure IV-1 : Les différentes échelles temporelles**

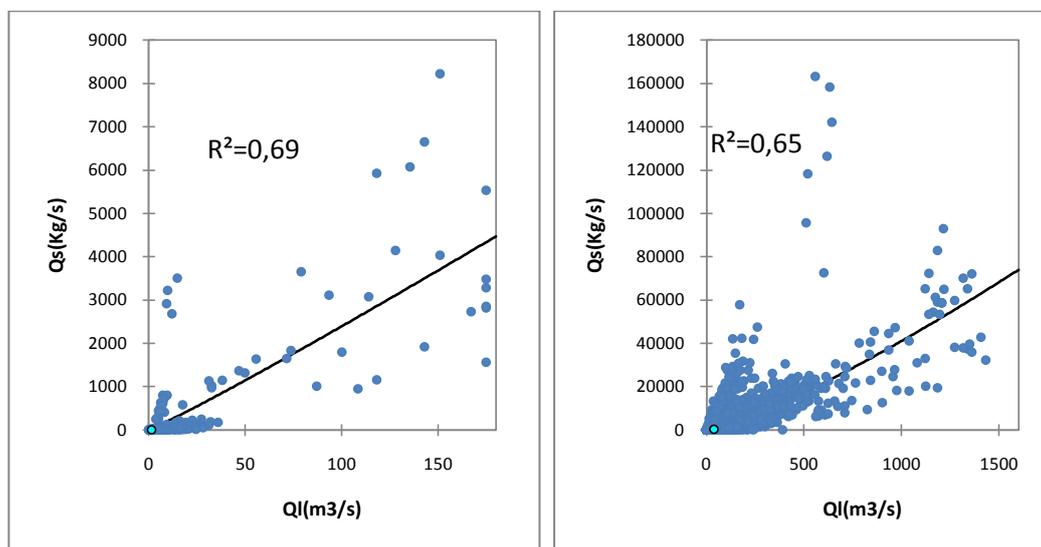
#### IV-1-1-1- Echelle interannuelle

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous sont issus du traitement de toute la série de mesure ( $Q_{l\ inst}/Q_{s\ inst}$ ) des crues bien suivies pour les deux stations :

**Tableau IV-1** : Valeurs des coefficients de détermination calculés à l'échelle interannuelle

Station	R <sup>2</sup>
Lakhdaria	0,65
La Traille	0,69

Le tableau ci-dessus montre que les débits liquides sont bien corrélés avec les débits solides pour toute la série de mesure.



**Figure IV-2** : Représentation de la relation débits liquides- débits solides instantanés à l'échelle interannuelle (a) la Traille (b) Lakhdaria

Nous remarquons que le nuage de point ne s'ajuste pas parfaitement à la droite théorique malgré le bon coefficient de détermination entre les débits liquides et les débits solides.

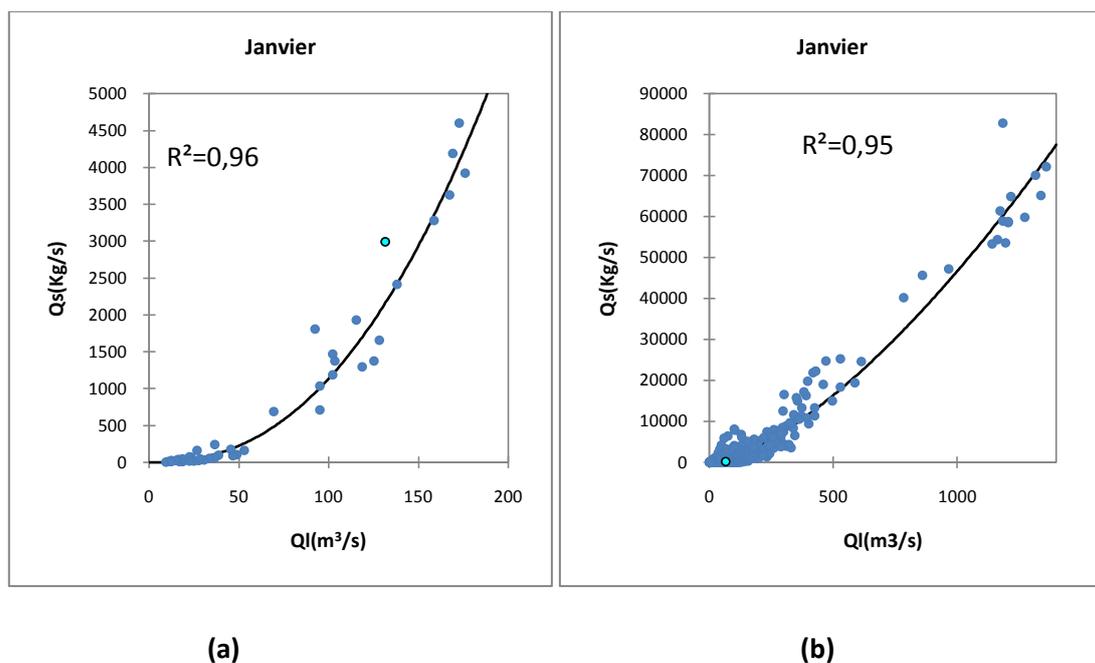
#### IV-1-1-2- Echelle mensuelle

Les données sont traitées par mois. Le choix étant justifié par le souci d'étudier le transport solide à l'échelle mensuelle. A cette échelle, les corrélations obtenues entre les débits liquides et les solides instantanés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV-2** : Valeurs des coefficients de détermination calculés à l'échelle mensuelle

mois	Lakhdaria	La Traille
Septembre	0,91	0,75
Octobre	0,63	0,74
Novembre	0,90	0,92
Décembre	0,85	0,73
Janvier	0,96	0,76
Février	0,81	0,78
Mars	0,88	0,82
Avril	0,73	0,60
Mai	0,64	0,44
Juin	0,40	0,85
Juillet	0,81	0,58
Aout	0,92	0,94

Au niveau mensuel les corrélations sont meilleures car la variation des débits au cours du mois n'est pas importante, nous présentons ci-dessous les graphiques du mois de Janvier pour les deux stations, le reste des graphes des stations de la Traille et de Lakhdaria est donné en annexe I-1-1 et I-2-2 respectivement.

**Figure IV-3** : Représentation de la relation débits liquides-débits solides du mois de Janvier

(a) La traïlle, (b) Lakhdaria

**IV-1-1-3- Echelle saisonnière**

Quatre saisons sont prises en considération, à savoir :

- Automne : Septembre, octobre, novembre.
- Hiver : Décembre, janvier, février.
- Printemps : Mars, avril, mai.
- Eté : Juin, juillet, août.

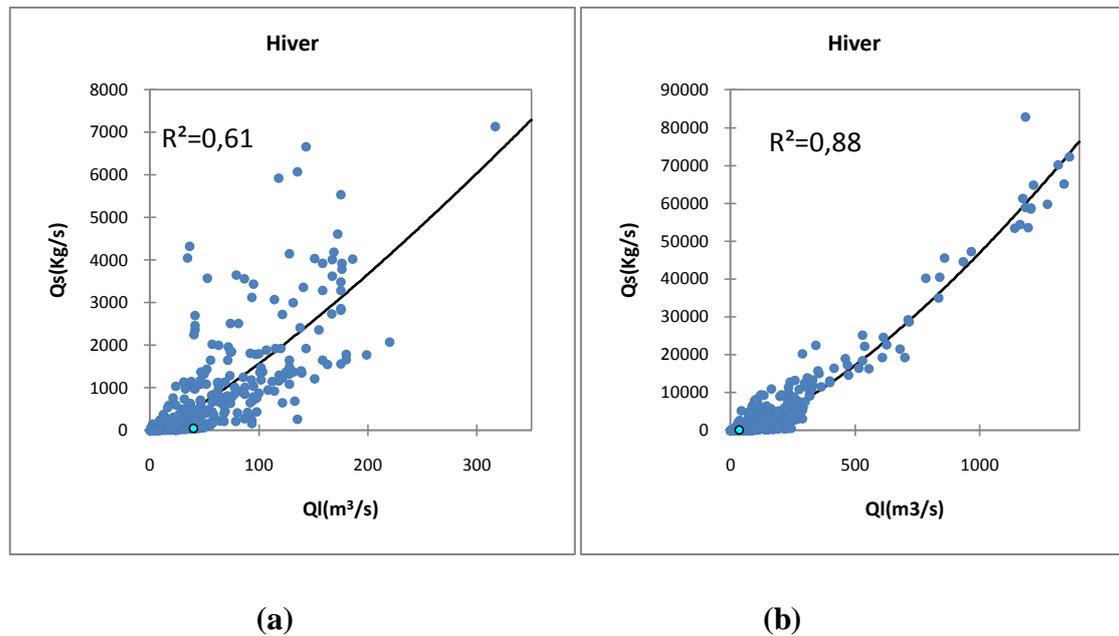
Cette approche permet de montrer l'influence du climat sur le transport solide. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau IV-4** : Valeurs des coefficients de détermination calculés à l'échelle saisonnière

Saison	Lakhdaria	La Traille
Automne	0,61	0,55
Hiver	0,88	0,61
Printemps	0,75	0,66
été	0,64	0,85

Nous avons obtenu de bons coefficients de détermination à l'échelle saisonnière qui dépasse les 55% pour les deux stations, ce qui montre que l'homogénéisation de la saison contribue de manière positive dans la corrélation  $Q_s/Q_l$ .

La figure ci-dessous donne la corrélation  $Q_s/Q_l$  pour la saison hivernale, le reste des graphes est présenté en Annexe I-1-3 pour la station de la Traille et dans I-2-3 pour la station de Lakhdaria.



**Figure IV-4** Représentation de la corrélation de la saison hivernale pour les deux stations

(a) La Traille, (b) Lakhdaria

#### IV-1-1-4- Echelle saisons sèche-humide

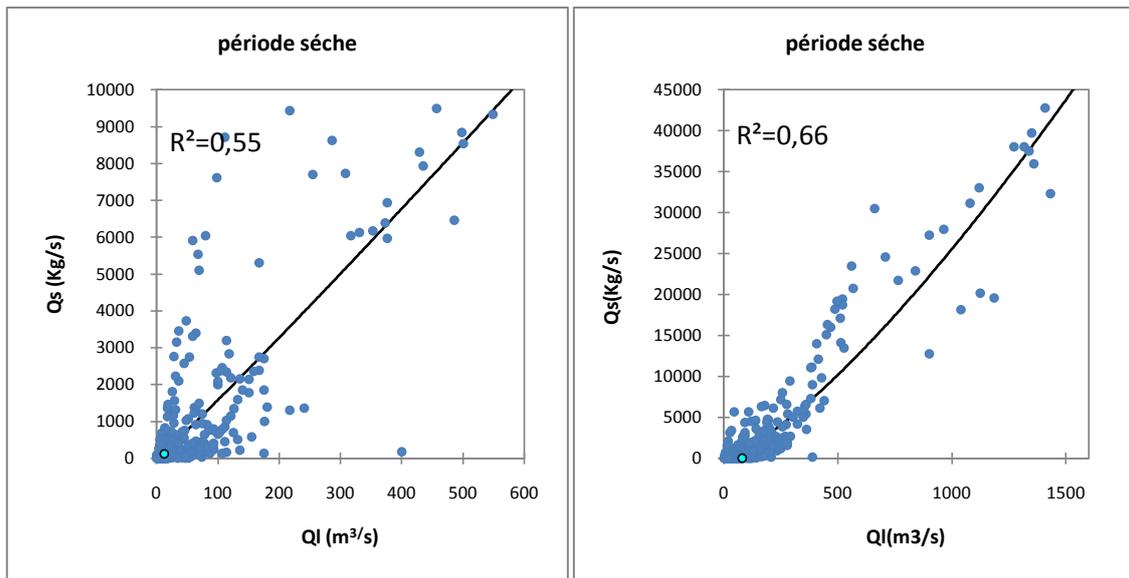
Cette approche permet d'étudier la relation débit liquide-débit solide sur deux saisons : Sèche et Humide. A cet effet, la totalité des observations a été subdivisée en deux parties et, le coefficient de détermination est représenté dans le tableau suivant :

**Tableau IV-5** : Valeurs des coefficients de détermination calculés à l'échelle saisons sèche-humide

	Lakhdaria	La Traille
Sèche	0,66	0,55
Humide	0,64	0,61

Nous remarquons toujours que les coefficients de détermination sont moyens à bon pour les deux stations.

Les graphes correspondant à la période sèche sont représentés ci-dessous, le reste des présentations est donné dans l'annexe I-1-3 et 1-2-3 pour la station de la Traille et celle de Lakhdaria respectivement.



(a)

(b)

**Figure IV-5-** Représentation de la relation débits liquides-les débits solides en période sèche.

(a) la Traille

(b) Lakhdaria

A travers cette étude, nous avons essayé de voir quelle est la relation débit liquide-débit solide et notamment la nature et le degré de cette relation, le but principal étant d'établir les modèles les plus appropriés dans le cadre de l'évaluation du transport solide au niveau du bassin versant étudié.

Les différents résultats obtenus permettront de quantifier les apports solides et de calculer l'érosion spécifique à l'échelle mensuelle.

#### IV-1- 2- Calcul du transport solide et l'estimation de l'érosion spécifique

Nous constatons d'après les résultats obtenus que le modèle puissance s'adapte le mieux à la quantification du transport solide en suspension.

Dans ce travail nous allons quantifier le transport solide en suspension à l'échelle mensuelle, pour ce faire, nous avons introduit les valeurs moyennes des débits liquides mensuels dans le modèle de puissance retenu pour chaque mois

Les débits solides obtenus en Kg/s vont être convertis à des tonnes/mois afin d'avoir une estimation mensuelle du transport solide.

Le transport solide par charriage, va être estimé à 30% du transport solide en suspension.

En prenant en considération le transport solide annuel, l'érosion spécifique moyenne est donnée par l'expression suivante :

$$E_s = \frac{TTS}{S}$$

S : Superficie du bassin versant

TTS : Transport solide annuel.

Les résultats du transport solide total et de l'érosion spécifique pour la Ttraille et Lakhdaria sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV-7** : Apport solide et érosion spécifique pour la station de La Traille (1971-1985)

Année	Transport solide	Erosion spécifique
71/72	1887458,98	866,72
72/73	1764388,74	810,21
73/74	544032,35	249,82
74/75	241902,67	111,08
75/76	658793,81	302,52
76/77	554092,57	254,44
77/78	102849,97	47,23
78/79	141657,94	65,05
79/80	314428,63	144,39
80/81	1293250,92	593,86
81/82	925470,88	424,98
82/83	593535,66	272,55
83/84	272659,25	125,21
84/85	849022,07	389,87

D'après le tableau ci-dessus nous remarquons que la station de la Traille enregistre des valeurs importantes du transport solide pour les années 71/72 et 72/73 elle représente pratiquement 36% du transport solide totale de toute la série de mesure, alors que dans les autres années le transport solide varie entre 0,3 et 12%.

Pour avoir la quantité du transport solide de la période entre 1985 et 2007, nous allons faire une extension de la série de mesures en introduisant les débits liquides correspondant à cette période dans un modèle neuroflou ANFIS.

Le choix du modèle le plus performant a été fait par le biais de plusieurs simulations dans lesquelles les périodes de calages et de validations sont modifiées tout en changeant les règles floues.

### IV-3- Simulation du transport solide par la neurofloue

#### IV-3-1- Simulation à deux règles floues

Les résultats obtenus par le modèle neuroflou à deux règles sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

**Tableau IV-8 :** Simulation avec deux règles floues en période de calage

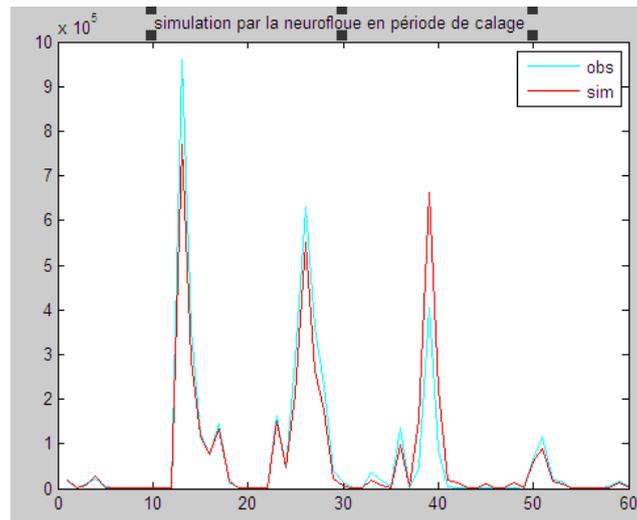
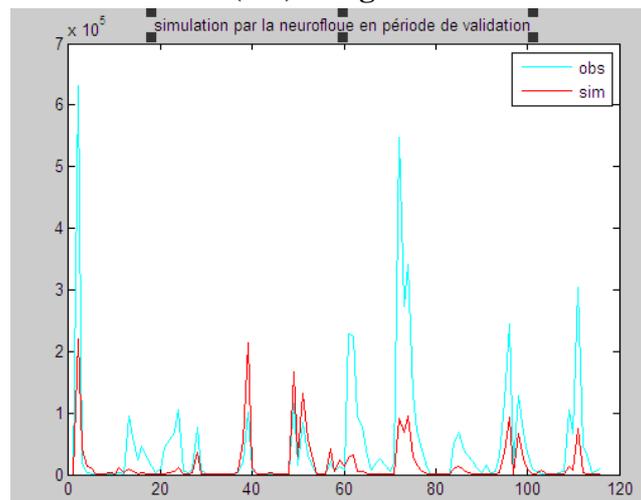
Nombre de mois	Nash(%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	R
60	93,42	2,03	0,97
90	84,30	3,24	0,92
120	84,09	2,89	0,92

**Tableau IV-9 :** Simulation avec deux règles floues en période de validation

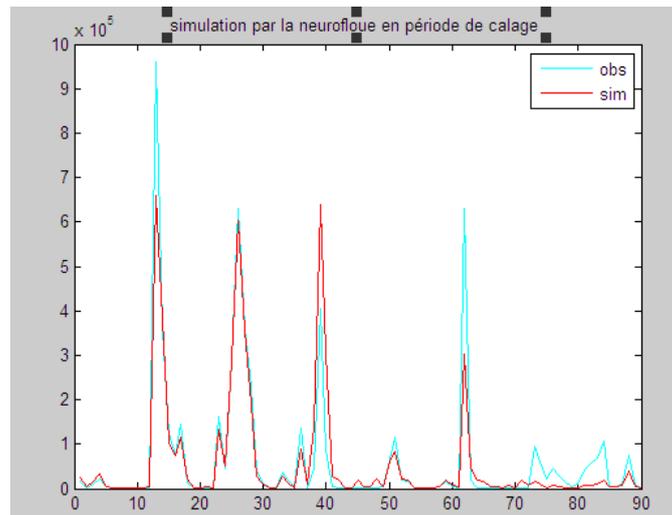
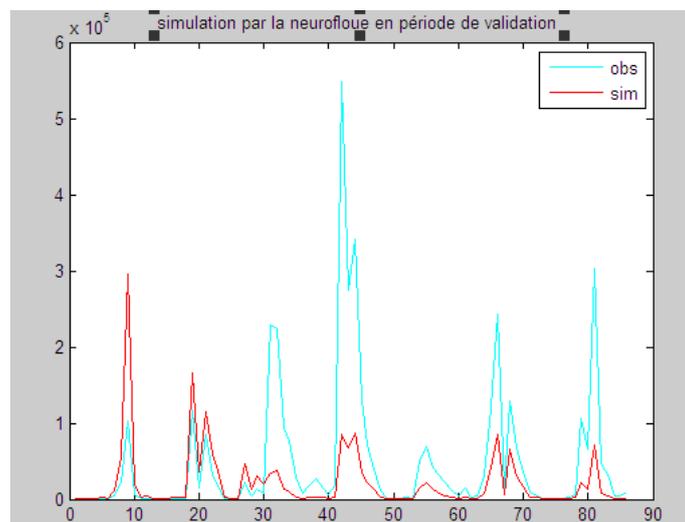
Nombre de mois	Nash(%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	R
116	39,88	4,30	0,78
86	45,62	3,71	0,76
56	23,24	4,80	0,96

D'après ces résultats, nous remarquons que le modèle neuroflou à deux règles a donné des résultats performants en période de calage mais on note une baisse notable du niveau de simulation pendant la période de validation. L'efficient Nash et le coefficient de corrélation sont beaucoup plus élevés en période de calage.

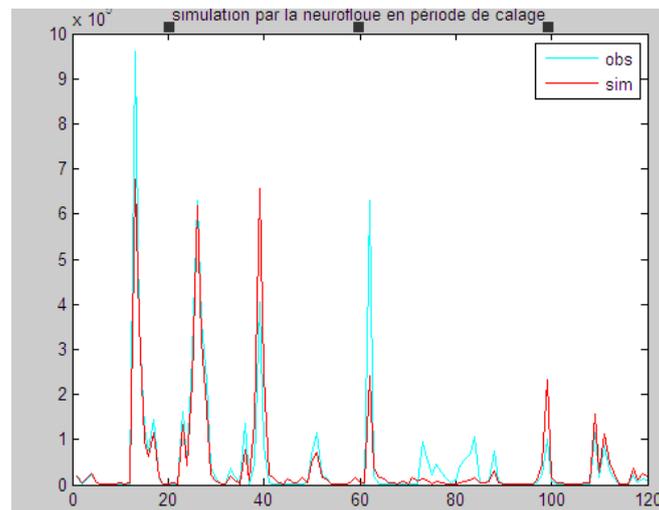
Les représentations graphiques des différents modèles neuroflous à 2 règles sont illustrées ci-dessous :

**(a-1) calage:60****(b-1) validation : 116 mois**

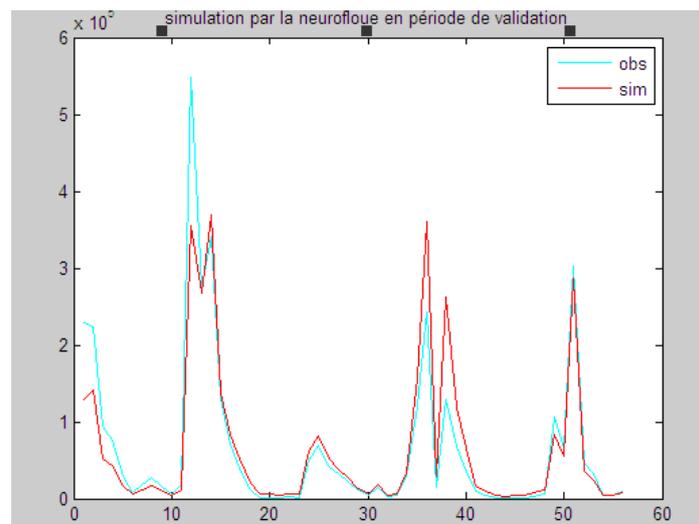
Les figures ci-dessus montrent que les débits simulés reproduisent fidèlement les débits observés en période de calage pour une durée de 60 mois, mais nous notons une baisse notable du niveau de simulation en période de validation.

**(a-2) calage: 90 mois****(b-2) validation: 86 mois**

Pour le modèle neuroflou à 90 mois pour la période de calage, il est à noter que les débits simulés correspondent bien aux débits observés, mais le modèle simulé n'arrive pas à reproduire les extrêmes de façon correcte, mais la simulation en période de calage reste meilleure que celle en validation.



(a-3) calage: 120 mois



(b-3) validation: 56 mois

**Figure IV-7** Simulation du transport solide par la neurofloue à deux règles

(a) calage, (b) validation.

Nous remarquons que le modèle à 120 mois reproduit bien l'allure des débits observés et simulés en calage et en validation mais le problème des extrêmes restent toujours posé.

#### IV-3-2- Simulation à trois règles floues

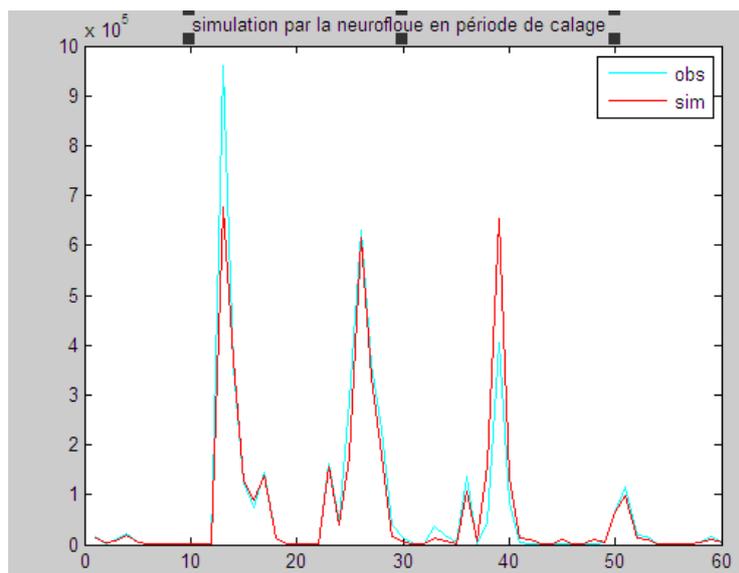
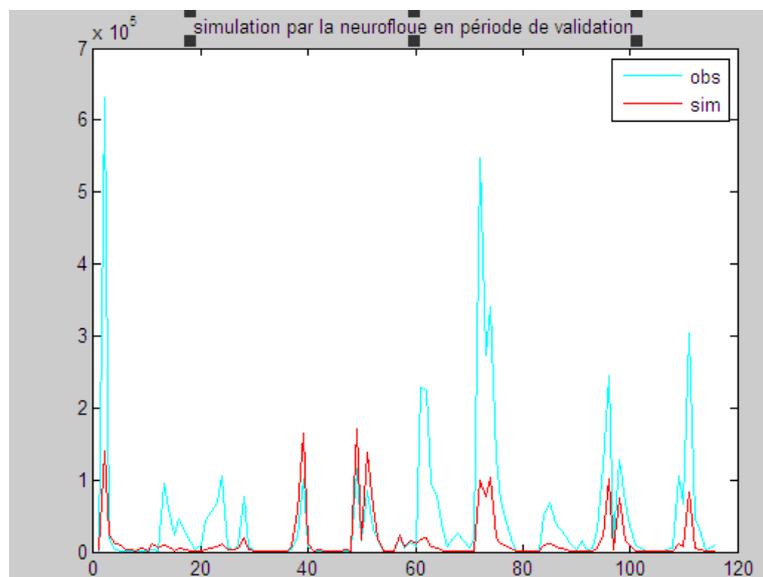
**Tableau IV-10** : Simulation avec trois règles floues en période de calage.

Nombre de mois	Nash(%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	R
60	94,15	1,95	0,97
90	84,89	3,23	0,92
120	84,47	2,90	0,92

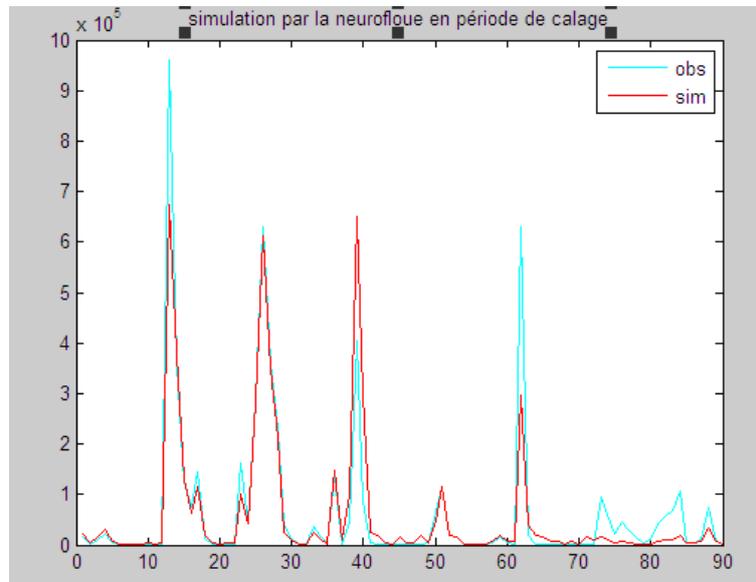
**Tableau IV-11** : Simulation avec trois règles floues en période de validation.

Nombre de mois	Nash(%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	R
116	38,04	4,59	0,78
86	49,58	3,73	0,79
56	25,00	4,80	0,95

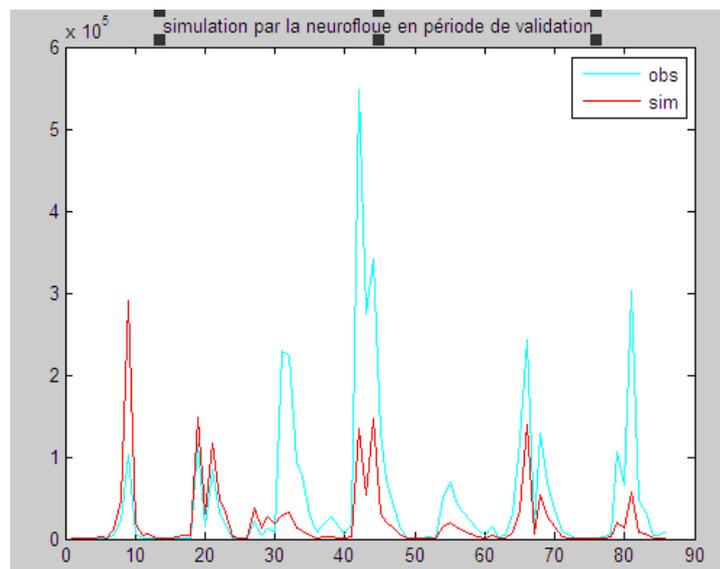
On note une légère amélioration du critère de Nash en période de validation du modèle à 3 règles floues par rapport au modèle à 2 règles floues. Nous constatons aussi que le modèle neuroflou donne de meilleurs résultats en augmentant le nombre de règles.

**(a-4) calage : 60 mois****(b-4) validation : 116 mois**

Les figures ci-dessus représentent la simulation par un modèle avec 3 règles floues à 60 mois pour la période de calage, les résultats obtenus ne diffèrent pas vraiment de ceux du modèle à 2 règles floues pour la même période de calage.

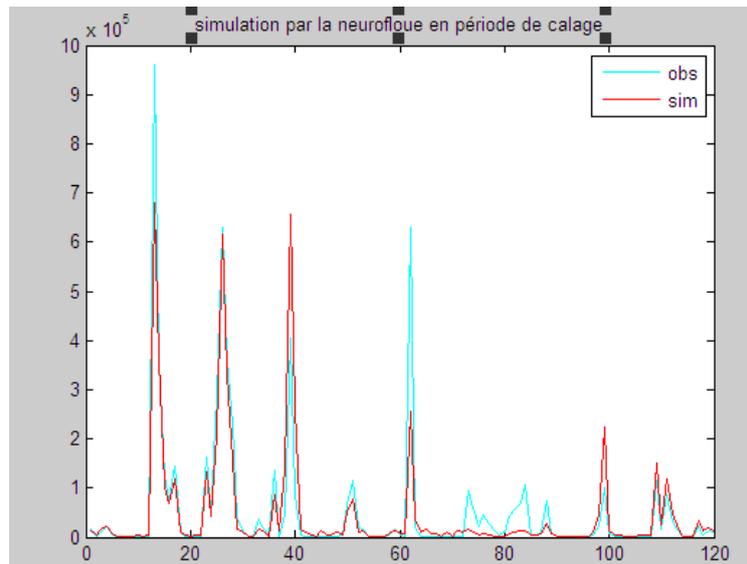


**(a-5) calage : 90 mois**

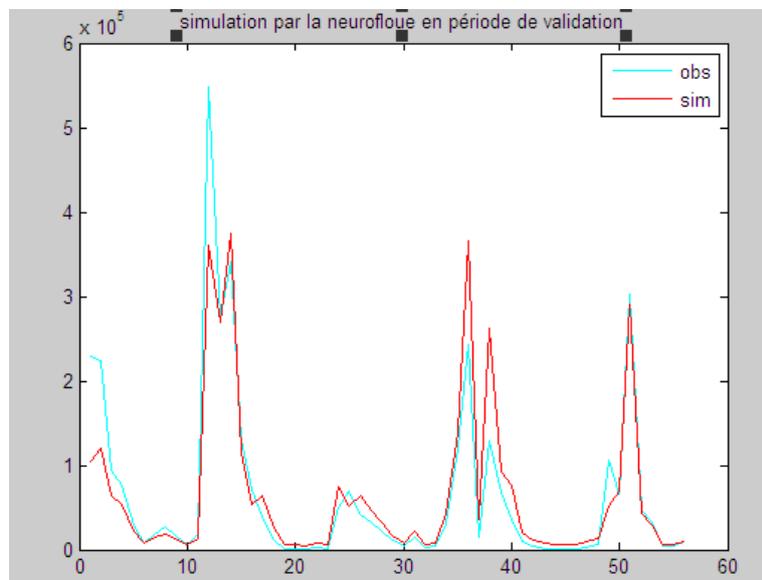


**(b-5) validation : 86 mois**

De même que pour le modèle neuroflou à 2 règles, le modèle neuroflou à 3 règles pour une période de calage de 90 mois simule de manière correcte les débits pendant la période de calage, mais nous remarquons une baisse notable en période de validation.



(a-6) calage : 120 mois



(b-6) validation : 56 mois

**Figure IV-** Simulation du transport solide par la neurofloue à trois règles.

(a)calage, (b) validation.

Le modèle à trois règles floues pour une période de calage de 120 mois reproduit bien l'allure des débits de l'historique en période de calage et de validation mais n'arrive pas à généralement atteindre les débits extrêmes.

D'après les résultats obtenus par le modèle neuroflou que ce soit pour deux règles ou bien pour trois règles floues, nous constatons que le modèle le plus performant est celui qui a la plus grande période de calage. L'extension de la série de mesures des débits solides va se

faire par ce dernier en introduisant les débits liquides obtenus dans le chapitre précédent dans l'un des modèles neuroflou ANFIS retenu.

Les résultats du transport solide obtenu par le modèle neuroflou sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV-12 :** Apports solides et érosion spécifique pour la station de La Traille (1986-2007)

<b>Année</b>	<b>Transport solide</b>	<b>Erosion spécifique</b>
85/86	895344,15	316,26
86/87	2088412,56	737,69
87/88	429839,56	151,83
88/89	206914,93	73,09
89/90	565862,55	199,88
90/91	780439,54	275,68
91/92	820604,47	289,86
92/93	275412,68	97,28
93/94	906989,90	320,38
94/95	4190665,29	1480,28
95/96	1394980,16	492,75
96/97	134140,83	47,38
97/98	1139027,72	402,34
98/99	638775,92	225,64
99/00	755907,99	267,01
00/01	892838,59	315,38
01/02	190750,60	67,38
02/03	1434497,06	506,71
03/04	2731609,89	964,89
04/05	1691590,27	597,52
05/06	795313,16	280,93
06/07	2305020,18	814,21

Le transport solide total moyen et l'érosion spécifique moyenne de la période (1971/2007) sont présentés dans le tableau ci-dessous :

<b>TTS moy (t)</b>	958591,25
<b>Es (t/Km<sup>2</sup>.an)</b>	338,61

Les résultats obtenus pour la station de Lakhdaria sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV-6** : Apports solides et érosion spécifique pour la station de Lakhdaria

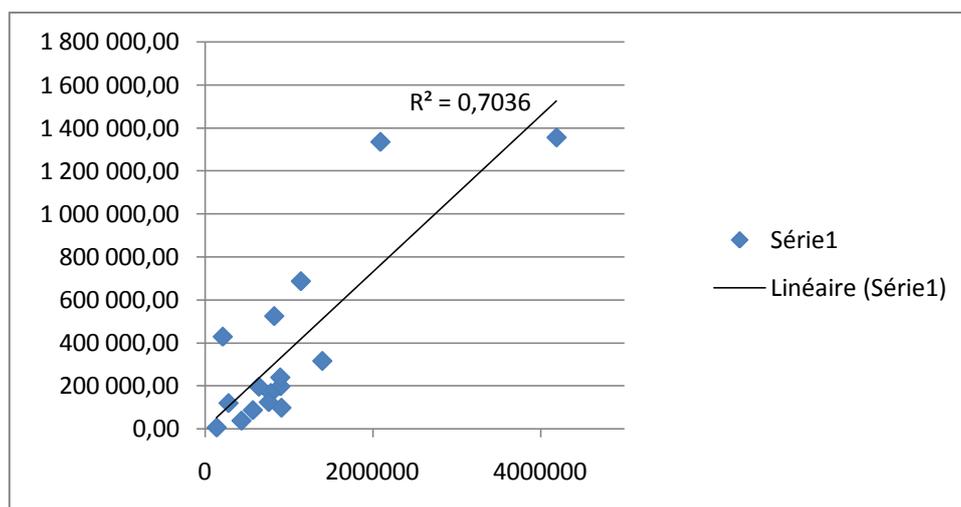
Année	Transport solide	Erosion spécifique
71/72	4 501 333,13	1245,18
72/73	4 894 289,62	1353,88
73/74	2 632 563,03	728,23
74/75	292 744,11	80,98
75/76	1 295 145,88	358,27
76/77	280 667,76	77,64
77/78	173 013,15	47,86
78/79	588 038,33	162,67
79/80	1 165 676,88	322,46
80/81	1 417 698,74	392,17
81/82	294 814,84	81,55
82/83	843 019,40	233,20
83/84	111 220,54	30,77
84/85	613 555,80	169,72
85/86	197 194,95	54,55
86/87	1 334 482,72	369,15
87/88	37 456,01	10,36
88/89	428 299,83	118,48
89/90	86 426,99	23,91
90/91	165 920,95	45,90
91/92	523 944,25	144,94
92/93	119 098,17	32,95
93/94	97 647,88	27,01
94/95	1 355 206,07	374,88
95/96	315 421,14	87,25
96/97	5 751,86	1,59
97/98	686451,15	193,32
98/99	195146,85	54,96
99/00	123581,53	34,80
00/01	238687,22	67,22

Le transport solide total moyen et l'érosion spécifique moyenne pour la station Lakhdaria sont présentés dans le tableau ci-dessous :

<b>TTS moy (t)</b>	914 255,08
<b>Es (t/Km<sup>2</sup>.an)</b>	252,90

#### IV-4- Comparaison entre les deux stations

Nous allons comparer le transport solide mensuel entre la station de la Traille et celle de Lakhdaria pour la période commune entre les deux stations qui s'étend de 1971 à 2001.



**Figure IV-8 :** Représentation de la corrélation entre le transport solide des deux stations étudiées.

On remarque une bonne corrélation entre le transport solide des deux stations, en effet le coefficient de détermination est de 0,70 ce qui confirme la performance du modèle neuroflou avec lequel nous avons fait l'extension du transport solide.

#### IV-5- L'estimation du taux d'envasement avec les différentes formules

On peut estimer la charge sédimentaire avec les différentes méthodes empiriques que nous avons présentées dans le chapitre I, les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux ci-dessous :

##### IV-5-1- Formule de Fournier (1960)

Pm (mm)	Pan (mm)	h(mm)	S (Km <sup>2</sup> )	Es ( t/Km <sup>2</sup> .an)
69	450	646	2831	143,25

##### IV-5- 2- Formule de Tixeront (1960)

T (°C)	L (mm)	Dm (mm)	Le (mm)	Es (t/Km <sup>2</sup> /an)
17	739.45	27.15	422.85	867

##### IV-5-3- Formule de Grailovic

t (°C)	P <sub>an</sub> (mm)	Z	P <sub>r</sub> (Km)	H(Km)	L(Km)	Es (m <sup>3</sup> .Km <sup>2</sup> /an)
17	450	0,85	332	0,93	171	726,56

##### IV-5-4-Formule de Touaibia et Achite (2003)

C	Ce	Dd (Km <sup>-1</sup> )	Es (t/Km <sup>2</sup> .an)
0,07	0,16	2,97	1756

**IV-5-5- Formule de Demmak (1982)**

<b>IL</b>	<b>AR (mm)</b>	<b>TSS (T/Km2.an)</b>
0,34	55,73	1043,11

**IV-6- Comparaison des résultats pour les différentes méthodes**

<b>Fournier</b>	<b>Tixeront</b>	<b>Gravilovic</b>	<b>Touibia et Achitte</b>	<b>Demmak</b>	<b>Es calculé</b>
143,25	867	726,56	1756	1043,11	338,61

En comparant les valeurs de l'érosion spécifique obtenues par les différentes méthodes empiriques à la valeur calculée à partir des données recueillies, nous remarquons que ces formules empiriques surestiment l'érosion spécifique, excepté la formule de Fournier.

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons quantifié le transport solide ainsi que l'érosion spécifique du bassin versant de Koudiat Acerdoune, nous remarquons le taux élevé de la dégradation spécifique de ce bassin ce qui nous conduit à proposer des aménagements antiérosifs pour le protéger, cela va être établi dans le chapitre suivant.

## Chapitre V : Aménagement intégré du bassin versant

Le couvert végétal, la pente, les techniques culturales anti-érosives et l'agressivité des pluies sont les facteurs majeurs qui régissent l'érosion accélérée des sols cultivés (Roose, 1973-81).

Cependant depuis longtemps agronomes, pédologues et géographes ont reconnu que les propriétés intrinsèques des sols peuvent modifier l'intensité des phénomènes d'érosion. Certaines de ces propriétés sont assez stables (texture) mais d'autres évoluent rapidement au cours de la mise en valeur des terres comme leur mode d'agrégation (stabilité structurale, croûte de battance, état dispersé, matière organique, cations échangeables, agents dispersants ou flocculants, ciments organiques, calcaires) et leurs propriétés hydrauliques (battance et dynamique de l'infiltration, l'humidité du sol et sa compacité, etc.) (Quantin et Combeau, 1962).

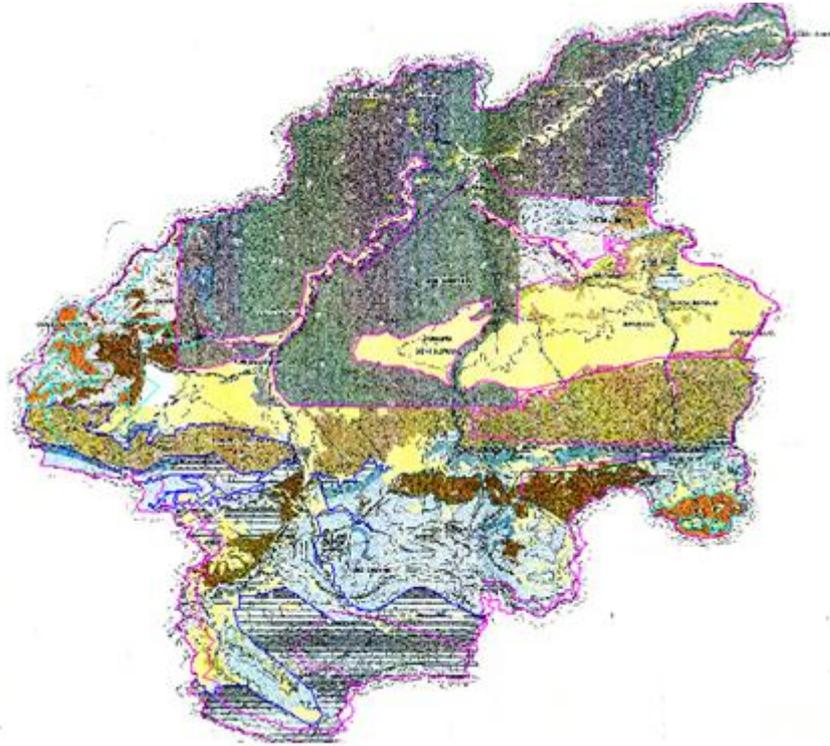
Or, la pression démographique entraîne inexorablement l'extension des cultures à des terres neuves de plus en plus fragiles. Il est donc urgent de mettre au point une méthode à la fois rapide et précise pour prévoir la sensibilité des sols à différents types d'érosion, l'érodibilité des sols, leur évolution sous culture et les aménagements anti-érosifs à mettre en oeuvre. Bennet (1926).

### V-1- Caractéristiques du bassin versant

Dans le but de proposer des aménagements antiérosifs pour le bassin versant, nous allons d'abord définir les différentes caractéristiques géologiques, topographiques....

#### V-1-1 Synthèse géologique du bassin versant

Les caractéristiques géologiques du bassin versant sont présentées dans le tableau ci-dessous :



**Figure V-1** : Carte géologique

-  Dépôt meuble à texture moyenne
-  Dépôt meuble à texture modérément meuble
-  Dépôt meuble à texture grossière
-  Calcaire
-  Marno-calcaire
-  Marne
-  Formation marno-graiseuse
-  Roches sédimentaire indifférencies
-  Flysh et molasse

**Tableau V-1** : Synthèse géologique du bassin du bassin versant

	Type de la roche	Superficie (km <sup>2</sup> )	Pourcentage (%)
Dépôt meuble	dépôt meuble/texture moyenne	305.62	10.72
	dépôt meuble/texture modérément meuble	249.54	8.75
	dépôt meuble/texture grossière	12.51	0.44
Roche sédimentaire	Indéterminées	918.49	32.21
	Flysh	349.61	12.26
	Calcaire	27.29	0.96
	Marne	347.63	12.19
	Formation marno-calcaire	86.37	3.03
	Formation calcaire/calcaire marneux	36.21	1.27
	Formation marno-gréseuse	222.19	7.79

### V-1-2- Pédologie du bassin versant

L'étude des sols vise la connaissance précise des couvertures pédologiques afin de différencier les sols à protéger de ceux à mettre en valeur.

Un aménagement intégré a été fait dans la région El Oumaria- Béni Slimane, quatre types de sols ont été relevés :

**Minéraux bruts** : ce sont des roches mères gréseuses ; ils se retrouvent dans la partie centrale du bassin versant.

**Sols évolués (Entisols)** : ce sont des sols d'érosion, portant une végétation naturelle de type maquis très dégradé. On les rencontre sur des versants à forte pente (35%).

Au niveau des plaines, les alluvions récentes sont essentiellement limoneuses à argileuses.

Une partie de celle-ci est sableuse. Ces alluvions se subdivisent en deux sous unités ; la première aurait puisé sa matière des marnes ; ce qui donne, dans la plupart des cas, des sols lourds avec un pourcentage relativement élevé en argile ; sols peu évolués, lourds, à caractère vertique, vertisols...etc. ayant gardés la couleur d'origine. La deuxième est formée de matière sableuse légère à couleurs variables.

Les alluvions actuelles sont exclusivement limoneuses à sableuses. Cependant, elles sont parfois très argileuses ; après une crue, elles constituent une boue, glissante et collante, semblable à un marécage.

Les alluvions anciennes, formées de poudingues composés de galets roulés, cimentés par une matrice argileuse rouge. Ils sont partout recouverts d'éléments caillouteux, graveleux et limoneux. Cette couche superficielle, souvent associée à des marnes, donne des sols très compacts difficiles à travailler (sols argilo-sableux).

**Sols Calcimagnésiques – isohumiques** : issus le plus souvent des marnes calcaires, ils occupent la superficie la plus grande du bassin versant, on les rencontre sur les versants à une forte pente (35%) sous forêt dégradée de chêne, sous vigne ou sous cultures céréalières lorsque la pente le permet. La charge caillouteuse importante, résultant de l'érosion et des éboulements leur confère des aptitudes forestières. Ils sont assez profonds, de texture variée et de structure développée. L'horizon de surface de couleur claire est assez épais et est moyennement riche en matière organique (1.5%).

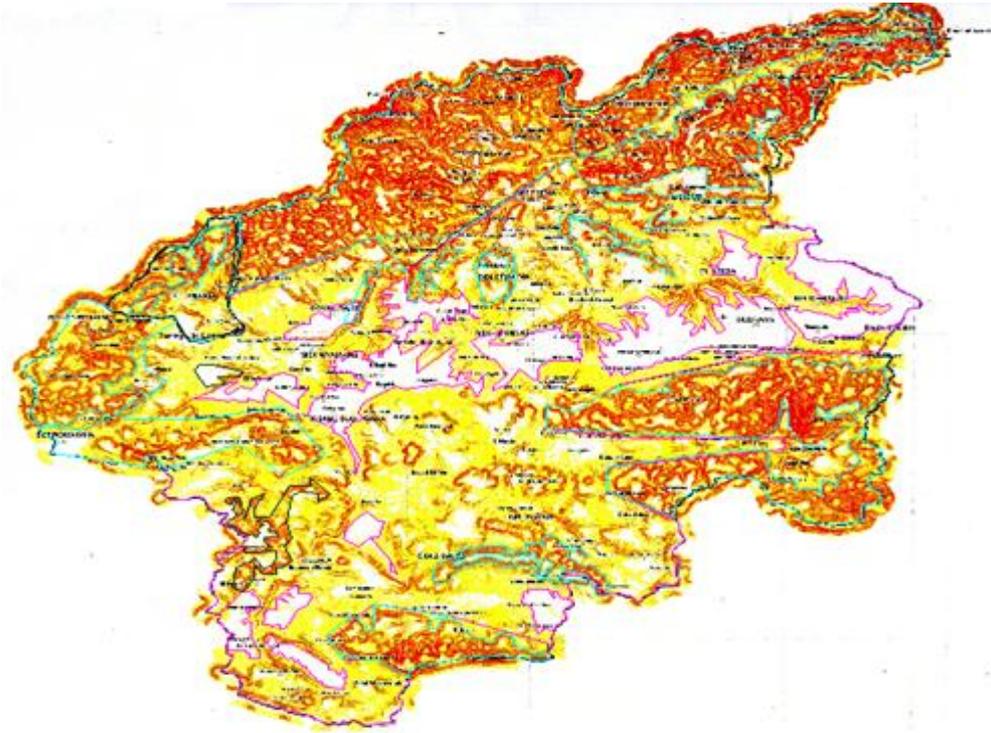
**Sols Isohumiques brunifiés** : ils se rencontrent essentiellement sur grés calcaires et grés ferrugineux avec une pente moyenne de 5 – 20%. Ils occupent une superficie d'environ 900 ha et sont utilisés pour les cultures céréalières. Ce sont des sols profonds, de structure développée et à texture équilibrée.

### V-1-3- Topographie

Les caractéristiques topographiques du bassin versant sont présentées ci-dessous :

- **La pente**

La topographie se révèle irrégulière avec des pentes allant de 0 à des valeurs dépassant les 35% ; le tableau ci-dessous montre les superficies correspondant aux différentes classes des pentes.



**Figure V-2 : Classe de pente**

Légende

Classe de pentes (%)

	> 35
	3 à 10
	10 à 15
	15 à 35
	0 à 3

La figure ci-dessus présente la carte des différentes classes de pente, afin de déterminer le pourcentage de chaque classe, nous avons délimité les différentes surfaces par le logiciel Autocad. Les résultats obtenus sont tabulés ci-dessous :

**Tableau V-2 : Le pourcentage des classes de pente.**

Classe (%)	Superficie (Km <sup>2</sup> )	%
0 - 3	283,00	10
3 - 10	849,30	30
10 - 15	736,06	26
15 - 30	339,72	12
Plus de 35	662,82	22

- **L'altitude**

Les cotes de la zone sont comprises entre 90 et 1810 m, l'altitude moyenne est de 750 m.

#### **V-1-4 Occupation de la population active**

Les occupations dans les secteurs autres que les secteurs les plus importants (agriculture, industrie) représentent la partie la plus importante de la population occupée.

**Tableau V-3 : Occupation de la population active**

Wilaya	Ensemble géographique	Occupation (%)			
		agriculture	industrie	BTP	Autre
Médéa	Atlas	34.06	1.59	6.97	57.37
	Haut piémont de l'Atlas	25.18	4.66	9.96	60.18
	Plaine de Béni Slimane	28.02	5.22	8.41	58.34
	Plateau	22.56	5.63	8.18	63.62
	Titteri	19.34	6.88	10.49	63.30
Bouira	Plateau	21.53	4.95	8.11	65.40
	Titteri	24.82	2.08	7.44	65.64
	Atlas	18.49	4.22	9.78	65.43

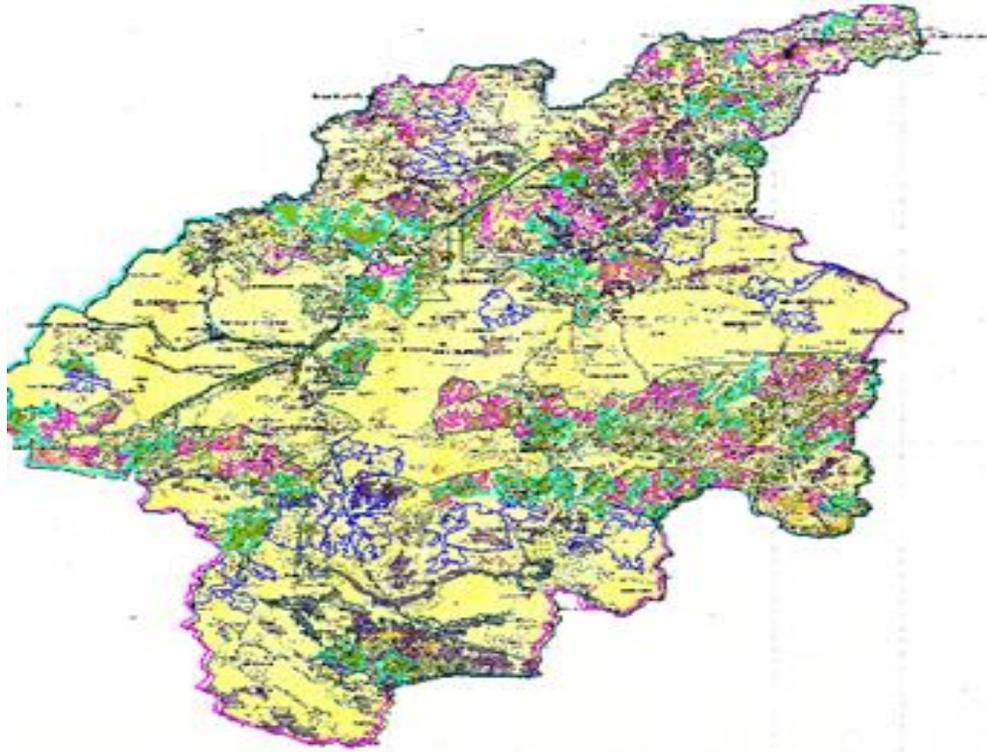
L'agriculture se distingue cependant par un taux moyen relativement appréciable de 17.35% par rapport à d'autres régions du Nord de l'Algérie.

Il est par ailleurs remarquable que les communes du bassin versant du barrage de Koudiat Acerdoune ont, pour leur grande majorité, connu une baisse de l'activité agricole au sein de la population occupée.

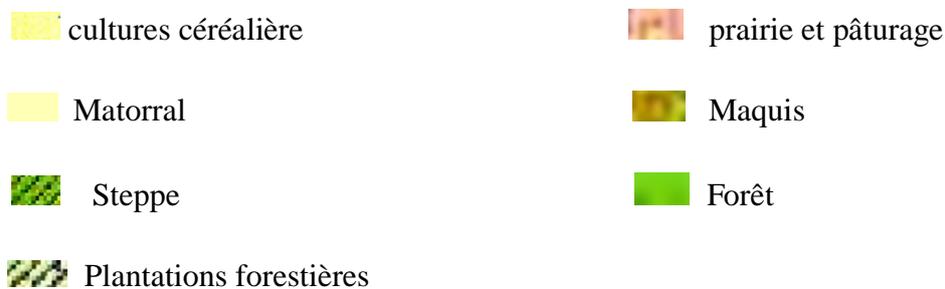
#### **V-1-7- La végétation naturelle**

La flore de cette région se distingue par sa faible densité et surtout par une dégradation plus ou moins avancée, l'absence du couvert végétale empêche les eaux de pluie de s'infiltrer en grande partie et provoque sur les pentes humides un ruissellement intense aboutissant à la formation de ravines dénuant les roches d'où l'intérêt de la lutte contre l'érosion.

Nous présentons ci-dessous la carte du couvert végétal du bassin versant de Koudiat Acerdoune ou nous avons délimité les surfaces occupées par les différentes cultures via Autocad.



**Figure V-3 :** Carte du couvert végétal



Les résultats obtenu sont résumés ce dessous :

**Tableau V-4 :** Le couvert végétal.

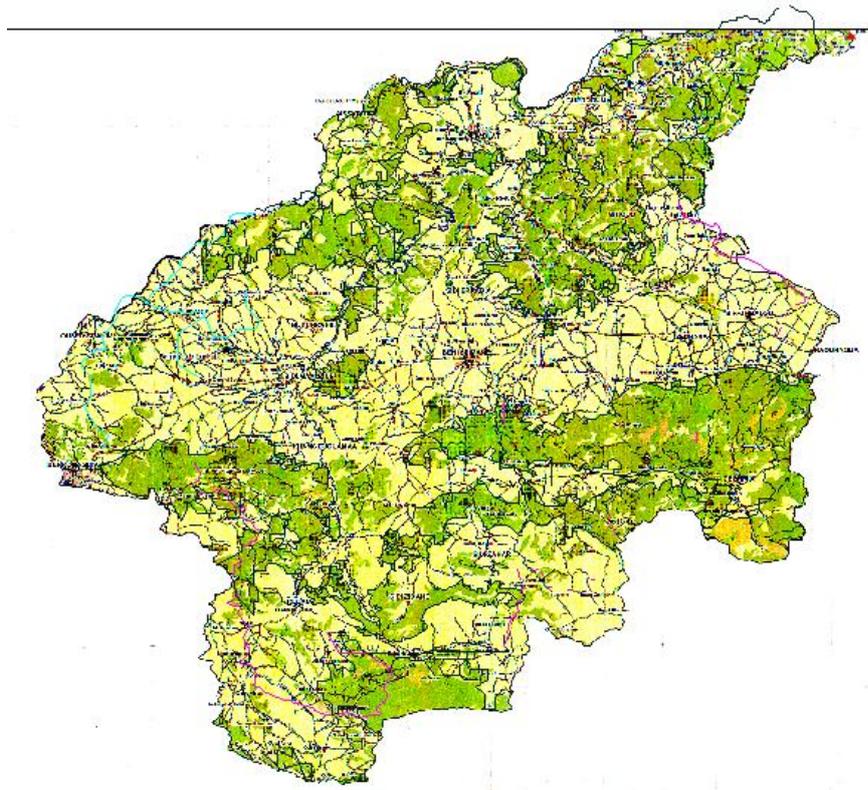
Couvert végétal	Km <sup>2</sup>	Bassin
Grande culture céréalières	1551	40,69%
steppe	132	4,67%
maquis	93,19	3,29
matorral	148,98	5,26%
forêt	1273,40	4,5%
Plantation forestières	62,28	2,2%
Prairie et pâturage	14,15	0,5

Nous remarquons que les cultures céréalières occupent la plus grande superficie qui est de plus de 40% de la surface du bassin versant.

### V-1-5- Occupation du sol

La zone d'étude comprend :

- Des chaînes de montagnes et de collines à l'Est et à l'Ouest couvertes de forêts et de maquis.
- Des vastes terres agricoles situées essentiellement dans les vallées des Oueds el Melab et Maleh.



### Légende

-  Zone urbaine
-  Pâturage naturel et anthropique.
-  Milieu naturel (steppe, maquis, matorral et forêt)
-  Agriculture.

**Tableau V-5 : Type d'occupation du sol**

Type d'occupation du sol	Superficie (km <sup>2</sup> )	(%)
Milieu naturel	1072.9	37.8
Zone agricole	1713.3	60.5
Urbain	21.4	0.8
Pâturage	22.7	0.8

Le tableau ci-dessus présente les superficies des différentes occupations du sol pour le bassin versant. En analysant ces données, il ressort que les activités agricoles dominent avec 60.5% suivi par le milieu naturel avec 37.8%. Les agglomérations de Berrouaghia, Beni Slimane, Sidi Maamane, Tablat, El Azizia et Sedraya sont desservis par les routes principales bitumées.

#### V-1-6- Climat

Le bassin versant de l'étude se situe dans une zone semi aride, pour cela le caprice du climat a une grande influence sur les différentes cultures implantées.

- **L'humidité**

Les tableaux ci-dessous présentent les humidités maximales, moyenne, minimale respectivement :

- **Humidité maximale**

**Tableau V-6 : L'humidité maximale mensuelle**

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
<b>H</b>	97,2	97,4	95,2	94,1	91,1	81,1	76,1	79,8	89,4	93,1	94,9	96,9

Source : ONM, 2011

- **Humidité moyenne**

**Tableau V-7 : L'humidité moyenne mensuelle**

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
<b>H</b>	84,4	82,6	74,2	71,4	67,8	55,9	51	54	65,6	70,7	70,7	83,8

Source : ONM, 2011

- **Humidité minimale**

**Tableau V-8 : L'humidité minimale mensuelle**

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
<b>H</b>	62	56,4	46,5	44,5	41	30,1	26,9	26,3	37,2	43,6	52,1	62,3

Source : ONM, 2011

- **Vitesse du vent**

Les vents provoquent une évapotranspiration excessive qui a pour conséquence un épuisement des réserves d'eau du sol par la plante

Le tableau ci-dessous présente les vitesses des vents mensuels

**Tableau V-9 : La vitesse du vent mensuelle**

mois	Jan	Fev	Mar	avr	Mai	jui	juill	aout	sept	oct	nov	Dec
V(m/s)	2,55	2,58	2,47	3,05	2,79	2,82	2,72	2,55	2,32	2,04	2,38	2,55

Source : ONM, 2011

Le tableau ci-dessus présente la variation mensuelle de la vitesse du vent, la connaissance de tel paramètre a une grande importance pour la mise en valeur des terres car elle permet l'implantation correcte de brise vent protégeant les cultures des vents dangereux.

- **Température**

Les températures élevées affectent la croissance de certaine plantes, pour cela le contrôle de celles-ci joue un rôle important pour le choix des cultures le mieux adaptées.

**Tableau V-10: La température mensuelle**

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
T°C	8,88	9,58	12,26	14,11	18,88	24,42	25,1	28,7	23,5	19,3	12,0	10,2

Source : ONM, 2011

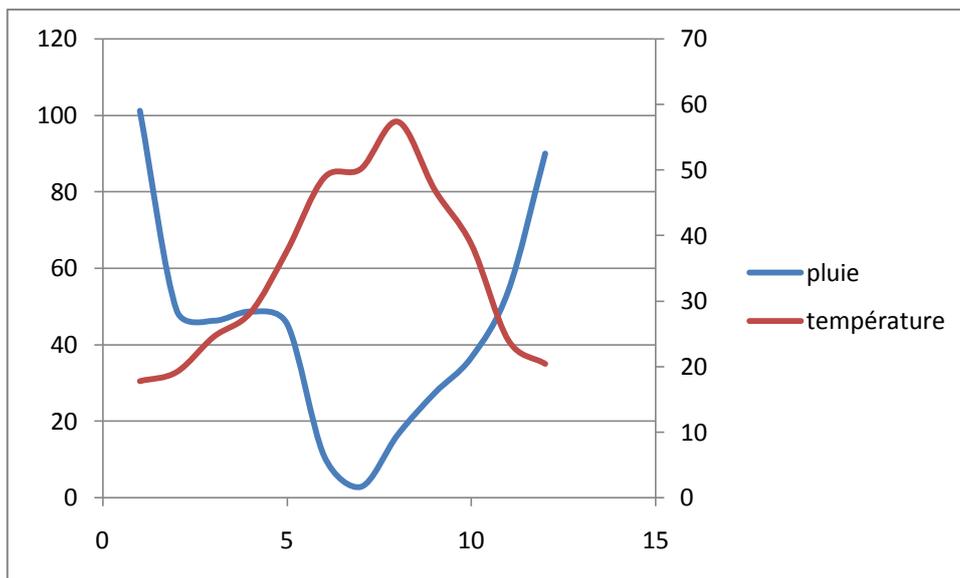
- **Pluviométrie**

La pluviométrie élevée peut avoir un effet néfaste sur certains cultures pour cela nous présentons dans le tableau ci-dessous les pluies mensuelles afin de choisir les culture les mieux adaptés.

**Tableau V-11 : La pluviométrie mensuelle**

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
P(mm)	101,27	48,99	46,34	48,73	45,4	10,93	2,89	16,55	27,43	36,78	54,2	90,08

Source : ONM, 2011



**Figure V-1 :** Variation de la température et la pluviométrie en fonction du temps.

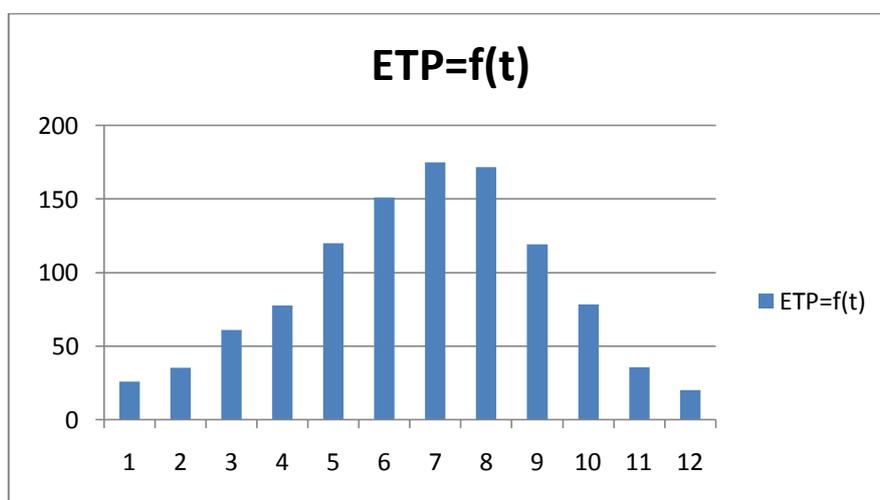
Le graphe représenté ci-dessus met en évidence la période sèche qui s’étend de Juin à Aout et la période humide qui s’étend de Septembre jusqu’à Mai.

- L’évapotranspiration potentielle

**Tableau V-12 :** L’évapotranspiration mensuelle

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
ETP(mm)	25,8	35,2	61,1	77,8	120,7	151,3	175,2	171,6	119,3	78,2	35,8	20,3

Source : ONM, 2011



**Figure V-2 :** la variation de l’ETP en fonction du temps.

On remarque que l’évapotranspiration potentielle atteint des valeurs élevées en période d’été, mais on note une baisse aussi importante en période de d’hiver.

- **Le bilan hydrique**

Le bilan hydrique est le résultat chiffré de la comparaison du total des précipitations tombées dans une région et l'évapotranspiration potentielle (Etp.) évaluée en laboratoire.

Le bilan hydrique permet d'apprécier la faisabilité d'une culture donnée dans la région.

**Tableau V-13 : Le bilan hydrique**

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui
<b>P(mm)</b>	101,2	48,99	32,91	48,73	45,4	10,93
<b>ETP</b>	25,8	35,2	61,1	77,8	120	151
<b>Bilan hydrique</b>	75,5	13,8	-28,2	-29,0	-75,3	-140,4

Mois	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
<b>P(mm)</b>	2,89	16,55	27,43	36,78	54,2	90,08
<b>ETP</b>	175	171,6	119,3	78,2	35,8	20,3
<b>Bilan hydrique</b>	-172,3	-155,0	-91,9	-41,4	18,4	69,8

Le bilan hydrique offre une période déficitaire qui s'étend de Mars jusqu'à Octobre déficit, surtout accusée pendant la période sèche (de Juin jusqu'à Septembre) ; par ailleurs nous remarquons que le bilan est positif entre Novembre et Février.

Les traits principaux du climat de la région d'étude sont la sécheresse de l'été et saison la plus humide s'étendant de l'Automne au Printemps. Le régime thermique offre des étés chauds et des hivers frais à doux, les écarts thermiques sont très marqués et l'humidité de l'air est faible en Eté.

**Tableau V-14:** Récapitulatif des caractéristiques du bassin versant

Pente (%)	Géologie	Stabilité	Occupation du sol	Erosion par ravinement
0 - 3	-Dépôt meuble -texture moyenne	Stable		Non susceptible au ravinement
3 - 10	-grés calcaire ou marneux -roches métamorphique	Modérément stable	-Agriculture	Faiblement susceptible au ravinement
10 - 15	Marne		- pâturage naturel et anthropique	Susceptible au ravinement
15 - 30	-Roche sédimentaire indifférencies -Flysh et molasse - formation marno-calcaire	instable	-Milieu naturel (steppe, maquis, maltorel et foret) -Plantation forestière	Très susceptible au ravinement
Plus de 35		Très instable		

Nous avons présentés les différentes caractéristiques de bassin versant de Koudiat Acerdoune afin de proposer les aménagements les mieux adaptés à ces caractéristiques.

## V-2- Les solutions proposées

### V-2-1- L'amélioration des pratiques agricoles

Les pratiques agricoles améliorées visent une plus grande infiltration de l'eau dans le profil du sol dans le but d'une part augmenter la production de biomasse et d'autre part, pour mieux couvrir le sol et ainsi réduire l'érosion au champs et surtout le ravinement.

L'amélioration des pratiques agricoles peut nécessiter une modification partielle ou radicale des systèmes de production, il peut s'agir d'appliquer une fertilisation équilibrée adaptée au sol et à la plante, d'utiliser un calendrier cultural tenant compte de l'agressivité des pluies...citons comme exemple :

- Le labour perpendiculaire à la pente et double dérayure : les sillons ouverts en courbe de niveau sur les pentes, après labour, constituent autant d'obstacles au ruissellement et favorisent l'infiltration. En générale, deux paires de dérayures sont espacées à 30 m environ sur pente inférieure à 10% et 20 m sur une pente variant de 10 à 20%.
- Implantation de la rotation : la pratique de la rotation doit être appliquée sur toutes les terres dégradées avec un assolement comprenant des plantes légumineuses.

- Pratique des cultures en bandes : deux cultures différentes peuvent être alternées sur des bandes successives en courbe de niveau sur un même champ. Cette pratique vise à cumuler l'effet de la rotation des cultures et celui de la protection contre l'érosion en maintenant en place une culture pendant que l'autre est enlevée. Cette pratique est possible sur des pentes sans rupture (inférieure à 10%) et si la longueur du champ est supérieure à 50 m.

### **V-2-2- Reboisement**

Il a pour rôle essentiel d'augmenter la couverture protectrice des terres et ainsi de réduire l'impact des gouttelettes de pluie sur le sol de même que pour le ruissellement de surface.

La prise en compte des paramètres climatiques de la région est déterminante pour assurer la survie des espèces reboisées. Sur le plan climatique, ce sont les valeurs de la pluviosité et la température annuelle qui servent habituellement de guide décisionnel pour les programmes de reboisement.

#### **V-2-2-1- Différentes plantes forestières possible**

- **Pinus halepensis**

Climat : pluviométrie comprise entre 250 et 800 mm.

Résistances aux fortes températures (+45°C) et aux basses températures (-12°C).

Sol : le pin d'Alep a une préférence pour les sols Marno-Calcaire, mais il tolère tout les type de sols, c'est une espèce résistante au calcaire,

Altitude : de 0 à 1770m

- **Cypre toujours vert**

Climat : pluviométrie de 350mm et plus

Résistant à la sécheresse.

Température entre -10 et 40°C

Sol : s'adapte à tout type de sol

Altitude de 0 à 1200 m.

### V-3-3- Plantations fruitières

Dans le domaine de la conservation du sol, les arbres fruitiers, grâce à leurs profondes racines, fixent le sol sur les fortes pentes.

En générale, les arbres sont plantés en suivant les courbes de niveau.

Les principales espèces fruitières aptes à être gérées en cultures sèches sur pente sont données ci après :

- **Abricotier**

L'arbre en lui-même est susceptible de supporter des températures extrêmes basses de l'ordre de  $-20^{\circ}\text{C}$ , il est adapté au terrain pauvre.

- **Le pommier**

Cet arbre redoute moins le froid que la chaleur, les fleurs sont détruite à  $-2,3^{\circ}\text{C}$  mais, résiste à la température de  $35$  à  $38^{\circ}\text{C}$ .

Pluviométrie  $600$  à  $700$  mm/an.

Résiste aux sols lourds.

Altitude  $> 500\text{m}$ .

- **Le poirier**

Température hivernale  $> 7^{\circ}\text{C}$ .

Sol profond et fertile.

- **Caroubier**

Altitude environ  $600$  m

Très résistant à la sécheresse.

Peut se contenter de  $200$  à  $250$  mm/an.

- **Amandier**

Relativement résistant au froid, supporte une température minimale de  $3^{\circ}\text{C}$ .

Pluviométrie supérieure à 300 mm/an.

Sols de qualité moyenne, pauvre, rugueux.

Altitude plafond se situe à quelque 550 m.

- **Figuier**

Supporte une température minimale de l'ordre de 8 à 10° C et une température maximale de 40°C.

Sols pauvres, schisteux-marneux ; sols calcaires.

Altitude entre 300 à 800 m.

Pluviométrie supérieure à 200mm.

#### **V-2-4- Les cordons de pierre**

Se sont des alignements de pierres établis de façon à ralentir l'écoulement de l'eau sur de grandes surfaces relativement dénuées et sur des pentes faibles (<12%). ils évitent la formation des rigoles, et favorise ainsi l'infiltration des sédiments.

La technique des cordons n'est applicable que sur les sols établis en pente légère.



**Figure V-3 : Les cordons de pierres**

### V-2-5- Les Banquettes

Elles ont pour but d'intercepter les eaux de ruissellement sur les versants afin de réduire l'érosion des sols. Elles contribuent à améliorer l'infiltration, accroître la couverture végétale et ainsi protéger les sols contre l'érosion.

-Les banquettes sont à proscrire sur des terrains argileux (marnes, schiste) favorables au glissement et sur les terrains très sableux fragiles susceptibles à la dégradation.

- sur forte pente (>35%) : à exclure sur les sols caillouteux peu épais et sur les sols argileux peu perméables.

- en zone humide : sur les terrains à pente allant de 12 à 25%, les banquettes de diversion peuvent être appliquées dans les secteurs à faible densité de population. Sur les pentes supérieures à 25%, il est préférable d'opter pour les gradins manuels.

On distingue au moins trois formes de banquettes : profil déversé vers l'amont (en V) profil normal (en U) et profil amorti (en courbe). Le traçage du réseau de banquettes peut s'effectuer à différents niveaux du versant : en commençant à partir des points d'aboutissant des banquettes à l'exutoire ou à partir de la limite de partage des eaux. L'essentiel est de parvenir à un réseau de banquettes cohérent. L'espacement (L) entre les banquettes est en fonction de la pente, de la dénivelée et de la distance horizontale.

La construction de banquettes offre plusieurs avantages mais présente également quelques inconvénients :

Avantage :

- Travail du sol selon les courbes de niveau.
- Infiltration nettement améliorée au niveau du secteur plat de la banquette. Il est donc permis de développer une intensification agricole à ce niveau.

Inconvénients :

- Coût élevé, entretien onéreux.
- Perte de 10 à 15% de superficie agricole utile.

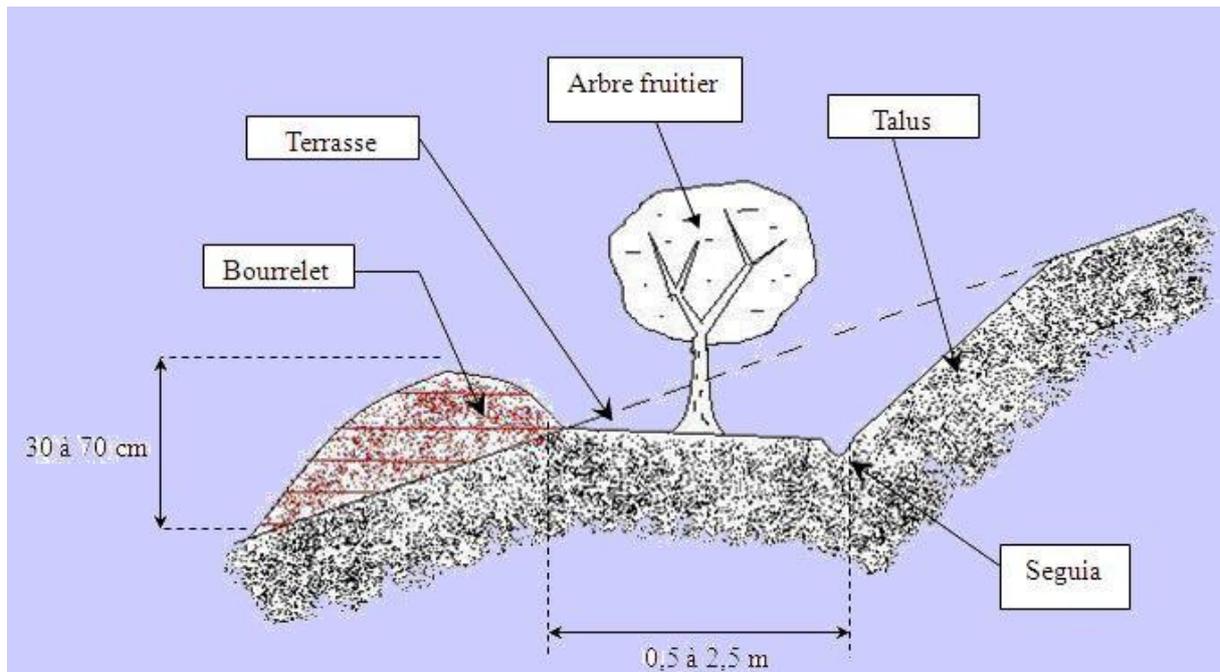


**Figure V-4 :** Les banquettes

#### **V-2-6- Les Bourrelets**

Lorsque les eaux de pluie sont trop abondantes ou trop intense pour être stockées ou infiltrées totalement dans le sol, on organise leur drainage dans les fossés, le long de bourrelets pour récupérer les nappes ruisselantes avant qu'elles aient acquis une énergie suffisante pour raviner le versant. Ces eaux de ruissellement sont alors évacuées en dehors de la zone de culture vers des exutoires naturels.

- Les bourrelets sont utilisés sur des pentes modestes au dessus de 8% et sur des bassins versants relativement petits, ils forment de véritables digues retenant l'eau, quelquefois jusqu'au pied du bourrelet situé en amont.
- Ces structures exigent un relevé topographique pour créer une pente de fossés croissant de 0,2 à 0,4%.



**Figure V-5 : Les bouvrelets**

#### **V-2-7- Les seuils**

Ils sont utilisés afin de réduire la vélocité du ruissellement à des taux non érosifs. Ils sont recommandés pour diminuer le ravinement ainsi que pour la correction torrentielle. Ils peuvent être faits en gabions ou en pierres sèches, ou en grillage métallique.

- Le seuil en gabions peut s'installer sur des pentes faibles. La hauteur des ouvrages en gabion ne doit pas dépasser 3m en partie centrale pour des raisons de stabilité.
- Le seuil en grillage métallique est très souple. Son installation en terrain est parfois complexe surtout dans les endroits difficiles d'accès. Ce type de seuil est particulièrement recommandé dans les régions dépourvus de pierre de qualité.



**Figure V-6** : Les gabions

### **V-2-8- Les Murettes**

Elles ralentissent l'écoulement des eaux de ruissellement afin de favoriser leur infiltration. Elles servent généralement d'appui à des terrasses horizontales de largeur variable et aménagées en marche d'escaliers successives.

Les murettes sont des structures plus stables que les cordons et donc plus adaptées aux pentes entre 5 et 30%.

- Elles demandent une conception et une construction plus élaborée que les cordons.
- Elles sont plus pérennes que les cordons.
- Elles sont souvent continues là où les pierres sont abondantes.
- Les écartements entre les murettes sont très variables et sont plus étroits pour les fortes pentes.
- La longueur des murettes peut concerner la largeur de tout le versant.



**Figure V-7 : Les murettes**

### V-3- Mise en valeur des terres

Les études de base (climat, sol, pente) nous ont permis de dégager 3 vocations culturales essentielles :

- **1<sup>ère</sup> vocation** : assolement céréales-fourrages.

Cette unité est représentée par les terrains dont la pente varie de 0 à 25% .

- 0 à 6% bandes alternées suivant les courbes de niveau.
- 6 à 12,5% doubles dérayures suivant les courbes de niveau espacées de 50 m.
- 12,5% à 25% doubles dérayures suivant les courbes de niveau espacées de 30 m.

Un tel assolement permet d'augmenter les rendements en réduisant la jachère et les surfaces actuellement destinées aux céréales ; cela permet d'intercaler en bandes, des cultures érosives (céréales) avec des cultures non érosives (légumineuses fourragère non pâturées).

Ces cultures fourragères couvrent très bien le sol et le protège contre l'érosion hydraulique.

- **2<sup>ème</sup> vocation** : l'arboriculture fruitière + prairie permanente.

Les cultures fourragères pérennes permettent de limiter l'érosion et de procurer des unités fourragères.

- **3<sup>ème</sup> vocation** : zone forestière (plantation en plein)

La forêt claire de pin d'Alep doit subir un repeuplement de 50%. Le maquis dégradé sera reboisé par bandes de 2,55 m suivant les courbes de niveau séparées par un intervalle de 1,75m, les intervalles entre les plantes seront de 2,15 m.

Occupation du sol	Km <sup>2</sup>	% du Sous Bassin
Matorral	55,76	2,02
Prairies et pâturage	12,14	0,44
Maquis et/ou garrigue	81,92	2,97
Plantation et forêt de faible densité	6,89	0,25
Plantation et forêt de moyenne densité	2,52	0,09
Sol dégradé	85,42	3,09
Zone agricole	385,86	13,98

2.02

Le type d'occupation du sol nécessitant le plus d'intervention en terme de superficie sur le sous bassin versant de Koudiat Acerdoune englobe les zone agricoles (386 km<sup>2</sup>), ces intervention sont principalement destinées à contrer le ravinement telles que :

- Les pratiques agricoles.
- La revégétalisation.
- Le reboisement.
- La mise en place des bourrelets sur les versants

Les sols dégradés sont le deuxième type d'occupation nécessitant des interventions antiérosive (85 km<sup>2</sup>). Ces interventions sont principalement destinées à contrer le ravinement et l'érosion en nappe. Elles englobent la plantation d'arbres fruitiers, la revégétalisation, le reboisement et la mise en place de seuils dans les ravines et de cordons de pierre sur les versants.

Les zones de maquis et/ou garrigue sont le troisième type d'occupation nécessitant le plus d'interventions en termes de superficie (82 km<sup>2</sup>). La probabilité de présence de ravines touche entièrement ces zones. Ainsi, les principales interventions préconisées sur ces zones sont :

-L'implantation des seuils dans les ravines.

-La revégétalisation.

-Le reboisement et les plantations fruitières.

De plus, certaines zones de maquis et/ou garrigue (10 km<sup>2</sup>) nécessitant également la mise en place de cordons de pierre pour contrer l'érosion en nappe.

Les zones de matorral sont le quatrième type d'occupation du sol nécessitant le plus d'interventions (56 km<sup>2</sup>). Presque toutes ces terres sont touchées par du ravinement mais sont peu affectées par l'érosion en nappe. La majeure partie de ces zones nécessite des techniques antiérosives telles que :

- L'implantation des seuils dans les ravines.
- La revégétalisation.
- Le reboisement.

De plus, certaines zones de matorral (8 km<sup>2</sup>) nécessitent également la mise en place de cordons de pierre pour contrer l'érosion en nappe.

Les prairies et les pâturages sont le cinquième type d'occupation du sol nécessitant des interventions antiérosives (12 km<sup>2</sup>). Ces interventions sont principalement destinées à contrer le ravinement. Elles englobent la plantation d'arbres fruitiers, du reboisement, la revégétalisation et la mise en place des seuils dans les ravines.

Les forêts de faible à moyenne densité sont le sixième type d'occupation nécessitant des interventions importantes (7 km<sup>2</sup>). Ces interventions sont principalement destinées à contrer les glissements de terrain par du reboisement et de revégétalisation ponctuel.

Finalement, les plantations et les forêts de moyenne densité nécessitent des interventions antiérosives sur environ 2 km<sup>2</sup>. Du reboisement de la revégétalisation ponctuel sont suggérées dans ces zones.

## **Conclusion**

Vu les conditions du bassin versant étudié (accidentées, la diversité des sols, le caprice du climat, et le phénomène d'érosion) nous avons opté pour des actions anti-érosives au niveau du bassin versant et à des orientations agricoles adapté aux particularités de notre zone en tenant compte de chaque facteur.

L'aménagement intégré de cette zone doit permettre à l'agriculteur de tirer le maximum de revenus sans pour cela épuiser ou éroder le sol. Cette actions sera donc indispensable sur tout les plans afin d'éliminer les disparités régionales en développant les zones qui étaient jusque là dans un isolement total.

## Conclusion générale

Lorsqu'on a entamé ce travail, l'objectif était de quantifier le transport solide ainsi que l'érosion spécifique du bassin versant de Koudiat Acerdoune afin de proposer des aménagements appropriés pour contrer ces phénomènes.

Nous avons entamé ce travail par une collecte et critique de données dans le but de les fiabiliser, malheureusement la station hydrométrique recueillie, représentative du bassin versant étudié n'était pas mise à jour, elle s'étend seulement de 1971 jusqu'à 1985.

Pour actualiser ces données, nous avons élaboré des modèles pluie débit afin de faire l'extension de la série des débits liquides mais les résultats obtenus n'étaient pas satisfaisantes, nous étions donc obligés de faire appel aux modèles neuroflous.

Le meilleur modèle a été choisi en faisant plusieurs simulations tout en changeant le nombre de règles floues et la longueur des périodes de calage et de validation, le modèle retenu a été utilisé pour faire l'extension des débits liquides.

Pour la quantification du transport solide, nous avons fait des régressions entre les débits liquides et les débits solides à différentes échelles, nous avons obtenus des relations linéaires, logarithmiques, polynomiales, puissances et exponentielles. Les relations puissance et polynomiale ont donné un bon coefficient de détermination, en particulier, pour la série des crues bien observées. Celles-ci étant considérées comme facteur causal des apports solides les plus importants. Pour avoir les débits solides mensuels nous avons introduits les débits liquides mensuels dans le modèle retenu à l'échelle mensuelle pour la période 1971 à 1985.

Afin d'actualiser la série des débits solides nous avons utilisé un modèle neuroflou ANFIS, le meilleur modèle qui a été utilisé pour faire l'extension a été choisi en suivant la même démarche que pour les débits liquides.

La quantification de l'érosion spécifique du bassin versant a été faite par deux approches : la première est basée sur les mesures hydrométriques et la deuxième sur les formules empiriques, les résultats obtenus par ces deux approches montrent que le taux d'érosion spécifique est trop élevé pour cela nous avons proposé un aménagement anti érosif pour protéger le bassin versant.

### Références bibliographiques

**Achite, M (2007)** ‘‘ problématique de l’érosion et du transport solide en Algérie du Nord :bassin de Oued Mina (Wilaya de Relizane)’’ thèse de doctorat

**Benkaci, A. (2006)** modélisation pluie –débit mensuelle et journalière par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous (application aux bassins Algériens).’’ Thèse de doctorat

**Bouaichi,I (2008)** contribution a l’élaboration d’un abaque « érosion spécifique-surface- lame d’eau- précipetee » pour le bassin hydrographie de l’Oued Cheliff’’

**Benalouane, Y., (2005) :** Contribution à la modélisation du transport solide par la logique floue. Thèse d’ingénieur d’état en hydraulique de l’ENP (Alger), 90 pages

**Degoutte.G. (2005).** Aide mémoire d’hydraulique à surface libre, 93 pages.

**Higy C. (2000)** Modélisation conceptuelle et à base physique des processus hydrologiques : application du bassin versant de la haute Mentue. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 300 p.

**Kouri L, 1993 -** L’érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l’Oued Mina (Algérie). Thèse géographie, univ. Strasbourg, 238 p.

**Larfi, B. (2001).** Prévission du transport solide dans le bassin versant d’Oued Isser Application à l’envasement du barrage de Beni Amrane’’ Thèse de magister

**Lefkir, A. (2007)** modélisation du transport solide par les modèles neuroflous’’ thèse de doctorat

**Michel C. (1989)** Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux. Rapport technique CEMAGREF, Anthony.

**Mouelhi S. (2002)** Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse. Doctorat, Université Paris 6 ENGREF, France. 300 p

**Makhlouf Z. (1994)** Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d’estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, CEMAGREF, 426 p.

**Nash J.E. & Stueliffe J.V. (1970)** River flow forecasting through conceptual model. Part 1- a discussion of principles. Journal of hydrology, 10; 282-290.

**Perrin C. (2000)** Vers une amélioration d’un modèle global pluie-débit au travers d’une approche comparative. Thèse de Doctorat, Cemagref, Anthony, Institut National Polytechnique de Grenoble, 530 p.

**Quesney A. (1999)** Assimilation de mesures d’humidité de surface dans un modèle hydrologique conceptuel global. Apport de la télédétection radar ERS/SAR. Thèse de Doctorat, Université Paris 7, 350 p.

**Roose E, Arabi. M, Brahamia.K, Chebbani. R, Mazour M, Morsli B, 1993** - Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Cah. Orstom, sér. Pédol., 28 (2) :289-308.

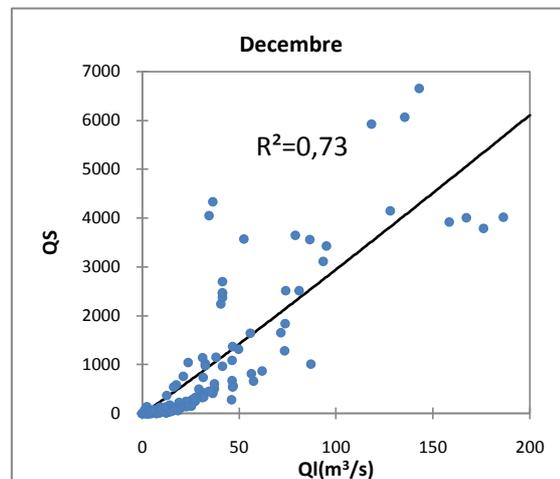
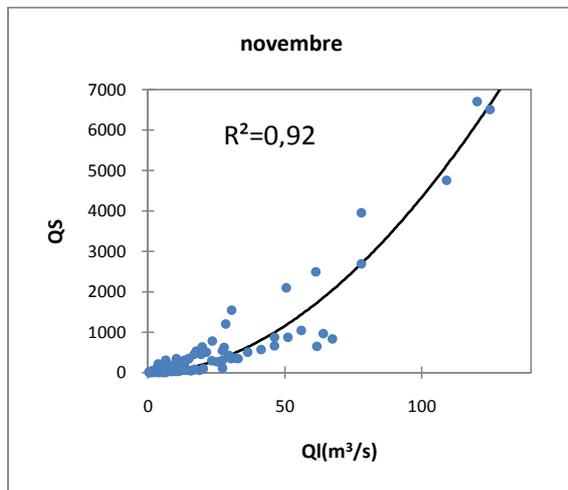
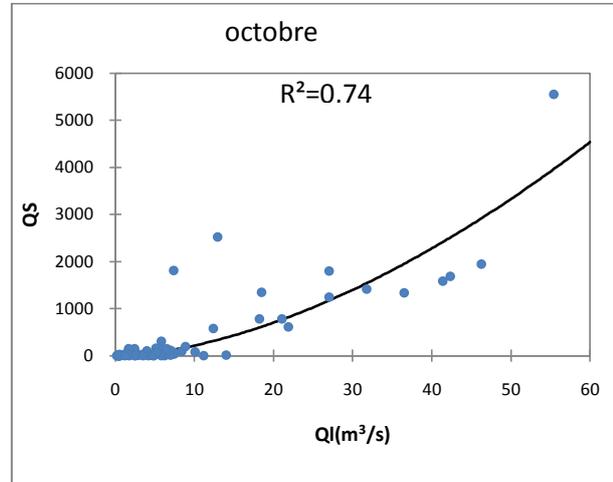
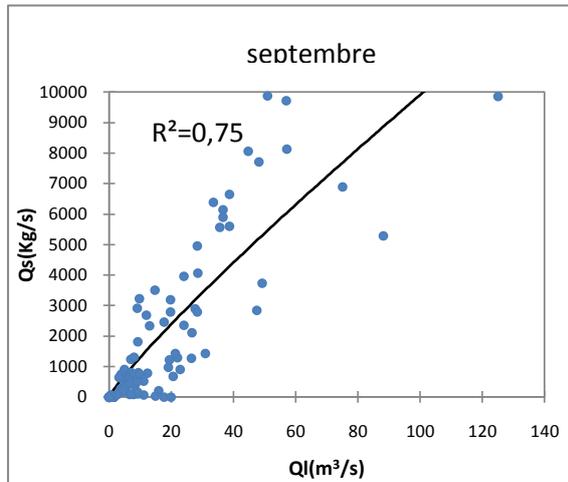
**Rakem Y. (1999)** Analyse critique et reformulation mathématique d'un modèle pluie-débit empirique (GR4J). Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 267 p.

**Sorooshian, S. & Gupta, V.K. (1983).** Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness. Water Resources Research, 19(1), 260-268.

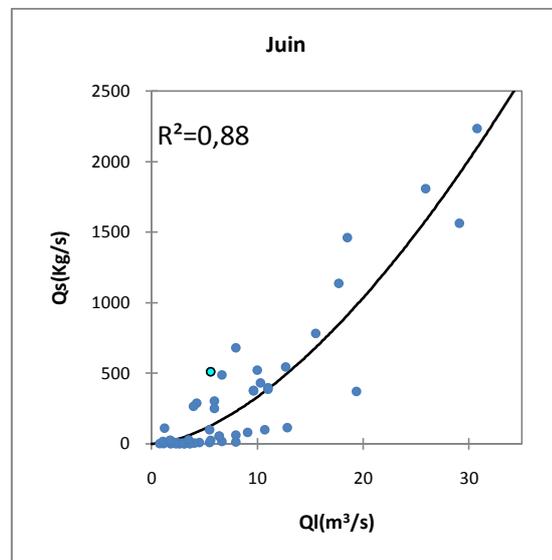
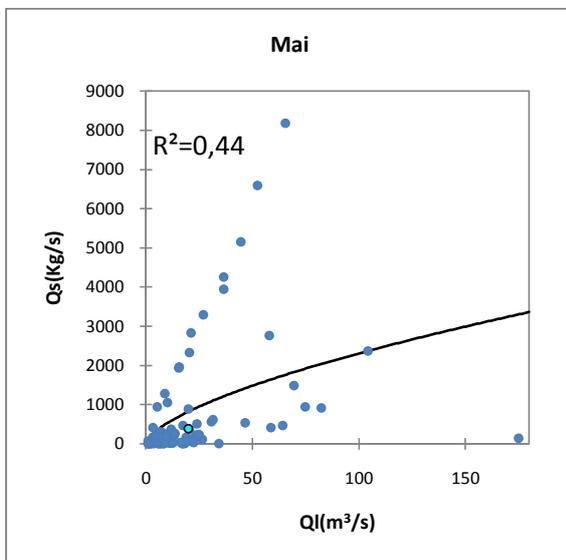
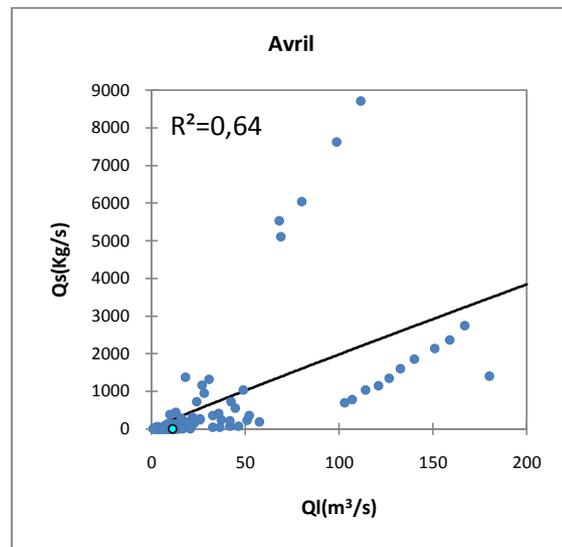
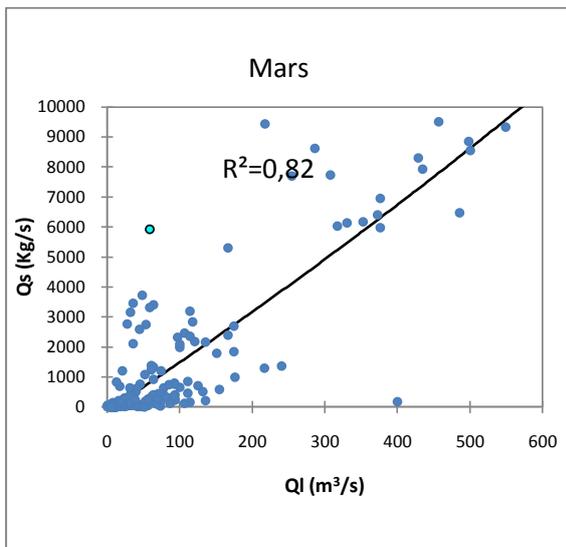
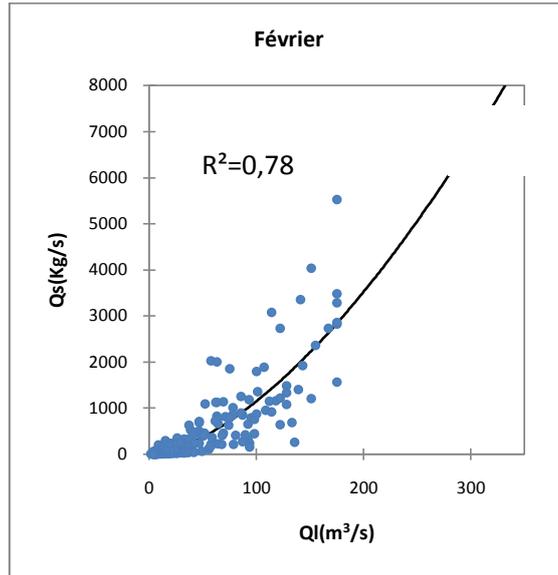
Annexe I

Annexe I-1- Relation débit liquide débit solide de la station La Traille

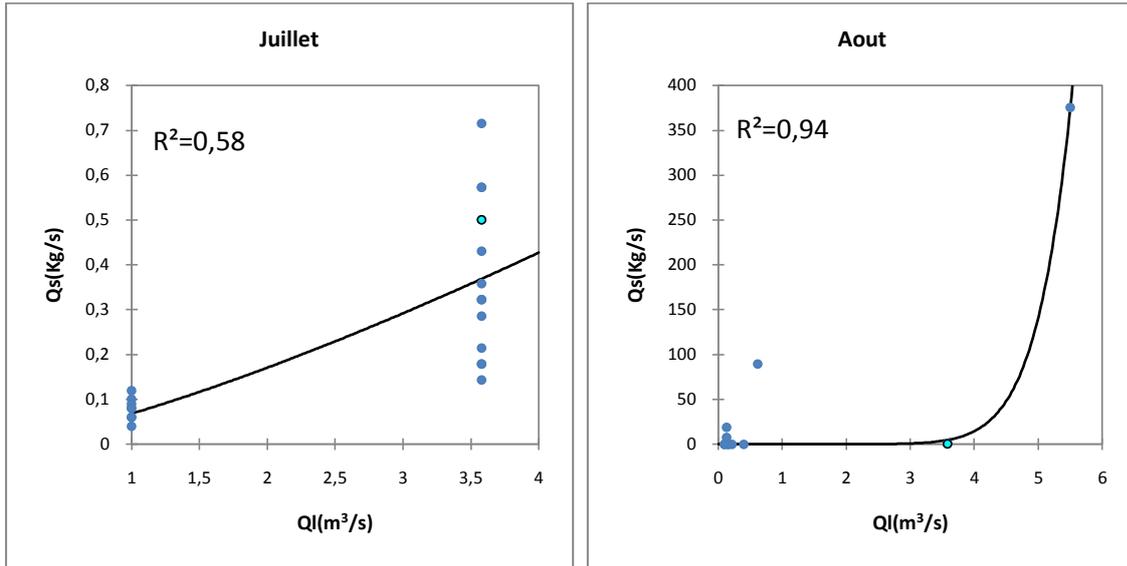
Annexe I-1-1 Relation débit liquide débit solide a l'échelle mensuelle



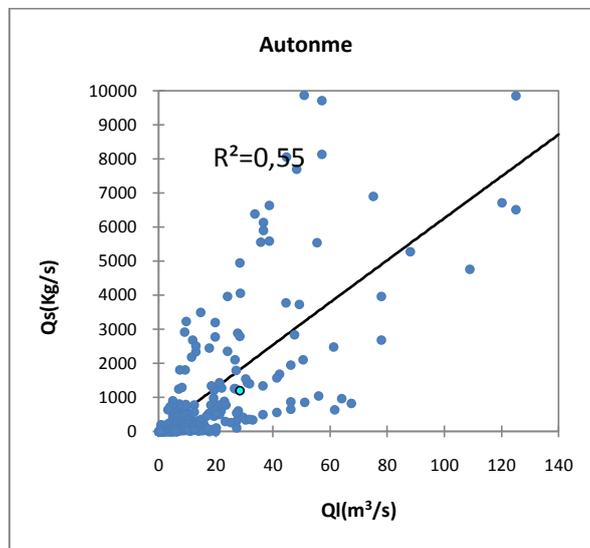
Annexe I

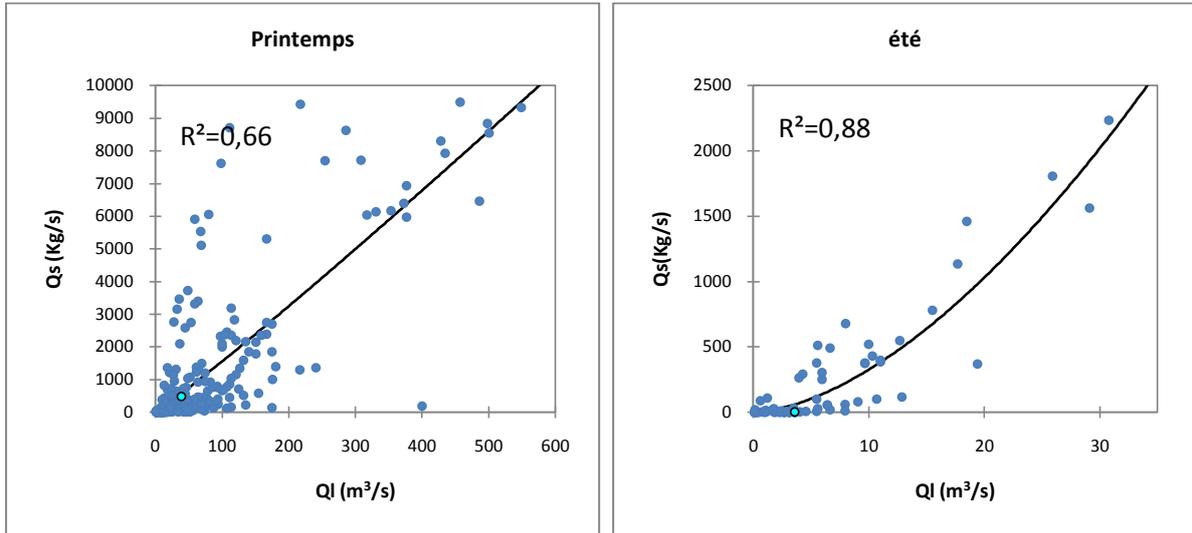


## Annexe I

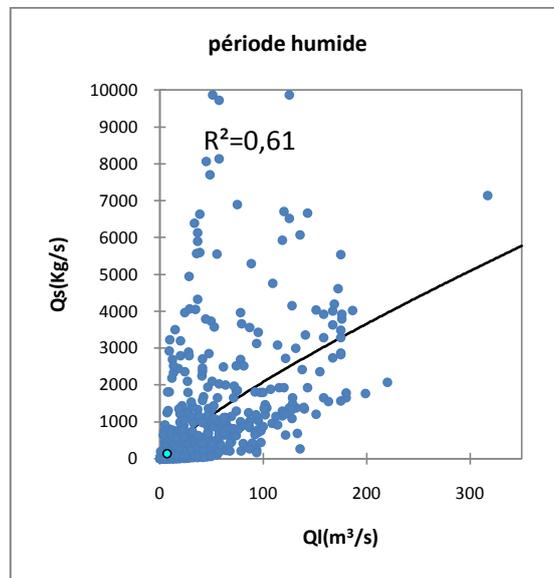


### Annexe I-1-2 Relation débit liquide débit solide a l'échelle saisonnière



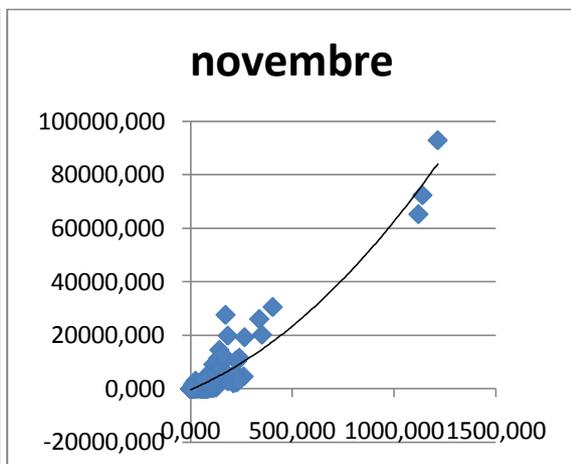
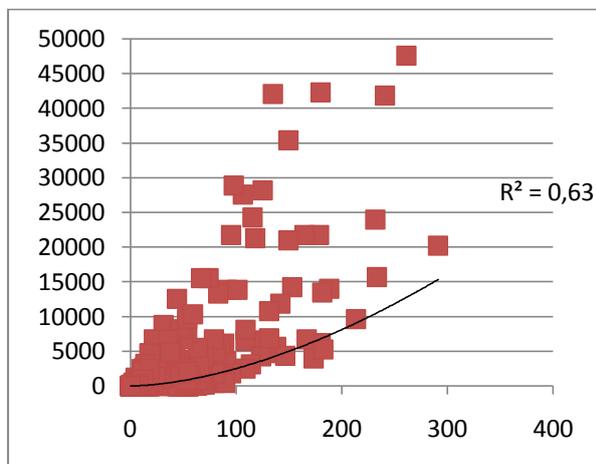
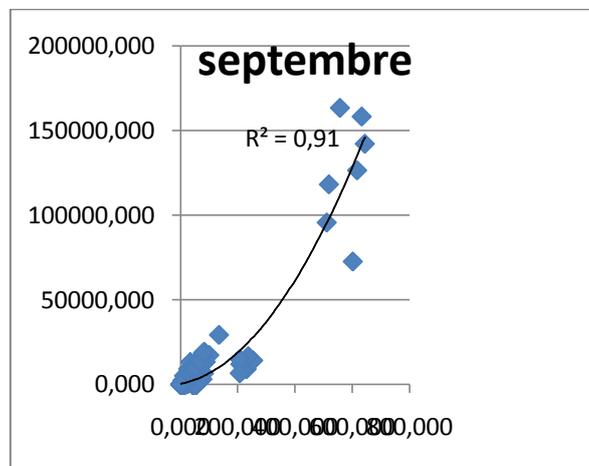


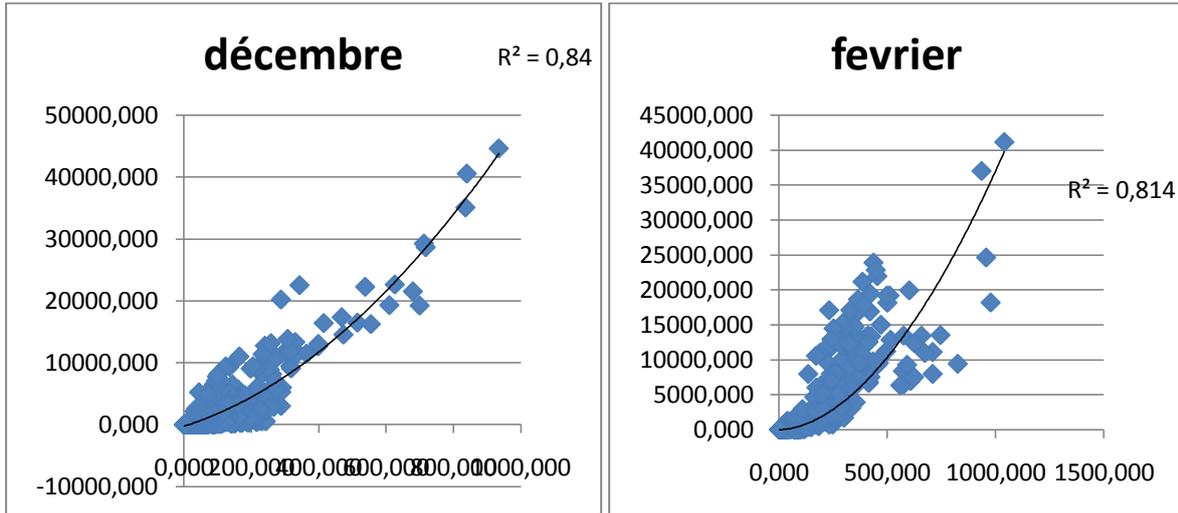
Annexe I-1-3 Relation débit liquide débit solide a l'échelle saison sèche-humide



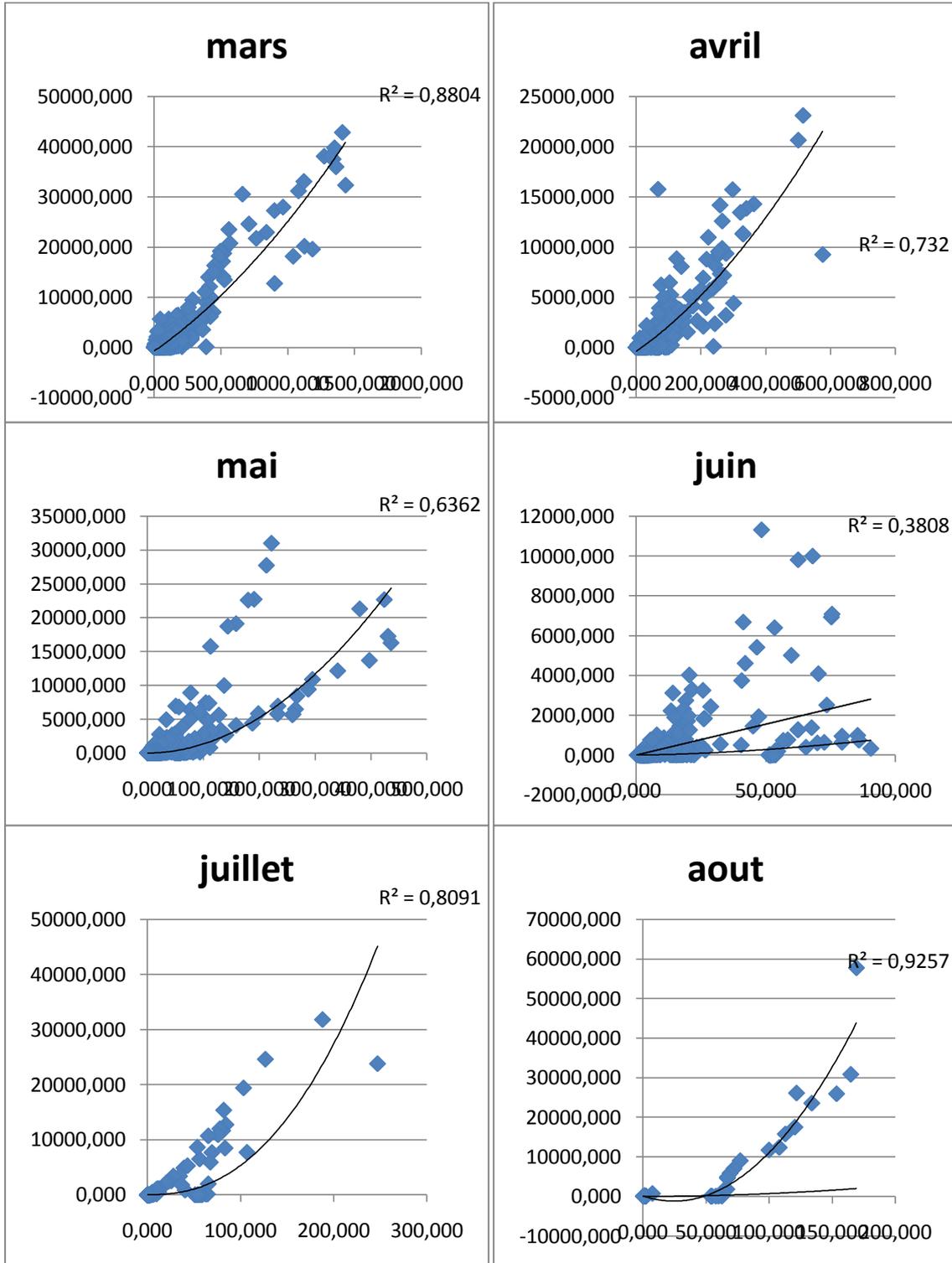
**Annexe I-2- Relation débit liquide débit solide de la station Lakhdaria**

**Annexe I-2-1 Relation débit liquide débit solide à l'échelle mensuelle**

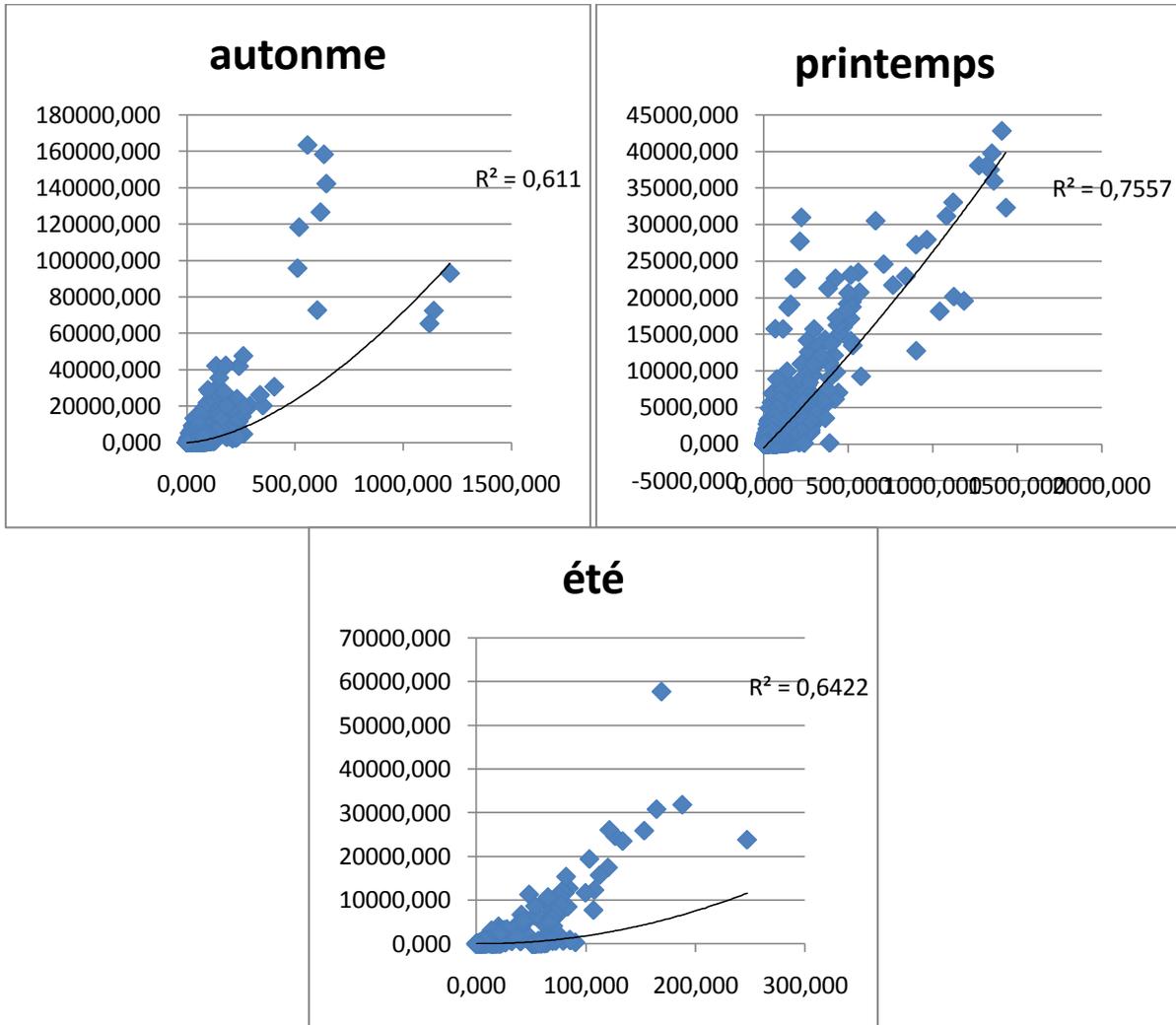




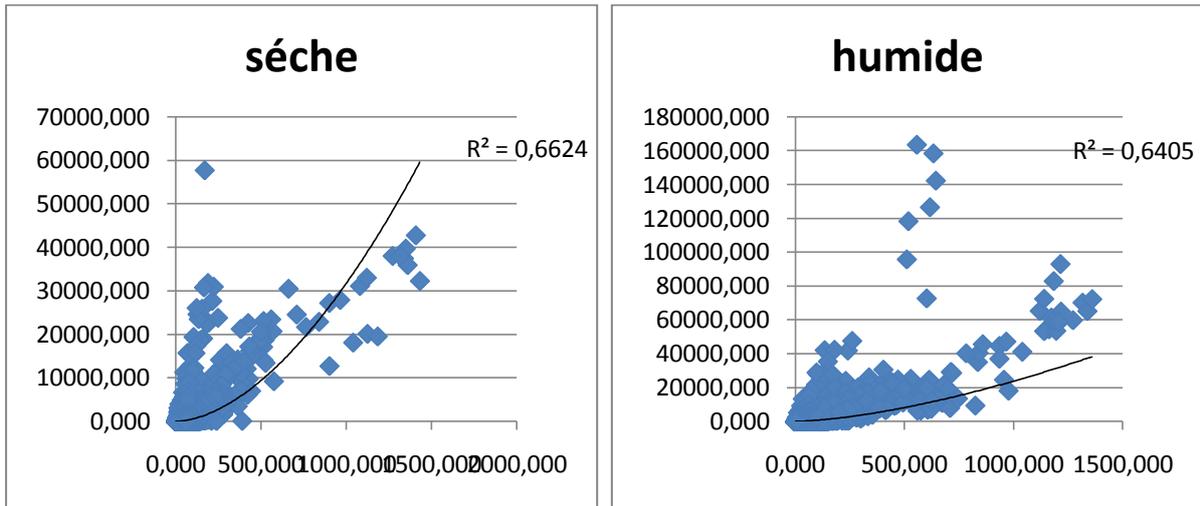
Annexe I

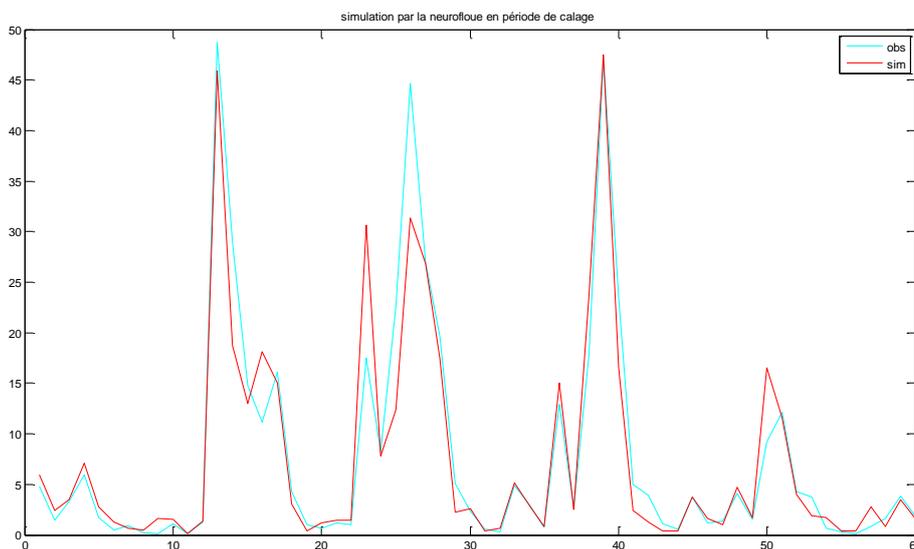
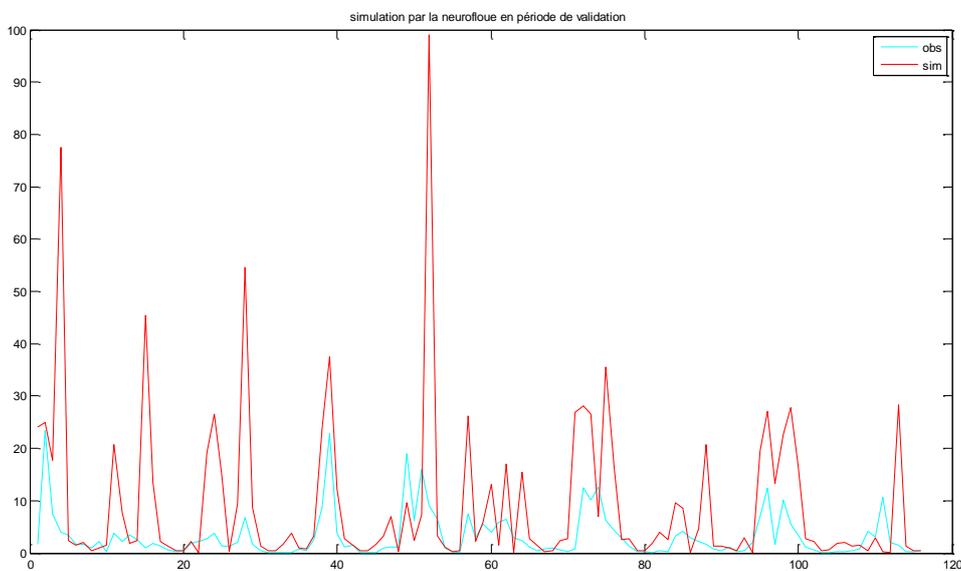


Annexe I-2-2 Relation débit liquide débit solide à l'Echelle saisonnière



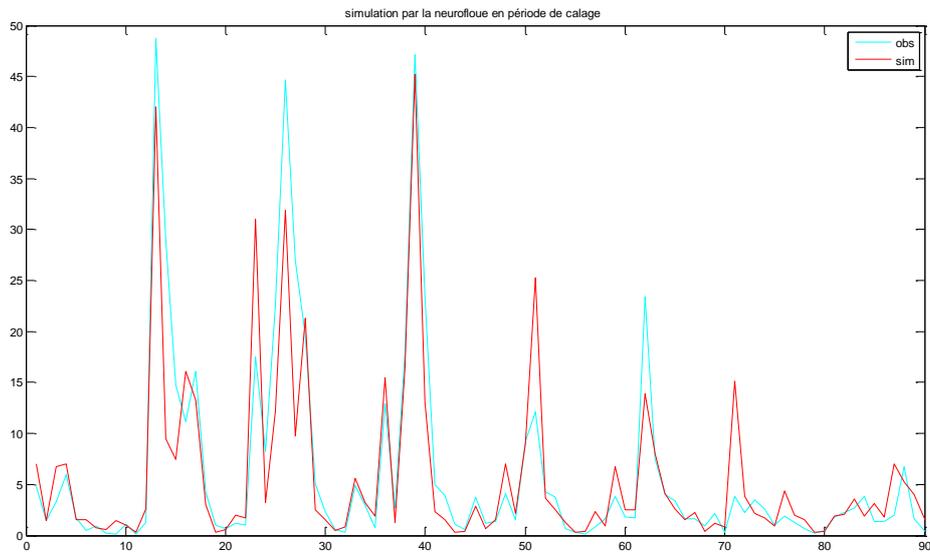
**Annexe I-2-3 Relation débit liquide débit solide à l'Echelle saison sèche saison humide**



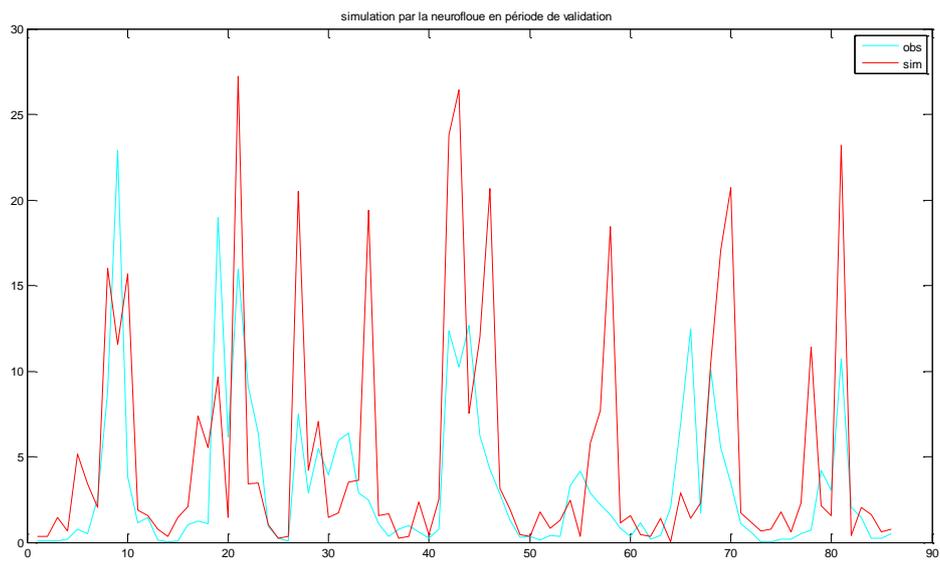
**Annexe II****Annexe II-1-Simulation pluie débit par la neurofloue****Annexe II-1-2-Simulation avec deux règles floues****Période de calage 60 mois****Période de validation 116 mois****Calage (a-1)****Validation (b-1)**

**Période de calage : 90 mois**

**Période validation : 86 mois**



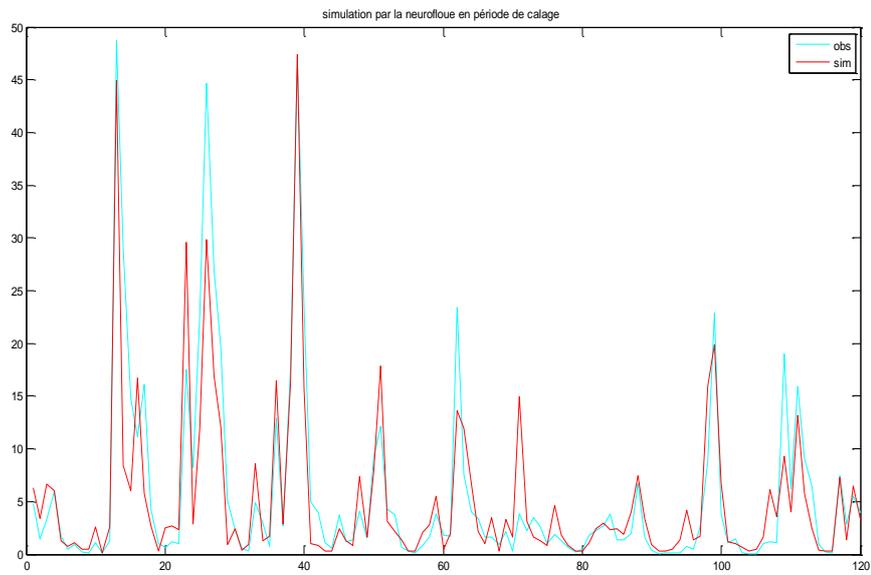
**Calage (a-2)**



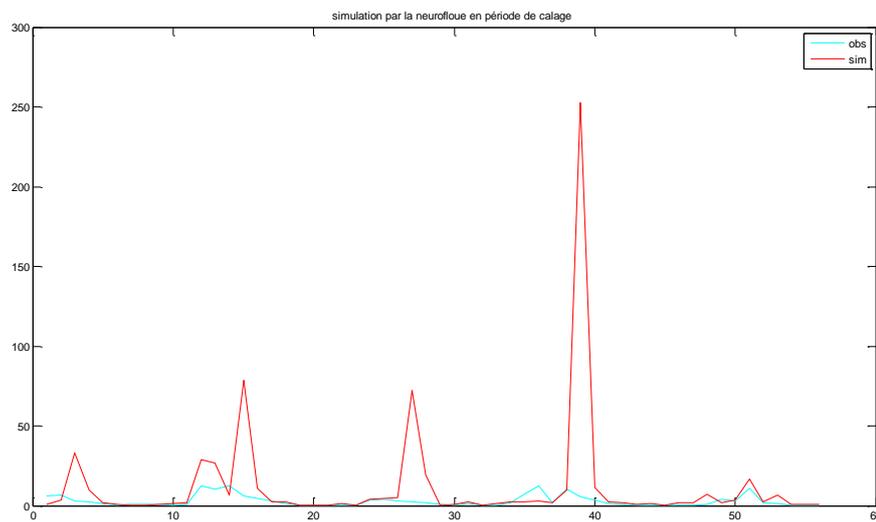
**Validation (b-2)**

**Période de calage : 120 mois**

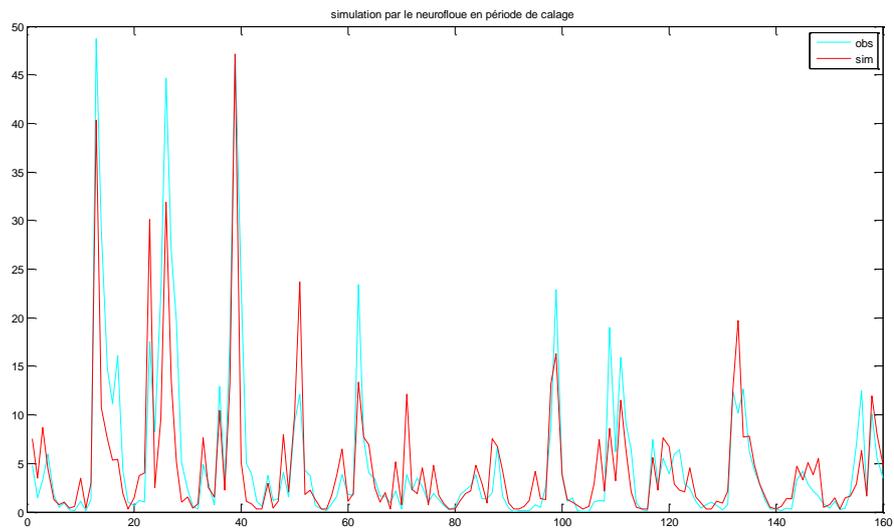
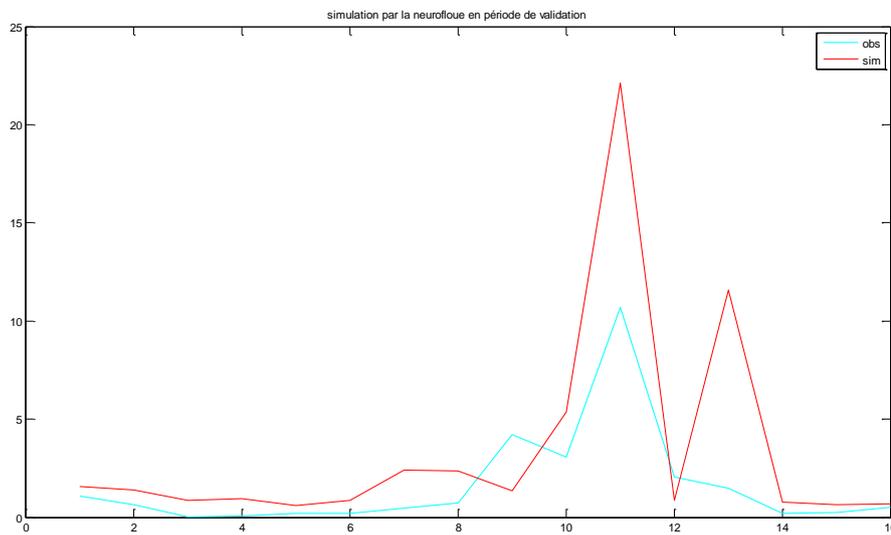
**Période de validation : 56 mois**

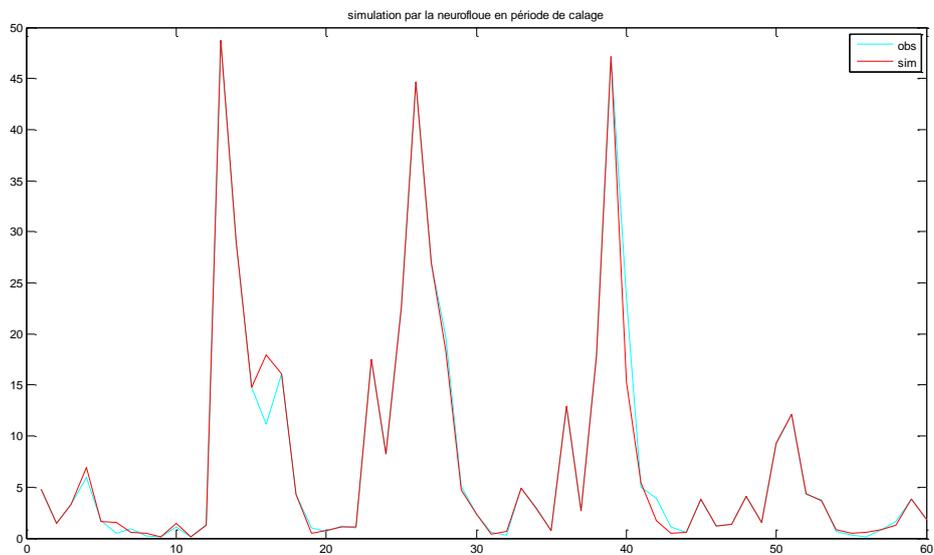
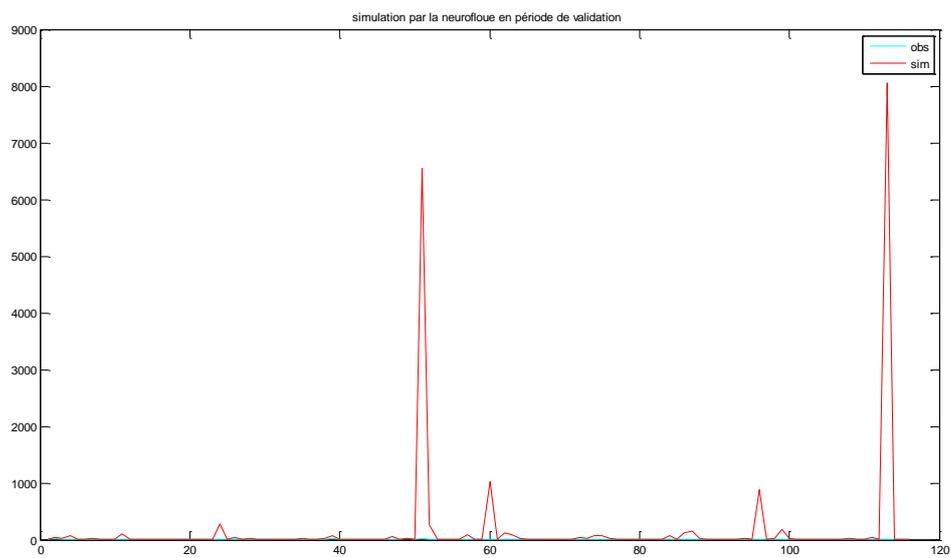


**Calage (a-3)**



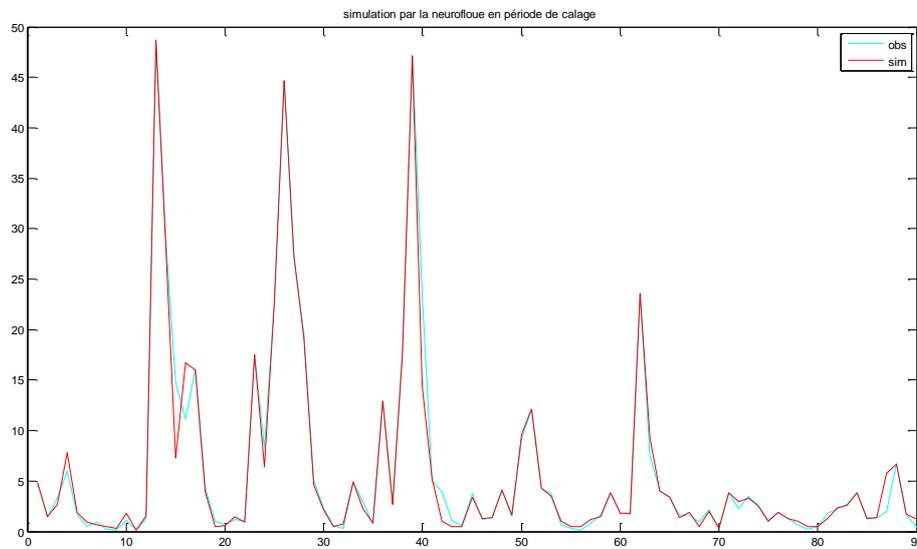
**Validation (b-3)**

**Période de calage 160 mois****Période de validation 16 mois****Calage (a-4)****Validation (b-4)**

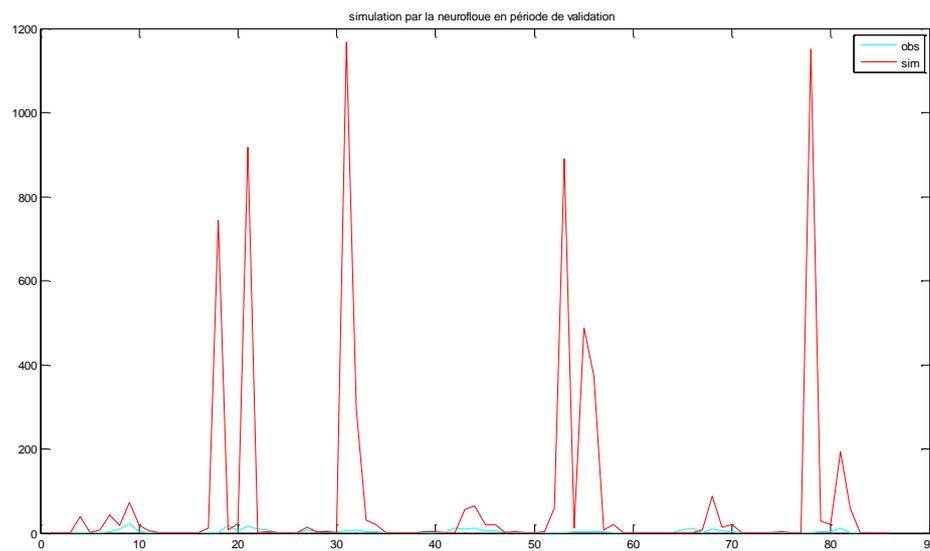
**Annexe II-1-2-Simulation avec trois règles floues****Période de calage 60 mois****Période de validation 116 mois****Calage (a-1)****Validation (b-1)**

**Période de calage : 90 mois**

**Période validation : 86 mois**



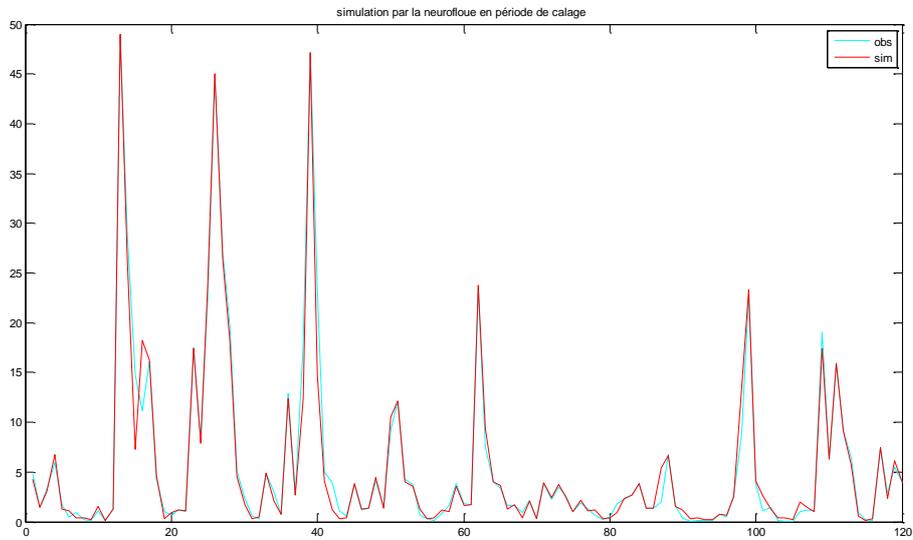
### Calage (a-2)



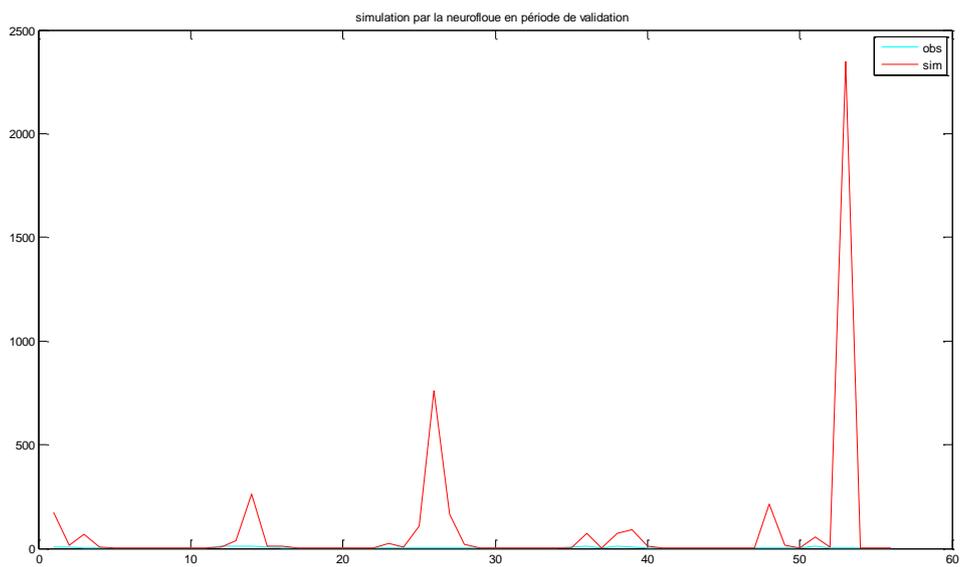
### Validation (b-2)

**Période de calage : 120 mois**

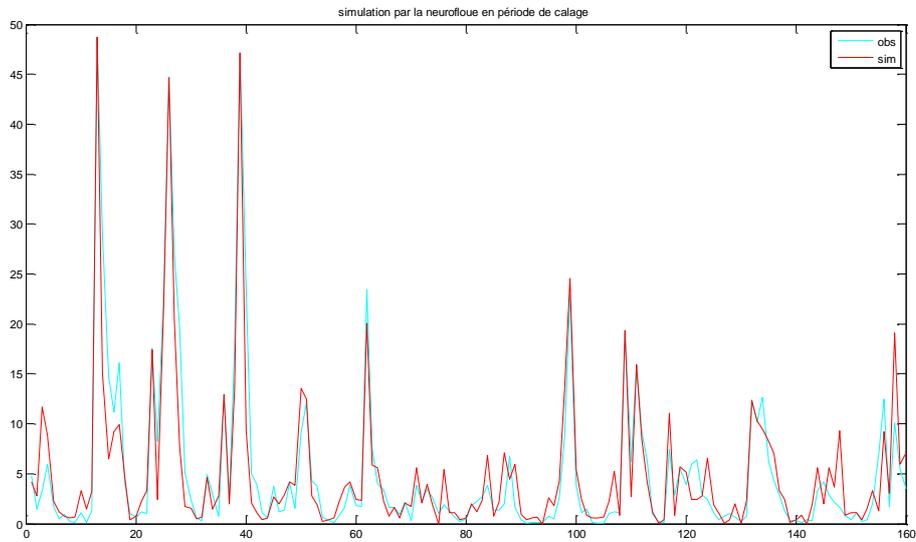
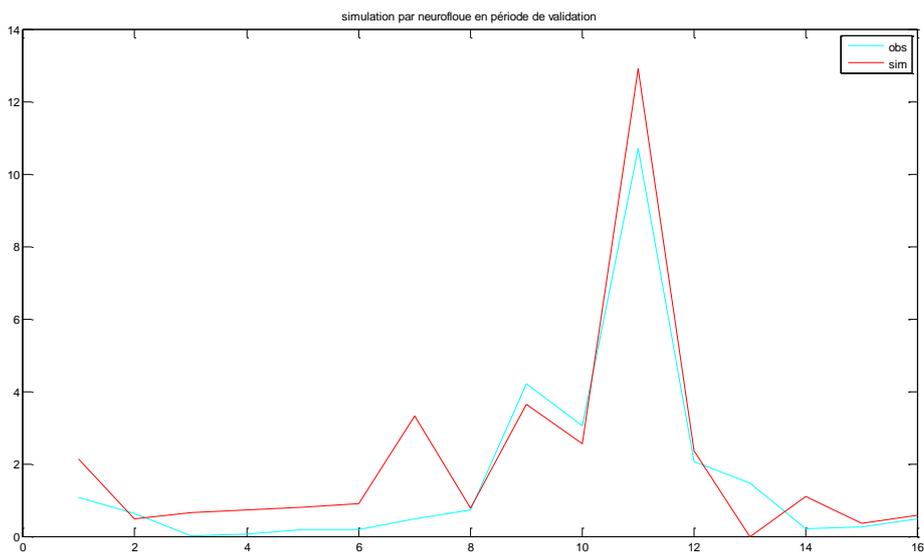
**Période de validation : 56 mois**



**Calage (a-3)**



**Validation (b-3)**

**Période de calage 160 mois****Période de validation 16 mois****Calage (a-4)****Validation (b-4)**