

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

**BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA**



**جامعة باجي مختار - عنابة**

**Faculté des Sciences de l'Ingéniorat**

**Département d'Hydraulique**

**Année : 2018/2019**

## **THESE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

**Contribution à l'étude de l'envasement des barrages par les  
méthodes paramétriques et non paramétriques**

**Cas de l'Afrique du Nord**

**Option Hydraulique**

Par

**BOURAS Farida**

Devant le jury

<b>Président :</b>	Pr.	HAMMAR	Yahia	U - Badji Mokhtar – Annaba
<b>Encadreur :</b>	Pr.	DJEBBAR	Yassine	U – Souk Ahras
<b>Co-Encadreur :</b>	Pr.	DJEMILI	Lakhdar	U - Badji Mokhtar – Annaba
<b>Examineur :</b>	Pr.	AMARCHI	Hocine	U - Badji Mokhtar – Annaba
<b>Examineur :</b>	Pr	SOUAG-GAMANE	Doudja	USTHB-ALGER
<b>Examineur :</b>	MCA	ZEGHADNIA	Lotfi	U – Souk Ahras

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à la mémoire*

*De Mon Père,*

*De Mon Frère Nacer-Eddine*

*De Mes Beaux Parents*

*Que Dieu les accueille en son vaste paradis*

*A ma Chère Mère, Source inépuisable de tendresse, de patience et  
de sacrifice, que Dieu la garde pour nous*

*A mon époux Mohamed qui a toujours tenu à m'apporter  
soutien indéfectible*

*A mes enfants : Chiraz, Abdelkrim et Rim*

*A tous mes frères et sœurs*

*A toute ma famille et ma belle famille*

*A tous mes collègues de travail*

# *Remerciements*

*Au terme de cette recherche, il m'est très agréable d'exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.*

*Je tiens à présenter mes humbles et sincères remerciements ainsi que toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude à mon directeur de Thèse, Professeur DJEBBAR Yassine, pour ses précieux conseils et pour l'intérêt qu'il a porté pour l'aboutissement de ce travail.*

*Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à mon Co-Directeur de Thèse, Monsieur LAKHDAR Djemili, Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba, pour l'attention soutenue qu'il m'a manifesté par ses encouragements.*

*Mes vifs gratitude vont également à Monsieur HAMMAR Yahia, Professeur à l'université d'Annaba d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.*

*Je tiens à adresser mes vifs remerciements aux membres du jury ; Madame SOUAG Doudja, Professeur l'USTHB Bab-Ezzouar Alger, Monsieur AMARCHI Hocine, Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba, Monsieur ZEGHADNIA Lotfi, Professeur à l'université Med Cherif Messaadia, Souk-Ahras.*

*J'adresse Mes grands remerciements à Monsieur REDJEL Bachir, Professeur à Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba, pour sa disponibilité.*

*Mes grands remerciements à Monsieur ABIDA Habib professeur à l'université de Sfax Tunis, pour ces conseils précieux.*

*Enfin, j'adresse mes vifs remerciements à Monsieur LOUACHERIA Fares, Professeur à l'université d'Annaba pour son dynamisme et ses grandes qualités humaines.*

# Résumé

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu dans le monde entier, touchant particulièrement les pays du Maghreb dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol. L'ampleur de ce phénomène est considérable, pour y remédier, il est nécessaire d'avoir des outils fiables qui puisse prédire le comportement à court, moyen et long terme du problème d'envasement.

La présente étude portant un nombre d'échantillons importants de barrages et retenues collinaires de l'Afrique du Nord plus précisément de l'Algérie, de la Tunisie et du Maroc. La méthodologie adoptée est très variée et vise à identifier les facteurs explicatifs de l'envasement et de produire une relation régionale et ce, grâce à l'utilisation combinée des outils statistiques paramétriques et non paramétriques. Une analyse en composantes principales a été entamée qui a permis d'analyser les caractéristiques morphométriques générales des bassins et leurs impacts sur l'érosion hydrique. L'utilisation de réseaux neuronaux avait pour objectif de trouver une relation entre le taux d'abrasion et les différents paramètres, telles que les variables morfo-métriques, d'occupation du sol et hydro pluviométriques. Pour l'étude des réponses des bassins versants aux débits liquides et solides, on a eu recours à une modélisation statistique, afin de développer un modèle spécifique à chaque bassin versant, évaluer le volume des sédiments transportés et déterminer sa dégradation spécifique. Les débits solides et liquides évoluent en général suivant un modèle en puissance. . Enfin on a utilisé le Système d'information Géographique (SIG) qui nous a aidé à cartographier les zones vulnérables à l'érosion selon l'équation universelle de pertes de sol USLE. A la fin on a proposé quelques recommandations afin de limiter les conséquences de ce phénomène naturel.

**Mots Clés** : Envasement, barrages, réseaux neuronaux, ACP, SIG et taux d'abrasion.

# الخلاصة

التجريف الهيدرولوجي هو ظاهرة معقدة منتشرة في جميع أنحاء العالم، لا سيما في البلدان المغاربية. حجم هذه الظاهرة هو كبير جداً، فمن الضروري أن يكون لدينا أدوات موثوقة التي يمكن التنبؤ بها لمشكلة التجريف على المدى القصير المتوسط والطويل. تشمل هذه الدراسة عدداً من العينات الكبيرة من السدود والاحواض المائية في شمال أفريقيا وتحديداً الجزائر وتونس والمغرب. المنهجية المتبعة متنوعة وتهدف إلى التعرف على العوامل التي تفسر ترسب المواد الصلبة، وذلك بفضل الجمع بين استخدام الأدوات الإحصائية المعلمية وغير المعلمية. تم البدء في تحليل المكونات الأساسية التي سمحت بتحليل الخصائص المورفومترية العامة للآحواض وتأثيراتها على التجريف الهيدرولوجي. ان الغرض من استخدام الشبكات العصبية هو إيجاد علاقة بين معدل التآكل والبارامترات المختلفة، مثل المتغيرات المرفومترية، النشاطات البشرية، وهطول الأمطار. لتحليل ظاهرة التعرية والتدفقات السائلة والصلبة، استخدمنا نموذج إحصائي لتطوير نموذج خاص لكل آحواض المياه، وتقدير حجم الرواسب المنقولة الى آحواض السدود. تتطور التدفقات الصلبة والسائلة عموماً وفقاً لنموذج القوة وأخيراً، استخدمنا نظام المعلومات الجغرافية (SIG)، الذي ساعدنا في تعيين المناطق المعرضة للتآكل وفقاً لمعادلة الكونية لتدهور التربة بصفة عامة. في النهاية قدمنا بعض التوصيات للحد من الظاهرة الطبيعية.

**SIG الكلمات المفتاحية:** السدود-الوحد - نظام المعلومات الجغرافية - كمية انجراف التربة - شبكة نورون - .

# Abstract

Water erosion is a complex phenomenon that is widespread around the world, particularly in the Maghreb countries, where it is seriously endangering water and soil potential. The magnitude of this phenomenon is considerable; to remedy this, it is necessary to have reliable tools that can predict the behavior in the short, medium and long term of the problem of siltation. The present study concerns a large number of samples of dams and reservoirs in North Africa, specifically in Algeria, Tunisia and Morocco. The adopted methodology is widely various and it aims to identify the explanatory factors of siltation and to produce a regional relationship with the combined use of parametric and non-parametric statistical tools. A principal components analysis was initiated and it allowed us to analyze the general morphometric characteristics of the basins and their impacts on water erosion. The purpose of using Neural networks was to find a link between the rate of abrasion and the various parameters, such as morphometric, land-use and rainfall variables. In order to study watershed responses to liquid and solid flows, we used a statistical modeling so that we would be able to develop a model specific to each watershed, assess the volume of transported sediments and determine its specific degradation. The solid and liquid flows generally evolve according to a power model. Finally we used the Geographic Information System (GIS), which helped us map areas vulnerable to erosion according to the USLE universal soil loss equation. At the end, we offered some recommendations.

**Keywords:** Dams, Neural networks, ACP, SIG and Specific degradation.

# Sommaire

Résumé .....	i
Résumé (Langue Arabe).....	ii
Abstract.....	iii
Sommaire .....	iv
Liste des Figures.....	ix
Liste des Tableaux.....	x
Liste des Photos.....	xi
Liste des Abreviations .....	xii
Introduction Générale .....	1
Partie I : Etude de l'envasement des barrages.....	5
Chapitre 1 : Erosion et transport solide.....	5
1.1. Introduction.....	5
1.2. L'érosion hydrique.....	6
1.3. Facteurs de l'érosion hydrique.....	7
1.3.1. Le climat.....	8
1.3.2. La végétation .....	8
1.3.3. L'utilisation des terres .....	8
1.3.4. La topographie .....	9
1.3.5. Les sols.....	10
1.3.6. La lithologie.....	11
1.3.7. Sensibilité des différents facteurs de l'érosion hydrique.....	11

1.4.	Les formes de l'érosion hydrique .....	12
1.4.1.	Érosion en nappe .....	12
1.4.2.	Érosion linéaire.....	12
1.4.2.1.	Érosion en griffes et rigoles .....	13
1.4.2.2.	Érosion par ravinement .....	13
1.5.	Quantification de l'érosion hydrique .....	14
1.5.1.	Mesures Directes .....	14
1.5.2.	Formules Empiriques.....	15
1.5.2.1.	Formule de Henin (1950) .....	15
1.5.2.2.	Formule de Grailovic (1960).....	16
1.5.2.3.	Formule de Fournier (1960) .....	17
1.5.2.4.	Formule de Tixeront (1960) .....	17
1.5.2.5.	Formule de la Sogreah (1969).....	17
1.5.2.6.	Formule de Wischmeier et Smith (1978) .....	18
1.5.2.7.	Formule de l'ANRH (1992) .....	18
1.6.	Le transport solide.....	19
1.6.1.	Le transport solide par charriage .....	20
1.6.2.	Le transport solide en suspension .....	20
1.6.3.	Caractéristiques physiques des sédiments .....	20
1.6.3.1.	Forme et dimension .....	20
1.6.3.2.	Caractéristiques granulométriques .....	21
1.6.3.3.	Compétence et capacité .....	21
1.6.4.	Arrangement des grains et pavage.....	22
1.7.	Facteurs influant Le transport solide.....	22
1.7.1.	Paramètres liés au fluide et à l'écoulement .....	23

## **Chapitre 2 : Présentation des données**

2.1.	Introduction .....	33
2.2.	Description des données de l'Algérie .....	33
2.2.1.	Localisation de la zone d'étude .....	33
2.2.2.	Caractéristiques hydrodynamiques des barrages étudiés.....	37
2.2.3.	Etude du relief .....	38
2.2.4.	Couverture végétale.....	41
2.2.5.	Evaluation des volumes des sédiments.....	42
2.3.	Description des données de la Tunisie.....	43
2.3.1.	Lacs collinaires.....	43
2.3.2.	Barrages en Tunisie .....	47



2.4. Description des données du Maroc .....	50
---	----

### **Chapitre 3 : Analyse paramétrique de l'érosion spécifique**

3.1. Introduction .....	55
3.2. Analyse en Composantes Principales .....	56
3.2.1. Principes de l'ACP .....	57
3.2.2. Interprétation des résultats de l'ACP .....	60
3.2.3. Représentation graphiques des résultats.....	60
3.3. Applicationde l'analyse en composantes principales .....	62
3.3.1. Première approche.....	62
3.3.1.1. Analyse et interpretation matrice corrélation .....	64
3.3.1.2. Analyse des variances sur les axes principaux .....	64
3.3.1.3. Analyse des variables .....	65
3.3.1.4. Analyse des individus.....	67
3.3.2. Deuxième approche.....	68
3.3.2.1. Analyse et interpretation matrice corrélation .....	69
3.3.2.2. Analyse des variables .....	71
3.3.2.3 Analyse des individus.....	72
3.4. Conclusion .....	75

### **Chapitre 4 : Analyse non paramétrique de l'érosion spécifique**

4.1. Introduction .....	76
4.2. Applications.....	77
4.3. Modèle d'un neurone.....	78
4.3.1. Fonctions de transfert .....	80
4.3.2. Architecture de réseau .....	81
4.3.3. Structure d'Interconnexion.....	81
4.3.4. Choix d'une bonne architecture RNA .....	82
4.3.5. Apprentissage .....	84
4.4. Méthodologie.....	86
4.4.1. Choix des variables.....	87
4.4.2. Architecture du modèle .....	88
4.4.3. Fonction d'activation.....	91
4.4.4. Choix des paramètres.....	92
4.5. Application du modèle.....	98
4.6. Comparaison de N.NE.VA avec différents modèles .....	99

4.7. Classification .....	102
4.8. Conclusion .....	104

## **Partie II : Approche cartographique de l'érosion spécifique**

### **Chapitre 5 : Modélisation du transport solide en suspensions**

5.1. Introduction.....	106
5.2. Présentation de la région d'étude .....	107
5.2.1. Bassin d'Oued Zeddine.....	107
5.2.2. Bassin d'Oued Harreza .....	108
5.3. Données et méthodes.....	109
5.3.1. Données Hydrologiques .....	109
5.3.2. Analyse des débits instantanés.....	110
5.3.3. Analyse des débits liquides de l'année (2000/2001).....	111
5.3.4. Analyse des débits solides de l'année2000-2001 .....	113
5.3.5. Analyse des débits solides de la période 1990-2013.....	114
5.3.6. Variation du débit liquide et solide pendant les crues .....	121
5.3.7. Flux des matières en suspension.....	122
5.3.8. Erosion hydrique spécifique .....	123
5.4. Conclusion .....	126

### **Chapitre 6 : Cartographie des zones sensibles à l'érosion**

6.1. Introduction.....	127
6.2. État de l'art – Choix d'un modèle.....	128
6.2.1. Les bases du modèle .....	128
6.2.2. Les principaux modèles hydrologiques de transfert des sédiments.....	129
6.2.3. Choix d'un modèle pour l'étude .....	132
6.2.4. Équation Universelle de Pertes en Sol (USLE).....	132
6.2.5. Expression de l'USLE .....	133
6.2.6. Définition des facteurs de l'équation.....	133
6.2.6.1. Facteur d'érosivité des précipitations (R) .....	133
6.2.6.2. Facteur d'érodibilité des sols (K).....	135
6.2.6.3. Facteur topographique (LS) .....	136
6.2.6.4. Facteur de la couverture végétale et pratiques culturales (C) .....	137
6.2.6.5. Facteur des pratiques de conservation du sol (P) .....	138
6.2.6.6. Distribution spatiale du risque d'érosion .....	139
6.3. Analyses et résultats.....	140
6.3.1. Facteur d'érosivité des précipitations (R).....	140
6.3.2. Facteur d'érodibilité des sols (K) .....	141

6.3.3.	Facteur topographique (LS) .....	141
6.3.4.	Facteur de la couverture végétale et pratiques culturales (C) .....	142
6.3.5.	Facteur des pratiques de conservation du sol (P) .....	143
6.3.6.	Evaluation des zones de production de sédiment.....	144
6.4.	Conclusion .....	146
<b>Conclusion générale et recommandations.....</b>		<b>148</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>		<b>152</b>
<b>Annexe</b>		

# Liste des Figures

<b>Figure 1.1 :</b>	Diagramme érosion, transport.....	7
<b>Figure 1. 2 :</b>	Différents types de transport solide en rivière.....	19
<b>Figure 1.3 :</b>	Critères de suspension.....	21
<b>Figure 2.1 :</b>	Localisation des bassins de l'Algérie.....	34
<b>Figure 2.2 :</b>	Courbe hypsométrique Mouilah et Sikkak.....	38
<b>Figure 2.3 :</b>	Courbe hypsométrique Sebdou et Isser.....	39
<b>Figure 2.4 :</b>	Courbe hypsométrique et répartition des classes Gargar.....	39
<b>Figure 2.5 :</b>	Courbe hypsométrique et répartition des classes S.M.Ben Aouda.....	40
<b>Figure 2.6 :</b>	Courbe hypsométrique et répartition des classes Bou-Hanifia.....	41
<b>Figure 2.7 :</b>	Localisation de la zone d'étude (lacs collinaires Tunisie).....	44
<b>Figure 2.8 :</b>	Localisation des bassins Barbara et Ghézala.....	46
<b>Figure 2.9 :</b>	Localisation des bassins El Azire et Siliana.....	49
<b>Figure 2.10 :</b>	Localisation Distribution géographique de la pluviométrie.....	50
<b>Figure 2.11 :</b>	Localisation des bassins Bouregreg et Rheraya.....	52
<b>Figure 2.12 :</b>	Localisation des bassins Ksob et Ourika.....	53
<b>Figure 2.13 :</b>	Localisation du bassin N'Fis.....	54
<b>Figure 3.1 :</b>	Loi de distribution .....	56
<b>Figure 3.3 :</b>	Projection des variables sur les axes 1 et 2 (1 <sup>ere</sup> Approche).....	66
<b>Figure 3.4 :</b>	Projection des variables sur les axes 1 et 3(1 <sup>ere</sup> Approche).....	67
<b>Figure 3.5 :</b>	Projection des individus sur les axes 1 et 2(1 <sup>ere</sup> Approche).....	68
<b>Figure 3.6 :</b>	Projection des variables sur les axes 1 et 2 (2 <sup>eme</sup> Approche).....	72
<b>Figure 3.7 :</b>	Projection des individus sur les axes 1 et 2 (2 <sup>eme</sup> Approche).....	74
<b>Figure 4.1 :</b>	Schéma d'un neurone biologique.....	78
<b>Figure 4.2 :</b>	Modèle d'un neurone artificiel.....	79
<b>Figure 4.3 :</b>	Comparaison neurone biologique et neurone artificiel.....	80
<b>Figure 4.4 :</b>	Fonction de transfert du neurone.....	80
<b>Figure 4.5 :</b>	Architecture choisie du réseau.....	81
<b>Figure 4.6 :</b>	Différents types de réseaux.....	82
<b>Figure 4.7 :</b>	Apprentissage supervisé.....	84
<b>Figure 4.8 :</b>	Apprentissage non supervisé.....	85
<b>Figure 4.9</b>	Comparaison érosion observées et simulées (Architecture 1).....	89
<b>Figure 4.10 :</b>	Comparaison érosion observées et simulées (Architecture 2).....	89
<b>Figure 4.11 :</b>	Comparaison érosion observées et simulées (Architecture 3).....	89

<b>Figure 4.12 :</b>	Comparaison érosion observées et simulées (Architecture 4).....	90
<b>Figure 4.13 :</b>	Erreur absolue entre les différents réseaux simulés.....	91
<b>Figure 4.14 :</b>	Architecture du réseau choisie pour le modèle d'érosion.....	91
<b>Figure 4.15 :</b>	Fonction d'activation sigmoïde.....	92
<b>Figure 4.16</b>	Comparaison érosion observées et simulées (1).....	93
<b>Figure 4.17 :</b>	Comparaison érosion observées et simulées (2).....	93
<b>Figure 4.18.</b>	Comparaison érosion observées et simulées (3).....	94
<b>Figure 4.19</b>	Moyenne absolue des écarts ,différents nombre d'itérations.....	95
<b>Figure 4.20</b>	Illustration de la validation croisée.....	96
<b>Figure 4.21 :</b>	Illustration du sur-apprentissage avec 60 000 itérations.....	96
<b>Figure 4.22 :</b>	Importance relative des variables d'entrée du réseau neurone.....	98
<b>Figure 4.23 :</b>	Effet de l'indice de pente sur le barrage Ain Dalia.....	99
<b>Figure 4.24 :</b>	Effet de la couverture végétale sur le barrage Bou Hanifia.....	99
<b>Figure 4.25 :</b>	Comparaison taux envasement avec différentes formules.....	101
<b>Figure 4.26 :</b>	Courbe de Brune.....	102
<b>Figure 4.27 :</b>	Classification des barrages Algériens.....	103
<b>Figure 5.1 :</b>	Situation des Oueds de la région d'étude.....	107
<b>Figure 5.2 :</b>	Situation des sous bassins de la région d'étude.....	108
<b>Figure 5.3 :</b>	Variation du débit liquide moyen annuel.....	110
<b>Figure 5.4 :</b>	Variation du débit solide moyen annuel.....	111
<b>Figure 5.5 :</b>	Evolution des valeurs moyennes journalières.....	112
<b>Figure 5.6 :</b>	Variation des débits liquides et solides Zeddine.....	113
<b>Figure 5.7 :</b>	Variation du débit solide pendant deux crues successives.....	114
<b>Figure 5.8 :</b>	Relation entre les débits instantanés liquides et solides.....	117
<b>Figure 5.9 :</b>	Variation sur les deux bassins .....	118
<b>Figure 5.10 :</b>	Relation entre les débits spécifiques saisonniers liquides et solides.....	120
<b>Figure 5.11 :</b>	Relation entre le débit liquide et solide.....	122
<b>Figure 5.12 :</b>	Variation de l'apport solide saisonnier.....	123
<b>Figure 5.13 :</b>	Distribution mensuelle de l'apport solide.....	123
<b>Figure 5.14 :</b>	Variation annuelle de l'érosion spécifique.....	124
<b>Figure 5.15 :</b>	Variation annuelle de l'érosion spécifique et de la pluie.....	125
<b>Figure 6.1 :</b>	Valeur du facteur de couvert végétal.....	138
<b>Figure 6.2 :</b>	Organigramme méthodologique de l'intégration du modèle USLE.....	139
<b>Figure 6.3 :</b>	Carte du facteur d'érosivité des précipitations (R) .....	140
<b>Figure 6.4 :</b>	Carte du facteur d'érodibilité des sols (K) .....	141
<b>Figure 6.5 :</b>	Carte du facteur topographique (LS) .....	142
<b>Figure 6.6 :</b>	Carte du facteur de la couverture végétale et pratiques culturales (C).....	143
<b>Figure 6.7 :</b>	Carte des pratiques de conservation des sols (P) .....	144
<b>Figure 6.8 :</b>	Carte du potentiel érosif de la zone d'étude.....	145

# Liste des Tableaux

<b>Tableau 2.1</b> : Caractéristiques physiques des bassins Algériens.....	35
<b>Tableau 2.2</b> : Paramètres hydro-morpho-métriques des bassins Algériens .....	37
<b>Tableau 2.3</b> : Bilan hydrologique des barrages Algériens .....	43
<b>Tableau 2.4</b> : Caractéristiques hydromorphométriques des bassins versants Tunisiens.....	44
<b>Tableau 2.5</b> : Mesures d'envasement des lacs collinaires .....	46
<b>Tableau 3.1</b> : Caractéristiques hydro- morphométriques des bassins.....	62
<b>Tableau 3.2</b> : Matrice de corrélations entre les variables.....	64
<b>Tableau 3.3</b> : Les valeurs propres des axes de l'analyse en composantes principale .....	65
<b>Tableau 3.4</b> : Contributions des variables retenues par l'ACP .....	66
<b>Tableau 3.5</b> : Contributions des individus exprimées en pourcentages .....	68
<b>Tableau 3.6</b> : Caractéristiques hydro-morphométriques des bassins versants de 14 barrages étudiés.....	69
<b>Tableau 3.7</b> : Matrice de corrélations entre les variables.....	70
<b>Tableau 3.8</b> : Les valeurs propres des axes de l'ACP.....	71
<b>Tableau 3.9</b> : Contributions des variables retenues pour la construction des axes de l'ACP.....	71
<b>Tableau 4.1</b> : Comparaison entre les différents paramètres d'apprentissage .....	94
<b>Tableau 4.2</b> : Spécificités du modèle N.NE.VA .....	97
<b>Tableau 4.3</b> : Comparaison des apports solides avec les différentes formules .....	100
<b>Tableau 4.4</b> : Valeurs des pourcentages de sédiments piégés .....	102
<b>Tableau 4.5</b> : Classification des barrages étudiés.....	104
<b>Tableau 5.1</b> : Caractéristiques morphométriques des deux bassins versants étudiés .....	108
<b>Tableau 5.2</b> : Moyennes mensuelles, maxima et minima du débit en m <sup>3</sup> /s .....	112
<b>Tableau 5.3</b> : Coefficients de la régression Qs-Q à l'échelle interannuel.....	115
<b>Tableau 5.4</b> : Coefficients de la régression Qs-Q à l'échelle annuel.....	11

<b>Tableau 5.5</b> : Coefficients de la régression Qs-Q à l'échelle mensuel.....	119
<b>Tableau 5.6</b> : Coefficients de la régression Qs-Q à l'échelle saisonnier .....	119
<b>Tableau 5.7</b> : Coefficients de la régression Qs-Q par saison humide et saison sèche .....	121
<b>Tableau 6.1</b> : Valeur de C pour différents types de couvert végétal (Sadiki et al., 2004).....	137
<b>Tableau 6.2</b> : Valeurs du facteur P (d'après Wischmeier & Smith, 1978).....	138

# Liste des Photos

<b>Photo1.1</b> : Sols nus très vulnérables .....	7
<b>Photo1.2</b> : Erosion en nappe .....	12
<b>Photo1.3</b> : Erosion en griffes er rigoles.....	13
<b>Photo1.4</b> : Réseau de ravines Bassin Ouizert.....	13
<b>Photo 1.5</b> : Signes avancés de ravinement Bassin Gargar .....	13
<b>Photo 1.6</b> : Sapement des berges Bassin Fergoug .....	14



## Abréviations

FAO	:	Food and Agriculture Organisation
CEMAGREF	:	Centre d'Etude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forets
USDA	:	United States Departement of Agriculture
UNEP	:	United Nations Environnement Program
ORSTOM	:	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer
ANRH	:	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
ANB	:	Agence Nationale des Barrages
ANBT	:	Agence Nationale des Barrages et Transferts
ACP	:	Analyses en Composantes Principales
SIG	:	Système d'Informations Géographiques
DGACTA	:	Direction Générale de l'Aménagement et de Conservation des Terres Agricoles (Tunisie)
IRD	:	Institut de Recherche pour le Développement
N.NE.VA	:	Neural Network Vase
PAP	:	Plan d'Aménagement de Protection
INRF	:	Institut National de Recherche Forestière
CES	:	Conservation des Eaux et des Sols
USLE_	:	Universal Soil Loss Equation
SDR	:	Sediment Delivery Ratio
SHE	:	Système Hydrologique Européen
SWAT	:	Soil and Water Assessment Tool
MHYDAS	:	Modélisation HYdrologique Distribuée des AgroSystèmes

# **Introduction**

## **Générale**

## Introduction générale

L'érosion hydrique est l'une des causes majeures de la dégradation des sols dans le monde entier. 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, diminuant sa productivité et dégradant la qualité des eaux de surface

Les particules du sol qui rejoignent les oueds et les retenues sous l'effet de l'érosion contribuent, d'une part, à rehausser le lit des cours d'eau entraînant un risque plus élevé d'inondation et, d'autre part, à augmenter la turbidité des eaux et par conséquent le débit solide, ce qui affecte alors les infrastructures en aval telles que les réservoirs d'eau, les canaux d'irrigation, les stations de traitement d'eau potable et les centrales hydroélectriques. Ce dernier problème touche l'Afrique du Nord et plus 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). Les barrages algériens sont de ce fait, de véritables fosses à sédiments, ce qui porte leur capacité de piégeage à plus de 98% (Agence Nationale des Barrages et Transferts (A.N.B.T, 2003). L'intensité de l'envasement est mise en évidence par l'importance des apports solides des cours d'eaux qui varient de quelques centaines de milliers, à quelques millions de m<sup>3</sup>/an. Les apports solides les plus élevés sont observés aux barrages suivants : Gargar (6,10 hm<sup>3</sup>/an), S.M.B.Aouda (3,25 hm<sup>3</sup>/an) et Fergoug (1,50 hm<sup>3</sup>/an). L'état détaillé de l'envasement des barrages donne une idée sur l'ampleur du phénomène suivant les régions. A ce titre, la réduction des capacités, dépasse les 50% pour les barrages : Fergoug, Beni.Amrane et Foum.El.Gueiss, et les 30% pour les barrages : Bou.Hanifia, Ghrib, Oued.Fodha, et Boughzoul (A.N.B.T, 2003). Cette réduction de capacité a entraîné une diminution des volumes régularisés et compromet donc la satisfaction

des besoins. Il s'avère donc impératif d'utiliser des moyens de lutte adéquats pour allonger la durée de vie des barrages en exploitation.

La Tunisie voit disparaître chaque année, une partie de ses bonnes terres, la fertilité de ses sols étant elle-même en régression. Par son ampleur et la gravité de ses conséquences, l'érosion hydrique est un problème dont la résolution est une nécessité vitale pour le pays. Environ 3 millions d'ha sont soumis aux processus d'érosion hydrique et éolienne dont 1 million d'ha sont menacés par une érosion hydrique particulièrement intense. La perte irréversible des sols cultivables par l'érosion hydrique atteint les 10 000 ha/an (Gaddas et Mhiri, 2002).

À cet égard, la stratégie du pays en matière de conservation des eaux et des sols (CES) vise surtout la réduction des pertes des terres agricoles, estimée annuellement à 20 000 ha, dont 10 000 ha sont associés à l'érosion hydrique, à réduire le colmatage et l'envasement des ouvrages hydrauliques qui entraînent une perte annuelle de stockage de 28 millions de m<sup>3</sup> d'eau et à augmenter la recharge des nappes par la mobilisation des eaux de surface (DGACTA, 2003).

Le Maroc compte parmi l'un des pays les plus exposés et menacés par l'érosion, ce qui entraîne un envasement moyen annuel des retenues des barrages à raison de 125 millions m<sup>3</sup> (Remini W. et Remini B., 2003) qui est responsable de la réduction de la capacité des réservoirs de 0,5% par année qui menace la sécurité alimentaire (Lahlou, 1996). L'érosion des sols se manifeste essentiellement dans les montagnes du Rif où la dégradation spécifique dépasse souvent 2 000 (t/km<sup>2</sup>/an) suite à la surexploitation des ressources et à la réduction du couvert végétal (Ministère de l'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole, 1995). Cette situation prend des proportions importantes et se traduit dans les ouvrages hydrauliques au niveau des bassins du Rif occidental, les plus touchés par le phénomène d'envasement. C'est le cas de barrage « Ali thelat » dans le bassin versant de Moulay Bouchta, dont la capacité de retenue était de 30 Million m<sup>3</sup>. Ce barrage, mis en service en 1935, se trouve complètement comblé avant la fin de sa durée de vie. Ces dernières années, dans le cadre du plan Maroc vert et du plan d'aménagement des bassins versants, qui aspirent à une agriculture durable et un développement soutenu, l'érosion des sols

est de plus en plus reconnue comme un danger plus grave dans les zones de montagne et les terrains agricoles.

L'érosion hydrique des sols est donc à l'origine de nombreux problèmes environnementaux et socio-économiques, Il est donc impérativement primordial d'établir une évaluation détaillée de ce processus avant tout aménagement. Afin d'évaluer spatialement et quantitativement les effets de l'érosion des sols pour faire face à ce phénomène et proposer les meilleures stratégies de lutte, de conservation et d'aménagement des terrains, on a fait appel à des modèles paramétriques et non paramétriques.

Au plan méthodologique, cette problématique de l'envasement des barrages peut être synthétisée dans le synopsis suivant :

Dans la première partie , nous avons traité des barrages de trois pays de l'Afrique du Nord, à savoir l'Algérie , la Tunisie et le Maroc sur lesquels on a appliqué des tests paramétriques et non paramétriques pour l'estimation du taux de sédimentation des barrages, cette partie se compose de quatre chapitres :

- Chapitre 1 : Synthèse bibliographique sur l'érosion et le transport solide

On a essayé de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans le phénomène d'érosion et de transport solide, à savoir les facteurs orographiques et morphologiques, lithologiques, climatiques et biogéographiques. Il décrit aussi les diverses mesures antiérosifs qui visent à lutter adéquatement contre l'envasement des barrages, préserver leurs capacités utile et assurer la disponibilité future de l'eau. Ainsi, une synthèse bibliographique, a été introduite dans ce chapitre, qui expose le résultat de la littérature Concernant ce phénomène.

- Chapitre 2 : Presentation des données

Pour permettre d'évaluer et d'identifier la nature et l'ampleur des processus d'érosion en cours, il est indispensable de réaliser une revue exhaustive des documents et études existantes, de procéder à une collecte de données nécessaires à la description des milieux propres à chaque bassin versant.

- Chapitre 3 : Analyse paramétrique de l'érosion spécifique

On a opté pour une analyse en composantes principales (ACP) qui permet d'analyser les caractéristiques morphométriques générales des bassins et leurs impacts sur l'érosion

hydrique. Il s'agit d'analyser les corrélations entre les variables et de déterminer les différentes affinités et distinctions notées entre les bassins et d'indiquer la relation entre les facteurs physiques.

- Chapitre 4 : Analyse non paramétrique de l'érosion spécifique

Dans ce chapitre on a utilisé des outils statistiques non paramétriques basés sur la méthode des réseaux de neurones qui a pour objectif de chercher une relation entre le taux d'abrasion et les différentes variables quantifiables, telles que les variables morpho-métriques (surface, indice de compacité et pente) d'occupation du sol (couverture végétale) et hydro pluviométriques (pluie, coefficient d'écoulement et densité de drainage). Les variables redondantes ont été éliminées afin de conserver le maximum d'information pour notre analyse.

Dans la deuxième partie on s'est basé sur une étude comparative du transport solide en suspension de deux oueds de l'Algérie orientale drainant respectivement les sous bassins-versants Zeddine et Harreza et qui appartiennent tous deux au bassin hydrographique du Haut Cheliff. Cette partie est constituée de deux chapitres :

- Chapitre 5 : Modélisation du transport solide en suspension

Cette étude a été menée en vue de quantifier le transport de la charge en suspension lors d'événements de crue uniques, de cerner l'impact des ouvrages anthropiques sur le bilan sédimentaire, d'estimer le remplissage des barrages par les matières fines et de suivre les variations saisonnières et spatiales de la concentration des matières en suspension dans des contextes morphoclimatiques variés.

- Chapitre 6 : Cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique

Afin d'évaluer spatialement et quantitativement les effets de l'érosion des sols dans les deux sous bassins pour faire face à ce phénomène d'érosion et proposer les meilleures stratégies de lutte, de conservation et d'aménagement des terrains ; on a fait appel à l'équation universelle de perte en sol USLE, couplée à un système d'information géographique (SIG).

# **Partie I**

**Etude de l'envasement des  
barrages par les méthodes  
paramétriques et non  
paramétriques**

# **Chapitre 1**

## Synthèse bibliographique érosion et transport solide



# Chapitre 1

## Erosion et transport solide

### 1.1. Introduction

Le Maghreb est l'une des régions les plus vulnérables au monde à l'érosion des sols ; en raison de son climat semi-aride, de la présence de relief abrupt et de la pauvreté de la végétation. L'ampleur de l'alluvionnement et l'exhaussement du fond des barrages par dépôts successifs des sédiments ramenés par les cours d'eau maghrébins, ont suscité l'intérêt d'un grand nombre de chercheurs qui ont tenté d'expliquer les mécanismes complexes du transport solide et de quantifier les volumes des sédiments transportés. Dans ce contexte, on notera les travaux de Tixeront (1960); Heusch (1982); Milliman et Meade (1983); Sogreah (1983); Walling (1984); Lahlou (1990) et plus récemment Probst et Amiotte (1992) qui ont tenté d'expliquer l'érosion mécanique et de déterminer les dégradations spécifiques des bassins versants de ces régions.

D'autre part Ghorbel et Claude (1977) ; Rais et Abidi (1989) ; Albergel et al. (1998) ; Snoussi et al. (1990), Merzouki (1992) ; Moukhchane et al. (1998) ; Demmak (1982); Bourouba (1996,1998) ; Touaibia (2000); Terfous et al. (2001) ; Ghnim (2001) ; Megnounif et al. (2000), ont présenté en conclusion de leurs travaux des informations significatives sur le flux des matières transportées par les cours d'eau de quelques bassins versants Tunisiens, Marocains et Algériens. Le volume de matériaux qui se déposent chaque année dans les retenues des barrages algériens sont évalués, en moyenne à 32 millions de m<sup>3</sup> par an (Remini et al., 2005), des 114 barrages en exploitation (Mekerta et al., 2008).

## 1.2. L'érosion hydrique

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays de la Méditerranée, qui continue à prendre des proportions considérables en particulier sur les pentes à cause de la nature torrentielle des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains (roches tendres, sols fragiles, pentes raides et couvert végétal souvent dégradé), du surpâturage et de l'impact défavorable des activités humaines: déforestation, incendies, mauvaise conduite des terrains agricoles, urbanisme chaotique, exploitation des carrières, etc.

Selon les études de la FAO (1990), la situation continue à se détériorer : ainsi, sont affectées par l'érosion hydrique : en Grèce 35 % des terres, au Maroc 40 % et en Turquie 50 % (Celic et al., 1996). En Tunisie, 45 % de la superficie du pays est menacée par l'érosion (Chevalier et al., 199; Boussema, 1996) et en Algérie, 45 % des zones telliennes, soit 12 millions d'hectares (Chebbani et al., 1999). Ces chiffres dépassent ce que la pédogenèse peut produire dans les conditions climatiques actuelles. En effet, les seuils de tolérance de l'érosion sous un climat humide tempéré varient entre 2,5 tonnes/ha/an pour un sol superficiel et 12,5 tonnes/ha/an pour un sol profond, de texture équilibrée et moyennement perméable (USDA, 1951; Klingebiel et Montgomery, 1996). Mais cette tolérance doit être moindre dans les pays méditerranéens car :

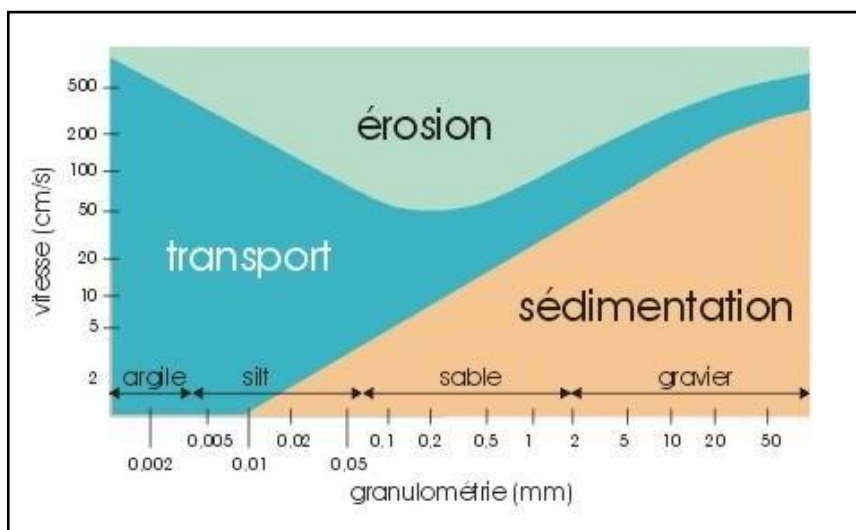
- La pédogenèse est beaucoup plus lente sous climat à aridité estivale accentuée et à saison sèche très longue,
- les sols sont le plus souvent superficiels et les taux d'altération sont relativement bas,
- Les terres cultivables sont peu étendues et diminuent chaque année en étant urbanisées.

L'érosion hydrique affecte les terres lors des orages exceptionnels (Photo 1.1), des coulées boueuses et des inondations. Les dégâts observés se traduisent par une baisse des rendements des cultures, un atterrissement des sédiments érodés dans les zones urbaines, une réduction de la superficie des sols agricoles, une accélération du taux d'envasement des réservoirs réduisant ainsi la quantité et la qualité des eaux disponibles, une aggravation des coulées boueuses qui mettent en péril les infrastructures humaines et une désertification du milieu naturel (FAO, 1980).



**Photo 1.1** : Sols nus très vulnérables à l'érosion  
Bassin Bou-Hanifia (Source : Tescult)

Le diagramme de Hjulström (Figure 1.1) permet de connaître l'activité d'une particule détritique en fonction de la vitesse du courant dans l'eau (mer, cours d'eau) où elle se trouve, et en fonction de sa taille. On peut donc définir l'activité des particules, à savoir s'il y a érosion, transport ou dépôt, en fonction de leur taille et de la vitesse du courant.



**Figure 1.1** : Diagramme érosion, transport, sédimentation.  
Hjulstrom (1935).

### 1.3. Facteurs de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique qui affecte les sols méditerranéens est fonction de multiples facteurs qui, selon Morgan (1986), semblent être les mêmes partout dans le monde.

### 1.3.1. Le climat

En Algérie sur des parcelles peu couvertes, pendant les orages d'automne, le ruissellement journalier maximal a dépassé 19 à 32 % et jusqu'à 70-85 % des averses importantes en hiver, sur des sols détrempeés (Arabi et Roose, 1989). Durant le reste de l'année sévit une période sèche. Ces averses de fréquence rare tombant sur des sols déjà saturés et de faible épaisseur sont à l'origine de la formation des ravines, de l'apparition des mouvements de masse et d'inondations. Lors d'averses exceptionnelles, le ruissellement des sols limoneux encroûtés en permanence peut augmenter de 15 % à 60-90 %. Les ravines acquièrent des tailles de l'ordre du mètre et les mouvements de masse sont importants lorsque les roches argileuses affleurent ; ils se produisent fréquemment dans les zones caractérisées par les tremblements de terre, failles ou surélévèrent très répandu dans le bassin méditerranéen (Almeida et al., 1991; Khawlie, 2000). Ces inondations sont caractérisées par des charges de sédiments qui peuvent atteindre 40 % du volume du ruissellement (Conesa, 1990).

### 1.3.2. La végétation

L'érosion des sols est fortement contrôlée par la couverture végétale dont dépend la production de la biomasse. Les sols sous forêts bien entretenues sont considérés comme non sensibles à l'érosion hydrique, car la litière et les végétations basses favorisent l'infiltration (Roose, 1994). Le sol soumis au pâturage intensif se tasse, devient plus compact, sa perméabilité diminue et le ruissellement de l'eau s'accroît ce qui entraîne des pertes de terre considérables et aboutit à la formation de profondes ravines lorsqu'il atteint des terres cultivées.

### 1.3.3. L'utilisation des terres

L'intensité de l'érosion hydrique des sols est affectée significativement par les activités humaines qui augmentent ou diminuent les pertes en terre. Les incendies répétés et le déboisement illégal détériorent les forêts existantes. Ceci favorise fortement le ruissellement et aboutit à une forte érosion par la suite. Mais après les incendies, la colonisation par les plantes réduit l'érosion des sols. La mise en culture d'un sol le rend sensible à l'érosion, cela dépend de la nature de la plante cultivée et des techniques culturales. Sous verger, l'érosion est intense comme un sol nu (Roose, 1993) ; sous maïs planté en terrasses, elle est moindre que s'il est planté en ligne dans le sens de la plus

grande pente (Nahal, 1984); et pour des cultures peu denses, elle est plus intense que pour des cultures denses (Browing, 1948 cité par Nahal, 1975).

L'alternance culture-légumineuses atténue l'érosion du sol d'une manière spectaculaire ; ainsi en Algérie, en associant du blé à des fèves, la perte en terres diminue de 1,5 tonnes/ha (sur sol nu travaillé) à 0,3 tonnes/ha (Arabi et Roose, 1989). Les semis très battus ou chantiers de récolte très roulés (rugosité nulle), accroissent les risques d'érosion, au contraire, du déchaumage avec résidus abondants ou labour (rugosité forte). Les résidus de récolte jouent le rôle d'éponge et créent une rugosité qui divise, ralentit et étale les écoulements dans le temps. Des recouvrements de 15 à 25 % de résidus de récolte diminuent l'érosion de 60 à 75 % par rapport au sol nu (Lattanzi et al., 1974).

Le paillage est pratiquement inexistant dans la plupart des pays méditerranéens car toute la biomasse disponible est utilisée par le bétail. Par le développement d'une couverture végétale permanente, l'abandon des terres cultivées aboutit à réduire les taux d'érosion en rigoles mais par contre l'érosion par ravinement peut devenir très importante quand les terres sont pâturées régulièrement (Quine et al., 1994; Poesen et al., 1998a). L'extension des cultures sous serre et les travaux de préparation du sol nécessaires pour leur construction provoquent des taux de dénudation locaux importants et soumettent les sols à l'érosion. Une fois installées, les serres peuvent concentrer le ruissellement d'une manière spectaculaire (Bou Kheir, 1998).

L'urbanisation peut accroître sensiblement les risques d'érosion : le CEMAGREF (1986) donne des valeurs moyennes des coefficients de ruissellement : 0,05 pour les espaces boisés ; 0,10 pour les terres cultivées ; 0,35 pour les habitations individuelles denses ; 0,50 pour les habitations collectives ; 0,60 pour les zones industrielles. Les terrasses dans les régions montagneuses ne protègent le sol contre l'érosion que si elles sont bien entretenues : en Algérie, entre 1945 et 1985, plus de 50 % d'entre elles ont été dégradées par manque d'entretien (Roose, 1999).

#### **1.3.4. La topographie**

L'eau de pluie cause une érosion grave sur les pentes fortes. En Algérie les ruissellements moyen et maximal diminuent lorsque la pente augmente (Arabi et Roose, 1992). L'exposition des pentes peut avoir une importance, car sur celles exposées au sud qui ont une faible couverture végétale, l'érosion est très élevée. Sur les pentes

concaves, l'érosion est la moins intense et sur les pentes convexes, la perte de terre est plus grande que sur les pentes rectilignes (Roose, 1999). La longueur de la pente est moins importante que son gradient et sa forme, mais à précipitation égale, il s'accumule sur une pente plus longue un plus grand volume d'eau et le temps d'absorption par le sol est plus grand sur les parcelles longues que sur les parcelles courtes.

### 1.3.5. Les sols

Les caractéristiques des sols qui permettent de déterminer le degré de sensibilité à l'érosion hydrique sont les suivantes : la profondeur, la porosité, la granulométrie, la teneur en matière organique, la nature minéralogique des argiles, l'infiltrabilité et la cohésion. La résistance à l'érosion hydrique est plus faible pour les sols superficiels que pour les sols profonds (Ryan, 1982) car dès que le sol peu épais est saturé par la pluie, il y'a glissement de terrains, même sur pente très faible. Plus de 60 % Dans les sols méditerranéens comportent des fragments de roches dans l'horizon superficiel (Poesen, 1990). Ces fragments réduisent l'érodibilité: protection contre l'impact des gouttes de pluie et diminution de la vitesse du ruissellement réduisant sa capacité de détachement et de transport. La suppression de cette couverture caillouteuse peut augmenter l'érosion de 1/3 à 3 (Nyssen et al., 1999).

Les sols contenant des fragments de roches dont la taille est supérieure à 40 mm sont plus sensibles à l'érosion que les sols graveleux contenant des fragments de roches de 2 à 40 mm (Poesen et al., 1994). La position, la taille et le taux de couverture des éléments grossiers augmentent le volume total d'infiltration. La matière organique réduit les risques d'érosion à court terme : maintenue en surface, elle protège le sol de l'énergie des pluies et du ruissellement, mais enfouie, elle ne réduit nettement ni le ruissellement ni l'érosion (Roose, 1994; Barthé et al., 1998).

En région méditerranéenne, les sols riches en argiles saturés en calcium sont résistants à la battance mais sensibles au ravinement. La stabilité du sol augmente si le sol reste faiblement humide pendant plusieurs jours et inversement diminue lorsqu'il reste proche de la saturation. Selon Heusch (1970), l'érosion n'est proportionnelle ni à la hauteur des pluies, ni à leur énergie cinétique, mais est fonction de la somme des énergies érosives dont l'énergie des eaux ruisselantes est la principale composante.

### 1.3.6. La lithologie

Les divers types de roches et leurs structures donnent une indication précieuse sur la capacité d'infiltration des zones occupées par les roches et par les sols et en conséquence sur la quantité de sol susceptible d'être érodée. Plusieurs paramètres déterminent la capacité d'infiltration : la lithologie, les failles, les linéaments, le karst et la densité de drainage. Une faible infiltration des roches affleurantes indique qu'une grande quantité d'eau ruisselle, par conséquent, une forte quantité de terre peut être emportée. En Algérie, Demmak (1982,1984) a montré que les transports solides d'un bassin versant dépendaient de sa surface en roches de différents types (argileuses, marneuses, schisteuses, etc.)

### 1.3.7. Sensibilité des différents facteurs de l'érosion hydrique

Pour la détermination de la quantité de la terre érodée, les différents facteurs qui commandent l'érosion hydrique des sols ne sont pas d'égale importance vis-à-vis de la détermination de la quantité de terre érodée (Lenthe et Krone, 1981; Morgan, 1986).

Dans l'équation universelle de perte en terre, Wischmeier et Smith (1978) ont attribué une grande importance à l'indice topographique LS qui varie de 0,1 à plus que 20, tandis que les autres facteurs K (érodibilité du sol), C (occupation et utilisation des terres) et P (pratiques de conservation) apparaissent de moindre importance : variant chacun de 0 à 1. Pour Roose et al. (1993), la pente n'est pas le facteur essentiel du risque érosif : les risques d'érosion en nappe sont très faibles malgré des versants très raides (10 à 45%) et le ruissellement diminue lorsque la pente augmente car les pellicules de battance sont incisées par l'eau ce qui facilite son infiltration. Ils indiquent que les pentes en région méditerranéenne sont liées à la lithologie et au type du sol; sur les roches dures (grès, calcaire durs) et pentes fortes, les sols résistent à l'érosion et les transports solides sont faibles tandis que sur les roches tendres (argiles, marnes) sur pentes plus douces, les sols sont fragiles.

La pente a donc un impact très variable selon la région où on se situe. Selon Poesen et al. (1996b), c'est la stabilité des agrégats des sols qui a le plus grand impact sur l'érodabilité des sols au niveau du millimètre ou du mètre, tandis que c'est le développement des croûtes qui a le poids le plus grand au niveau du mètre ou de la centaine de mètres.

## 1.4. Les formes de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un processus majeur de dégradation de terrains en zone méditerranéenne, qui constitue une des clés de la désertification (UNEP, 1994). Il existe plusieurs formes d'érosion hydrique :

### 1.4.1. Érosion en nappe

Elle se produit lorsque l'écoulement et l'érosion se font sur toute la surface du sol (Photo 1.2), ce qui provoque une usure homogène non perceptible dans la majorité des cas. Quantitativement, l'érosion en nappe est très modeste. En Algérie, les chercheurs de l'INRF et de l'OROSTOM ont évalué les pertes en terres par ce type d'érosion de 0,10 à 20 t/ha/an (Chebbani et al., 1999). Ce type d'érosion entraîne des conséquences morphologiques et pédologiques fâcheuses suite à un décapage de l'horizon superficiel diminuant insidieusement sa réserve en éléments fertilisants et un entraînement préférentiel des particules les plus fines, de la matière organique et du carbonate de calcium.



**Photo 1.2 :** Érosion en nappe

(Photo Roose)

On observe l'évolution de l'érosion en nappe au sommet, en rigoles et en ravines sur les fortes pentes tandis que l'oued attaque le pied de la colline.

### 1.4.2. Érosion linéaire

Elle se manifeste lorsque la concentration des eaux conduit à la formation de chenaux de dimension croissante : griffes (quelques centimètres de profondeur), rigoles (incision dans la couche labourée), ravines (incision dépassant la couche labourée).



### 1.4.2.1. Érosion en griffes et rigoles

Elle se produit lorsque l'écoulement d'eau se concentre et choisit son passage. Dès qu'une griffe s'établit, l'eau de ruissellement tend à se réunir, et plus elle se creuse plus il y a appel d'eau dans la rigole (Photo 1.3). Ainsi le phénomène de creusement s'accélère de lui-même. De point de vue quantitatif, ce type d'érosion reste dans les mêmes proportions que l'érosion en nappe.



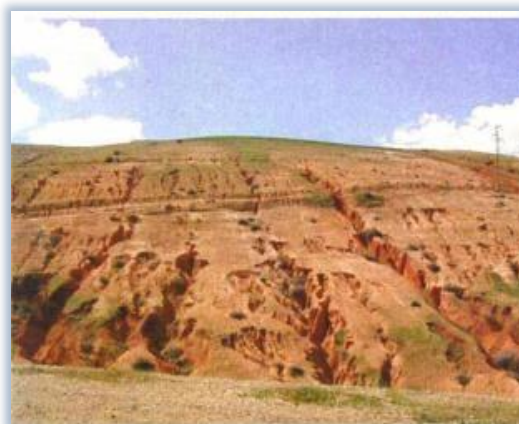
**Photo 1.3** : Érosion en griffes et rigoles  
(Source : Roose)

### 1.4.2.2. Érosion par ravinement

Les ravines suivent la ligne de plus grande pente des versants (Photos 1.4 et 1.5). Puisque le ruissellement provenant des versant peut atteindre 50 à 80% durant les averses exceptionnelles tombant sur les terres battues ou compactées, l'essentiel du transport solide provient des ravines et des oueds (Heush, 1970 ; Arabi et Roose, 1992).

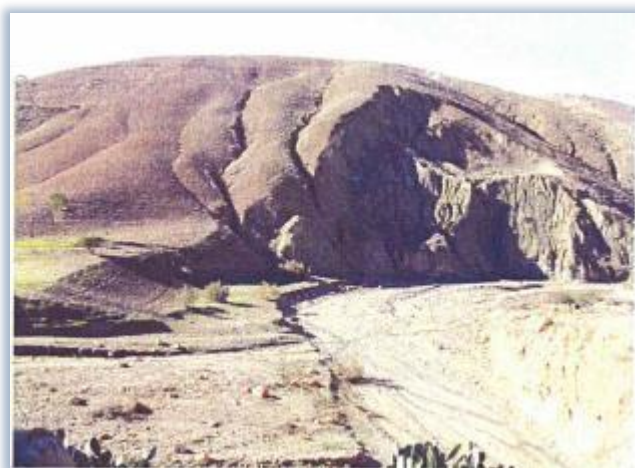


**Photo 1.4** : Réseau de ravines dans un champ, Bassin Ouizert  
(Source : Tescult)



**Photo 1.5** : Signes avancés de ravinement, Bassin Gargar  
(Source : Tescult)

Lorsque le sol est peu perméable, saturé et peu couvert, le ruissellement est abondant. Ce dernier creuse des ravines et augmente les pointes de crue des oueds, ce qui favorise le sapement des berges (Photo 1.6) et les glissements de terrain, et par conséquent l'envasement des barrages, la destruction des infrastructures et la dégradation des terres. En Algérie, l'érosion ravinant a déplacé 90 à 300 t/ha/an ce qui correspond à une vitesse d'altération des versants de 8 à 17 mm/an (Chebbani et al., 1999).



**Photo 1.6 :** Sapement des berges Bassin Fergoug  
(Source : Tescult)

## 1.5. Quantification de l'érosion hydrique

La quantification du transport solide peut s'opérer de deux manières, à savoir :  
Les mesures directes –Les équations universelles.

### 1.5.1. Mesures Directes

Elles sont basées sur les valeurs instantanées des débits liquides  $Q_l$  ( $m^3/s$ ) et celles des concentrations des sédiments en suspension  $C$  ( $g/l$ ) correspondantes. La fourniture de ses données est du ressort de l'A.N.R.H. Ces mesures sont effectuées au niveau de la station hydrométrique de contrôle du bassin versant. Le débit liquide est calculé après lecture de la hauteur d'eau sur une échelle limnométrique posée sur la rive de l'Oued et à l'aide de la courbe de tarage adéquate (régulièrement contrôlée et actualisée). La charge de la matière en suspension obtenue à partir d'échantillons d'eau prélevés dans la section mouillée de l'Oued au moyen d'un conteneur de (50 cl). La boue recueillie sur un papier filtre est pesée après séchage à l'étuve à  $105^{\circ}C$  pendant 30

minutes. On détermine ensuite la charge correspondante à un litre d'eau prélevé. Ce qui établit la concentration donnée en (g/l).

La fréquence des prélèvements effectuée dépend de la variation de la hauteur d'eau. Cette fréquence s'effectue chaque heure en période de crue. Dans le cas où la crue est importante c.-à-d., la variation de la hauteur d'eau est rapide, la fréquence de prélèvement augmente jusqu'à trente (30) minutes. En effet La règle adoptée est de procéder à un ou deux prélèvements par 24 heures en période normale et avec une fréquence plus grande (observation toutes les 15 ou 30 minutes par exemple) lors des crues (Fournier, 1960). Le calcul du débit solide en suspension est donné par la formule empirique suivante :

$$Q_{ss} = C \cdot Q_l \quad (1.1)$$

Avec

$Q_{ss}$  : Débit solide en suspension (kg/s)

$Q_l$  : Débit liquide (m<sup>3</sup>/s)

$C$  : Concentration ou turbidité (g/l).

Toutefois, il est à noter le caractère approché de cette méthode dans le calcul de l'apport solide en suspension car la fiabilité des prélèvements d'échantillons à travers la section du cours d'eau est mise en cause. En effet, la concentration en sédiments varie le long d'une section de mesure, du fond du cours d'eau vers la surface et d'un instant à l'autre (Molinier 1979 ; Olivry, 1989).

## 1.5.2. Formules Empiriques

Plusieurs formules ont été conçues pour la quantification de l'érosion hydrique. Nous ne citerons que celles qui impliquent les paramètres physiques représentatifs (morphologie du bassin, pluies, débit liquide, végétation).

### 1.5.2.1. Formule de Henin (1950)

Cette formule symbolise la relation existante entre l'érosion et les facteurs susceptibles de la favoriser ou de la limiter. La quantification de l'érosion spécifique "Es" est donnée par la formule :

$$Es = \frac{IpI_s}{K.Ve} \quad (1.2)$$

Avec :

$Ip$  : Intensité des précipitations

I : Pente du bassin versant

S : Susceptibilité des sols

K : Perméabilité

Ve : Végétation.

Les facteurs S, K et Ve limitent l'érosion et en plus, les facteurs S et Ve semblent les plus difficiles à quantifier.

### 1.5.2.2. Formule de Grivilovic (1960)

Grivilovic a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnelle à la température, à la pluie et à un coefficient d'érosion, l'équation est donnée par l'expression :

$$Es = 3.14TPo\sqrt{Z^3} \quad (1.3)$$

Avec :

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

T : coefficient de température

$$= \sqrt{t_0} \frac{-0.1}{10} \quad (1.4)$$

Où :

t<sub>0</sub> : température moyenne annuelle (°C)

P<sub>0</sub> : pluie annuelle (mm)

Z : coefficient d'érosion, tel que :

$$Z = y [x.a](\delta + \sqrt{Imoy}) \quad (1.5)$$

Avec :

y : valeur du coefficient de la résistance du sol dû à l'érosion. Il dépend de la roche mère, le type du sol et du climat,

[x.a] : Coefficient de régularisation du bassin versant, se rapportant à la protection des sols, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles. Il est aussi tabulé.

δ : équivalent numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant,

Imoy : indice de pente moyenne du bassin versant.

### 1.5.2.3. Formule de Fournier (1960)

Fourier a développé un modèle pour prédire les apports solides à l'exutoire d'un cours d'eau quel que soit son emplacement géographique en utilisant les données de 104 bassins versants provenant de différentes régions du globe. La formule est la suivante :

$$Ass = \left( \frac{1}{36} \right) \left( \frac{P}{P_{am}} \right)^2 (2.65) \left( \frac{h}{S} \right)^2 (0.46) \quad (1.6)$$

Avec :

- Ass : apport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)
- P<sub>m</sub> : précipitations moyennes mensuelles du mois le plus pluvieux (mm)
- P<sub>am</sub> : précipitations annuelles (mm)
- H : dénivelée moyenne (m)
- S : Superficie du bassin (km<sup>2</sup>)

### 1.5.2.4. Formule de Tixeront (1960)

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

- pour les bassins tunisiens  $Ass = 354 E^{0.15} \quad (1.7.a)$
- pour la région est algérien  $Ass = 92 E^{0.15} \quad (1.7.b)$
- pour la région centre algérien  $Ass = 200 E \quad (1.7.c)$

avec

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

E : Ecoulement annuel (mm).

### 1.5.2.5. Formule de la Sogreah (1969)

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

- Perméabilité élevée  $Ass = 8.5 E^{0.15} \quad (1.8.a)$
- Perméabilité moyenne à élevée  $Ass = 75 E^{0.15} \quad (1.8.b)$
- Perméabilité faible à moyenne  $Ass = 350 E^{0.15} \quad (1.8.c)$
- Perméabilité faible  $Ass = 1400 E^{0.15} \quad (1.8.d)$

- Imperméable  $Ass = 3200 E^{0.15}$  (1.8.e)

Avec

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

E : Ecoulement annuel (mm)

#### 1.5.2.6. Formule de Wischmeier et Smith (1978)

La moyenne annuelle des pertes de terres par hectare (A) est déterminée à partir de six facteurs :

$$Ps = E_p \times E_s \times F_{lp} \times F_p \times F_{am} \times F_v \quad (1.9)$$

Avec :

Ps : pertes annuelles de sol (t/ha/an)

Ep : érosivité des précipitations (N/h).

Es : érodabilité du sol ou susceptibilité du sol à l'érosion (t.h/N.ha)

F<sub>lp</sub> : facteur de longueur de pente (sans dimension)

F<sub>p</sub> : facteur de pente (sans dimension)

F<sub>am</sub> : facteur d'aménagement (sans dimension)

F<sub>v</sub> : facteur de conservation des sols pratiqué (sans dimension)

#### 1.5.2.7. Formule de l'ANRH (1992)

Cette formule a été utilisée en Algérie, élaborée à partir des données recueillies dans 30 bassins versants de superficie comprises entre 100 et 3000 Km<sup>2</sup> soumis à une pluviométrie allant de 300 à 1000 mm.

$$TSS = 26.62 IL + 5.07 IP + 9.77 CT - 593.56 \quad (1.10)$$

Avec :

TSS : Transport solide spécifique annuel (T/Km<sup>2</sup>/an)

IL : Indice lithologique ; superficie des formations marneuses et argileuses du Crétacé supérieur et du Tertiaire. (Pourcentage de la superficie totale du bassin versant).

IP : Indice des précipitations érosives (fait intervenir le pourcentage des précipitations annuelles trouvées sous forme de pluie journalières supérieures à 20 mm et le nombre annuel de ce type de précipitation).

CT : Coefficient de torrentialité ;

$$CT = Dd \times F1 \quad (1.11)$$

$Dd$  : Densité de drainage (longueur du réseau fluvial par unité de surface)

$F1$  : Fréquence de Talweg élémentaire.

## 1.6. Le transport solide

Le transport solide constitue la seconde phase de l'érosion. C'est la quantité de sédiments (ou débit solide) transporté par un cours d'eau (Figure 1.2). Ce phénomène est limité par la quantité de matériaux susceptible d'être transportée (c'est-à-dire la fourniture sédimentaire). Un cours d'eau transporte des matériaux détritiques qui proviennent soit du bassin soit du fond des berges du lit mineur. L'érosion du bassin versant produit des particules fines qui se propagent le long du cours d'eau en auto-suspension et sont responsables de sa turbidité, alors que les matériaux prélevés sur les parois sont alternativement déposés et repris par le courant. Ces derniers sont transportés suivant deux types de mécanisme en fonction de la puissance de l'écoulement et de la taille et la densité des grains.

Généralement deux modes de transport solide sont considérées : le transport solide par charriage et le transport solide en suspension. Il n'existe pas de délimitation nette entre ces deux modes de transport. Il y a même des auteurs qui considèrent un troisième mode caractéristique intermédiaire, la saltation, où les particules se déplacent par des bonds, en alternant le charriage et la suspension (Probst et al., 1986). Le mode de transport dépend essentiellement d'un paramètre fondamental : la taille du sédiment transporté.



**Figure 1. 2** : Différents types de transport solide en rivière

### 1.6.1. Le transport solide par charriage

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, gravier, galets et blocs), de diamètre supérieur à 1 mm, qui se déplacent par roulement ou glissement, au voisinage immédiat du fond du cours d'eau, et parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace. Les mesures sur le terrain du transport solide par charriage sont très onéreuses à cause des perturbations de l'écoulement. De ce fait, les évaluations de ce type de transport sont difficiles à mener en l'absence de bases de données. On se contente généralement d'études sur modèles réduits pour déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total. Pour quelques bassins versants le taux de charriage a été estimé à 12.5 % de la suspension (Crawford, 1991).

### 1.6.2. Le transport solide en suspension

Le transport solide en suspension représente le transport de sédiments fins (argiles, limons, sables fins), maintenues en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement. Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval. Quelques valeurs indicatives, permettent de délimiter les deux modes de transport. Ces valeurs utilisent le rapport entre vitesse de l'écoulement  $V$  sur le lit du cours d'eau, et la vitesse  $W$  de chute des particules (Graf, 1983).

- $V/W > 0.10$  : début de transport par charriage.
- $V/W > 0.40$  : début de transport en suspension.

Le transport en suspension se fait par flottaison et ne comporte que très épisodiquement des retombées des sédiments sur le fond. La turbulence est le facteur principal de la suspension des sédiments. Les critères de suspension, donnés par Bagnold, Van Rijn, Egelund et Schields sont représentés dans la figure (1.3).

### 1.6.3. Caractéristiques physiques des sédiments

#### 1.6.3.1. Forme et dimension

En général, l'érosion et le transport solide diminuent avec une augmentation de la taille moyenne de sédiment. Cependant, une augmentation de  $d_{50}$  engendre une augmentation de la force stabilisante (poids apparent de la particule) et des forces



motrices qui causent l'entraînement des grains. Sous certaines conditions, l'effet de l'une est annulé par l'autre et par conséquent, les sédiments demeurent au repos.

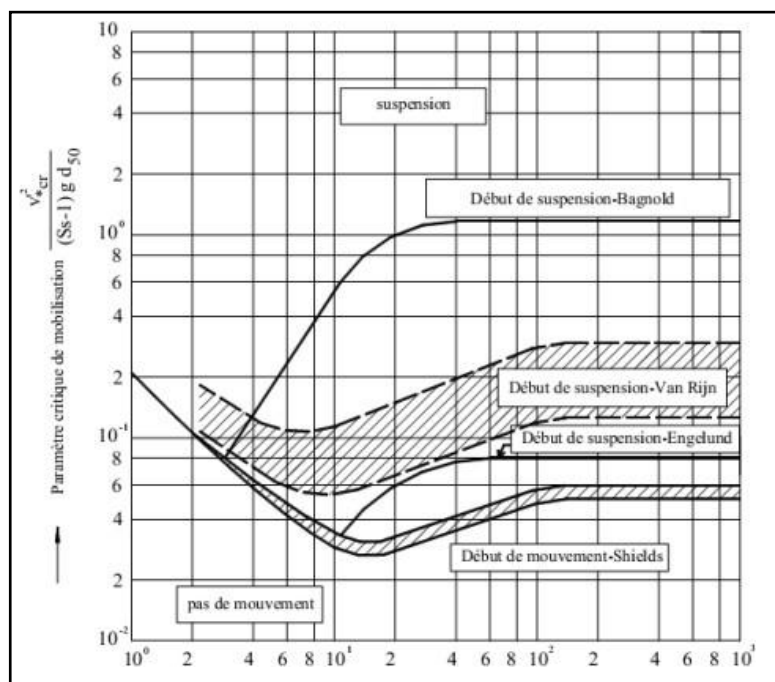


Figure 1.3 : Critères de suspension (Van Rijn, 1984)

### 1.6.3.2. Caractéristiques granulométriques

Le phénomène d'érosion dépend non seulement de la taille moyenne du sédiment, mais aussi de la distribution de la taille des grains.

Le coefficient d'uniformité est par définition :  $C_u = d_{60}/d_{10}$

Si  $C_u < 3$  le sol est dit à granulométrie serrée ; si  $C_u > 3$  il est dit à granulométrie étalée.

En général, l'érosion est beaucoup plus importante pour une distribution serrée pour les mêmes conditions hydrauliques. Cela est expliquée par le fait que, lors de la première phase du transport solide, les particules les plus fines dans une distribution étalée sont entraînées en premier lieu, et par conséquent, le matériau devient plus grossier avec le temps et donc plus résistant à l'érosion.

### 1.6.3.3. Compétence et capacité

Le transport solide est principalement régi par deux propriétés du cours d'eau :

- Sa compétence : Elle est mesurée par le diamètre maximum des débris rocheux que peut transporter le cours d'eau. Cette caractéristique est essentiellement fonction de la vitesse d'eau.

• Sa capacité : C'est la quantité maximale de matériaux solides que peut transporter en un point et à un instant donné le cours d'eau. La capacité est fonction de la vitesse de l'eau, du débit et des caractéristiques de la section (forme, rugosité, etc.). Les variations de la compétence en fonction de la vitesse ont été étudiées par Hjulstrom (1935), qui établit un diagramme duquel on peut tirer les résultats suivants :

- Les matériaux les plus sensibles à l'arrachement par le ruissellement ont une texture voisine des sables fins de 100 microns. Les matériaux plus argileux sont plus cohérents ;
- Les matériaux ne sont pas érodés pour des faibles vitesses de l'écoulement (25 cm/s). Ainsi pour éviter l'érosion, il faut étaler et ralentir l'écoulement ;
- Même à faibles vitesses, le transport des particules fines argileuses et limoneuses s'effectue facilement. Par contre, pour les matériaux plus grossiers tels que les sables fins, on passe très vite de la zone d'érosion à la zone de sédimentation. Ceci peut donc expliquer pourquoi les fossés d'évacuations des eaux de ruissellement sont soit érodés s'ils sont trop étroits, soit ensablés par les matériaux grossiers qui n'arrivent pas à circuler facilement.

#### **1.6.4. Arrangement des grains et pavage**

Dans les parties amont des cours d'eau, qui se caractérisent par une granulométrie étalée (blocs, cailloux, graviers, sables et même limons), le charriage enlève les parties fines, et laisse en surface une couche de matériaux grossiers, qui constitue peu à peu une protection pour les sédiments sous-jacents. En effet, les gros blocs se comportent comme des seuils qui abritent des grains plus petits à leur amont et induisent une petite fosse à leur aval ; laquelle se remplira en décrue de petits grains. A la prochaine crue, les grains aval seront emportés. Donc, certains gros grains en fonction de leur position et de leur taille, ont un rôle structurant et forment une armature de surface, appelée pavage. Lorsqu'une rivière est pavée, le transport solide est réduit. Seule une forte crue pourra détruire la couche pavée et permettre la saturation en débit solide.

### **1.7. Facteurs influant Le transport solide**

Le transport solide fait intervenir un certain nombre de paramètres liés à l'écoulement, aux sédiments et à la configuration et l'arrangement des grains.

## 1.7.1. Paramètres liés au fluide et à l'écoulement

### 1.7.1.1. La viscosité

Elle dépend de la quantité de matériaux transportés en suspension et en solution ; elle a une valeur minimale pour une eau pure. Un écoulement à forte charge et très visqueux peut transporter des matériaux de grande taille.

### 1.7.1.2. La vitesse d'écoulement

La pente du lit du cours d'eau et la viscosité du fluide influent sur la vitesse d'écoulement. Pour une pente fixe, une eau pure coule plus vite qu'une eau chargée. Le profil des vitesses se caractérise par un gradient à partir du fond où la vitesse est théoriquement nulle, jusqu'à la surface où la vitesse est maximale. Proche de la paroi, le profil transversal de la vitesse présente une zone appelée couche limite, qui se divise en trois sous-couches (laminaire, transitoire et turbulente).

- Zone 1 : Couche laminaire, où le profil des vitesses est linéaire. Dans cette couche la tension de viscosité  $T_v$  est beaucoup plus grande que la tension de turbulence  $T_t$ , car le nombre de Reynolds est assez faible.
- Zone 2 : Couche transitoire caractérisée par la présence des deux régimes d'écoulement laminaire et turbulent.
- Zone 3 : Couche limite turbulente caractérisée par un profil de vitesse logarithmique et un gradient de vitesses assez important.  $T_t$  est beaucoup plus importante que  $T_v$ .
- Zone 4 : Zone de plein écoulement avec un gradient de vitesses beaucoup plus faible et des vitesses pratiquement constantes.

### 1.7.1.3. Profondeur d'écoulement

Un écoulement profond (profondeur de quelques mètres) cause peu d'érosion sur le fond, alors qu'un écoulement très superficiel (de l'ordre de quelques décimètres) se caractérise par un potentiel érosif beaucoup plus important. A vitesse égale à la surface, l'action érosive des oueds en région aride est beaucoup plus grande que celle des rivières des zones humides.

### 1.7.1.4. Types d'écoulement

Un écoulement peut être laminaire ou turbulent. L'écoulement laminaire se caractérise par des vitesses faibles et des filets d'eau parallèles. La vectrice vitesse est identique, avec une vitesse moyenne égale à la vitesse instantanée. Alors que les vitesses varient pour un écoulement turbulent. La variation de la vitesse instantanée en un point conditionne le déplacement d'un objet sur le fond. Lorsque la vitesse augmente, l'objet est soulevé et entraîné ; lorsqu'elle diminue, il tombe.

#### **1.7.1.5. Irrégularité des parois des cours d'eau**

Un rétrécissement dans un chenal cause une augmentation de la vitesse d'écoulement et, par conséquent, une augmentation d'érosion des berges et du fond. Un élargissement, au contraire, est accompagné d'une diminution de vitesse, ce qui favorise la sédimentation. Dans un chenal courbé, la vitesse d'écoulement est plus grande à l'extérieur de la courbe qu'à l'intérieur : dans un méandre, la rivière creuse sa rive concave et dépose sur sa rive convexe. Finalement, la présence d'obstacles sur le lit d'un canal cause une augmentation des vitesses en amont (zone d'érosion) et le développement de tourbillons en arrière de l'obstacle (zone de dépôt).

### **1.8. Conséquences de l'envasement sur la retenue d'un barrage**

#### **1.8.1. Sur les volumes régularisés et les performances de barrage**

L'envasement de la retenue d'un barrage affecte sa capacité de stockage et par suite réduit son volume utile disponible, ce qui se traduit par une diminution des niveaux des services rendus par la retenue. Cette diminution du service rendu se manifeste soit par une diminution des volumes fournis, soit par une diminution de leur garantie ou parfois une conjugaison des deux. L'impact de la diminution annuelle du volume régularisé, faible au début de la mise en service d'un ouvrage, devient de plus en plus important au fur et à mesure de l'augmentation des besoins en eau à satisfaire à partir du barrage.

#### **1.8.2. Sur la capacité de laminage des crues**

Du fait de l'envasement de la retenue d'un barrage, le volume de la tranche réservée au laminage des crues subit une réduction progressive. Cette réduction se traduit par une augmentation du risque de déversement ce qui constitue une menace pour la sécurité de l'ouvrage et les zones inondables à l'aval et se traduit par des pertes d'eau pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et la production énergétique.

### 1.8.3. Sur la sécurité des barrages

L'envasement des retenues affecte la sécurité des barrages par :

- la mise en danger de la stabilité de l'ouvrage du fait de l'augmentation de la poussée hydrostatique causée par le remplacement progressif des volumes par les sédiments et l'accroissement de la densité des eaux stockées du fait de la suspension,
- l'opposition à l'ouverture des vannes en cas de nécessité de diminution du plan d'eau dans la retenue dans certaines situations d'urgence,
- l'altération des caractéristiques de résistance des ouvrages due aux réactions chimiques au sein des dépôts et particulièrement celles liées au cycle du soufre et aux caractéristiques d'agressivité de l'eau,
- la gêne de l'auscultation de l'ouvrage. En effet, les sédiments déposés peuvent empêcher la mise en œuvre de moyens d'inspection subaquatiques et contrarient également les inspections visuelles après vidange en masquant le parement amont et en y interdisant l'accès depuis la cuvette.

### 1.8.4. Sur les ouvrages annexes des barrages

Les dimensions des matériaux qui sont transportés par la rivière dans la retenue et dont une partie vient en contact avec les organes de restitution constituent un danger permanent pour la sécurité du barrage. Ces dangers sont de deux types en fonction de la taille des sédiments transportés.

Le premier danger, dû essentiellement aux matériaux fins, provient de l'effet statique de ces matériaux qui en s'accumulant devant l'entonnement des prises d'eau et de vidanges de fond parfois même les évacuateurs de crues (situés dans la partie basse du barrage) risquent de créer un bouchon de vase qui devient problématique avec sa consolidation. Le risque est de se priver des services de l'organe en question, surtout quand c'est le seul moyen disponible d'abaisser le plan d'eau en cas de nécessité. De telles situations ont été vécues au niveau des Barrage Lalla Takerkoust et Hassan Addakhil au Maroc (Badraoui, 2001) et ont nécessité des interventions très urgentes pour rétablir les conditions normales de fonctionnement.

Le second danger est dû aux matériaux grossiers qui peuvent :

- arracher les blindages aménagés dans les conduites aux endroits où l'eau circule à grande vitesse ;
- endommager l'étanchéité des vannes ;
- endommager les vannes elles-mêmes ;
- s'opposer à la fermeture des vannes par conséquent le risque de perte de volumes d'eau importants.

L'envasement accélère donc le vieillissement des ouvrages hydrauliques et rend plus délicat et plus coûteux leur entretien et leur maintenance.

### **1.8.5. Sur les infrastructures aval**

Les problèmes posés par les sédiments ne se limitent pas au niveau du barrage mais ils s'étendent bien en aval. Ainsi, les sédiments en suspension dans l'eau distribuée par des canaux à partir des barrages se déposent dans ces ouvrages et favorisent le développement de plantes aquatiques. Ceci réduit la débitance de ces canaux et rend difficile leur exploitation et augmente considérablement les tours d'irrigation et la probabilité de déversement.

L'envasement des canaux d'irrigation impose leur entretien et leur curage d'une manière régulière

### **1.8.6. Sur la qualité de l'eau**

Un des plus importants effets de l'érosion sur la qualité des eaux des retenues de barrages est la dégradation très sérieuse de cette qualité due au phénomène d'eutrophisation. Ce phénomène est lié à un aspect particulier du transport solide dans les bassins versant, à savoir, sa charge en phosphore, en manganèse et en azote et à l'effet des sédiments sur la modification du chimisme de l'eau et la stratification thermique de la retenue. La nature des formations lithologiques du bassin versant contrôlé par le barrage est le facteur déterminant dans ce processus ; l'eutrophisation d'une retenue peut provenir de l'érosion des sols non couverts par une végétation.

Un autre effet, non moins important de l'érosion sur la qualité de l'eau, est la difficulté d'éliminer les quantités importantes de matières en suspension au niveau des oueds où existent des prises d'alimentation en eau potable au fil de l'eau. La garantie de la continuité de l'approvisionnement exige dans certains cas la mise en place

d'équipement de débouage, garantissant le fonctionnement des stations de traitement même en cas de forte turbidité des eaux.

## **1.9. L'érosion et le transport solide en Afrique du Nord**

### **1.9.1. L'érosion et le transport solide en Algérie**

L'irrégularité de la pluviométrie saisonnière et interannuelle des bassins versants du Tell algérien dominés par un climat semi-aride a un impact direct sur l'action érosive et notamment sur le transport solide en suspension. Les valeurs de la dégradation spécifique varient d'un bassin à un autre et d'une région à l'autre. Par exemple, 1160 t/km<sup>2</sup>/an pour l'oued Mazafran (côtiers algérois), 2300 t/km<sup>2</sup>/an pour l'Isser à Lakhdaria, 490 t/km<sup>2</sup>/an pour oued Soummam à Sidi Aïch, 680 t/km<sup>2</sup>/an pour oued Medjerda à Souk-Ahras (Bourouba, 1997) et 150 t/km<sup>2</sup>/an pour la Macta au barrage Cheurfa (Bourouba, 1998).

Annuellement, le comportement morphologique irrégulier des bassins versants algériens passerait d'une année à l'autre d'un régime méditerranéen à érosion élevée et à écoulement abondant au régime de la zone tempérée caractérisée par un écoulement abondant et une érosion faible ou encore au régime de la frange aride à érosion élevée et à faible écoulement.

Les crues de l'automne et du printemps sont responsables du transport solide. En effet, pendant l'été connu pour ces chaleurs intenses, le sol se dessèche, se fissure, se fragmente et voit son couvert végétal réduit, ce qui permet aux premières averses de l'automne de laver le sol de ces éléments fins détachés. Pendant le printemps qui succède à la saison hivernale froide et pluvieuse, les crues coïncident avec des versants saturés et déblayés. L'activité érosive dépend alors des mouvements de masses et des sapements de berges qui se produisent dans les zones mal protégées au bas des versants. On assiste alors pendant ces crues à une croissance rapide du volume ruisselé et de la turbidité. Pour la crue du 17 avril 1979 à oued Medjerda supérieur, le débit liquide et la concentration enregistrés sont 8 fois supérieurs aux valeurs moyennes mensuelles. Ces périodes de crues de l'automne et du printemps représentent une courte période de forte érosion qui dure entre 2 et 4 mois mais responsable de la majeure partie du transport solide. Le reste de l'année est à érosion faible (Terfous et al., 1999); (Bourouba, 1997,1998).

Le volume de matériaux qui se déposent chaque année dans les retenues des barrages algériens est évalué, en moyenne à 20 millions de m<sup>3</sup> par an (Remini, 1999), ce qui contribue à réduire de 0.3% par an les capacités de stockage de l'eau estimée à 6,2 milliard de m<sup>3</sup> (Riad et al., 1999), dans des régions caractérisées par une pluviométrie à la fois faible et irrégulière. Le phénomène de l'envasement des barrages, de par la situation géographique du pays (zone semi-aride), constitue un enjeu d'envergure nationale. Selon une récente étude basée sur des séries statistiques comportant les données de 57 grands barrages, l'Algérie perd par envasement 45 à 50 millions de m<sup>3</sup> chaque année. En effet, le phénomène de l'envasement touche les pays du Maghreb, mais plus particulièrement l'Algérie s'est accélérée à partir des années 2000 (particulièrement à partir de 2003). Les retombées sont directes et graves et sur l'économie nationale et sur le développement de la société tout entière. Sachant qu'en Algérie les barrages de taille et d'importance diverses ne recueillent en fait que 5% des précipitations atmosphériques, le problème apparaît dès lors dans toute son acuité.

D'importantes quantités de pluies rejoignent la mer, ou reviennent vers l'atmosphère par évaporation. Autant donc apprécier le temps de remplissage d'un barrage et l'ampleur des dégâts engendrés par le fléau de l'envasement. Selon le ministère des Ressources en eau, durant la période allant du 1<sup>er</sup> au 11 octobre 2008 une quantité de 209 millions de mètres cubes a été reçue au niveau des 59 barrages en exploitation. Conséquence de ces apports, le taux de remplissage des barrages est estimé à 44, 37%. Un taux supérieur à celui enregistré l'année dernière à la même période. Selon le communiqué du ministère des Ressources en eau, la réserve totale de l'ensemble des barrages qui était de 2,49 milliards de mètres cubes est passée à 2,58 milliards de mètres cubes, soit un stockage global estimé à 87 millions de mètres cube. Au niveau de la région ouest, le volume d'eau stocké est de 449 millions de mètres cubes, dans la région du Chelif il est de 252 millions de mètres cubes, au centre le volume est de 556 millions de mètres cubes, alors qu'à l'Est, il est de 1,322 milliard de mètres cubes. La région de l'ouest a également connu une pluviométrie importante.

### **1.9.2. L'érosion et le transport solide en Tunisie**

L'infrastructure hydraulique des pays du Maghreb est amputée de 2 à 2,5 % de la retenue globale (Kassoul et al., 1997). En Tunisie l'expérience acquise au cours des dernières décennies qui ont vu la création de nombreux barrages et lacs collinaires pour



des objectifs divers, montre que le problème d'envasement entraîne une perte importante de la capacité de ces ouvrages, en raison d'une érosion hydrique importante favorisée par l'agressivité des pluies, l'alternance de périodes sèches et humides, la fragilité des formations géologiques et l'action de l'homme. Cette perte est évaluée à 5 tonnes/ha/an pour les petits bassins versants (lacs collinaires) et 15 t/ha/an pour les grands bassins versants (barrages) (Boufaroua et al, 2000).

Chaque année donc, la Tunisie voit disparaître une partie de ses bonnes terres, la fertilité de ses sols étant elle-même en régression. Par son ampleur et la gravité de ses conséquences, l'érosion hydrique est un problème dont la résolution est une nécessité vitale pour le pays. En Tunisie, l'eau présente un caractère stratégique de développement socio-économique en raison de sa rareté. Les potentialités hydrauliques du pays sont évaluées à 4503 millions de m<sup>3</sup>, dont 2 700 millions de m<sup>3</sup> soit 59,96 % sont des eaux de surface. Une protection de ces ressources de surface contre l'envasement passe par la réduction de l'érosion hydrique des bassins versants via des actions de protection et de conservation des sols à l'échelle des zones les plus vulnérables (Ben Mammou et Louati, 2007). À cet égard, la stratégie du pays en matière de conservation des eaux et des sols (CES) vise surtout la réduction des pertes des terres agricoles, estimée annuellement à 20 000 ha, dont 10 000 ha sont associés à l'érosion hydrique, à réduire le colmatage et l'envasement des ouvrages hydrauliques qui entraînent une perte annuelle de stockage de 28 millions de m<sup>3</sup> d'eau et à augmenter la recharge des nappes par la mobilisation des eaux de surface (DGAFTA, 2003).

### **1.9.3. Envasement des retenues de barrages au Maroc**

Au Maroc, l'érosion des sols et les pertes en terre constituent un processus de dégradation des ressources naturelles qui touche, avec des intensités diverses les régions du territoire national. Ainsi, sur une totale superficie des zones montagneuses d'environ 23 millions d'ha, 75 % sont touchées par l'érosion dont un tiers de manière très critique.

Les bassins versants à l'amont des barrages présentent des risques importants d'érosion accentuée par l'action des populations sous la pression démographique par une surexploitation des forêts et des pratiques culturelles inadéquates. En effet, la majorité des bassins versants du pays est caractérisée par de fortes dégradations spécifiques dépassant les 2000 t/km<sup>2</sup>/an au niveau des bassins abritant les grands ouvrages hydrauliques. Elle est :

- Supérieure à 2 000 t/km<sup>2</sup>/an au niveau des bassins du Martil, de l'Ouergha, de Lakhdar et de la Tessaout ;
- Comprise entre 1 000 et 2000 T/Km<sup>2</sup>/an au niveau des bassins du Neckor, de M'Harhar et du Loukkos ;
- Comprise entre 500 et 1 000 t/km<sup>2</sup>/an au niveau des bassins de Sebou, de l'Inaouène, de l'Oued El Abid et du Massa ;
- Inférieure à 500 t/km<sup>2</sup>/an au niveau du reste du pays.

Officiellement, 78,7% est le taux de remplissage des barrages au Maroc durant le premier trimestre 2015. Les 128 barrages que compte le Maroc ne connaissent pas réellement ce taux de remplissage. En prenant en compte l'envasement, les barrages perdent 10% de leur capacité de stockage, soit 1,74 milliard de m<sup>3</sup> cumulés jusqu'en 2012 sur les 14 milliards de m<sup>3</sup> de la capacité de stockage globale. Les barrages construits dans le bassin de Moulouya sont dans une situation critique à cause de l'envasement. Ces ouvrages ont perdu 39% de leur capacité de stockage. Ils sont suivis par les barrages sur le bassin de Tensift, puis ceux sur Draa et le Loukkous. L'érosion continue des sols au Maroc rend inéluctable l'envasement. Ce phénomène naturel dépendant des conditions climatiques, du relief et du couvert végétal s'accélère et s'intensifie avec l'activité humaine (occupation des sols, pratiques culturales, pâturage, déforestation...).

Ces valeurs de la dégradation spécifique sont à comparer au niveau jugé tolérable qui est, en moyenne, de l'ordre de 300 t/km<sup>2</sup>/an. Les pertes en terres annuelles cumulées à cause de l'érosion sont estimées à plus de 100 millions de tonnes par an, dont près de 60 % se dépose dans les retenues de barrages. Cette proportion est de plus en plus importante au fur et à mesure de la poursuite de l'effort d'aménagement des ressources en eau superficielles.

### **1.10. Stratégie de lutte contre l'envasement**

Aux fins d'assurer les volumes d'eaux garanties aux différents usagers, toutes les retenues des barrages en Algérie sont calculés en tenant compte de l'envasement durant la période de service affectée au barrage. C'est à cet effet que pour pallier les effets négatifs de l'envasement et de garantir les volumes régularisés, il est toujours prévue une garde d'envasement (volume mort), destinée au comblement des sédiments

durant la période de service. Cette attitude passive est adoptée par le monde. Néanmoins, il est toujours prévu des méthodes de lutte actives et continues contre la sédimentation des barrages. On distingue trois méthodes : préventives, spéciaux et curatives.

### **1.10.1. Méthodes préventives**

Les mesures antiérosives à caractère biologique et mécanique seront réalisées obligatoirement de concert avec les populations concernées, les propriétaires terriens et les différents services techniques, afin d'effectuer la sensibilisation requise à leur participation effective, pleine et entière dans le choix des interventions à privilégier pour le bon déroulement des travaux et des études, et une efficacité optimum et durable des mesures antiérosives, soit :

- Amélioration des pratiques culturales ;
- Plantation d'opuntia ;
- Revégétalisation ;
- Plantation des haies vives ;
- Reboisement ;
- Plantations fruitières ;
- Aménagement de cordons de pierres ;
- Construction de murettes ;
- Construction de banquettes ;
- Construction de bourrelets ;
- Construction de seuils ;
- Aménagement de drains et exutoires.

Dans le cadre de la protection de bassins versants des barrages, un programme spécial a été lancé par la Direction générale des forêts. Il s'agira de traiter une superficie de 1,5 millions d'hectares d'ici l'an 2000, soit un rythme de réalisation de 6700 ha. En 2000, ce rythme était de 5600 ha/an (Agence National Barrage et Transfert, 2000).

### **1.10.2. Méthodes spéciaux**

Les différents travaux spéciaux relatifs à des ouvrages d'envergure sont :

- Protection des berges ;
- Construction d'ouvrages de capture de sédiments ;
- Construction de retenues collinaires ;

- Protection des apports routiers.

### **1.10.3. Méthodes curatives**

Les méthodes curatives constituent une tout autre méthodologie de lutte contre le fléau de l'envasement. Depuis plusieurs années, l'Algérie diversifie ses moyens d'intervention en vue de prolonger la durée de vie de son infrastructure de stockage hydrique. L'opération la plus classique de curetage des barrages et en même temps la plus coûteuse concerne le dévasement (l'enlèvement des boues de fond par des moyens mécaniques). La situation géographique de l'Algérie fait d'elle le pays pionnier en la matière. Parmi les moyens utilisés :

#### **1.10.3.1. Chasse hydrauliques**

Ce moyen de lutte consiste à éliminer une partie des sédiments au fur et à mesure de leurs arrivés dans les réserves, on citera :

- Les chasses dites à « l'espagnole », cette méthode est surtout valable pour les barrages de moindre importance et à régularisation annuelle.
- les chasses de dévasement par les vidanges de fond à barrage plein, elle est utilisée sur la plupart des barrages algériens.
- le soutirage par « courant de densité » ou « underflow » grâce aux vannettes de dévasement.

#### **1.10.3.2. Dragage**

Le dragage est une opération qui consiste à extraire de la vase du fond d'un barrage, les différentes techniques de dévasement de retenues sont à priori :

- Dragage hydraulique.
- Dragage mécanique

Toutefois, la technique de dragage la plus appropriée nécessite au préalable la résolution des problèmes suivants :

- L'extraction et le transport des vases en utilisant un volume d'eau minimum (rapport vase/eau) ;
- Définition des zones de rejet ;
- Exploitation en continu de la retenue d'eau en même temps que le dévasement.

# **Chapitre 2**

Présentation des données

# Chapitre 2

## Présentation des données

### 2.1. Introduction

Pour permettre d'évaluer et d'identifier la nature et l'ampleur des processus d'érosion en cours, il est indispensable de réaliser une revue exhaustive des documents et études existantes, de procéder à une collecte de données nécessaires à la description des milieux propres à chaque bassin versant.

### 2.2. Description des données de l'Algérie

Les différents barrages étudiés sont situés dans des bassins versants répartis sur une zone qui couvre une partie importante du territoire algérien. Le choix de ces 15 bassins est dicté par la disponibilité de données de mesure des concentrations des matières en suspension. Ces données nous ont été fournies par les services hydrologiques de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques) et l'A.N.B.T (Agence Nationale des Barrages et de Transfert). Le comportement morphologique irrégulier des bassins versants algériens passerait d'une année à l'autre d'un régime méditerranéen à érosion élevée et à écoulement abondant au régime de la zone tempérée caractérisée par un écoulement abondant et une érosion faible ou encore au régime de la frange aride à érosion élevée et à faible écoulement.

#### 2.2.1. Localisation de la zone d'étude

Les bassins de Gargar, S.M. Ben-Aouda, Ouizert, Bou-Hanifia et Fergoug, sont localisés dans la région Ouest de l'Algérie du Nord, entre les villes de Relizane, Oued Rhiou, Tissemsilt, Tiaret, Saida, Mascara, Oran, Sidi Bel Abbés, Ras el Ma et Zeraghet.

Le bassin de Gargar appartient au massif de l’Ouarsenis dans l’Atlas Tellien, alors que les bassins de S.M.Ben.Aouda, Ouizert, Bou-Hanifia et Fergoug appartiennent à la région physiographique des Hauts Plateaux. Le bassin versant de la Tafna, situé au Nord Ouest du territoire algérien, (Figure 2.1), s’étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen sur une superficie de 7245 km<sup>2</sup>. Selon la nouvelle structuration des unités Hydrologiques en Algérie, le bassin versant de la Tafna appartient à l’ensemble de l’Oranie –Chott Cherguie. Globalement, le bassin versant peut être subdivisé en trois grandes parties : partie orientale avec comme principaux affluents l’oued Isser et l’oued Sikkak, partie occidentale comprenant la Haute Tafna ; oued Sebdou, oued Khemis et l’oued Mouilah et partie septentrionale : qui débute pratiquement du village Tafna et s’étend jusqu’à la plage de Rachgoune, embouchure de la Tafna sur la mer. Les oueds Boukiou, Boumessaoud et Zitoun sont les principaux affluents de cette partie.

Le bassin versant de la Tafna comprend quatre barrages fonctionnels ; Béni-Bahdel, Boughrara, Sidi.Abdelli et Sikkak. Ces bassins sont tous situés dans la région Ouest de l’Algérie du Nord, alors que les bassins de : Zardeza, Ain Zada, Hammam Grouz, Ain Dalia, Fontaine des Gazelles et Zit Emba se situent dans l’Est Algérien.

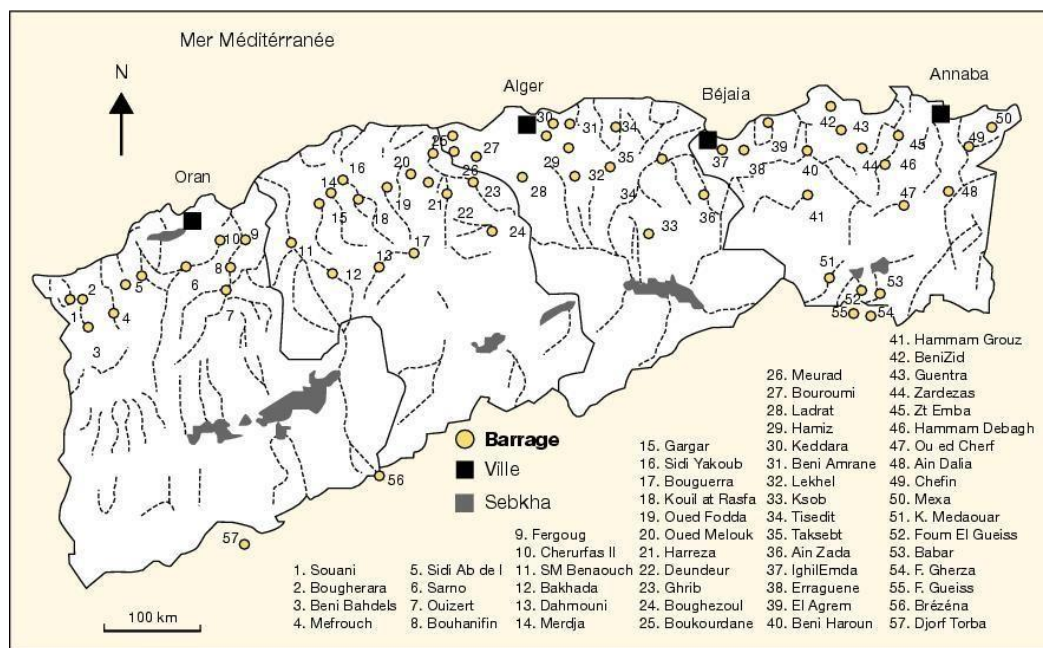


Figure 2.1 : Localisation des bassins de l’Algérie  
Source : Remini, 2009

Cependant, les contrastes physico-géographiques de l'Est algérien confèrent à celui-ci deux systèmes hydrographiques juxtaposés, nettement opposés : les bassins septentrionaux, à écoulement relativement fourni, de type exoréique ; Côtiers constantinois (bassin de Zardeza), Soummam (bassin de Ain Zada), Kébir-Rhumel (bassin de Hammam Grouz), et Medjerda (bassin de Ain Dalia) et les bassins méridionaux, à écoulement plutôt modeste, de type endoréique ; Chott Melrhir (bassins des Fontaine des Gazelles et Zit Emba). Le Tableau (2.1) montre l'ensemble des principales caractéristiques des bassins versants des barrages en exploitation (ANBT, 2006). Les quinze bassins versants couvrent une superficie totale de 25 840 km<sup>2</sup>.

**Tableau 2.1** : Caractéristiques des bassins versants des barrages (Algérie)

N°	Barrage	Bassin	Oued	Superficie (km <sup>2</sup> )	Lithologie	Végétation
01	Gargar	Chelif	Rhiou	2362	-Grés et calcaires. -Marnes à bancs calcaires ou gréseux. -Marnes	-Forêt. -Maquis et garrigue. -Cultures céréalière et fourragères.
02	S.M.Ben Aouda	Chelif	Mina	4801	-Calcaires, dolomies et grés poudingues. -Marno-calcaires et marno-calcaires. -Marnes noires.	-Forêt résineuse. - Maquis et garrigue. -Cultures céréalière et fourragères. -Steppe et Mattoral.
03	Ouizert	Macta	Sahouat	2144	-Calcaires, dolomies, grés, calcaires cristallins, granites et rhyolites. -Marno-calcaires et calcaires marneux. -Marnes noires, marnes à gypse et alluvions.	-Forêt résineuse. - Maquis et garrigue. -Céréalière et fourragères. -Steppe. -Mattoral. -Agriculture maraichère.
04	Bou-Hanifia	Macta	El Hammam	5566	-Conglomérats, grés et calcaires. - Calcaires marneux. -Marnes noires, marnes à gypse et alluvions.	-Forêt résineuse. - Maquis et garrigue. -Céréalière et fourragères. -Mattoral.
05	Fergoug	Macta	El Hammam	574	-Poudingues, grés, calcaires et conglomérats. - Calcaires marneux. -Marnes noires, marnes à gypse et alluvions.	-Forêt résineuse, feuillue. - Maquis et garrigue. -Céréalière et fourragères. -Agriculture maraichère. -Mattoral.



06	Fontaine des Gazelles	Chott Melrhir	El Hai	1660	-Remblaiements Quaternaires. -Reliefs calcaires de l'Atlas.	-Forêts sur versant Atlasique et oasis. -Cultures discontinues. -Steppe.
07	Béni-Bahdel	Tafna	Sebdou	255,5	-Calcaires dolomitiques. -Conglomérats marneux. -Marnes miocènes.	-Cultures extensives. -Couvert forestier dégradé. -Couvert forestier normal.
08	Boughra ra	Tafna	Mouilah	2650	- Calcaires, dolomies et grès -Marnes du miocène et alluvions.	-Cultures extensives. -Couvert forestier normal.
09	Sidi. Abdelli	Tafna	Isser	1140	-Grès et calcaires dolomitiques. -Marnes du miocène moyen.	-Cultures extensives. -Couvert forestier dégradé. -Couvert forestier normal. -Arboriculture.
10	Sikkak	Tafna	Sikkak	463	- Calcaires et dolomies. -Marnes et argiles. -Alluvions.	- Cultures extensives. -Arboriculture. -Prairies et terrains de pacage.
11	Ain-Dalia	Medjerda	Medjerda	193	-Calcaires surmontés de marnes. -Marno-calcaires -Marnes noires et dépôts sableux.	- Forêts. -Cultures discontinues. -Steppe.
12	Zardeza	Saf-Saf	Saf-Saf	345	-Calcaires -Calcaires marneux. -Grès friables, sables, argiles et marnes.	-Forêt. -Maquis. -Systèmes de cultures Méditerranéens.
13	Hamma m Grouz	Rhumel	Rhumel	1120	-Poudingues et calcaires. -Calcaires marneux. -Argiles, marnes et alluvions.	-Systèmes de cultures méditerranéennes. -Céréaliculture. -Forêts.
14	Zit Emba	Chott-Melrhir	El Hammam	485	-Calcaires marneux, calcaires argileux. -Argiles schisteuse, marnes et alluvions.	-Forêts sur versant Atlasique et oasis. -Cultures discontinues. -Steppe.
15	Ain Zada	Soum-mam	Bou. Sellam	2080	-Calcaires, poudingues et grès. -Dépôts mollassiques calcaires. -Marnes noires.	-Systèmes de cultures méditerranéennes. -Céréaliculture. -Forêts.

L'infrastructure hydraulique des pays du Maghreb est amputée annuellement de 2 % à 5 % de la réserve globale (Benblidia et al., 2001). La capacité initiale des 15 barrages algériens examinés dans le cadre de cette étude était d'environ 1548 Mm<sup>3</sup>, elle s'est réduite à 1107 Mm<sup>3</sup> en 2004, soit 28 % de perte en volume.

### 2.2.2. Caractéristiques hydrodynamiques des barrages étudiés

Les bases de données hydrologiques disponibles en Algérie souffrent néanmoins d'une discontinuité plus ou moins importante, tant chronologique que géographique. La sélection des bassins jaugés et de leurs séries communes d'observation hydrométrique tient compte de ces contraintes qu'il y a lieu de suppléer, par la suite, à l'aide des techniques de généralisation spatiale de l'information.

Les différents barrages étudiés sont situés dans des bassins versants répartis sur une zone qui couvre une partie importante du territoire algérien, de par son relief varié (montagne, plaine), de la diversité de sa végétation (forêt, broussailles, prairies,...) et de son climat (subhumide, humide, semi-aride, aride). La majeure partie des quinze bassins versants ont une pluviométrie moyenne interannuelle comprise entre 300 et 700 mm, le climat semi-aride y est fortement représenté. Les pluies sont irrégulières durant l'année, avec un maximum enregistré en automne et au printemps, elles sont parfois brutales et orageuses et sont liées à des humidités relativement faibles en été et assez élevées en hiver. Les températures de cette zone sont fortement continentales et à grande amplitude moyenne annuelle (15,4 à 18°C). L'évapotranspiration annuelle varie de 900 à 1500 mm. Le Tableau (2.2) montre l'ensemble des paramètres hydro-morpho-métriques.

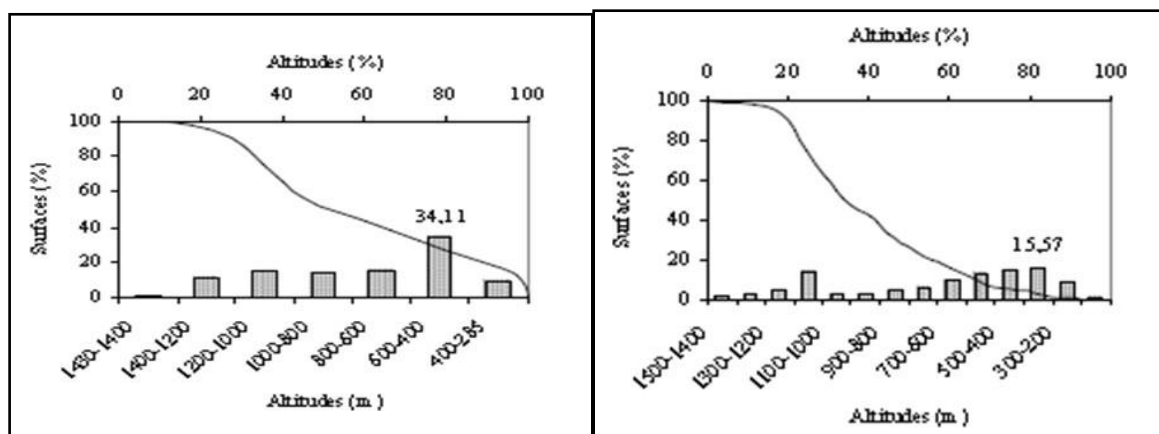
Barrage	Superficie du bassin S (Km <sup>2</sup> )	Pluie annuelle (mm)	Module spécifique Mo (l/s/km <sup>2</sup> )	Coefficient d'écoulement Ce	Écoulement annuel total R (mm)	Perméabilité du bassin K sog
Gargar	2362,00	448,00	2,50	0,18	78,78	2,70
S.M. Ben Aouda	4801,00	394,00	0,79	0,06	25,00	2,51
Ouizert	2144,00	413,00	1,24	0,09	39,00	2,43
Bou-Hanifia	5566,00	401,00	0,80	0,06	25,00	2,45
Fergoug	574,00	430,00	3,09	0,22	98,00	2,55
Fontaine	1660,00	314,00	0,42	0,06	13,30	2,30
Béni-Bahdel	255,50	434,90	5,73	0,41	180,20	2,30
Bougrara	2650,00	357,00	0,64	0,05	20,35	2,30
Sidi.Abdelli	1140,00	393,00	1,18	0,08	37,34	2,30

Sikkak	463,00	412,4	2,97	0,19	44,13	2,30
Ain dalia	217,00	478,00	6,04	0,33	214,05	2,40
Zardeza	345,00	653,00	3,54	0,15	104,20	2,40
Hammam Grouz	1120,00	321,00	0,34	0,03	10,70	2,40
Zit Emba	485,00	719,20	9,07	0,13	286,10	2,40
Ain Zada	2080,00	276,10	0,30	0,03	8,33	2,40

### 2.2.3. Etude du relief

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin. Partant de la répartition par tranches d'altitudes des bassins, nous avons établi les courbes hypsométriques et les diagrammes des fréquences altimétriques de quelques bassins.

La forme de la courbe hypsométrique du bassin Mouilah, (Figure 2.2.a), présente un état d'équilibre du bassin et donc un potentiel érosif moyen. Alors que celle du bassin Sikkak, (Figure 2.2.b), présente bien l'état d'équilibre vieillissant du bassin, offrant un potentiel érosif moyen à faible.

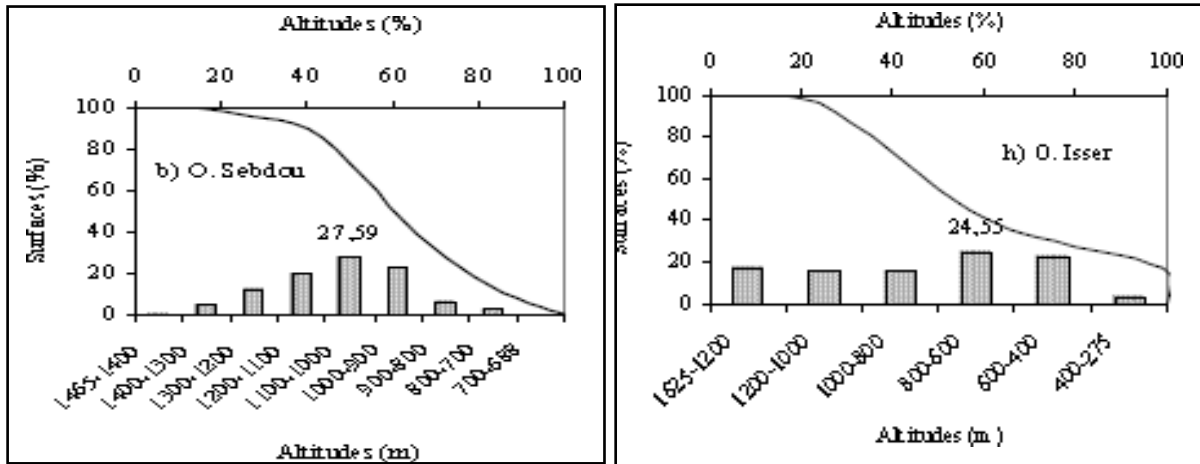


a : Bassin Mouilah.

B : Bassin Sikkak.

**Figure 2.2 :** Courbe hypsométrique des bassins de Mouilah et Sikkak

Les formes des courbes hypsométriques des bassins Sebdou et Isser, Figure (2.3), sont caractéristiques d'un bassin à l'état de jeunesse allant vers l'équilibre, d'où un potentiel érosif assez important.

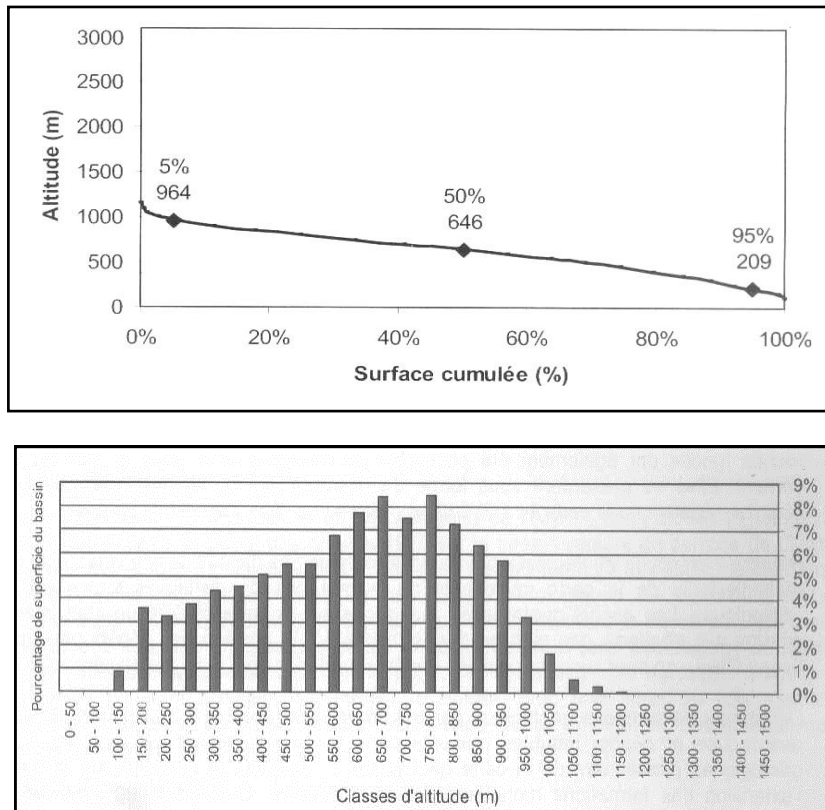


a : Bassin Sebdu.

b : Bassin Isser.

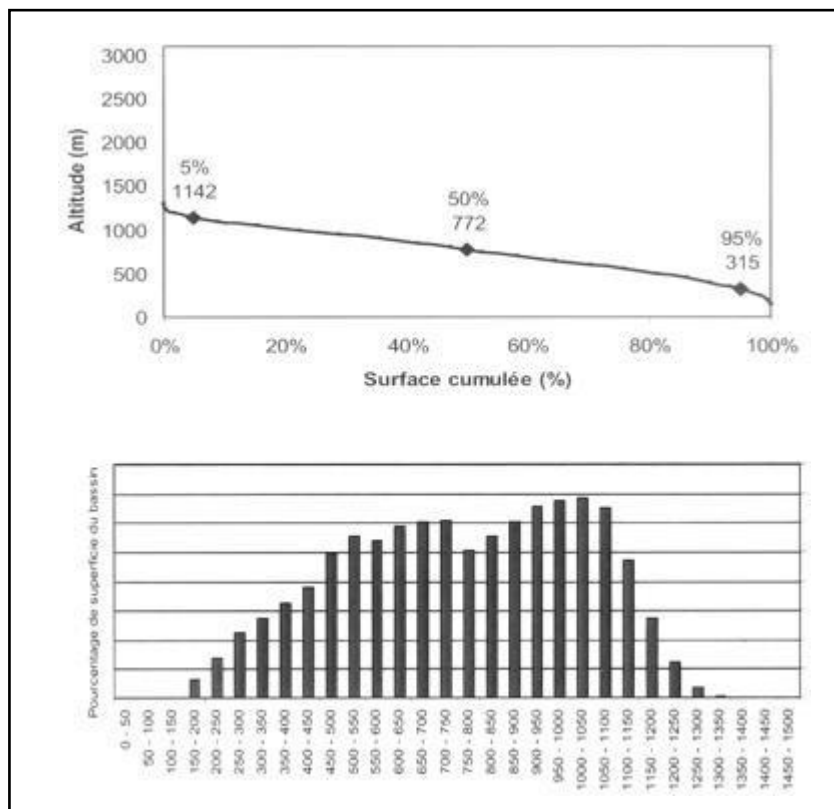
**Figure 2.3 :** Courbe hypsométrique des bassins de Sebdu et Isser

La dénivelée maximale du bassin de Gargar atteint 1107 m, tandis que celle des terres principales (H 5% - 95%) atteint tout au plus 965 m (Figure 2.4). une légère dominance de terres situées entre 550 et 900 m d'altitude peut être observée.



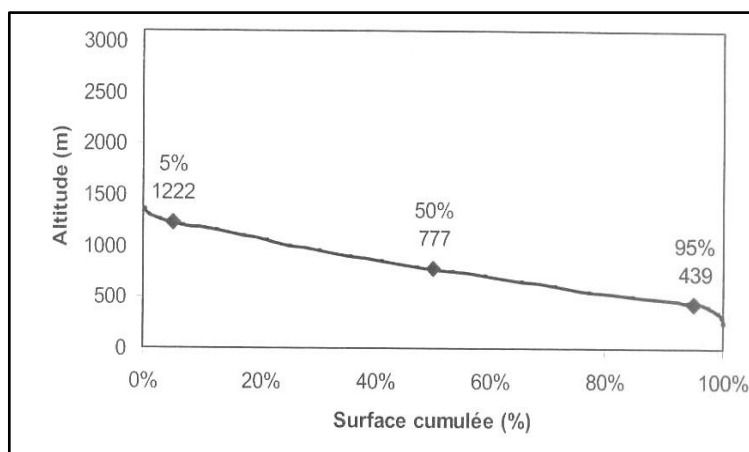
**Figure 2.4 :** Courbe hypsométrique et répartition des classes du bassin Gargar.

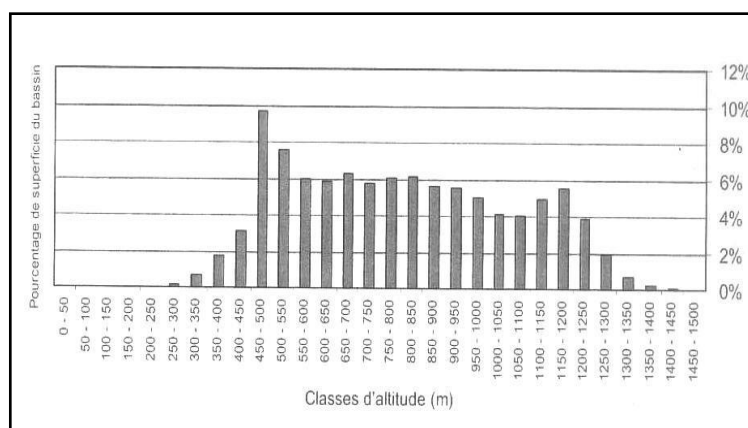
La Figure (2.5) illustre la répartition de classes d'altitude pour l'ensemble du bassin S.M.Ben Aouda. Une légère dominance de terres entre 850 1100 m peut être observée, bien qu'un second groupe entre 600 et 750 m, se distingue aussi.



**Figure 2.5 :** Courbe hypsométrique et répartition des classes du bassin S.M.Ben Aouda.

Dans le bassin de Bou-Hanifia, la dénivelée des terres principales est moins importante, n'atteignant que 783 m (Figure 2.6). La présence des hauts sommets peut être observée sur le graphique qu'illustre la répartition des classes d'altitude.





**Figure 2.6 :** Courbe hypsométrique et répartition des classes du Bassin Bou-Hanifia

### 2.2.4. Couverture végétale

Le couvert végétal d'un bassin versant agit sur trois processus : le ruissellement, l'infiltration et l'érosion. Si le rôle de la végétation vis-à-vis du ruissellement et de l'infiltration est souvent opposé, il demeure décisif vis-à-vis de l'érosion hydrique. En particulier, sur les terrains des versants mal protégés ou nus, source principale d'alimentation de la charge solide des cours d'eau.

La végétation n'est pas considérée dans ce travail sous son aspect purement botanique ou phytogéographique, mais sous son aspect de couverture du sol, plus ou moins modifiée par l'homme. Nous en adaptons donc la présentation afin de distinguer la végétation forestière de montagne méditerranéenne, la végétation des terres cultivées (systèmes de cultures méditerranéens, céréaliculture avec jachère), la végétation steppique et la végétation des oasis sahariennes palmeraies.

#### a) Végétation forestière

La zone humide et subhumide (le plus arrosé de l'Est et de toute l'Algérie), est caractérisée par des espaces fortement montagneux et la prépondérance des formations gréseuses, est le terrain de prédilection du chêne liège : subéraies des massifs de Béjaia, de Petite Kabylie, de l'Edough, du massif de Collo et des confins algéro-tunisiens.

#### b) Végétation des terres cultivées

- **Systèmes de cultures méditerranéens et arboriculture de montagne**

Les zones bioclimatiques humides et subhumides à hiver chaud favorisent les cultures délicates (agrumes, primeurs) et autres arbres fruitiers. Ces cultures épousent une étroite bande littorale constituée des plaines de Jijel, de Skikda (périmètre du Safsaf).

- **Céréaliculture avec jachère et cultures discontinues avec parcours**

Les Hautes Plaines à climat beaucoup plus continental, sont en grande partie cultivées, avec à la clef une céréaliculture dominante. Le domaine semi-aride à hiver frais, le plus répandu dans les Hautes Plaines, portées à 800 ou 1 000 m d'altitude, se caractérise par l'omniprésence de la céréaliculture, souvent pratiquée avec de la jachère (système du *dry farming*). Dans les régions à climat semi-aride inférieur à hiver frais, la pluviométrie (moins de 300-350 mm) ne permet que de faibles rendements céréaliers, d'où l'apparition déjà de l'alfa. Les zones de cultures discontinues (association céréales et parcours) gagnent sur les sols plutôt steppiques, plus spécialement au Sud Est dans les plaines intra montagneuses, et au Nord du Chott Hodna.

### c) **Végétation steppique**

La steppe, formation de graminées (alfa, sparte), de buissons ligneux (armoise), de plantes halophiles (salsolacées, atriplex), constitue des zones de parcours (élevage d'ovins et de caprins). Elle s'étend à perte de vue dans les Hautes Plaines méridionales du Constantinois, et est plus développée encore dans la moitié Ouest de l'Algérie orientale, dans la grande dépression du Hodna (pays de l'alfa).

### **2.2.5. Evaluation des volumes des sédiments**

Les données de base ont été élaborées par la Compagnie Géophysique de France et traitées par contrat avec l'Agence Nationale des Barrages et Transfert. La quantification des volumes de sédiments, pris à partir de différentes sources est donnée dans le Tableau (2.3).

Les mesures bathymétriques ont été réalisées avec embarcation, à l'aide d'un échosondeur qui enregistre en continu la profondeur. Cet échosondeur était synchronisé avec un stadimètre micro-onde. Les travaux portant sur ces levées se basent sur les points connus d'après la triangulation ou polygonation géodésique. La comparaison des plans topo-bathymétriques effectués à deux dates différentes donne le volume d'alluvionnement durant la période comprise entre celles-ci.

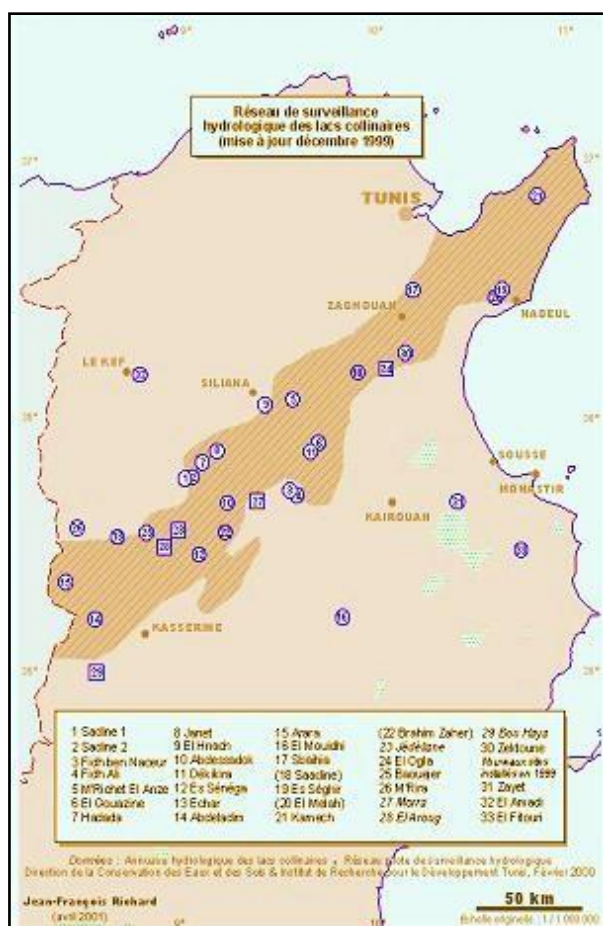
N°	Barrage	Année de mise en eau	Capacité initiale (hm <sup>3</sup> )	Capacité Dernier levé (hm <sup>3</sup> )	Apport moy-annuel (hm <sup>3</sup> /an)	Taux annuel spécifique (t/km <sup>2</sup> /an)
01	Gargar	1988	450,00	437,10	185,00	4853,93
02	S.M. Ben Aouda	1978	235,00	153,71	120,00	1154,44
03	Ouizert	1986	100,00	93,91	84,00	284,00
04	Bou-Hanifia	1948	73,00	38,11	138,8	180,81
05	Fergoug	1970	18,00	3,93	56,00	1225,60
06	Fontaine	2000	55,50	14,89	20,6	438,91
07	Béni-Bahdel	1952	63,00	54,63	73,8	1023,72
08	Boughrara	1989	13,00	11,00	9,00	79,75
09	Sidi.Abdelli	1988	110,00	106,61	185,00	371,71
10	Sikkak	2004	27,00	20,00	25,00	169,07
11	Ain dalia	1987	82,00	76,08	55,00	3539,25
12	Zardeza	1945	31,00	18,68	53,00	1112,25
13	Hammam Grouz	1987	45,00	40,15	30,00	103,02
14	Zit Emba	2001	120,00	116,59	50,00	1237,11
15	Ain Zada	1986	125,00	121,40	90,00	185,44

## 2.3. Description des données de la Tunisie

### 2.3.1. Lacs collinaires

La dorsale tunisienne, où se situent les 24 lacs collinaires (Figure 2.7), est caractérisée par un climat semi-aride et une pluviométrie comprise entre les isohyètes 250 et 500 mm. Les pluies sont rares et très irrégulières durant l'année, avec un maximum enregistré en automne et au printemps. Ces pluies sont parfois brutales et orageuses. Elles sont liées à des humidités relativement faibles en été et assez élevées en hiver. Les températures de cette zone sont fortement continentales et à grande amplitude moyenne annuelle (18 à 20° C). La dorsale Tunisienne est une région constituée d'une succession de Jebels, où les affleurements géologiques sont constitués en majorité par des plis calcaires ayant des impluviums très diversifiés allant d'un milieu semi-forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole (Mahjoub et al, 2001).





**Figure 2.7 :** Localisation de la zone d’étude des lacs collinaires (Tunisie)

Les caractéristiques physiques que nous présentons sont celles des bassins et des retenues correspondantes. Le tableau (2.4) montre l’ensemble de leurs paramètres hydromorphométriques.

Les 24 lacs collinaires ont été équipés en matériel hydro-pluviométrique performant. A la demande de la Direction de la Conservation des Eaux et des Sols et à la fin de 1994, l’équipe IRD a mis en place le même type d’équipement sur ces 24 lacs collinaires, ce qui permet donc d’avoir des observations de même type à une échelle différente et permettra sans doute une meilleure adéquation des résultats à l’ensemble des retenues de cette zone semi-aride (Ayadi et al, 2008).

**Tableau 2.4 :** Caractéristiques hydromorphométriques des bassins versants Tunisiens

N	Nom	S (ha)	P (km)	Ic	L (km)	L (km)	Ig (m/km)	Alt <sub>max</sub> (m)	Alt <sub>min</sub> (m)	ΔH (m)	Dd (km-1)
1	Sadine1	384,0	9,7	1,3	3,8	1,0	105,8	250,0	842,0	408,0	3,1

2	Sadine2	653,0	16,8	1,8	7,5	0,8	57,8	267,0	825,0	442,0	2,7
3	M'Richet	158,0	5,5	1,2	1,9	0,8	72,4	730,0	590,0	140,0	3,3
4	Hadada	469,0	9,9	1,2	3,7	1,2	94,2	246,0	900,0	346,0	2,9
5	Jannet	521,0	12,9	1,5	5,5	0,9	67,0	191,0	820,0	371,0	6,8
6	ElHanech	395,0	9,5	1,3	3,7	1,0	104,3	834,0	447,0	387,0	3,4
7	Abdessadok	307,0	7,9	1,2	2,9	1,0	127,8	189,0	815,0	5,3	5,3
8	Fidh Ben Naceur	169,0	5,7	1,2	2,0	0,8	54,6	462,0	350,0	5,1	5,1
9	FidhAli	412,5	6,6	1,2	2,2	1,0	38,1	444,0	335,0	8,6	8,6
10	El Gouazine	810,0	25,8	1,7	11,3	1,6	17,5	575,0	376,0	4,5	4,5
11	Dékikira	307,0	7,6	1,2	2,6	1,1	36,9	479,0	380,0	4,6	4,6
12	Saadine	272,0	8,2	1,4	3,3	0,8	92,5	552,0	245,0	3,9	3,9
13	Sbahia1	324,0	7,3	1,1	2,2	1,4	77,1	473,0	300,0	4,5	4,5
14	Es Séguir	431,0	10,0	1,3	3,9	1,1	40,9	231,0	70,0	5,8	5,8
15	El Melah	85,0	4,1	1,2	1,5	0,6	36,1	144,0	90,0	6,8	6,8
16	Kamech	245,5	7,2	1,3	2,7	0,9	39,6	203,0	95,0	5,1	5,1
17	Es Sénégal	363,0	8,5	1,2	3,0	1,2	87,0	883,0	618,0	4,9	4,9
18	Abdelahdim	642,0	11,5	1,2	4,2	1,5	45,2	224,0	113,0	4,5	4,5
19	Arara	708,0	13,8	1,4	5,6	1,2	77,8	352,0	910,0	5,4	5,4
20	ElMouidhi	266,0	7,7	1,3	2,9	0,9	43,4	363,0	235,0	7,8	7,8
21	Baouejjer	486,0	10,5	1,3	4,0	1,2	32,5	118,0	987,0	4,7	4,7
22	Brahim Zaher	464,4	12,8	1,6	7,5	0,8	79,9	115,0	570,0	6,0	6,0
23	M'Rira	613,0	12,3	1,3	4,9	1,2	34,7	940,0	770,0	3,1	3,1
24	Echar	917,0	15,5	1,4	6,2	1,4	39,4	190,0	970,0	3,6	3,6

avec

S : Surface du bassin (ha)	L : Longueur du bassin (km)
P : Périmètre du bassin (km)	l : Largeur du bassin (km)
Lw : Longueur du talweg principal (km)	Alt <sub>max</sub> : hauteur maximale
Ig : Indice de pente de roche	Alt <sub>min</sub> : hauteur minimale
Ic : Indice de compacité de Gravellius	Dd : Densité de drainage (km/km <sup>2</sup> )

Le contrôle de l'envasement des cuvettes de barrages permet d'une part la surveillance des ouvrages et la décision des mesures de protection à prendre, d'autre part, en intégrant sur une longue période l'accumulation de sédiments, il conduit à une estimation globale des

transports solides et des phénomènes d'érosion sur les bassins versants. Une campagne systématique de mesures a été entreprise entre 1996 et 2001 en Tunisie, en utilisant un échosondeur à ultra-sons permettant un relevé en continu des profondeurs le long de profils préalablement repérés. Le cubage des sédiments déposés conduit à l'estimation des transports solides totaux ayant pénétré dans les retenues et de l'érosion spécifique des bassins versants contrôlés.

Les résultats obtenus sont donnés par le tableau (2.5). Le paramètre exprimant la sédimentation a été normalisé en taux d'abrasion (Ta), c'est à dire que le volume de sédiments mesuré au niveau de la cuvette du lac collinaire pendant une durée donnée est ramené à une unité de surface du bassin pour une année hydrologique moyenne.

**Tableau 2.5 : Mesures d'envasement des lacs collinaires**

Lac	Année de construction	Dernière mesure d'envasement	Volume initiale de la retenue	Volume restant en m <sup>3</sup>	Volume d'envasement en m <sup>3</sup>	Durée de vie estimée en années	Ta m <sup>3</sup> /ha/an
Sadine 1	1989	Sept-98	35070	2875	32195	11	8,2
Sadine 2	1990	Sept-98	82400	20780	61620	8	15,8
Fidh ben Naceur	1990	Juill-98	47110	35070	12040	29	9.7
Fidh Ali	1991	Sept-98	134710	90145	44565	20	16
M'Richet El Anse	1992	Mars-98	41780	36780	5000	34	7.8
El Gouazine	1990	Mai-98	233370	217230	16140	>100	1.1
Hadada	1992	Mai-96	84910	70910	14000	24	7.5
Jannet	1992	Mai-98	95570	59560	36010	10	17.9
El Hnach	1992	Mai-96	77400	58630	18770	16	7.9
Abdessadok	1990	Sep-98	92530	66320	26210	29	10.6
Dékikira	1991	Juin-96	219100	197800	21300	51	13.9
Es Sénégal	1991	Juin-98	86420	74570	11850	22	10.9
Echar	1993	Juin-96	186840	181540	5300	>100	1.9
Abdeladim	1992	Août 97	164080	163250	830	>100	1.5
Arara	1992	Sept-98	991150	49930	941220	8	16.6
El Moudhi	1991	Sept-98	142770	138910	3860	37	14.5
Sbahia 1	1993	Oct-96	135570	125020	10550	39	10.9
Saadine	1992	Sep-98	35620	8250	27370	8	16.9

Ességhir	1990	Oct-96	192460	190440	2020	>100	1.2
El Melah	1990	Nov-96	15395	13262	2133	36	5
Kamech	1991	Avr -98	142560	131180	11380	33	17.5
Brahim Zahar	1992	Sept-98	86190	71780	14410	21	8.9
El Ogla	1989	Avr-97	5887080	4971250	915830	51	14.3

### 2.3.2. Barrages en Tunisie

- **Le bassin versant de l'oued Barbara-Tunisie**

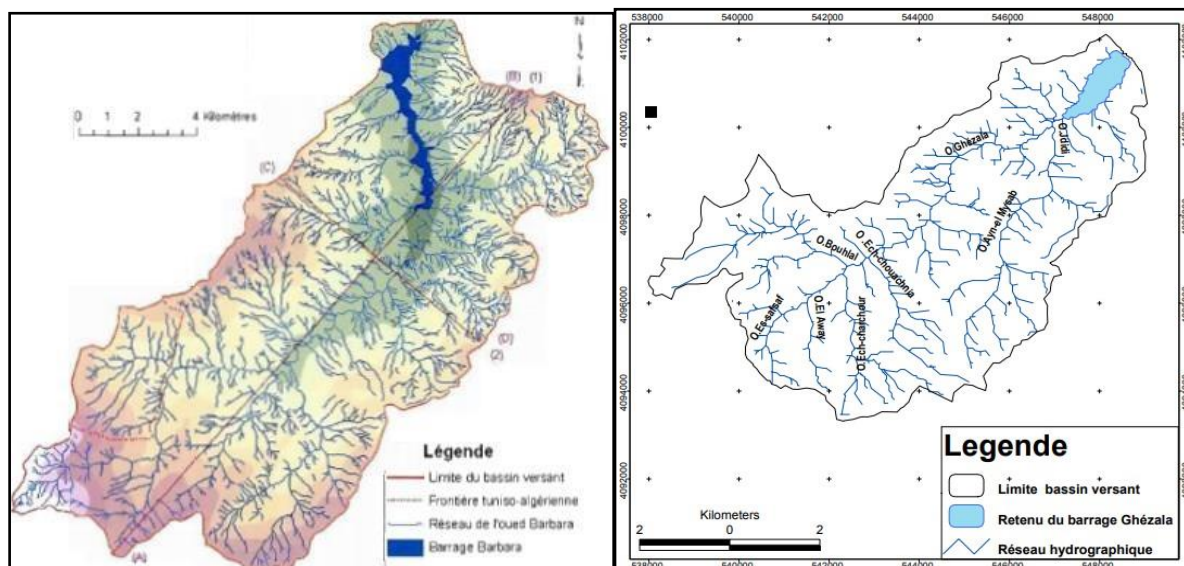
Le périmètre d'étude est l'unité hydrologique du bassin versant de l'oued Barbara. Cette entité géographique couvre une superficie de 162,6 km<sup>2</sup> (Figure 2.8.a) et se situe entre les latitudes Nord 36° 34' et 36° 45' et les longitudes Est 8° 22' et 8° 38'. Il fait partie de la zone montagnarde de la Kroumirie, qui est la plus arrosée du pays et qui se caractérise par des températures relativement plus basses en raison de l'altitude, une pluviométrie moyenne annuelle est de 867 mm, une humidité relative assez élevée qui oscille entre un minimum de 71 % en août et un maximum de 86 % en novembre et une évaporation relativement faible (Souadi, 2011).

Le bassin versant de l'oued Barbara a un indice de pente égal à 0,038 et se range dans une classe de relief assez fort. Les apports solides sont estimés à 786.55 tonnes/ Km<sup>2</sup> /an. Il est situé dans la zone des nappes, il a un relief très accidenté, qui s'est essentiellement structuré au cours du Miocène. La structure stratigraphique et lithologique, surtout du fait des affleurements marneux qui deviennent plastiques et imperméables avec les premières précipitations, ne favorisent que les ruissellements et confèrent à la région une grande sensibilité à l'érosion hydrique sous ses différentes formes (glissements, ravins, etc.).

- **Bassin versant Ghézala**

Le bassin versant Ghézala (Figure 2.8.b) est situé à 50 Km de Bizerte, et à l'est de la ville de mateur. IL est situé entre les coordonnées latitude Nord 37°07'8'' et 36°97'5'' et Longitude Est 9°57'1'' et 9°43'3'', il est traversé par les routes locales RL334 et RL 327 et s'étend sur le secteur Hached, Sidi Mansour, Dahoauda et Boumkhila. Il est caractérisé par un relief complexe présentant des morphologies variables. La situation géographique du bassin de Ghézala et son altitude moyenne (320 m) font que la zone bénéficie d'un étage bioclimatique humide à hiver doux caractérisé par une pluviométrie abondante de l'ordre de 705,30 mm et des températures hivernales modérées (Marghmi, 2013).

Le bassin versant du barrage Ghézala est drainé par un réseau hydrographique dense dont le cours d'eau principal (oued Ghézala) est de direction SW-NE. La longueur de l'oued jusqu'à l'exutoire dans Garret Ichkeul est de 8,3Km, il comporte deux principaux sous bassins drainés respectivement les oueds Ghézala et Jlidi



a : Bassin versant Oued Barbara

b : Bassin versant Ghézala

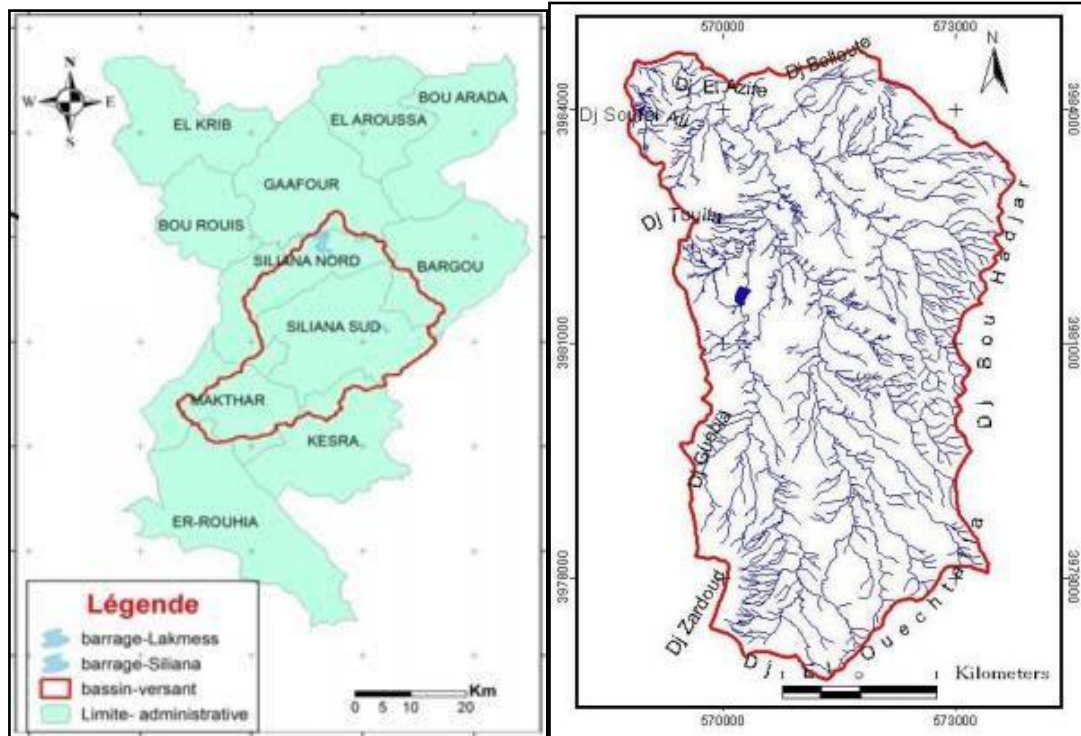
**Figure 2.8 :** Localisation des bassins versants Barbara et Ghézala

- **Bassin versant Siliana**

Le bassin versant Siliana (Figure 2.9.b), couvre une superficie de 1039 Km<sup>2</sup>, il se situe entre les coordonnées latitude Nord 35°47.773' et 36°11.214' et les coordonnées longitudes Est 9°22.627' et 9°8.911'. Il appartient en majeure partie à l'étage bioclimatique du semi-aride supérieur (73%) et à l'étage bioclimatique du semi-aride moyen (23.8%). Aussi quelques microzones, qui représentent 3.2% de la surface totale du bassin versant, appartiennent au subhumide à hiver frais (sous variante d'altitude). Ces derniers sont situés surtout le long de jebel Bargou et jebel Serj. La pluviométrie moyenne annuelle durant cette période est de 557 mm.

La zone amont du bassin est constituée par les massifs montagneux de la dorsale Tunisienne. La direction générale des plissements est orientée Sud- Ouest, Nord- Est. Les massifs montagneux sont formés principalement par les djebels Bargou, Serj et Skarna ainsi que par les hauts plateaux de la région de Maktar. Les sommets culminent à 1268 m pour Bargou, 1358 m pour Serj et 1321m pour Skarna ; le plateau de Makthar voisine autour de la cote 1000 m. Le reste du bassin est constitué par une série de plaines et collines au relief assez

mou dont les sommets voisinent autour de la cote 600 m. Le transport solide observée est estimé à 13.8 t/ha/an. (Raboudi, 2016).



a : Bassin versant El Azire

b : Bassin versant Siliana

**Figure 2.9 :** Localisation des bassins versants El Azire et Siliana

- **Bassin versant El Azire (Tunisie Centrale)**

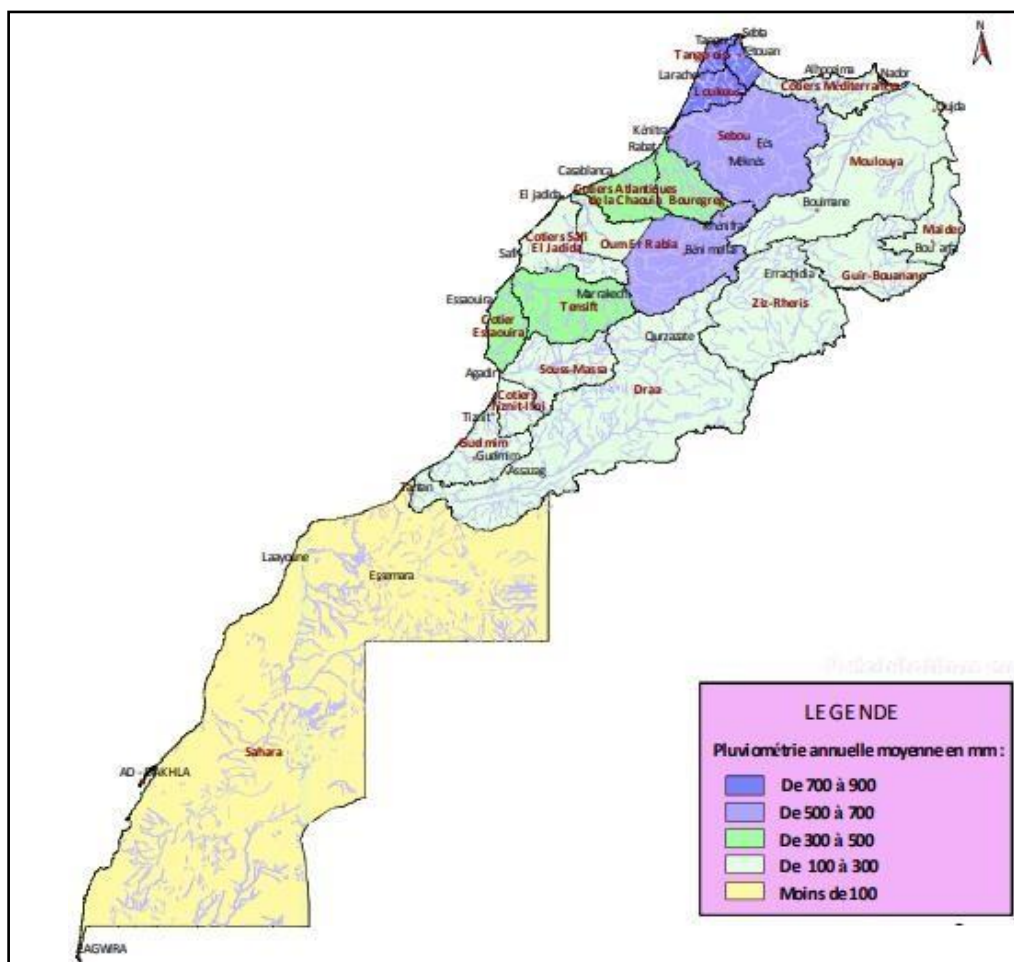
Le bassin versant d'Oued El Azire, fait partie du grand bassin versant d'Oued Nebhana situé en Tunisie centrale. Il couvre une superficie de 26,56 km<sup>2</sup> (Figure 2.9.a). Il est limité à l'ouest par Djebel Bou Hadjjar, à l'est par les Djebels Touila et Guebla et au sud par les Djebels Zerdoud et Ouechtata. L'exutoire du bassin versant est situé entre Djebel El Azire et Djebel Soufel Alia. La simulation de l'averse du 02/10/1997 d'une hauteur de 41,5 mm pendant 50 min a généré une hauteur de lame ruisselée égale à 11.95 mm et une valeur de pertes en sol moyenne égale à 5153 kg/ha.

La majorité de la superficie du bassin versant est affectée par l'aléa de l'érosion et seulement 5.3% de la superficie n'est pas concerné ou à aléa d'érosion nul. Plus de 50% de la superficie du bassin versant El Azire est occupée par des formations très vulnérables à l'érosion telle qu'El Haria Supérieur, El Haria Inférieur, Souar et les alluvions actuelles. Les aménagements construits sur ces formations ne peuvent pas tenir pendant une longue période. C'est pour cela qu'il faut éviter la céréaliculture qui aggrave d'avantage la situation et penser

à la reforestation pour essayer de tenir le sol et diminuer l'érosion régressive (Boughattas, 2010).

## 2.4. Description des données du Maroc

Presque toute la région du Maroc est située dans un contexte climatique aride à semi-aride. La quantité de l'eau disponible est faible et variable dans l'espace et dans le temps. En plus de la rareté de l'eau et de son inégale répartition (Figure 2.10), due à l'effet des changements climatiques observée à l'échelle planétaire, la région est soumise à une demande croissante en eau. Pour suivre le rythme d'envasement des retenues de barrages et connaître la répartition spatiale des sédiments dans les retenues on utilise la technique de la bathymétrie, complétée dans certains cas par des travaux topographiques ou de photogrammétrie des parties non submergées.



**Figure 2.10 :** Localisation Distribution géographique de la pluviométrie annuelle moyenne au Maroc

- **Bassin versant de l'Oued Bouregreg**

L'Oued Bouregreg est l'un des principaux cours d'eau du réseau hydrologique du Maroc. Il prend naissance dans le massif central marocain et chemine vers le littoral atlantique à travers la meseta côtière selon une direction moyenne NW-SE. Son bassin versant est limité au Nord-Est par le bassin du Sebou, au Sud par celui d'Oum er-rebia, au Sud-Ouest par les bassins des Oueds côtiers (Oued Cherrat, Oued Nfifikh, Oued Mellah) et s'ouvre vers l'Ouest sur l'océan Atlantique (Figure 2.11.a). A grande échelle, il s'agit d'un bassin de la zone méditerranéenne, compris entre les parallèles 32°50' et 34°30' N et s'étend entre les méridiens 5° et 7° W (El Baraka, 2011).

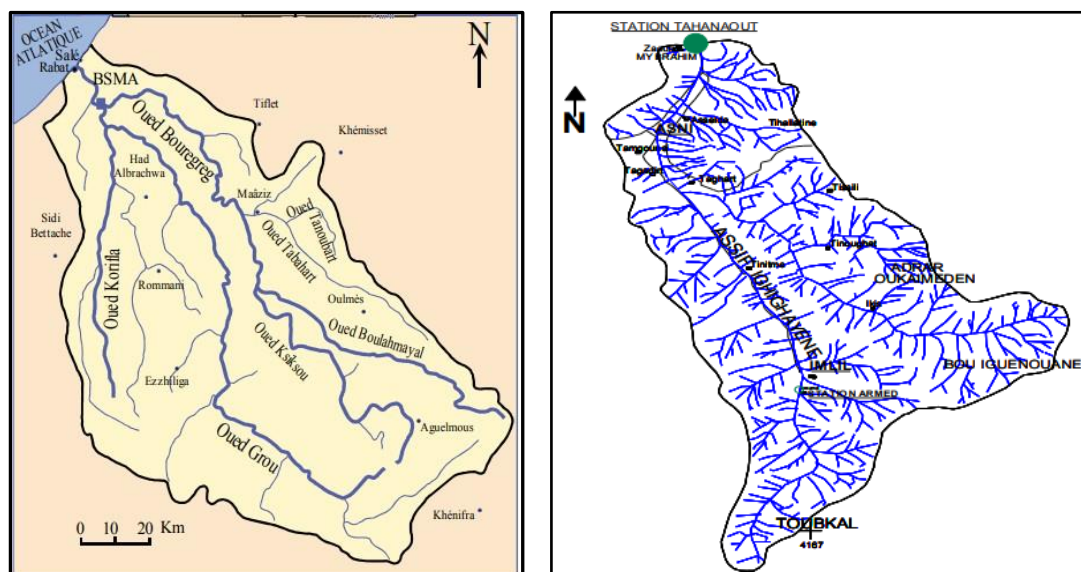
De forme elliptique ; il est drainé par trois principales artères hydrologiques : Oued Bouregreg, Oued Grou, et Oued Korifla qui prennent naissance sur le flanc occidental du Moyen Atlas, puis ils traversent le Maroc central pour se jeter dans le barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah situé à quelques kilomètres de Rabat. Il couvre une superficie de 3800 km<sup>2</sup>. Il est caractérisé par une diversité lithologique et par un réseau hydrographique très hiérarchisé. La pluviométrie annuelle est en moyenne de l'ordre de 433 mm. Le taux d'abrasion sur le bassin du Bouregreg entre 1985 et 2009 est d'environ 270 t/km<sup>2</sup>/an.

- **Bassin versant de Rhéraya**

Le bassin versant de la Rheraya est situé dans le Haut Atlas de Marrakech, entre les latitudes 30°10' et 30°20', et les longitudes 7°40' et 8° Ouest. Il est localisé à une quarantaine de kilomètres au sud de Marrakech, dans le massif de Toubkal. Oued Rhéraya est un affluent atlasique rive gauche du Tensift, il contrôle un bassin versant de 225 km<sup>2</sup> à la station hydrologique de Tahanaout. L'oued Rhéraya est constitué par la confluence de Assif Iminene et assif N'Aït Mizaine qui prennent naissance dans le haut Atlas à environ 3600 m d'altitude. Globalement le climat du Rhéraya est semi-aride (Figure 2.11.b).

L'oued Rhéraya écoule un débit moyen de 1.555 m<sup>3</sup>/s. Ce qui donne un volume de 49 Mm<sup>3</sup>/an. Il est à la fois pentu et arrosé, il est caractérisé par un régime nival prononcé. Globalement le climat du Rhéraya est semi-aride. La pluviométrie moyenne annuelle à l'exutoire du bassin est de 352,7mm. La dégradation spécifique du bassin de Rhéraya est de l'ordre de 700 T/km<sup>2</sup>/an (Haddani, 2012).





a : Bassin versant de l’Oued Bouregreg

b : Bassin versant de Rheraya

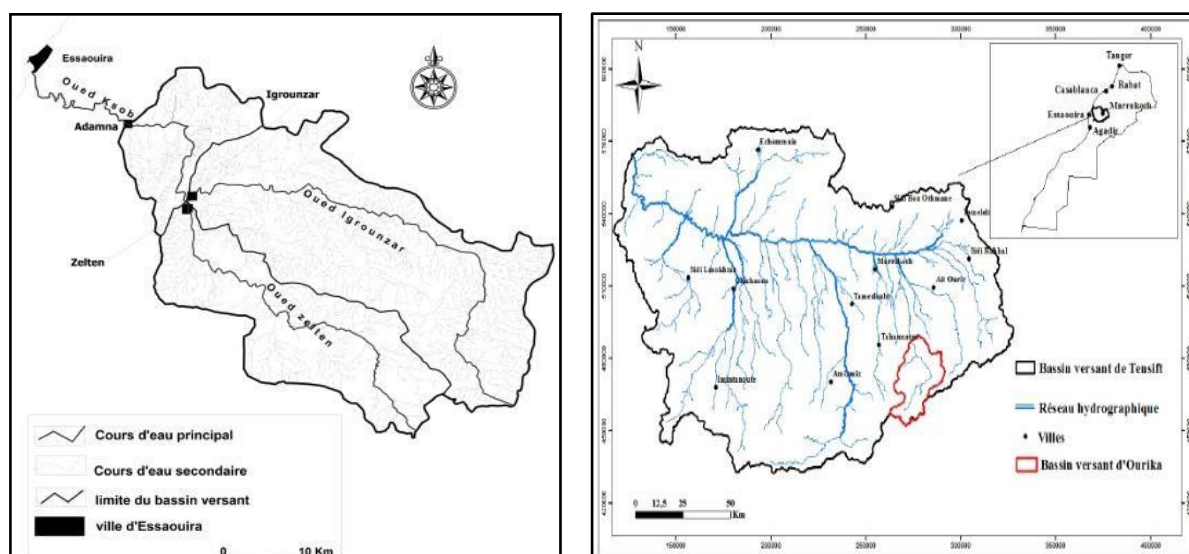
**Figure 2.11** : Localisation des bassins versants Oued Bouregreg et Rheraya

- **Bassin versant du Ksob**

Le bassin versant du Ksob se localise sur la façade Atlantique du Maroc au sud-est de la ville d’Essaouira, entre 31°2’ et 31°30’ Nord et entre 9° et 9°46’ Ouest, où il constitue l’extrémité occidentale de la chaîne haut atlasique. Le cours d’eau principal (Oued Ksob) résulte de la confluence des oueds Igrounzar et Zelten à l’amont de la gorge Zerrar à environ 29 km de l’océan Atlantique. Le bassin versant du Ksob est donc composé de trois sous bassin d’une superficie totale de 1480 km<sup>2</sup> (823 km<sup>2</sup> pour le sous bassin d’Igrounzar qui s’étend sur la partie Nord, 460 km<sup>2</sup> pour le sous bassin de Zelten sur la partie Sud et 197 km<sup>2</sup> pour le sous bassin l’Adamna à l’extrême Ouest).

L’altitude moyenne est de l’ordre de 745m. La pluviométrie annuelle est en moyenne de l’ordre de 330 mm par an, avec un coefficient de variation de 34 % (Figure 2.12.a). Les débits moyens annuels enregistrés durant les trois dernières décennies à la station Adamna varient entre 0.11 m<sup>3</sup>/s et 6,77 m<sup>3</sup>/s (El Mimouni et al, 2005).

En amont du bassin, la dégradation spécifique au niveau du confluent des deux sous bassins versants (Igrounzar et Zelten) est de 1000 T/Km<sup>2</sup>/an.



a : Bassin versant du Ksob

b : Bassin versant de l'Ourika

**Figure 2.12 :** Localisation des bassins versants Ksob et Ourika

- **Bassin versant de l'Ourika (Haut-Atlas, Maroc)**

Le bassin versant de l'Ourika se situe dans le Haut Atlas de Marrakech, Maroc. Il constitue un sous bassin atlasique du grand bassin versant du Tensift (Figure 2.12.b). Ce bassin couvre une superficie de 576 km<sup>2</sup>. Il est situé entre les latitudes 31° et 31°21' Nord et les longitudes 7°30' et 7°60' Ouest. Il est limité au Sud par le haut bassin de l'Oued Souss, au Nord par la plaine du Haouz, à l'Est par le bassin versant de Zat et à l'ouest par le bassin versant de la Rhéraya. Sur le plan topographique, l'altitude moyenne s'élève à 2500 m avec prédominance de terrains compris entre 1600 et 3200 m.

Le climat du bassin versant de l'Ourika est caractérisé par sa grande variabilité spatiotemporelle. La précipitation annuelle est en moyenne de 500 mm. Cette pluviométrie augmente avec l'altitude. Elle est de l'ordre de 400 mm au piedmont et peut dépasser 700 mm par an sur les hauts sommets du bassin.

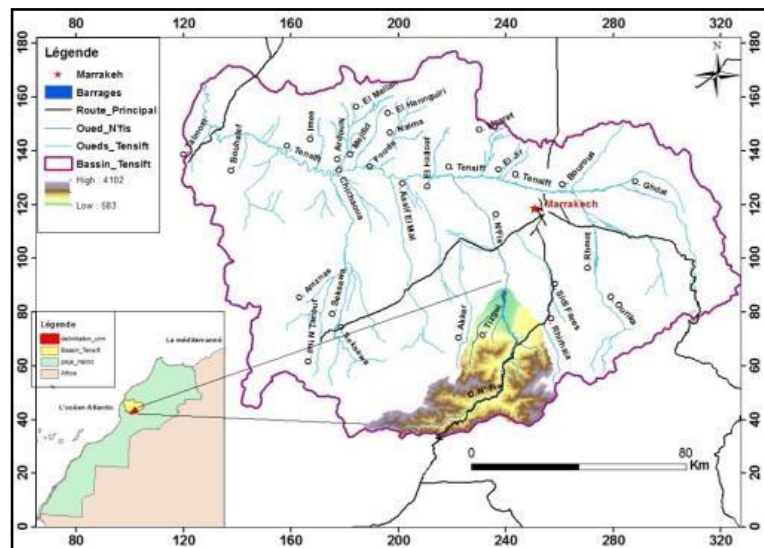
Ce bassin d'une topographie très accidentée, à couvert végétal peu dense et à substrats friables, est soumis à une action anthropique croissante exacerbée par un climat variable et changeant. Sa vulnérabilité aux phénomènes d'érosion hydrique est assez élevée engendrant ainsi un risque d'écoulements des oueds avec des charges solides importantes. La valeur moyenne des pertes en sols (t/ha/an) obtenue dans le bassin est de 380 t/ha/an (Meliho et al).

- **Bassin versant du N’Fis (Haut Alas de Marrakech)**

Le bassin versant de l’oued N’fis est un sous bassin de l’oued Tensift. Il draine une superficie de 1686 km<sup>2</sup> au niveau du barrage de Lalla Takerkoust dont le bassin versant coïncide pratiquement avec la limite aval des zones de ruissellement actif. Son cours d’eau mesure 152 km jusqu’à la confluence avec l’oued Tensift. Son réseau hydrographique mesure 3322 km environ au barrage, soit une densité de drainage de 1,97 km/km<sup>2</sup> (Figure 2.13).

Le bassin versant du N’fis se localise au flanc Nord du massif central à l’ouest de Toubkal entre 30,5 et 31,2° Nord et entre les longitudes 7, 55° et 8, 40° W. En ce qui concerne la séparation entre le Haouz occidental et le Haouz central, la position de Jean Dresch est nette, il inclut le N’fis dans le Haouz occidental (Nahid et Benzakour, 2002).

Situé dans le Haut Atlas centre-occidental, le bassin de N’Fis montre une topographie accidentée disséquée, de fréquentes et violentes inondations, et sa caractérisation par une succession litho-stratigraphique allant du Précambrien terminal à l’actuel engendrent une importante érosion, et entraînent l’envasement des réservoirs.



**Figure 2.13 : Localisation du bassin N’Fis**

## **Chapitre 3**

### Analyse paramétrique de l'érosion spécifique

# Chapitre 3

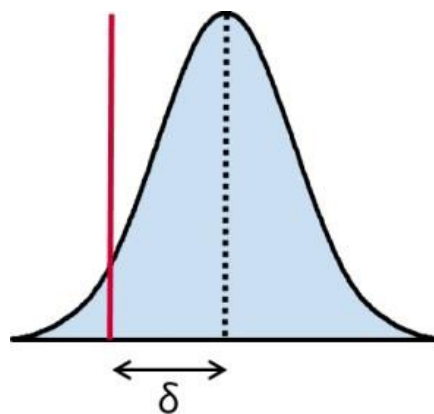
## Analyse paramétrique de l'érosion spécifique

### 3.1. Introduction

L'envasement entraîne une perte importante de la capacité des ouvrages de rétention en Afrique du Nord suite à une érosion hydrique importante favorisée par des conditions hydro-morphologiques défavorables.

Pour évaluer la façon dont les sous bassins réagissent par rapport à l'écoulement et leur contribution à l'hydrologie du bassin, les paramètres morphologiques sont privilégiés dans cette étude du fait que le relief est sans doute le facteur qui traduit le mieux la partition du bassin entre le cours supérieur aux hautes terres, le cours moyen au relief moyen (altitudes moyennes) et le cours inférieur aux régions de plaines (faibles altitudes). L'analyse morphométrique est une démarche importante pour la hiérarchisation des bassins versants même sans tenir compte de la carte des sols (Biswas et al., 1999 ; Faye, 2013) Pour ce faire, nous pouvons recourir à un ensemble de paramètres quantitatifs importants dans la compréhension du dynamisme d'une rivière : superficie, périmètre, indice de compacité de Gravelius, indice de pente, pente moyenne du cours d'eau, altitude moyenne. Pour faire une étude statistique, il faut choisir des variables complémentaires pour synthétiser au mieux l'information portée par l'ensemble des variables devant une série de données et de trouver une représentation plane de l'ensemble des variables dans un espace réduit permettant une visualisation des liens numériques et de déceler des facteurs latents.

Pour l'analyse du dépôt solide on a adopté une méthodologie qui est basée sur des tests paramétriques qui se basent sur des distributions statistiques supposées dans les données. Ils fonctionnent en supposant que les données que l'on a à disposition suivent un type de loi de distribution connu (en général la loi normale). Ces tests sont en général très fins, mais ils nécessitent que les données suivent effectivement la loi de distribution supposée (Figure 3.1). Ils sont en particulier très sensibles aux valeurs aberrantes et ne sont pas conseillés si des valeurs aberrantes sont détectées.



**Figure 3.1** : Loi de distribution

Parmi ces tests, on a opté pour une analyse en composantes principales (ACP) qui est une analyse statistique des caractéristiques morphométriques générales du bassin et leurs impacts sur l'érosion hydrique. Il s'agit ici d'analyser les corrélations entre les variables et d'identifier des sous bassins qui se différencient fortement des autres. L'objectif est de déterminer les différentes affinités et distinctions notées entre sous bassins et d'indiquer la relation entre les facteurs physiques. Pour ce faire, trois questions sont soulevées : les ressemblances entre sous bassins, les liaisons entre paramètres et les relations entre ces paramètres et l'érosion hydrique.

### **3.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)**

L'analyse en composantes principales est une méthode d'analyse des données permettant l'étude simultanée d'un grand nombre de variables dont l'information totale ne peut pas être visualisée. C'est une méthode très efficace pour l'analyse de données quantitatives (continues ou discrètes) qui permet de visualiser et analyser rapidement les corrélations entre les variables et les observations initialement décrites par les variables sur un graphique à deux

ou trois dimensions, construit de manière à ce que la dispersion entre les données soit aussi bien préservée que possible.

### 3.2.1. Principe de l'A.C.P

On cherche une représentation des  $n$  individus, dans un sous-espace  $F_k$  de  $R^p$  de dimension  $k$  (Figure 3.2). Autrement dit, on cherche à définir  $k$  nouvelles variables combinaisons linéaires des  $p$  variables initiales qui feront perdre le moins d'information possible.

Ces variables seront appelées «composantes principales », les axes qu'elles déterminent : « axes principaux » et les formes linéaires associées : « facteurs principaux ».

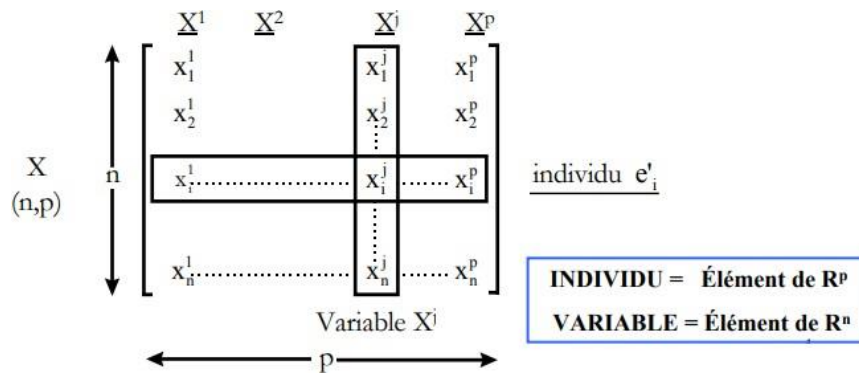


Figure 3.2 : Individus et variable dans une ACP

- **Choix de la distance entre individus**

- Dans le plan :

$$d^2(A, B) = (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 \quad (3.1)$$

- Dans l'espace  $R^p$  à  $p$  dimensions, on généralise cette notion : la distance euclidienne entre deux individus s'écrit :

$$e_i = (X_i^1 \ X_i^2 \ \dots \ X_i^p) \quad e_j = (X_j^1 \ X_j^2 \ \dots \ X_j^p)$$

$$d^2(e_i, e_j) = (X_i^1 - X_j^1)^2 + (X_i^2 - X_j^2)^2 + \dots + (X_i^p - X_j^p)^2$$

$$d^2(e_i, e_j) = \sum_{k=1}^p (X_i^k - X_j^k)^2 \quad (3.2)$$

L'observation  $X_i^k$  est alors remplacée par l'unité d'écart type :

$$\text{Unité d'écart type} = \frac{X_i^k - \bar{X}^k}{S_k} \quad (3.3)$$

où :  $\bar{X}^k$  = moyenne de la variable  $X^k$

$S_k$  = écart-type de la variable  $X^k$

- **Inertie totale**

L'inertie est la somme pondérée des carrés des distances des individus au centre de gravité  $\underline{g}$ .

Elle mesure la dispersion totale du nuage de points.

L'inertie est donc aussi égale à la somme des variances des variables étudiées. En notant  $V$  la matrice de variances-covariances :

$$V = \begin{pmatrix} s_1^2 & s_{12} & \dots & s_{1p} \\ \vdots & s_2^2 & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ s_{p1} & & & s_p^2 \end{pmatrix}$$

$$I_g = \sum_{i=1}^p S_i^2 \quad (3.4)$$

Dans le cas où les variables sont centrées réduites, la variance de chaque variable vaut 1.

L'inertie totale est alors égale à  $p$  (nombre de variables).

La recherche d'axes portant le maximum d'inertie équivaut à la construction de nouvelles variables (auxquelles sont associés ces axes) de variance maximale. En d'autres termes, on effectue un changement de repère dans  $R_p$  de façon à se placer dans un nouveau système de représentation où le premier axe apporte le plus possible de l'inertie totale du nuage, le deuxième axe le plus possible de l'inertie non prise en compte par le premier axe, et ainsi de suite. Cette réorganisation s'appuie sur la diagonalisation de la matrice de variances-covariances.

- **Axes principaux**

On appelle axes principaux d'inertie les axes de direction des vecteurs propres de  $V$  normés à 1. Il y en a  $p$ . Le premier axe est celui associé à la plus grande valeur propre. On le note  $u^1$  et le deuxième axe est celui associé à la deuxième valeur propre. On le note  $u^2$ .



- **Composantes principales**

À chaque axe est associée une variable appelée composante principale.

La composante  $C^1$  est le vecteur renfermant les coordonnées des projections des individus sur l'axe 1.

La composante  $C^2$  est le vecteur renfermant les coordonnées des projections des individus sur l'axe 2.

Pour obtenir ces coordonnées, on écrit que chaque composante principale est une combinaison linéaire des variables initiales.

$$\underline{C^1} = U_1^1 \underline{X^1} + U_2^1 \underline{X^2} + \dots + U_p^1 \underline{X^{1p}} \quad (3.5)$$

- **Propriétés des composantes principales**

- La variance d'une composante principale est égale à l'inertie portée par l'axe principal qui lui est associé.

1<sup>ère</sup> Composante  $C^1$  variance :  $\lambda_1$

2<sup>ème</sup> Composante  $C^2$  variance :  $\lambda_2$

3<sup>ème</sup> Composante  $C^3$  variance :  $\lambda_3$

Les composantes principales sont non corrélées deux à deux. En effet, les axes associés sont orthogonaux. Si on désire une représentation plane des individus, la meilleure sera celle réalisée grâce aux deux premières composantes principales.

- **Représentation des variables**

Les « proximités » entre les composantes principales et les variables initiales sont mesurées par les covariances, et surtout les corrélations. Classiquement, on utilise un coefficient de corrélation (Pearson) et non la covariance car l'utilisation du coefficient de corrélation permet de supprimer les effets d'échelle : ainsi une variable variant entre 0 et 1 ne pèse pas plus dans la projection qu'une variable variant entre 0 et 1000. Toutefois, dans certains domaines, lorsque les variables sont supposées être sur des échelles identiques, ou lorsque l'on veut que la variance des variables influe sur la construction des facteurs, on utilise la covariance.

### 3.2.2. Interprétation des résultats d'une Analyse en Composantes Principales

La représentation des variables dans l'espace des  $k$  facteurs permet d'interpréter visuellement les corrélations entre les variables d'une part, et entre les variables et les facteurs d'autre part, moyennant certaines précautions. En effet, qu'il s'agisse de la représentation des observations ou des variables dans l'espace des facteurs, deux points très éloignés dans un espace à  $k$  dimensions peuvent apparaître proches dans un espace à 2 dimensions en fonction de la direction utilisée pour la projection.

On peut considérer que la projection d'un point sur un axe, un plan ou un espace à 3 dimensions est fiable si la somme des cosinus carrés sur les axes de représentation n'est pas trop éloignée de 1. Les cosinus carrés sont affichés dans les résultats afin d'éviter toute mauvaise interprétation.

Si les facteurs doivent être utilisés par la suite avec d'autres méthodes, il est intéressant d'étudier la contribution relative (exprimée en % ou en proportion) des différentes variables à la construction de chacun des axes factoriels, afin de rendre les résultats obtenus ensuite facilement interprétables.

- **Nombre de facteurs à prendre en compte dans l'Analyse en Composantes Principales**

Deux méthodes sont communément utilisées pour déterminer quel nombre de facteurs doit être retenu pour l'interprétation des résultats :

- Le scree test (Cattell, 1966) est fondé sur la courbe décroissante des valeurs propres. Le nombre de facteurs à retenir correspond au premier point d'inflexion détecté sur la courbe.
- On peut aussi se fonder sur le pourcentage cumulé de variabilité représenté par les axes factoriels et décider de se contenter d'un certain pourcentage.

### 3.2.3. Représentations graphiques des résultats de l'Analyse en Composantes Principales

L'un des avantages de l'Analyse en Composantes Principales est qu'elle fournit à la fois une visualisation optimale des variables et des données, et des biplots mélangeant les deux. Néanmoins, ces représentations ne sont fiables que si la somme des pourcentages de variabilité associés aux axes de l'espace de représentation, est suffisamment élevée. Si ce pourcentage est élevé (par exemple 80%), on peut considérer que la représentation est fiable. Si le pourcentage

est faible, il est conseillé de faire des représentations sur plusieurs couples d'axes afin de valider l'interprétation faite sur les deux premiers axes factoriels.

- **Biplots d'une Analyse en Composantes Principales**

Suite à une Analyse en Composantes Principales, il est possible de représenter simultanément dans l'espace des facteurs à la fois les observations et les variables. Les premiers travaux sur ce sujet datent de Gabriel (1971). Legendre (1998) a synthétisé les travaux précédents et a étendu cette technique de représentation graphique à d'autres méthodes. Le terme biplot est réservé aux représentations simultanées qui respectent le fait que la projection des observations sur les vecteurs variables doit être représentative des données d'entrée pour ces mêmes variables. Autrement dit, les points projetés sur le vecteur variable, doivent respecter l'ordre et les distances relatives des données de départ correspondant à la même variable.

La représentation simultanée des observations et des variables ne peut être faite directement en prenant les coordonnées des variables et des observations dans l'espace des facteurs. Une transformation est nécessaire afin de rendre l'interprétation exacte. Trois méthodes sont proposées en fonction du type d'interprétation que l'on souhaite pouvoir faire à partir de la représentation graphique :

- **Biplot de corrélation (correlation biplot) :** ce type de biplot permet d'interpréter les angles entre les variables car ils sont directement liés aux corrélations entre les variables. La position de deux observations projetées sur un vecteur variable permet de conclure quant à leur niveau relatif sur cette même variable. La distance entre deux observations est une approximation de la distance de Mahalanobis dans l'espace des  $k$  facteurs. Enfin, la projection d'un vecteur variable dans l'espace de représentation est une approximation de l'écart-type de la variable (la longueur du vecteur dans l'espace des  $k$  facteurs est égale à l'écart-type de la variable).
- **Biplot de distance (distance biplot) :** un biplot de distance permet d'interpréter les distances entre les observations car elles sont une approximation de leur distance euclidienne dans l'espace des  $p$  variables. La position de deux observations projetées sur un vecteur variable permet de conclure quant à leur niveau relatif sur cette même variable. Enfin, la longueur d'un vecteur variable dans l'espace de représentation est

représentative du niveau de contribution de la variable à la construction de cet espace (la longueur du vecteur est la racine carrée de la somme des contributions).

- Biplot symétrique (symmetric biplot) : ce biplot proposé par Jobson (1992) est intermédiaire entre les deux biplots précédents. Si ni les angles ni les distances ne peuvent être interprétés, on peut choisir cette représentation car elle est un compromis entre les deux.

### 3.3. Application de l'analyse en composante principales

Afin d'extraire les variables qui influencent la sédimentation des retenues, une analyse a été appliquée par le biais du logiciel statistique XLSTAT.

Le choix du module Analyse en Composantes Principales du logiciel XLSTAT va nous permettre de visualiser un ensemble de résultats tels que : une statistique sommaire des variables étudiées (moyenne, écart-type) ; la matrice des corrélations des variables ; le tableau des valeurs propres de la matrice de corrélation ainsi que le pourcentage d'explication de chaque valeur propre ; un plan de projection des variables ; un plan de projection des individus

#### 3.3.1. Première approche : 36 Observations avec 7 variables

La première approche a consisté à considérer un ensemble de sept variables caractéristiques, de trente-six bassins versants de l'Afrique du Nord considérés comme observation, à savoir : dix barrages de l'Algérie, quatre barrages et dix-sept retenues collinaires de la Tunisie et cinq barrages du Maroc (tableau 3.1). Les variables utilisées sont la surface (S), le périmètre (P), l'indice de compacité, l'altitude moyenne (Altmoy), le coefficient d'écoulement (Ce), la pluviométrie annuelle et l'érosion spécifique (Ta).

<b>Tableau 3.1</b> : Caractéristiques hydro- morphométriques des bassins versants de 14 barrages étudiés								
N°	Nom	S	Pr	Ic	Altmoy	Ce	Pl	Ta
<i>Barrages en Algérie</i>								
1	SMBA	4801	378	1.5	772	6	448	1154.44
2	Bouhanifia	5566	520	2	777	6	401	180.81
3	Gargar	2362	304	1.8	646	18	448	4853.93
4	Ouizert	2144	251	1.5	862	9	413	284
5	Fergoug	574	125	1.5	399	22	430	1225.6

6	El Izdihar	1139	209	1.73	838	10	370	128.55
7	Koudiat Medouar	731.32	137.53	1.43	1267	1.94	375	531
8	Chartioua	110	49	1.31	998	63	488	421
9	Zeddine	898.54	174	1.62	640	14	580	312
10	Harreza	743.97	143	1.76	575	12	490	165
<i>Retenues collinaires en Tunisie</i>								
1	Sadine1	3.84	9.7	1.3	546	17.9	52	8.2
2	Sadine2	6.53	16.8	1.8	546	96.6	40	15.8
3	M'Richet	1.58	5.5	1.2	660	19.4	27.5	7.8
4	Hadada	4.69	9.9	1.2	573	23.8	21	7.5
5	Jannet	5.21	12.9	1.5	505.5	77.4	36.6	17.9
6	ElHanech	3.95	9.5	1.3	640.5	39.4	18.3	7.9
7	Abdessadok	3.07	7.9	1.2	502	27.1	78	10.6
8	Fidh Ben Naceur	1.69	5.7	1.2	406	9.2	33	9.7
9	FidhAli	4.12	6.6	1.2	389.5	15.1	11	16
10	El Gouazine	8.10	25.8	1.7	475.5	5	55.3	1.1
11	Dékikira	3.07	7.6	1.2	429.5	24.4	55	13.9
12	Saadine	2.72	8.2	1.4	398.5	34.2	82	16.9
13	Sbahia1	3.24	7.3	1.1	386.5	17.6	66.5	10.9
14	Es Séguir	4.31	10	1.3	150.5	3.5	17.5	1.2
15	El Melah	8.5	4.1	1.2	117	13.7	44	5
16	Kamech	2.45	7.2	1.3	149	24	74	17.5
17	Es Sénégal	3.63	8.5	1.2	750.5	15.9	17.5	10.9
<i>Barrages en Tunisie</i>								
1	Siliana	1039	146	1.5	1025	72	556.9	13.8
2	El Azire	40.66	26.18	1.42	517.5	32	632	50
3	barbara	174.84	84.95	1.8	550	23.39	875	782.11
4	Ghézala	47.23	39.4	1.6	280	19.2	705.3	846.91
<i>Barrages au Maroc</i>								
1	Bourgreg	3800	430.31	1.87	671.46	76.21	433	200
2	N'Fis	823.8	187.1	1.67	2074	44	373.2	115
3	Ourika	503	104	1.3	2500	40	543	380
4	Rhéraya	225	78	1.46	2154	50	352.7	700
5	Ksob	1480	208	1.5	745	56.4	330	800

### 3.3.1.1. Analyse et interprétation de la matrice de corrélation

Cette matrice permet d'identifier simultanément les relations qui existent entre les variables, par une visualisation globale de ces corrélations en même temps. Ceci représente une bonne approche permettant d'affiner l'analyse du problème de l'érosion. Les paramètres, géomorphologiques, anthropiques et hydro-climatiques des bassins versants intervenant dans la variabilité de l'écoulement et l'érosion, sont susceptibles d'expliquer l'envasement des retenues des différents individus étudiés.

<b>Tableau 3.2 : Matrice de corrélations entre les variables</b>							
Variables	S	Pr	Ic	Altmoy	Ce	Pl	Ta
S	<b>1</b>						
Pr	<b>0.953</b>	<b>1</b>					
Ic	<b>0.476</b>	<b>0.605</b>	<b>1</b>				
Altmoy	0.149	0.278	0.123	<b>1</b>			
Ce	-0.248	-0.212	0.176	0.244	<b>1</b>		
Pl	<b>0.334</b>	<b>0.489</b>	<b>0.565</b>	<b>0.338</b>	0.047	<b>1</b>	
Ta	<b>0.360</b>	<b>0.445</b>	<b>0.340</b>	0.065	-0.081	<b>0.361</b>	<b>1</b>

L'analyse de la matrice de corrélations entre les variables montre que la surface du bassin (S), le périmètre (Pr), la pluviométrie (Pl) et l'indice de compacité (Ic) sont liés entre eux et sont bien corrélés avec le taux d'envasement (Tableau 3.2). Ces derniers sont aussi corrélés mais négativement à l'indice d'écoulement (Ce). Le traitement de ces informations a permis d'identifier que la sédimentation dépend donc essentiellement de la taille, de la forme du bassin versant et des précipitations. L'effet d'altitude pourrait être explicité car la majorité des bassins versants sont montagneux (Abdelgader et al, 1996).

### 3.3.1.2. Analyse des variances sur les axes principaux

Dans le tableau (3.3) est représenté le pourcentage de la variance expliquée ainsi que celui de la variance cumulée par chaque axe factoriel responsable de la distribution du taux d'envasement. Les trois premiers axes représentent ensemble un poids de 76% de la variance totale.

Le pourcentage d'inertie cumulé sur les facteurs F1 et F2 est de 63.53%, donc c'est une bonne structure d'échantillonnage. Le premier axe exprime 43.1% de la variance totale et 20.43% pour le deuxième axe.

**Tableau 3.3** : Les valeurs propres des axes de l'analyse en composantes principale

<b>Tableau 3.3</b> : Valeurs propres des axes de l'analyse en composantes principale			
	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>
Valeur propre	3.017	1.430	0.866
Variabilité (%)	43.099	20.433	12.369
% cumulé	43.099	63.533	75.902

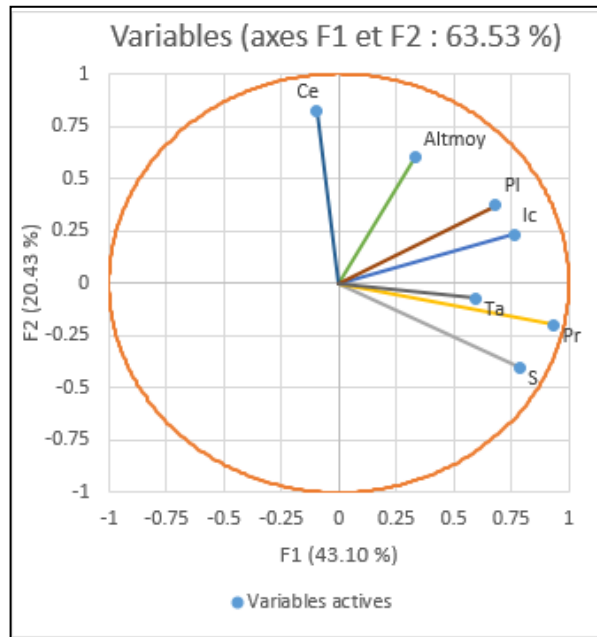
### 3.3.1.3. Analyse des variables

Les sept variables des trente-six observations ont été toutes retenues. La distribution des variables sur le premier plan factoriel formé par les axes F1 et F2 est illustré dans la figure (3.3). Le premier axe F1 qui présente 43.10 % de la variance totale, est défini par les variables : Ta (érosion spécifique), Pr (périmètre), S (surface), Ic (l'indice de compacité) et Pl (pluviométrie annuelle).

- **Représentation des variables sur le plan (F1, F2)**

La projection des variables sur l'axe 1 montre de bonnes corrélations, le paramètre hydrologique (Pl), la forme (Ic, Pr) et la surface du sol (S) sont bien corrélés au taux d'envasement (Ta). Ceci implique que les précipitations intensives aggravent le processus d'alluvionnement dans un bassin à relief accentué et superficie importante du bassin versant.

L'axe F1 individualise l'indice de compacité de Gravius (Ic) qui est bien prononcé, présentant alors l'effet de la forme des bassins. En effet, outre la topographie, la forme du bassin versant se révèle parmi les principaux facteurs qui contrôlent l'érosion spécifique annuelle (Verstraeten et al., 2003). En fait, plus les bassins sont allongés, plus leurs temps de concentration sont compensés par des pentes plus escarpées, moins l'effet réducteur de la sédimentation est observé. On note aussi une bonne corrélation entre les paramètres géométriques (Altmoy, Pr, S et Ic) et le paramètre hydrologique (Pl) qui présentent des coordonnées positives sur cet axe.



**Figure 3.3** : Projection des variables sur les axes 1 et 2

**Tableau 3.4** : Contributions des variables retenues pour la construction des axes de l'ACP

	F1	F2	F3
S	0.619	0.163	0.062
Pr	0.877	0.040	0.042
Ic	0.580	0.053	0.100
Altmoy	0.110	0.358	0.409
Ce	0.009	0.672	0.029
Pl	0.466	0.139	0.027
Ta	0.355	0.005	0.198

- **Représentation des variables sur le plan (F1, F3)**

Le taux d'envasement est bien représenté sur ce plan. L'axe F1 caractérise l'impact de l'agressivité des pluies engendrant des crues exceptionnelles. L'axe F3 est principalement associé aux caractéristiques hydromorphologiques du bassin versant (Tableau 3.4). L'axe oppose les altitudes moyennes (Altmoy) au taux d'envasement (Ta) tandis que la pluviométrie annuelle (Pl), la surface (S) et l'indice de forme (Ic) évoluent selon le gradient du taux d'envasement (Figure 3.4). En effet les bassins d'altitudes sont aussi ceux qui ont le moins de



sol et où les affleurements rocheux délivrent le moins de matériaux. A l'inverse les pluies de fortes intensités et de longues durées engendrent de fortes crues lesquelles produisent beaucoup de particules à l'exutoire d'un bassin versant (Hajji et al., 2014). De plus cette aptitude à l'érosion peut être accentuée, lorsque le bassin présente un fort relief.

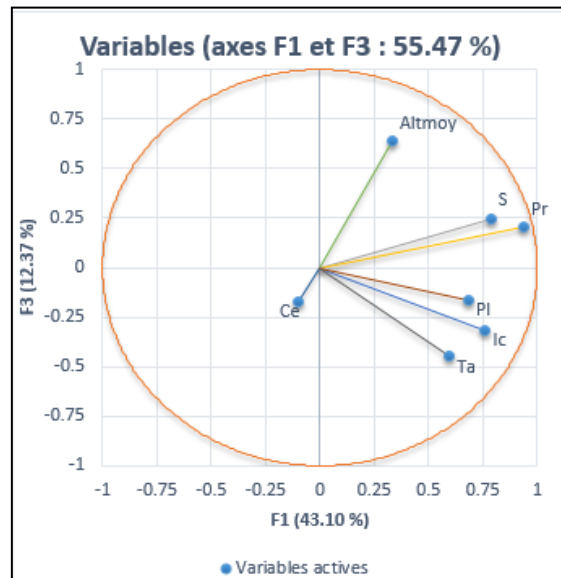


Figure 3.4 : Projection des variables sur les axes 1 et 3

### 3.3.1.4. Analyse des individus

- **Représentation des individus sur le plan (F1, F2)**

La représentation des individus suivant leurs poids (Tableau 3.5), sur le plan factoriel formé par les deux axes F1 et F2 de l'ACP (figure 3.5) montre globalement cinq groupes distincts : le premier groupe (Sadine 2, Chartioua, Jannet et El Azire) caractérisé par de fortes valeurs des coefficients d'écoulement, est opposé selon l'axe 1 au second groupe (Sadine1, M'Richet, El Hanech, Abdessadok, FidhAli, El Gouazine, Saadine, Sbahia1, Es Séguir et El Melah) qui possèdent les plus petites tailles (retenues collinaires). On distingue un troisième groupe (Ourika, Rhéraya, Bouregreg, N'Fis et Siliana) qui se caractérisent par un relief fort. Ces bassins d'altitudes ont le moins de sol car les affleurements rocheux délivrent le moins de matériaux, ce qui conduit à un faible effet de l'érosion au niveau de ces sites. Le quatrième groupe (Barbara, Ksob, Ghézala, Zeddine, Harreza, Fergoug, Izdihar, Koudiat Medouar et Ouizert) est caractérisé par des précipitations intensives et des reliefs accentués et sont bien corrélés avec le taux d'envasement. Enfin le cinquième groupe (Gargar, Sidi Mohamen Ben Aouda et Bouhanifia) présente une surface importante et un taux d'envasement fort.

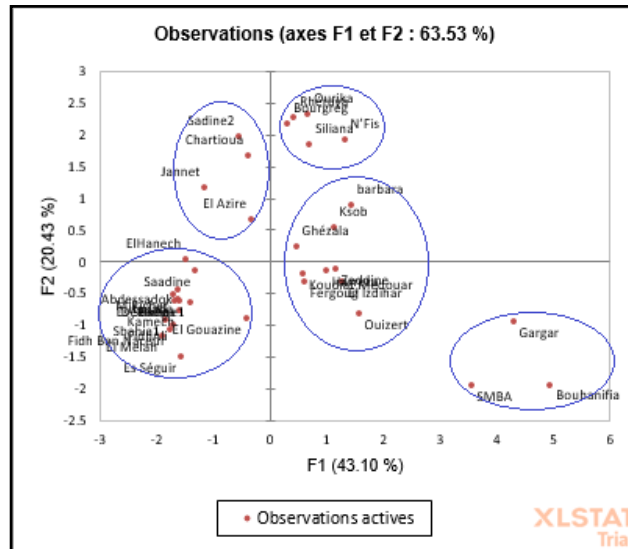


Figure 3.5 : Projection des individus sur les axes 1 et 2

Tableau 3.5 : Contributions des individus exprimées en pourcentages

Individus	F1	F2	Individus	F1	F2	Individus	F1	F2
Sadine1	1.817	0.791	Sbahia1	3.146	1.669	barbara	1.903	1.555
Sadine2	0.261	7.546	Es Séguiir	2.228	4.351	Ghézala	0.202	0.098
M'Richet	2.662	0.542	El Melah	3.306	2.673	SMBA	11.613	7.433
Hadada	2.399	0.669	Kamech	2.328	1.155	Bouhanifia	22.571	7.343
Jannet	1.194	2.621	Es Sénégal	2.303	0.745	Gargar	16.982	1.753
ElHanech	1.997	0.002	Ouirika	0.428	10.493	Ouizert	2.273	1.326
Abdessadok	2.433	0.371	Rhéraya	0.171	9.953	Fergoug	0.348	0.192
Fidh Ben Naceur	2.834	2.212	Ksob	1.169	0.558	El Izdihar	1.519	0.209
FidhAli	2.693	1.982	Bourgreg	0.097	9.193	Koudiat Medouar	0.322	0.082
El Gouazine	0.154	1.541	N'Fis	1.616	7.238	Chartioua	0.131	5.449
Dékikira	2.608	0.734	Siliiana	0.460	6.560	Zeddine	1.242	0.027
Saadine	1.573	0.043	El Azire	0.095	0.853	Harreza	0.921	0.038

### 3.3.2. Deuxième approche : 14 Observations et 9 variables

La deuxième approche a consisté à quantifier l'érosion spécifique pour 19 barrages de l'Afrique du Nord (de même ordre de grandeur sans les retenues collinaires), à savoir : cinq barrages de l'Algérie, quatre barrages de la Tunisie et cinq barrages du Maroc. Les variables prises en compte sont la surface (S), le périmètre (P), l'indice de compacité, la pente, l'altitude moyenne (Altmoy), le coefficient de ruissèlement (Cr), la longueur du cour d'eau (lce), la pluviométrie annuelle (PI) et l'érosion spécifique (Ta), ces paramètres sont exposés dans le tableau (3.6).

<b>Tableau 3.6 : Caractéristiques hydro-morphométriques des bassins versants de 14 barrages étudiés</b>									
Nom	S (km <sup>2</sup> )	P (km)	Ic	Pente %	Alt <sub>moy</sub> (m)	Cr (%)	Longueur du cours d'eau (km)	Pluie (mm)	Erosion spécifique /ha/an)
<i>Barrages en Algérie</i>									
SMBA	4801	378	1.5	5.9	772	6	90	448	1154.44
Bouhanifia	5566	520	2	5.5	777	6	126	401	180.81
Gargar	2362	304	1.8	5.1	646	18	53.46	448	4853.93
Ouzert	2144	251	1.5	7.1	862	9	40.19	413	284
Fergoug	574	125	1.5	3.3	399	22	35	430	1225.6
<i>Barrages en Tunisie</i>									
Siliana	1039	146	1.5	7,47	1025	72	66.75	556,9	13,8
El Azire	40.66	26.18	1.42	5.83	517.5	32	14.24	632	50
barbara	174,84	84,95	1.8	3.86	550	23.39	32,79	875	782.11
Ghézala	47.23	39,40	1.6	8.5	280	19.2	16,55	705.3	846.91
<i>Barrages au Maroc</i>									
Ourika	503	104	1.3	2.15	2500	40	32	543	380
Rhéraya	225	78	1.46	3.2	2154	50	45,6	352,7	700
Ksob	1480	208	1.5	1.5	745	56.4	105	330	800
Bourgreg	3800	430.31	1.87	3.06	671.46	76.21	14.307	433	200
N'Fis	823.8	187.1	1,67	3.5	2074	44	67,9	373,2	115

La reconstitution finale de la distribution des sous bassins versants, nous a permis de définir les axes factoriels ou facteurs responsables de cette distribution et par conséquent, faire ressortir les affinités entre les différents sous bassins versants et déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux.

### 3.3.2.1. Analyse et interprétation de la matrice de corrélation

Les paramètres, géomorphologiques, anthropiques et hydro-climatiques des bassins versants intervenant dans la variabilité de l'écoulement et l'érosion, sont susceptibles d'expliquer l'envasement des retenues des différents individus étudiés.

Toutefois, le nombre élevé de ces variables peut rendre l'étude pénible. Dans ce contexte, la matrice de corrélation (Tableau 3.7), étant une étape primordiale dans la prise de connaissance des données, mettra en évidence les couples de variables explicatives les plus structurées et pourra soutenir, par la suite, le choix des différents paramètres pertinents qui vont être utilisés lors de la construction ultérieure des composantes principales.

**Tableau 3.7 : Matrice de corrélations entre les variables**

Variables	S	Pr	Ic	Pente	Alt <sub>moy</sub>	Cr	Lce	Pl	Ta
S	<b>1</b>								
Pr	<b>0.971</b>	<b>1</b>							
Ic	0.347	0.405	<b>1</b>						
Pente	0.224	0.143	0.055	<b>1</b>					
Alt <sub>moy</sub>	-0.146	-0.084	-0.368	-0.437	<b>1</b>				
Cr	<b>-0.558</b>	<b>-0.535</b>	-0.128	-0.381	0.304	<b>1</b>			
Lce	<b>0.796</b>	<b>0.838</b>	0.258	-0.091	0.055	-0.168	<b>1</b>		
Pl	-0.369	-0.436	0.036	0.340	-0.320	-0.152	-0.497	<b>1</b>	
Ta	0.165	0.243	0.214	0.251	-0.232	-0.289	0.029	-0.085	<b>1</b>

Plus la pente du terrain est forte plus l'effet de l'érosion devient important et par conséquent un taux d'envasement important à l'aval du bassin. Ceci explique le coefficient de corrélation positif (0,351) entre pente (Pente) et le taux d'envasement (Ta). Plus le relief correspond à une topographie prononcée, plus le potentiel érosif ainsi que la quantité du transport solide diffusée sont importants, ce qui justifie, par la suite, la source majeure du processus de l'envasement.

Le pourcentage de variance expliquée ainsi que celui de la variance cumulée par chaque axe factoriel est illustré dans le tableau (3.8). Les trois premiers axes représentent ensemble un poids de 74% de la variance totale. Le pourcentage d'inertie cumulé sur les facteurs F1 et F2 est de 61.88%. Le premier axe exprime 38.40 % de la variance totale et 23.49 % pour le deuxième axe.

	F1	F2	F3
Valeur propre	3.455	2.114	1.100
Variabilité (%)	38.393	23.489	12.225
% cumulé	38.393	61.882	74.107

### 3.3.2.2. Analyse des variables

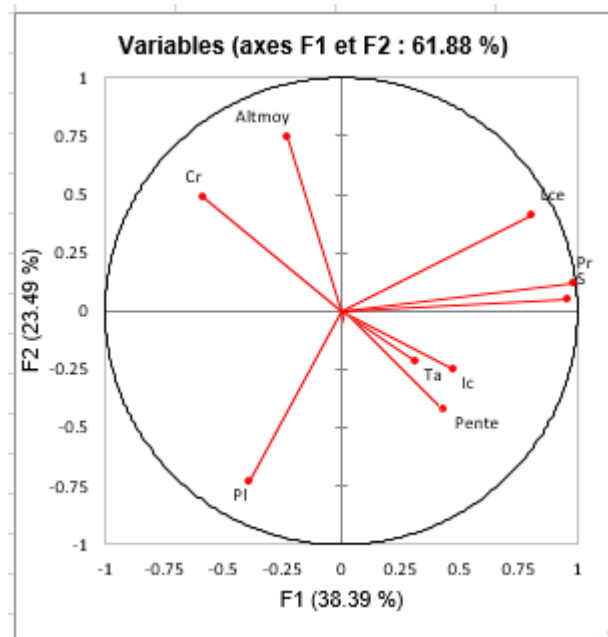
Le premier axe F1 est défini par les variables : Ta (érosion spécifique), Pr (périmètre), S (surface), Ic (l'indice de compacité) et Pl (pluviométrie annuelle).

	F1	F2	F3
S	<b>0.926</b>	0.002	0.032
Pr	<b>0.965</b>	0.014	0.005
Ic	0.225	0.062	0.262
Pente	0.040	<b>0.489</b>	0.219
Altmoy	0.053	<b>0.561</b>	0.048
Cr	<b>0.342</b>	0.235	0.043
Lce	<b>0.652</b>	0.167	0.011
Pl	0.154	<b>0.536</b>	0.009
Ta	0.099	0.046	<b>0.470</b>

Le tableau (3.9) des Contributions des variables montre que l'axe F1 est bien corrélé positivement à la superficie S (0.926), au périmètre Pr (0,965) et la longueur du cour d'eau (0,652) mais moyennement avec le coefficient de ruissèlement Cr (0.342).

L'axe F2 présente une bonne corrélation positive avec l'altitude moyenne Altmoy (0,561), la pluviométrie interannuelle (0.536) et la pente (0,489). Sa corrélation positive avec

les autres variables est très faible. Il en est de même pour l'axe F3 qui n'a de corrélation acceptable positive qu'avec le taux d'érosion spécifique (0,470) et assez bonne avec l'indice de compacité Ic (0.262). Ces différentes caractéristiques des paramètres morphométriques sont représentées respectivement dans des cercles et des plans (Figure 3.6).



**Figure 3.6** : Projection des variables sur les axes 1 et 2

### 3.3.2.3. Analyse des individus

Cette représentation a pour but de fournir des images planes approchées du nuage des sous bassins (individus) situés dans le plan. Ainsi, l'axe des abscisses représente la forme (taille) générale des bassins alors que celui des ordonnées représente leur profil. En effet, un bassin représenté sur la partie positive de l'axe 1 possède en général des paramètres de dimension importants.

Le plan de projection (F1, F2) met en évidence trois groupes (Figure 3.7) :

Le premier formé par les bassins versants caractérisés par les plus fortes valeurs de forme (S, Pr) et une moyenne pluviométrie (P) ; bassin, Bouhanifia, Bouregreg, Gargar et Sidi Med Ben Aouda. Ces bassins sont définis par un fort taux d'envasement.

Les zones les plus productives de sédiment du bassin versant du Bouregreg se situent en amont de Lala Chafia et de Sidi Jaber. Il s'agit de zones à pentes fortes sur substratum

schisteux et/ou magmatique à perméabilité très faible. Ces caractères favorisent le développement de crues violentes qui sont à l'origine du taux élevé de la sédimentation du barrage Bouregreg. Le bassin versant de Bouhanifia présente des versants susceptibles à l'érosion et sont dispersés sur tout le bassin et d'autres susceptibles à l'érosion en nappe et aux glissements de terrains et qui sont situés dans la partie Nord-Est et au centre du bassin. Pour le bassin versant de S.M.Ben Aouda, les zones subissant des pertes de sol importantes se situent principalement dans la région septentrionale et qui contrastent dans le paysage car elles sont agglomérées sur des versants abrupts et de forme allongée. Dans le bassin de Gargar, il existe plusieurs îlots d'érosion très prononcée, et ce notamment à l'Ouest de réservoir, au centre du bassin et dans la zone interfluve des oueds Rhiou et Tiguiguest. En général, ces versants sont sur des sols à nu ou caractérisés par des cultures agricoles sur pentes abruptes. (Rapport de Tecsalt, 2005).

Le second groupe est représenté par les bassins versants correspondant aux plus faibles valeurs de forme avec des valeurs relativement importantes d'altitude et un taux de sédimentation modéré ; Ourika, Rhéraya, N'Fis et Ksob.

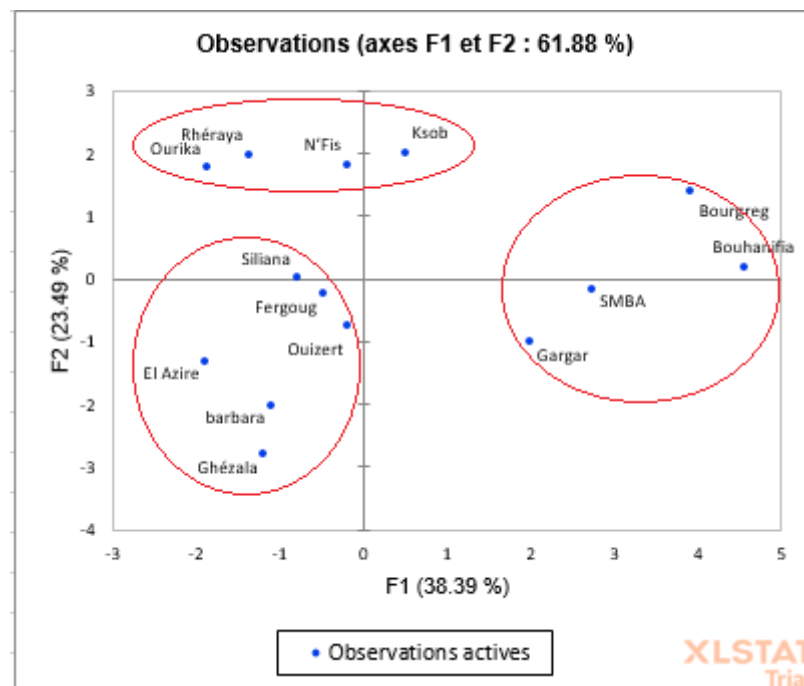
Le bassin de N'Fis présente un relief accentué, sous un climat semi-aride à sub-humide, caractérisé par une pluviométrie à forte variation spatio-temporelle (Hanich et al, 2006) qui favorisent une vulnérabilité accrue à l'érosion. Quant aux bassins d'Ourika et Rhéraya, ils sont caractérisés par des terrains accidentés avec des reliefs imposants et des formations lithologiques cristallines qui affleurent sur une grande partie des bassins et une végétation qui est limitée. Dans le bassin versant du Ksob, la charge solide charriée en période de crue par l'oued est très importante ; elle est composée de galets, de sables, de limons, d'argiles et de débris organiques. Ces matériaux transportés résultent aussi bien de la dégradation des versants abrupts que de la remobilisation des sédiments accumulés, en période de sécheresse, dans le lit de l'oued.

Le troisième groupe est constitué par les bassins versants ; Ouizert, Siliana, Fergoug, El Azire, Barbara et Ghézala, caractérisé par une pluviométrie importante et un taux d'érosion faible à modéré. Le bassin de Ouizert possède un peu de versants susceptibles à l'érosion qui se présentent sous la forme d'une bande allongée qui traverse le terrain d'Est en Ouest. Quant au bassin versant de Siliana, il est situé dans la dorsale Tunisienne et est caractérisé par une prolifération importante des différentes formes de dégradations des sols, de nombreux cours

d'eau, par en relief accidenté présentant des alternances de montagnes et de plaines ou de plateaux et une variabilité de pluie. Malgré une dénivelée faible, Le relief du bassin versant de Fergoug est manifestement accidenté. La déclivité des terres atteint environ 24% ce qui accentue le phénomène d'érosion.

Les caractéristiques physiques du bassin versant El Azire montrent un pouvoir d'érosion hydrique important comme la plupart des bassins versants de la Tunisie centrale. Il est moyennement aménagé surtout dans sa partie aval par des banquettes et des cordons en pierres sèches ce qui a réduit le pouvoir érosif du bassin.

Bien que la superficie du bassin versant de l'oued Barbara soit faible le taux d'érosion est important. Ce bassin présente un déficit hydrique qui conduit à une diminution du couvert végétal et par conséquent à des terrains dénudés. À cela s'ajoutent les pentes fortes, qui rendent le bassin versant extrêmement sensible à l'érosion hydrique. L'action de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Ghézala est favorisée par les pluies intenses mal réparties et l'action de l'homme. En effet, la forte pression exercée sur les sols aussi bien par le labour que par le surpâturage pour subvenir aux besoins de la population de cette zone a exposé le sol à une dégradation qui se manifeste par différents phénomènes érosifs.



**Figure 3.7** : Projection des individus sur les axes 1 et 2



### 3.4. Conclusion

Cette étude s'est basée sur une série de paramètres morphométriques obtenus sur un ensemble de sous bassins pour indiquer des paramètres résumant le mieux l'information portée par ces descripteurs, un bilan de liaison entre les paramètres, une représentation plane optimale des sous bassins, une classification des sous bassins selon les variables.

L'analyse en composantes principales (ACP) a mis en évidence les affinités entre les différents sous bassins versants quel que soit leur appartenance et a permis de déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux et les rattacher à des groupes distincts.

L'examen des caractéristiques physiques de ces bassins versants a montré que ce sont surtout les caractéristiques de dimension ou de forme (Superficie, Périmètre, Coefficient de compacité) qui ont régi le classement statistique des différents sous bassins versants en groupes distincts.

Dans la première approche où 36 barrages et retenues collinaires qui se répartissent sur des zones situés au Nord de l'Afrique (l'Algérie, la Tunisie et le Maroc), l'ACP a permis de diviser les individus (Barrage) en des groupes sur la base des valeurs des variables qui les caractérisent. Ainsi cette analyse a fait ressurgir cinq groupes qui se caractérisent par leurs paramètres hydromorphométriques. Eventuellement, les caractéristiques de dimension ou de forme et le régime d'écoulement, impactent considérablement sur le taux d'envasement dans les différents sous bassins.

La deuxième approche a consisté à évaluer le taux d'envasement pour 19 barrages de l'Afrique du Nord (de même ordre de grandeur sans les retenues collinaires) En fonction d'autres paramètres morphométriques, pour voir comment les lois de distribution régissaient. Trois groupes se sont formés.

Le premier groupe se caractérise par des bassins occupant tous des superficies largement supérieures à celles des autres bassins et génèrent un taux d'érosion élevé ; le second groupe est représenté par les bassins versants correspondant aux plus faibles valeurs de forme avec des valeurs relativement importantes d'altitude et un taux de sédimentation modéré et enfin le troisième groupe qui est constitué par des bassins versants caractérisés par une pluviométrie importante et un taux d'érosion faible à modéré.

# **Chapitre 4**

Analyse non paramétrique de  
l'érosion spécifique

# Chapitre 4

## Analyse non paramétrique de l'érosion spécifique

### 4.1. Introduction

Le calcul de la sédimentation dans une retenue est considéré comme étant un outil de prévision lors de la planification, la conception et l'exploitation d'un ouvrage hydraulique. La genèse, les transports et dépôts des sédiments sont des processus dynamiques complexes. Ces processus "à discontinuité temporelle et spatiale" restent difficiles à quantifier individuellement, chacun d'entre eux étant étroitement lié au "chaînon amont ou aval". Par contre, la mesure des sédiments au niveau des barrages est un résultat intégrant tous ces processus. L'insuffisance de certaines formules existantes réside dans l'estimation du transport solide en suspension seul, et ne tiennent pas compte du transport solide charrié, et surtout qu'il est difficile de transformer des charges solides (en tonnes) en volumes de sédiments suite à la variabilité spatio-temporelle de la densité des sédiments d'un barrage à l'autre (conditions locales) ; suivant la situation amont ou aval, en surface ou en profondeur dans une même cuvette (Adjel et Smail, 1985). D'autres équations ou abaques (Johnson, 1983), nécessitent parfois l'élaboration de cartes lithologiques et des calculs fastidieux.

Les travaux relatifs à la modélisation du phénomène d'érosion et du transport solide ont mis aux points des relations liant le transport solide aux paramètres explicatifs. En Algérie comme dans les autres pays méditerranéens, de nombreux modèles ont été mis au point dans le but de développer une expression du transport solide. Durant les deux dernières décennies, les réseaux neuronaux artificiels ont montré une performance exceptionnelle comme outils de régression, surtout pour les problèmes de classification et de reconnaissance des formes.

Les caractéristiques principales des réseaux neuronaux sont leur non linéarité et leur capacité d'inférer des relations, inconnues au préalable, entre les données. De plus, ils peuvent manier les données qui sont incomplètes et imprécises. Ces caractéristiques font d'eux un outil convenable pour les problèmes mal connus. Les principaux inconvénients des réseaux neuronaux résident dans le fait qu'ils sont difficiles à manier et peuvent être lents dans la recherche d'une solution durant l'étape du développement.

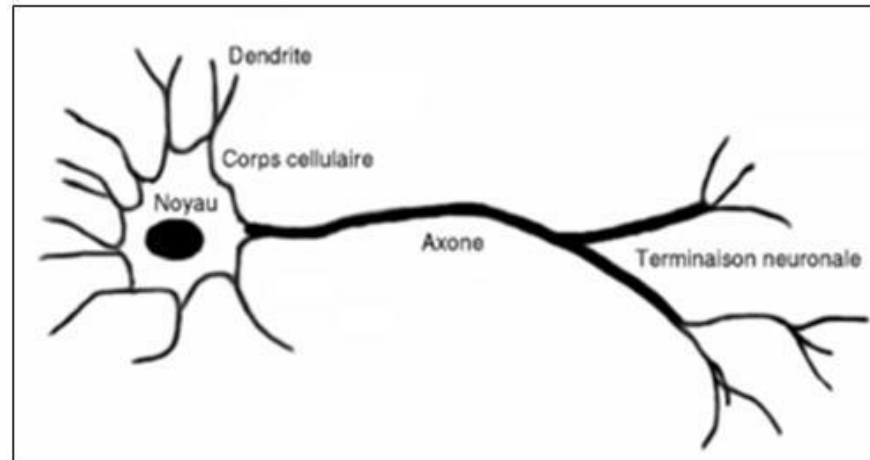
La méthodologie adoptée dans notre étude est innovatrice et vise à produire une relation régionale et ce, grâce à l'utilisation des outils statistiques non paramétriques basés sur la méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA), qui est beaucoup plus performante que les méthodes paramétriques qui nécessitent une large base de données de développement assez exacte (Djebbar et Kadota, 1998).

## 4.2. Applications

Les réseaux de neurones, fabriqués de structures cellulaires artificielles, constituent une approche permettant d'aborder sous des angles nouveaux les problèmes de perception, de mémoire, d'apprentissage et de raisonnement. Ils s'avèrent aussi des alternatives très prometteuses pour contourner certaines limitations des ordinateurs classiques. Grâce à leur traitement parallèle de l'information et à leurs mécanismes inspirés des cellules nerveuses (neurones), ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner des problèmes jadis qualifiés de complexes. Le cerveau humain contient environ 100 milliards de neurones. Les neurones reçoivent les signaux (impulsions électriques) par des extensions très ramifiées de leur corps cellulaire (les dendrites) et envoient l'information par de longs prolongements (les axones). Les impulsions électriques sont régénérées pendant le parcours le long de l'axone. La durée de chaque impulsion est de l'ordre d'1 ms et son amplitude d'environ 100 Mvolts. Les contacts entre deux neurones, de l'axone à une dendrite, se font par l'intermédiaire des synapses. Chaque neurone intègre en permanence jusqu'à un millier de signaux synaptiques. Ces signaux n'opèrent pas de manière linéaire (effet de seuil).

La première application concrète des réseaux de neurones artificiels est survenue vers la fin des années 1950 avec l'invention du réseau dit «perceptron» par un dénommé Frank Rosenblatt et ses collègues qui ont construit un réseau à propagation avant avec seulement deux couches ; entrée et sortie entièrement interconnectées, et ont démontré ses habilités à reconnaître des formes. Malheureusement, il a été démontré par la suite que ce perceptron simple, ne pouvait résoudre qu'une classe limitée de problème.

Environ au même moment, Bernard Widrow et Ted Hoff ont proposé un nouvel algorithme d'apprentissage pour entrainer un réseau adaptatif.



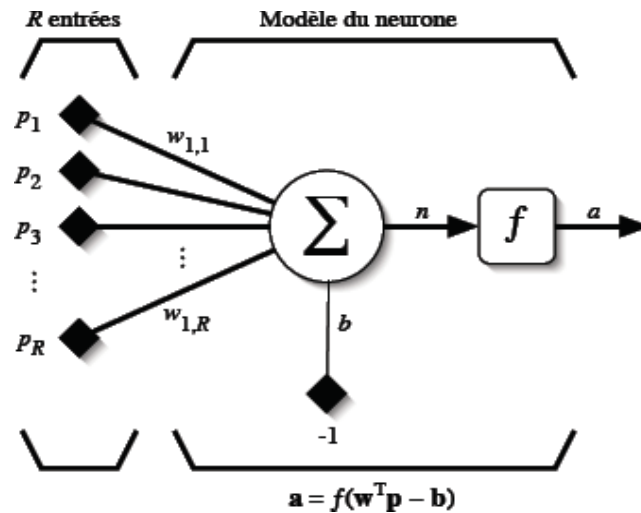
**Figure 4.1** : Schéma d'un neurone biologique

Les réseaux de neurones servent aujourd'hui à toutes sortes d'applications dans divers domaines. Ils sont appliqués dans le domaine hydrométéorologique, à des fins de prévision, concernent généralement la prévision des débits des rivières comme l'estimation des précipitations, la prévision des apports naturels aux réservoirs d'irrigation. Dans le domaine de la prévision de la qualité de l'eau, les études réalisées portaient sur la prévision de la salinité (Maier et Dandy, 1996), l'acidité et la conductivité (Bastarache et al., 1997) et sur le pouvoir de dissolution de l'eau des produits chimiques à base de carbone et d'azote (Clair et Etherman, 1998).

Ils sont utilisés aussi dans la modélisation de la température de l'eau en rivière (Mohamed et al., 2008), dans la quantification de l'effet de rejets d'un mélange de médicaments sur les boues activées des stations d'épuration (Naitali et Ghoualem, 2015).

### 4.3. Modèle d'un neurone

Le modèle mathématique d'un neurone artificiel est illustré à la Figure (4.2). Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Le résultat  $n$  de cette somme est ensuite transformée par une fonction de transfert  $f$  qui produit la sortie  $a$  du neurone.



**Figure 4.2** : Modèle d'un neurone artificiel.

Les  $R$  entrées des neurones correspondent au vecteur  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_r]^T$  alors que  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_r]^T$ , représente le vecteur des poids du neurone.

La sortie  $n$  de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} n &= \sum_{j=1}^R w_{1,j} p_j - b \\ &= w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots + w_{1,R} p_R - b, \end{aligned} \quad (4.1)$$

Que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$n = \mathbf{w}^T \mathbf{p} - b \quad (4.2)$$

Cette sortie correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins ce qu'on nomme le biais  $b$  (seuil d'activation) du neurone. Le résultat  $n$  de la somme pondérée s'appelle le niveau d'activation du neurone. Lorsque le niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil  $b$ , alors l'argument de  $f$  devient positif (ou nul). Sinon, il est négatif.

Un poids d'un neurone artificiel représente donc l'efficacité d'une connexion synaptique. Un poids négatif vient inhiber une entrée, alors qu'un poids positif vient l'accentuer. Pour pouvoir simuler un réseau de neurones, nous allons supposer que tous les neurones sont synchrones, c'est-à-dire qu'à chaque temps  $t$ , ils vont simultanément calculer leur somme pondérée et produire une sortie  $a(t) = f(n(t))$ .

Synapse = Poids d'un neurone artificiel

Corps cellulaire = Fonction de transfert  
 Axone = Elément de sortie

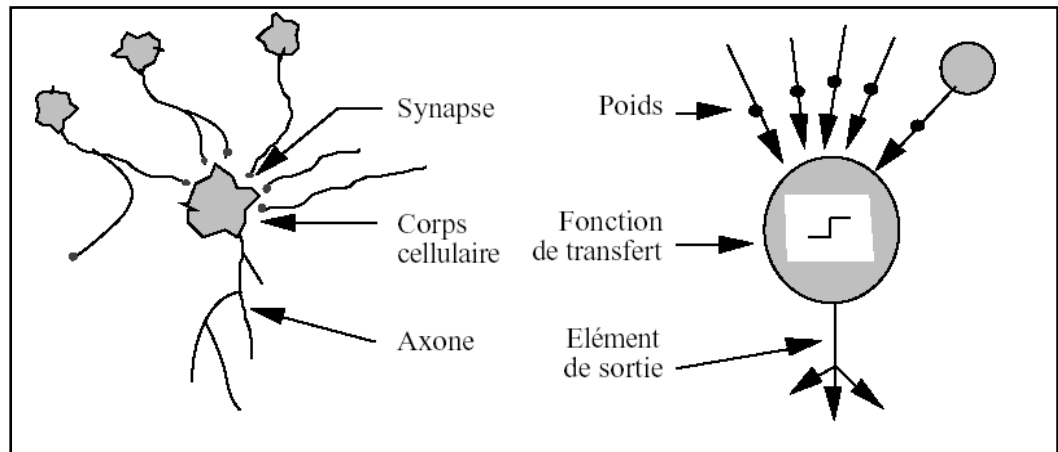
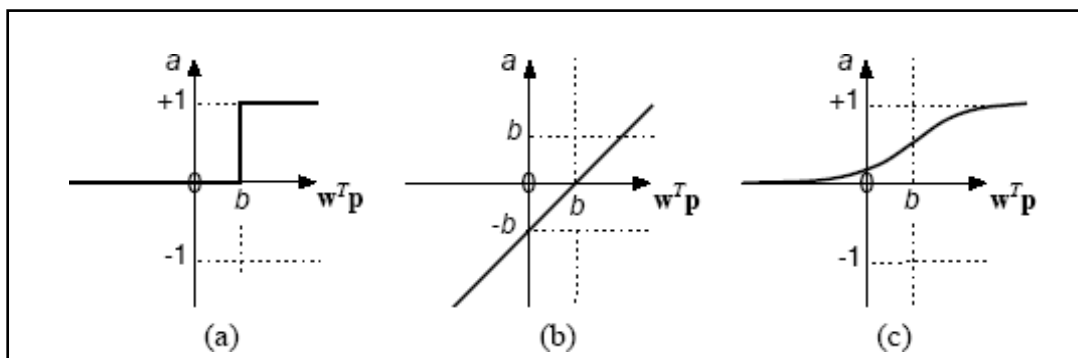


Figure 4.3 : Comparaison neurone biologique et neurone artificiel

### 4.3.1. Fonctions de transfert

Il existe de nombreuses fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonction d'activation du neurone. Les trois les plus utilisées sont présentées sur la Figure (3.4), qui sont les fonctions «seuil», «linéaire» et «sigmoïde». La plupart des fonctions de transfert sont continues et offrent une infinité de valeurs possibles comprises dans l'intervalle  $[0, +1]$  ou  $[-1, +1]$ . La fonction seuil applique un seuil sur son entrée. Plus précisément, une entrée négative ne passe pas le seuil, la fonction retourne alors la valeur 0, alors qu'une entrée positive ou nulle dépasse le seuil, et la fonction retourne 1.

La fonction linéaire est très simple, elle affecte directement son entrée à sa sortie. La fonction de transfert sigmoïde ressemble soit à la fonction seuil, soit à la fonction linéaire, selon que l'on est loin ou près du biais  $b$ .



(a) «seuil» ; (b) «linéaire» (c) «sigmoïde».

(b) Figure 4.4 : Fonction de transfert du neurone

### 4.3.2. Architecture de réseau

Un réseau de neurones est un maillage de plusieurs neurones, généralement organisé en couches. On appelle couche d'entrée (Input layer) l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie (Output layer) l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelés couches cachées (Hidden layer).

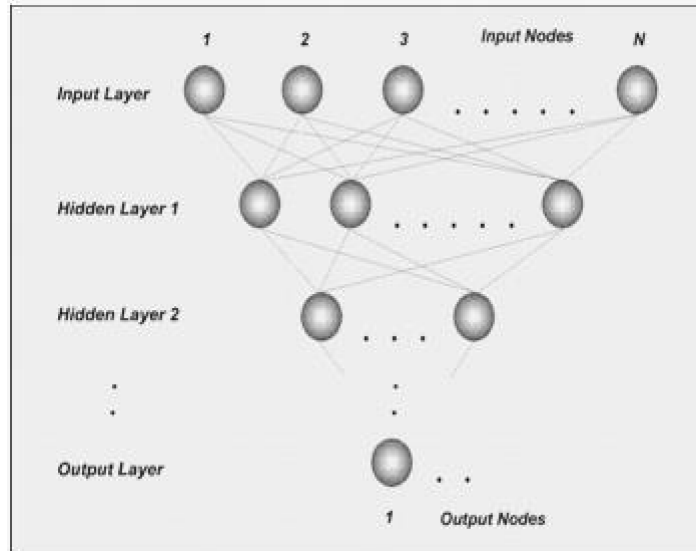


Figure 4.5 : Architecture choisie du réseau

### 4.3.3. Structure d'Interconnexion

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Un poids  $w_{i,j}$  est associé à chacune des connexions, il relie le neurone  $i$  à son entrée  $j$ . Il existe une panoplie impressionnante d'architectures de réseaux possible (Figure 4.6). En fait, lorsque les neurones sont branchés entre eux d'une façon peu commune, la difficulté principale devient alors de trouver un algorithme efficace pour l'apprentissage de ce réseau.

- **Réseau multicouche**

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avalent. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante seulement. Ce qui nous permet d'introduire la notion du sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et de définir les concepts du neurone d'entrée et du neurone de sortie.



- **Réseau à connexions locales**

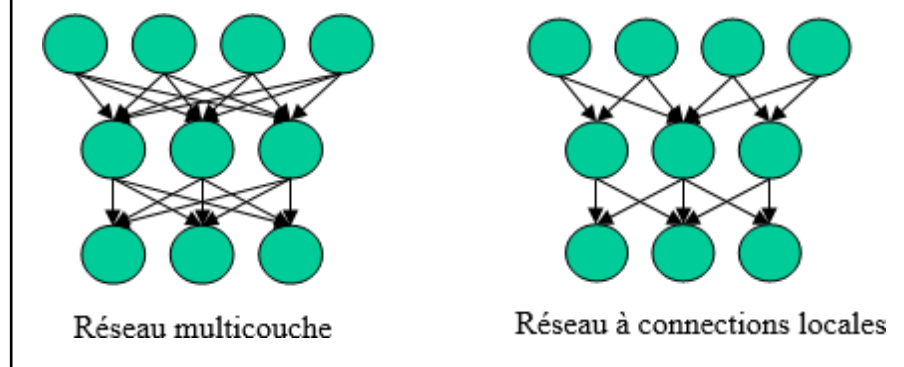
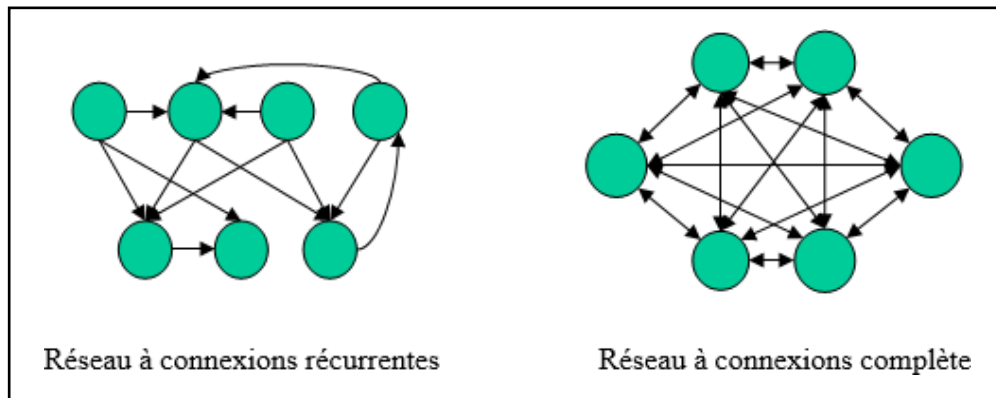
Il s'agit d'une structure multicouche, mais qui à l'image de la rétine, conserve une certaine topologie. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche avale. Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique.

- **Réseau à connexions récurrentes**

Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales.

- **Réseau à connexions complètes**

C'est la structure d'interconnexion la plus générale Figure. Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau (et à lui-même).



**Figure 4.6** : Différents types de réseaux

#### 4.3.4. Choix d'une bonne architecture d'un réseau neurone artificiel RNA

Le choix d'une architecture adéquate de RNA est primordiale pour obtenir un système performant ou tout au moins fonctionnel. Or plusieurs aspects sont à considérer lors de la conception dont les plus importants sont :

- Le nombre d'entrées et de sorties ;
- Le nombre de couches de neurones ;
- Le nombre de neurones sur chaque couche ;
- Les interconnexions entre les couches (récuratif ou non-récuratif) ;
- La fonction d'activation.

Habituellement une seule couche cachée suffit pour résoudre la plupart des problèmes. En règle générale, plus un RNA a d'entrées et plus la résolution du problème est complexe, plus il faudra de neurones en couche cachée (Lee et al, 2000). Une technique souvent utilisée consiste à effectuer l'apprentissage d'une première topologie de réseau avec beaucoup de neurones en couche cachée et de diminuer ce nombre jusqu'à ce que les performances commencent à se dégrader. Il est aussi possible de commencer avec une structure simple, pour ensuite la complexifier jusqu'à l'atteinte des performances souhaitées.

Par ailleurs, pour ce qui est du choix d'une topologie à propagation avant ou réursive et des interconnexions entre les neurones, il faut d'abord bien connaître le problème à résoudre. Ainsi, une structure réursive est souvent mieux adaptée à la reconnaissance et à la classification de signaux ou d'images. La reconnaissance de caractères manuscrits en est un bon exemple. Une topologie réursive est également très performante lorsque l'aspect temporel des signaux appliqués en entrée est important.

Toutefois, la topologie de réseaux à propagation avant n'en demeure pas moins la plus utilisée de par la simplicité des algorithmes d'apprentissages utilisés pour cette topologie et de par sa « réputation méritée » de produire des solutions performantes à plusieurs problèmes concrets de l'industrie. Sous cette configuration, tous les neurones d'une couche sont habituellement reliés à tous les neurones de la couche suivante, bien qu'il y'ait une liberté totale quant au choix des interconnexions.

Lorsque le RNA doit fournir une réponse en temps réel, ou plus encore, lorsque le RNA doit s'adapter aux changements de son environnement en poursuivant son apprentissage en temps réel, la structure du réseau doit alors être simplifiée au maximum afin de diminuer le nombre d'opérations mathématiques requises et de limiter les ressources matérielles nécessaire à l'implémentation du RNA.

### 4.3.5. Apprentissage

L'apprentissage est un processus dynamique et itératif permettant de modifier les paramètres d'un réseau en réaction avec les stimuli qu'il reçoit de son environnement. Comme le cerveau humain, les réseaux de neurones artificiels (RNA) peuvent apprendre par expérience. Ainsi, suite à l'application séquentielle de plusieurs entrées à apprendre, les algorithmes d'apprentissage se traduisent par une modification de l'efficacité synaptique, c'est-à-dire ils modifient la valeur des poids entre les neurones ainsi que la valeur des biais de façon à améliorer la performance du RNA. En fait, l'ajustement des poids est plus ou moins efficace tout dépendamment de la connaissance que nous avons du système à modéliser ou du problème à résoudre. Ainsi plusieurs classes d'apprentissage existent :

#### 4.3.5.1. Apprentissage non-supervisé

Ce type d'apprentissage est basé sur des probabilités, il est choisi lorsqu'il n'y a pas de connaissances a priori des sorties désirées pour des entrées données. En fait, c'est de l'apprentissage par exploration où l'algorithme d'apprentissage ajuste les poids des liens entre neurones de façon à maximiser la qualité de classification des entrées.

Il est caractérisé par un environnement qui fournit des stimuli, et d'un réseau qui doit apprendre sans intervention externe Figure (4.7). En assimilant les stimuli de l'environnement à une description de son état interne, la tâche du réseau est alors de modéliser cet état le mieux possible. Pour y arriver, il importe d'abord de définir une mesure de la qualité pour ce modèle, et de s'en servir par la suite pour optimiser les paramètres libres du réseau, c'est-à-dire ses poids synaptiques

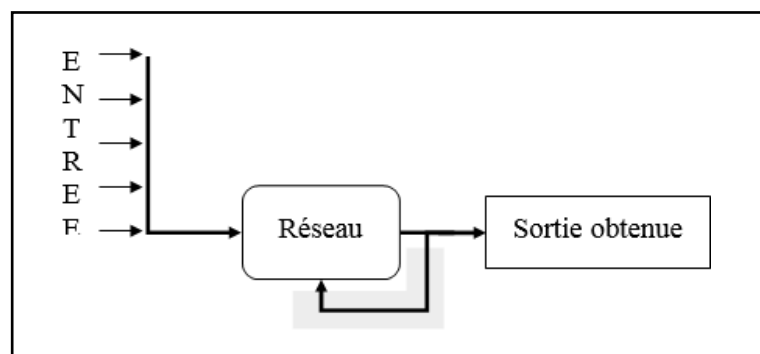


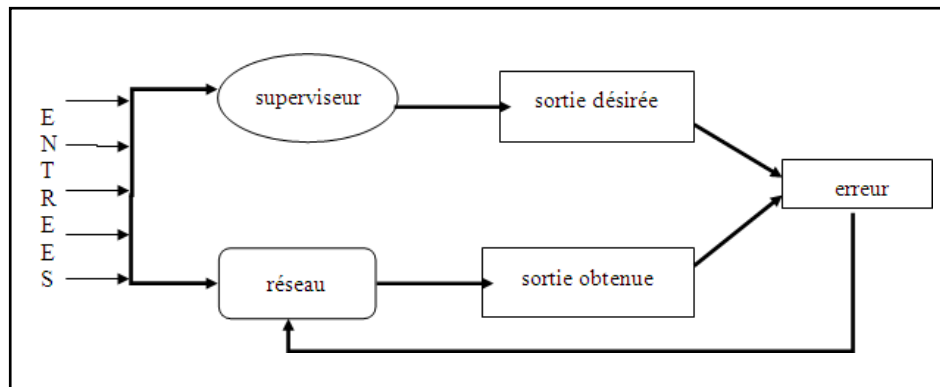
Figure 4.7 : Apprentissage non supervisé

#### 4.3.5.2. Apprentissage supervisé (back propagation)

Cet algorithme d'apprentissage ne peut être utilisé que lorsque les combinaisons d'entrées-sorties désirées sont connues. L'apprentissage est alors facilité et par là, beaucoup

plus rapide que pour les deux autres algorithmes puisque l'ajustement des poids est fait directement à partir de l'erreur, soit la différence entre la sortie obtenue par le RNA et la sortie désirée.

Cet apprentissage est illustré d'une manière conceptuelle à la Figure (3.6). L'environnement est inconnu du réseau. Celui-ci produit un stimulus qui est acheminé à la fois au superviseur et au réseau. Grâce à ses connaissances intrinsèques, le superviseur produit une sortie désirée pour ce stimulus. On suppose que cette réponse est optimale. Elle est ensuite comparée (par soustraction) avec la sortie du réseau pour produire un signal d'erreur qui est réinjecté dans le réseau pour modifier son comportement via une procédure itérative qui, éventuellement, lui permet de simuler la réponse du superviseur. Autrement dit, la connaissance de l'environnement par le superviseur est graduellement transférée vers le réseau jusqu'à l'atteinte d'un certain critère d'arrêt.



**Figure 4.8 :** Apprentissage supervisé

Une fois le type d'apprentissage choisi selon les connaissances à priori du problème à résoudre, un autre aspect important consiste à déterminer si le réseau de neurones, dans sa phase d'exploitation, sera statique ou dynamique. Dans le premier cas, un pré-apprentissage sera effectué alors que dans le second, un apprentissage continu sera requis pour permettre au RNA de réagir aux changements de son environnement.

#### 4.3.5.3. Apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement permet de contourner certaines des limitations de l'apprentissage supervisé. Il consiste en une espèce d'apprentissage supervisé, mais avec un indice de satisfaction scalaire au lieu d'un signal d'erreur vectoriel. L'absence de signal d'erreur rend le calcul de ce gradient impossible. Pour estimer le gradient, le réseau est obligé de tenter des actions et d'observer le résultat, pour éventuellement inférer une direction de

changement pour les poids synaptiques. Pour ce faire, il s'agit alors d'implanter un processus d'essais et d'erreurs tout en retardant la récompense offerte par l'indice de satisfaction. Ainsi, on introduit deux étapes distinctes : une d'exploration ou l'on essaie des directions aléatoires de changement, et une exploitation ou l'on prend une décision. Ce processus en deux étapes peut ralentir considérablement l'apprentissage

#### 4.4. Méthodologie

Il n'y a pas de méthodologie bien précise et rigoureuse pour développer un RNA capable de résoudre un problème donné. On va vers ce but par essais et erreurs. Ceci est dû à la flexibilité inhérente au RNA, à son caractère foncièrement non linéaire et à la difficulté de déterminer la signifiante statistique des paramètres estimés, tellement l'information est cachée dans la structure parallèle du RNA.

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'apprentissage neuronal comporte plusieurs choix : le critère d'erreur à atteindre, l'algorithme d'optimisation de ce critère les paramètres de l'algorithme et la gamme des valeurs initiales aléatoires des poids et seuils.

La validation est la vérification des performances d'un réseau de neurones hors échantillon et sa capacité de généralisation. Une fois le réseau calculé, il faut toujours procéder à des tests afin de vérifier que notre réseau réagit correctement. Idéalement, les résidus du modèle devraient être imprévisibles quelle que soit la combinaison des entrées et des sorties antérieures du modèle. La première validation est l'inspection des graphiques entre les séries simulées et observées.

Après le développement et la validation du modèle appropriée, vient la phase de l'application, qui a pour but de montrer la performance et l'utilité de ce modèle. La structure du RNA doit être aussi adéquate tant pour l'ensemble de données qui ont servi à l'apprentissage, que pour d'autres données qui ont servi à la validation. C'est pour cela qu'on a utilisé deux ensembles indépendants de données pour entraîner notre réseau : les deux tiers des données sont utilisés pour l'apprentissage et le tiers restant des données est utilisé pour la validation.

Le réseau de neurones, en principe, traite avec des données normalisées. Ceci est effectué en transformant les données ( $x_i$ ) pour les rendre homogène ou stationnaire et pour

changer leur échelle. Pour cela, il est préférable de standardiser les entrées et les sorties ; i.e. soustraire une mesure de localisation, telle que la moyenne, et diviser la différence par une mesure de la dispersion, telle que l'écart type. Cette transformation permet d'éviter les minima locaux et d'avoir, pour une valeur d'initialisation des poids et seuils proches de zéro, une valeur plus proche du minimum globale.

$$X = \frac{x - moy (xi)}{ecart (xi)} \quad (4,3)$$

où,

$X$  : valeur normalisée de la variable brute  $x$ .

$moy(xi)$  : moyenne des variables  $xi$ .

$ecart (xi)$  : écart type des variables  $xi$ .

L'application de la méthode des réseaux neuronaux a pour objectif de chercher une relation entre le taux d'abrasion (Ta) et les différentes variables quantifiables, telles que les variables morpho-métriques (surface, indice de compacité et pente) d'occupation du sol (couverture végétale) et hydro pluviométriques (pluie, coefficient d'écoulement et densité de drainage). Les variables redondantes ont été éliminées afin de conserver le maximum d'information pour notre analyse. On a travaillé sur les données recueillies dans des bassins Algériens et Tunisiens, cela dans le but d'augmenter le nombre de données d'une part et d'autre part de diversifier les caractéristiques hydro-morphométriques des bassins pour mieux développer le modèle.

#### 4.4.1. Choix des variables

Le choix des variables est très important pour le développement de n'importe quel modèle de calcul du taux de sédimentation. Plusieurs chercheurs ont travaillé sur l'envasement et ont établi des modèles permettant de calculer le transport solide à l'échelle annuelle en fonction des variables explicatives. Dans le cas des réseaux de neurones qui sont des systèmes non autonomes, un sous-ensemble des variables descriptives est constitué par les variables d'entrée, variables dont la valeur est déterminée extérieurement au modèle.

Pour le développement de notre modèle, on a rassemblé 32 échantillons dont 15 bassins versants Algériens et 17 bassins Tunisiens. Les caractéristiques de ces données sont bien développées dans le Chapitre (2). Comme indiqué dans la section précédente les deux tiers des données ont été choisis aléatoirement pour l'apprentissage du réseau et le tiers restant a été assigné pour l'ensemble de validation.

On a essayé plusieurs variables d'entrée pour le développement du modèle et on a retenu les variables les plus explicatives et qui sont facilement identifiables :

- La surface du bassin versant (S) ;
- La couverture végétale (Cv) ;
- L'indice de compacité (Kc) ;
- L'indice de pente global (Ig) ;
- La pluviométrie annuelle (P) ;
- Le coefficient d'écoulement interannuel (Ce) ;
- La densité de drainage (Dd).

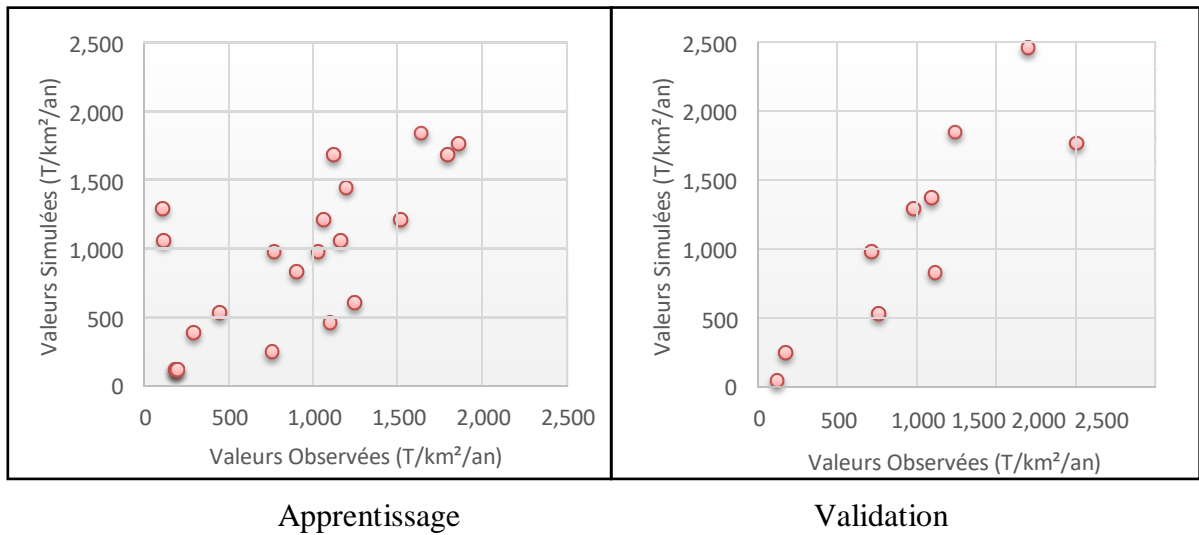
La variable de sortie (Ta) exprime le volume de sédiments mesuré au niveau de la cuvette du barrage pendant une durée donnée et ramené à une unité de surface du bassin pour une année hydrologique moyenne.

#### 4.4.2. Architecture du modèle

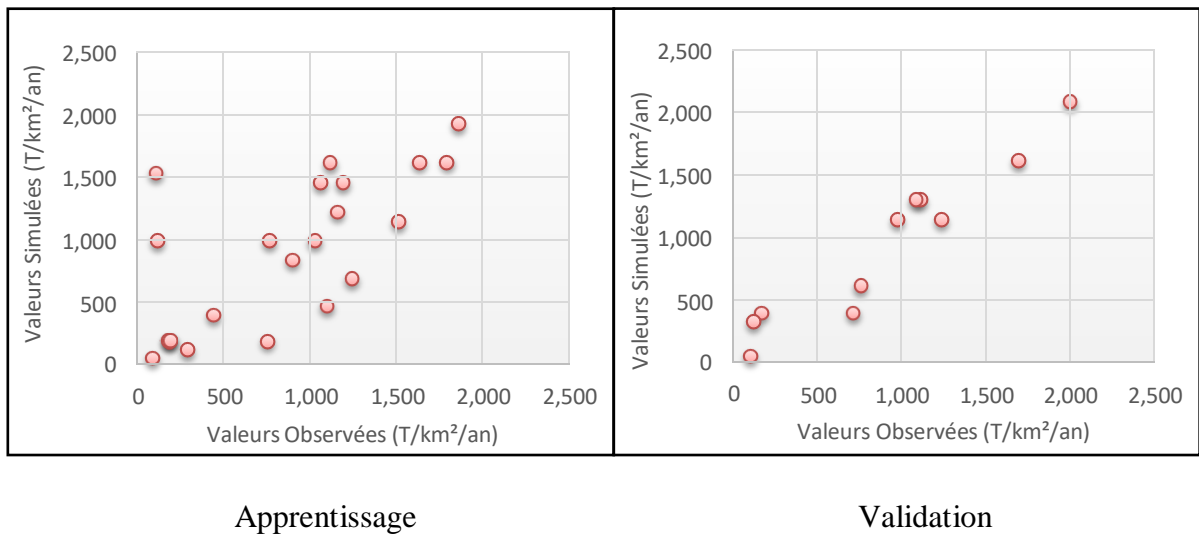
Le choix d'une architecture adéquate de RNA est primordiale pour obtenir un système performant ou tout au moins fonctionnel. Le réseau neurologique peut capturer des interactions entre les entrées parce que les unités cachées sont non-linéaires. La nature de ces interactions est implicite en valeurs des poids, mais il n'est pas toujours facile d'interpréter les poids. Une meilleure méthode est d'employer réellement le réseau pour faire des prévisions et pour voir comment ceux-ci dépendent de diverses combinaisons des entrées.

Pour le développement du modèle, on a simulé plusieurs architectures pour l'apprentissage et la validation :

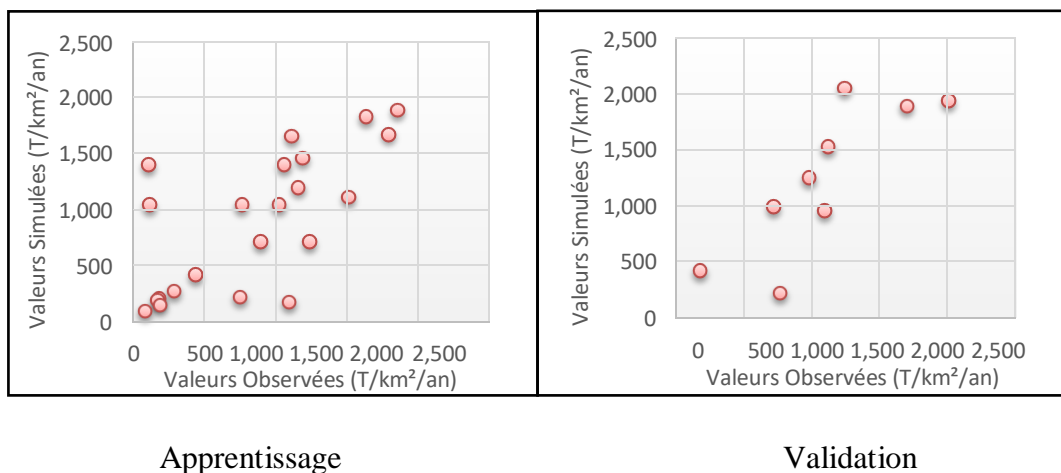
- Architecture 1 : une seule couche cachée composée de cinq neurone [5], (Figure 4.9),
- Architecture 2 : deux couches cachées avec quatre neurones sur la première couche et deux neurones sur la deuxième couche [4,2], (Figure 4.10),
- Architecture 3 : deux couches cachées ; avec trois neurones sur la première couche et deux neurones sur la deuxième couche [3,2], (Figure 4.11),
- Architecture 4 : une seule couche cachée composée de quatre (4) neurones [4], (Figure 4.12).



**Figure 4.9 :** Comparaison des valeurs d'érosion observées et simulées  
Architecture 1

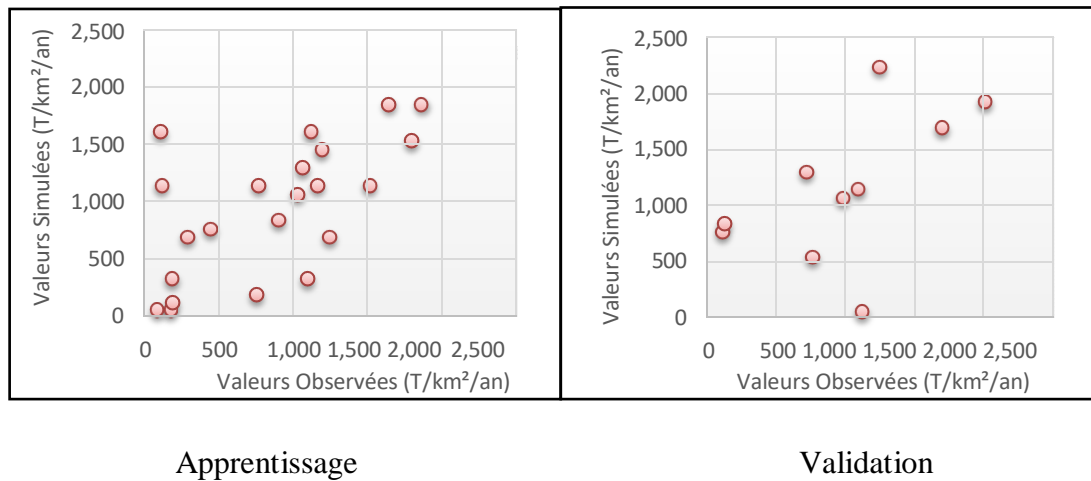


**Figure 4.10 :** Comparaison des valeurs d'érosion observées et simulées  
Architecture 2



**Figure 4.11 :** Comparaison des valeurs d'érosion observées et simulées  
Architecture 3





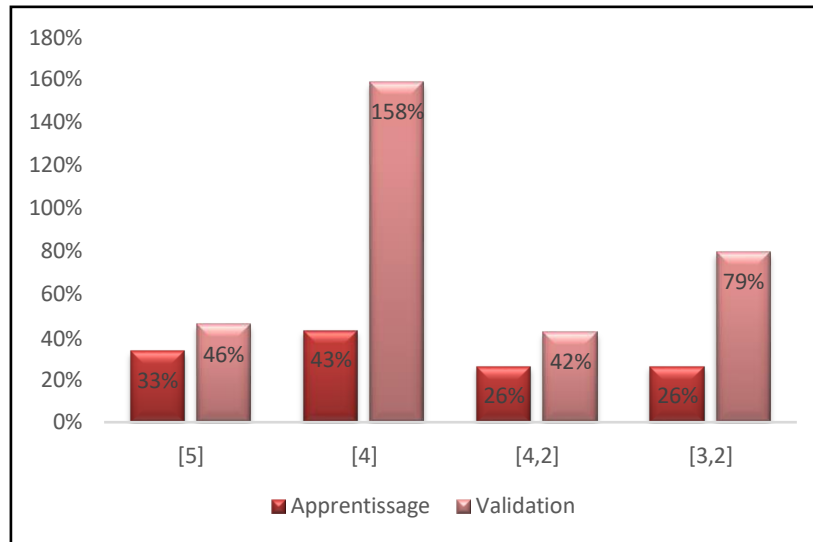
**Figure 4.12** : Comparaison des valeurs d'érosion observées et simulées  
Architecture 4

Après plusieurs séries de développement, on a comparé les résultats par l'évaluation des erreurs absolues et arithmétiques qui sont calculées à partir des équations (4.4) et (4.5) respectivement.

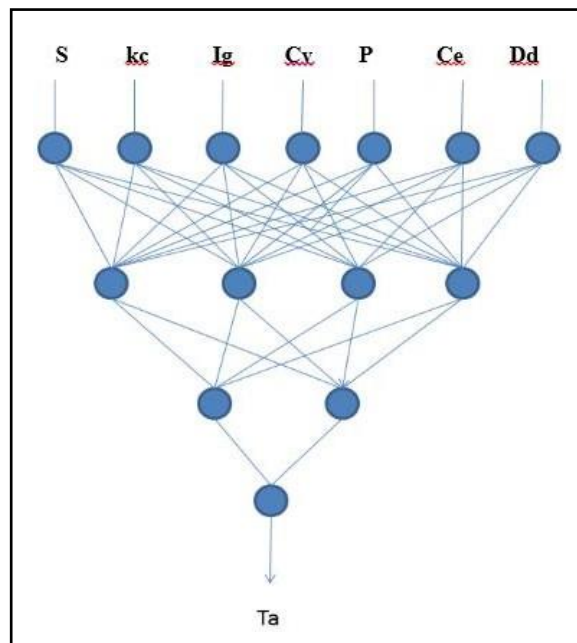
$$\text{Erreur arithmétique} = \text{mo} \left( \frac{\text{observé} - \text{simulé}}{\text{observé}} \right) \quad (4.4)$$

$$\text{Erreur absolue} = \text{moy} \left( \frac{|\text{observé} - \text{simulé}|}{\text{observé}} \right) \quad (4.5)$$

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure (4.13). On constate que le réseau (4,2) présente une estimation de l'erreur absolue acceptable, elle est de l'ordre de 26% pour l'apprentissage et de 42% pour la validation. Par conséquent on est arrivé à optimiser le nombre d'unités cachées et le nombre de couches cachées dans le ANN avec une bonne approximation de relation entrée - sortie. Ce qui nous a poussé à adopter cette architecture pour le modèle qu'on va développer (Figure 4.14).



**Figure 4.13** : Erreur absolue entre les différents réseaux simulés.

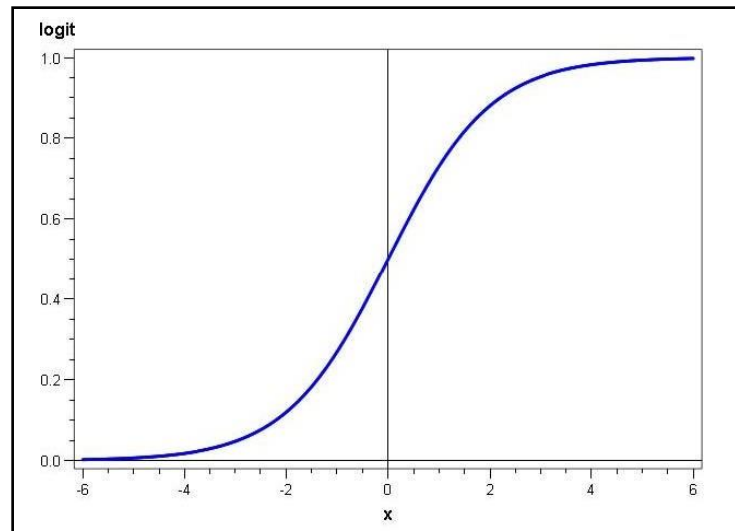


**Figure 4.14** : Architecture du réseau choisie pour le modèle d'érosion des bassins versants.

#### 4.4.3. Fonction d'activation

Dans la plupart des modèles actuels de réseaux de neurones, nous avons affaire à des modèles à temps discret, synchrone, dont le comportement des composants ne varie pas dans le temps. Plusieurs fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonction d'activation du neurone. Les trois les plus utilisées sont les fonctions «seuil», «linéaire» et «sigmoïde». On a choisi la fonction sigmoïde parce qu'elle

Etant donné que la fonction sigmoïde (Figure 4.15) est continue et offre de bon résultat (Mangeas, 1997), on l'a donc choisi pour l'activation du neurone. En fait cette fonction ne fait pas de pics locaux pour redevenir nulle ensuite. Lors de la mise au point du modèle, l'activation d'un neurone caché est compensé par les autres neurones cachés jusqu'à la convergence vers un modèle optimal.

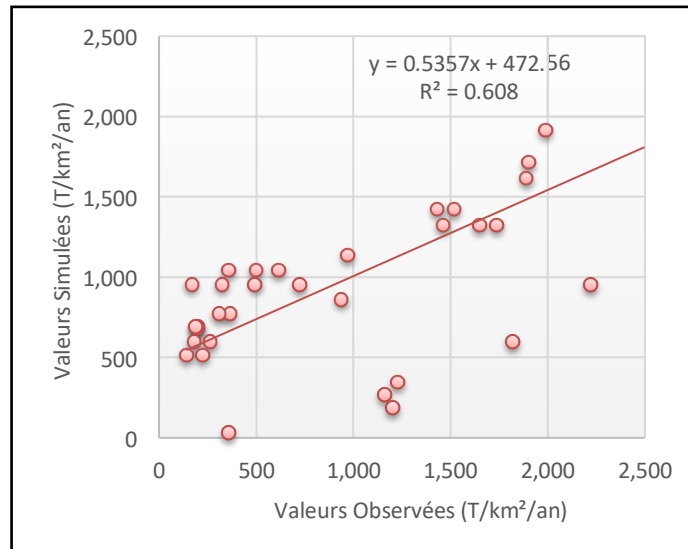


**Figure 4.15** : Fonction d'activation sigmoïde

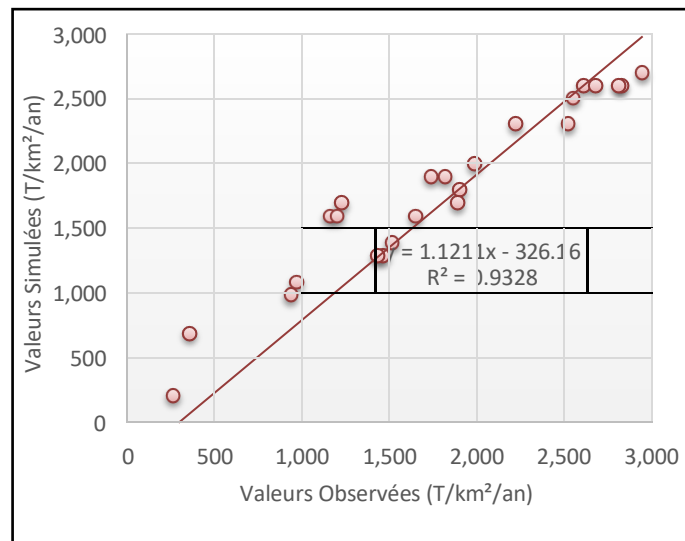
#### 4.4.4. Choix des paramètres

L'estimation des paramètres comporte plusieurs choix : le critère d'erreur à atteindre, l'algorithme d'optimisation de ce critère, les paramètres de l'algorithme et la gamme des valeurs initiales aléatoires des poids et seuils. D'après Vapnik (1992), la complexité du modèle dépend aussi bien du nombre de poids, du Rate (coefficient d'apprentissage) et de seuils que de leurs normes.

Pendant le développement du modèle, on est passé par plusieurs étapes de simulation. En premier lieu on a choisi un seuil de (-4,7) et un Rate de (0,04). On a remarqué une mauvaise concordance entre les valeurs observées et simulées, comme présenté à la Figure (4.16). On a alors changé les valeurs du seuil à [-5,6] mais on a gardé celle du Rate (0,04), les résultats sont illustrés à la Figures (4.17). On constate une assez bonne corrélation, tous les points ne sont pas présentés sur le graphe, ceci est dû à l'écart d'erreur important.



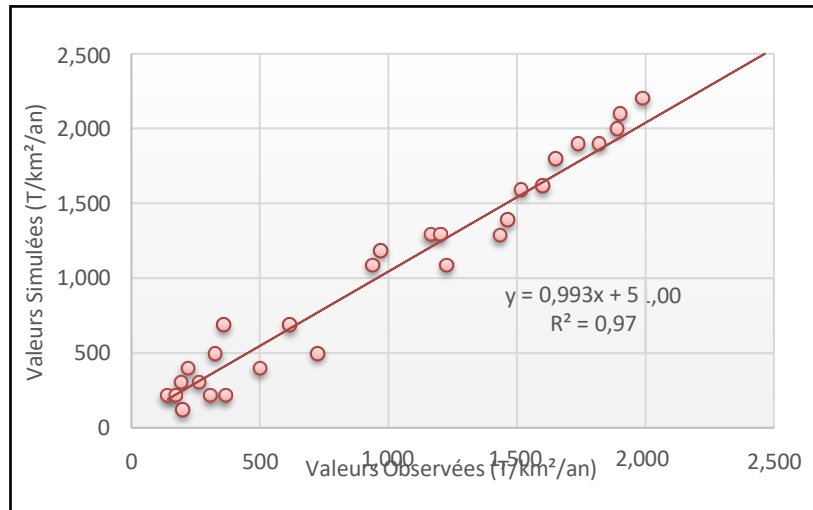
**Figure 4.16 :** Comparaison des valeurs d'érosion observées et simulées pendant le développement avec un seuil de [-4,7] et un Rate de (0,04).



**Figure 4.17 :** Comparaison des valeurs d'érosion observées et simulées avec un seuil de [-5,6] et un Rate de (0,04).

Pour éviter ce problème on a gardé la valeur du seuil mais on a réduit celle du Rate à (0,02) et on a relancé le développement du modèle avec 25 000 itérations. Le résultat obtenu est illustré sur la Figure (4.18), on remarque une très bonne corrélation entre les valeurs simulées et observées avec un très bon coefficient de détermination, comme représenté dans le tableau (4.1).

<b>Tableau 4.1</b> : Comparaison entre les différents paramètres d'apprentissage			
Réseau	seuil [-4,7],	seuil [-5,6]	seuil [-5,6]
	Rate (0,04)	Rate (0,04)	Rate (0,02)
Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	0,608	0,932	0,970



**Figure 4.18.** Comparaison des valeurs d'érosion observées et simulées avec un seuil de [-5,6], un Rate de (0,02) et 25000 itérations.

#### 4.4.5. Choix de l'algorithme d'entraînement

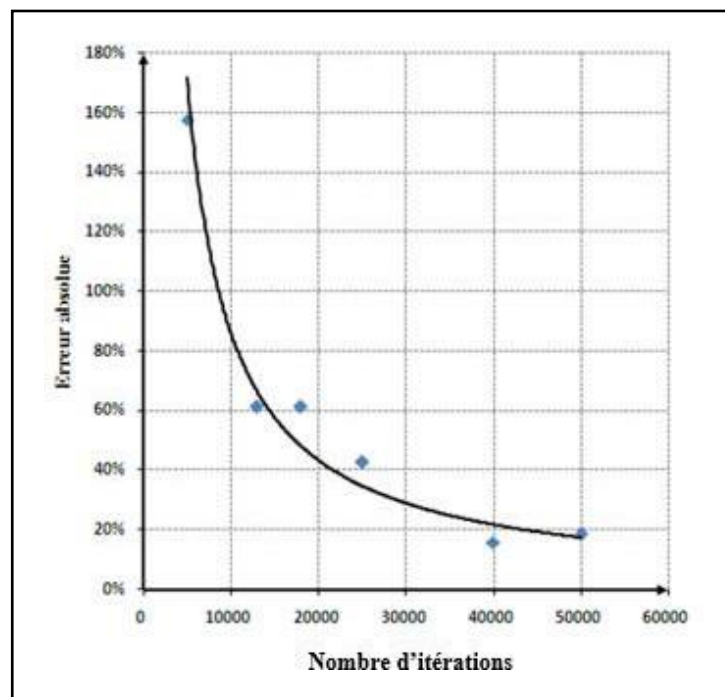
L'algorithme choisi est celui de la rétro-propagation du gradient. Cet algorithme est devenu très célèbre, et est plus connu sous son nom anglais "back propagation". Comme son nom l'indique, c'est un algorithme qui ajuste les poids et seuils du RNA en utilisant les dérivées premières de la fonction objectif (d'où gradient) et propage l'ajustement des neurones de sortie vers ceux de la première couche cachée (d'où rétro-propagation). La rétro-propagation est surtout adaptée aux fonctions d'activation dérivables avec des patrons d'entraînement abondants (Lippmann, 1987).

#### 4.4.6. Critères d'arrêt

Avec l'algorithme de rétropropagation des erreurs, plusieurs critères d'arrêts peuvent être utilisés. Le plus commun consiste à fixer un nombre maximum de périodes d'entraînement, ce qui fixe effectivement une limite supérieure sur la durée de

l'apprentissage. Ce critère est important car la rétropropagation des erreurs n'offre aucune garantie quant à la convergence de l'algorithme. Il peut arriver, par exemple, que le processus d'optimisation reste pris dans un minimum local. Sans un tel critère, l'algorithme pourrait ne jamais se terminer.

Un deuxième critère commun consiste à fixer une borne inférieure sur l'erreur quadratique moyenne, ou encore sur la racine carrée de cette erreur. Dépendant de l'application, il est parfois possible de fixer a priori un objectif à atteindre. Dans notre travail, on a essayé plusieurs périodes d'entraînement ; 5 000, 13 000, 18 000, 25 000, 40 000 et 50 000 itérations (Figure 4.19). On remarque sur cette figure que plus le nombre d'itérations augmente, plus l'erreur diminue et c'est le but recherché. Au Delas d'un certain nombre d'itérations l'erreur devient constante.



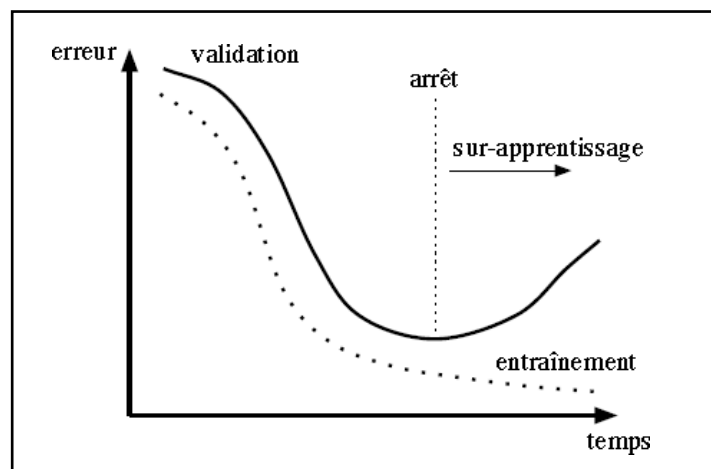
**Figure 4.19** : Moyenne absolue des écarts entre les différents nombres d'itérations.

#### 4.4.7. Sous-apprentissage et Sur-apprentissage

Un réseau incapable de modéliser la complexité d'un système, que cela soit faute de neurones sur la couche cachée ou de temps suffisant d'apprentissage, est dit qu'il souffre de sous- apprentissage (underfitting). Un réseau qui performe bien sur son ensemble d'apprentissage, mais qui performe beaucoup moins bien sur d'autres données, que cela soit dû à trop de neurones sur la couche cachée ou à un apprentissage excessif, est dit qu'il souffre de

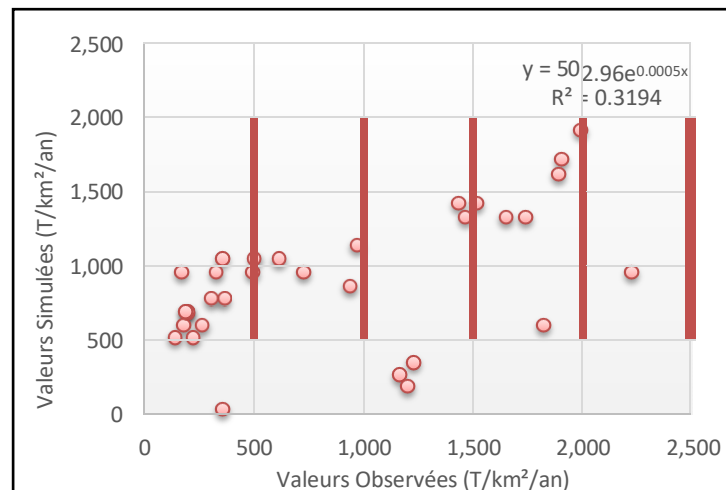
sur-apprentissage (overfitting). Donc le choix de la structure est un compromis entre le sous-apprentissage et le sur-apprentissage. Ce dernier est spécialement dangereux, car il peut produire des sorties qui dépassent largement l'ordre de grandeur des variables.

Une solution à ce problème consiste à utiliser un autre critère d'arrêt basé sur une technique dite de validation croisée, (Figure 4.20). Cette technique consiste à utiliser deux ensembles indépendants de données pour entraîner notre réseau : un pour l'apprentissage qui comprend les deux tiers des données et l'autre pour la validation et qui comprend le tiers restant, c'est-à-dire le calcul d'un indice de performance (une erreur, un taux de reconnaissance ou tout autre mesure pertinente à l'application).



**Figure 4.20** : Illustration de la validation croisée

C'est pour cela qu'il faut être prudent dans le choix du nombre d'itération pour éviter la mémorisation ou le sur-apprentissage. On a essayé un entraînement avec 60 000 itérations (Figure 4.21). D'après les résultats obtenus, on remarque que le RNA a sur-appris et il a produit des sorties avec une variance excessive.



**Figure 4.21** : Illustration du sur-apprentissage avec 60 000 itérations

#### 4.4.8. Modèle retenu

Après avoir passé par toutes les étapes d'apprentissage, de validation, du choix de l'architecture de réseau, de la fonction d'activation et de l'algorithme d'apprentissage, mentionnées ci-dessus, on a alors opté pour le modèle Neural Network Vase (N.NE.VA). Les spécificités de ce modèle sont représentées sur le tableau (4.2).

Tableau 4.2 : Spécificités du modèle N.NE.VA								
Entrées	S	Cv	Kc	Ig	P	Ce	Dd	Ta
Moyenne	695,70	20,46	1,37	42,93	392,49	0,08	4,03	955,98
Ecart type	1 364,52	18,75	0,21	35,78	129,60	0,08	1,79	655,42

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

Cv : Couverture végétale (%)

Kc : Indice de compacité

Ig : Indice de pente global

P : La pluviométrie annuelle (mm)

Ce : coefficient d'écoulement interannuel

Dd : Densité de drainage (km/km<sup>2</sup>)

Ta : Taux d'abrasion (T/km<sup>2</sup>/an)

En ce qui concerne les paramètres du réseau du développement, ils sont représentés sur le fichier 'Net' qui est joint dans l'Annexe 1.

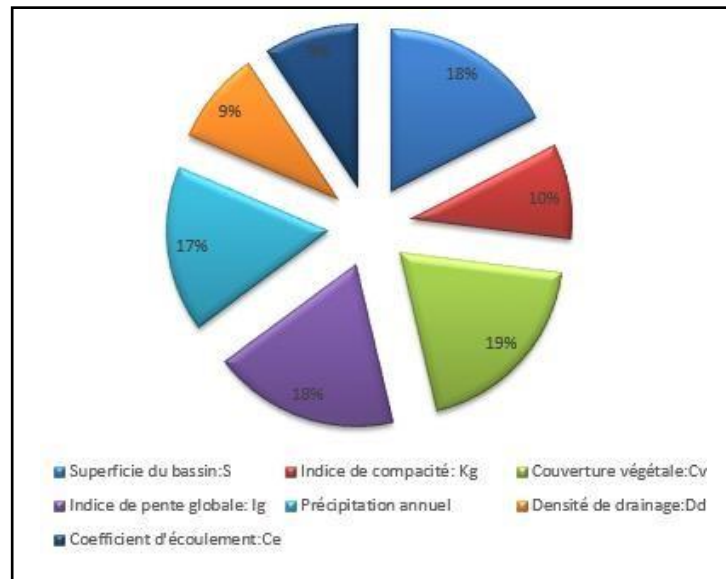
#### 4.4.9. Importance relative des variables

La variation du taux des apports solides entre les barrages peut être expliquée, d'une part, par le fait que les bassins étudiés présentent une variabilité dans le régime d'écoulement et d'autre part, par la variabilité des caractéristiques hydro-morphométriques. Le diagramme d'importance relative des variables (Figure 4.22) montre l'importance de chaque entrée et son impact sur les résultats de réseau neurologique.

On constate en premier lieu, que la superficie, la couverture végétale, l'indice de pente globale et la pluie moyenne annuelle sont les plus importants et expliquent à eux seuls 72% de la variabilité du modèle, ce qui signifie qu'ils ont un impact très important sur le phénomène d'érosion. En second lieu, vient se placer ; le coefficient d'écoulement, la densité de drainage et l'indice de compacité (entre 9 % et 10 %), qui ont une influence moins importante sur la quantification du transport solide. Ceci va nous aider à projeter des mesures antiérosives pour



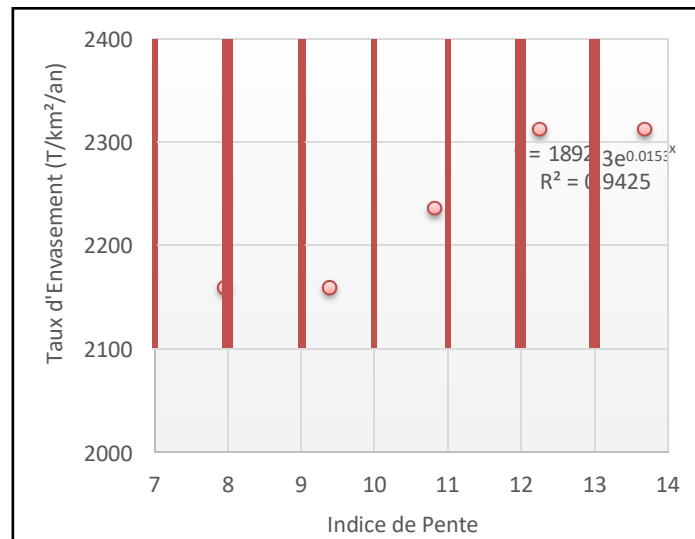
diminuer l'envasement. On a alors essayé quelques applications sur quelques bassins pour pouvoir démontrer la performance du modèle N.NE.VA adopté.



**Figure 4.22** : Importance relative des variables d'entrée

#### 4.5. Application du modèle

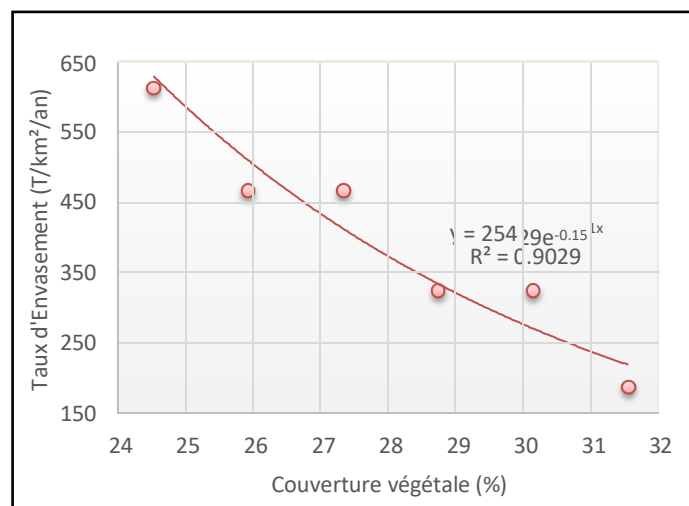
Pour la vérification des performances du réseau conçu on a procédé à des tests afin de vérifier que notre réseau réagit correctement. Pour cela, on a réalisé des tests sur différents bassins versants. On constate qu'en diminuant progressivement de 4% la pente du bassin versant du barrage Ain Dalia (Figure 4.23), le taux d'envasement diminue de 2600 T/km<sup>2</sup>/an à 2100 T/km<sup>2</sup>/an. Cette solution peut être assurée par la réalisation des banquettes qui ont pour but d'intercepter les eaux de ruissellement sur les versants afin de réduire l'érosion des sols, ou des murettes qui ralentissent sur l'écoulement des eaux de ruissellement afin de favoriser leur infiltration et qui servent généralement d'appui à des terrasses horizontales.



**Figure 4.23** : Effet de l'indice de pente sur le barrage Ain Dalia.

La Figure (4.24), montre l'effet de l'amélioration du couvert végétal sur le barrage Bou Hanifia. Cette approche a été confirmée par le plan d'aménagement de protection (PAP, 2006), par l'agence nationale des barrages et de transfert (ANBT).

Selon ce plan, environ 250 km<sup>2</sup> ( $\pm 4\%$  du territoire) nécessitent des interventions de lutte antiérosive de divers types. L'occupation du sol nécessitant le plus d'intervention sur le bassin versant sont les zones de matorral ( $\pm 83$  km<sup>2</sup>). Les zones agricoles ( $\pm 68$  km<sup>2</sup>), les zones de maquis et/ou garrigue ( $\pm 50$  km<sup>2</sup>), les sols dégradés ( $\pm 37$  km<sup>2</sup>), les forêts de moyenne densité ( $\pm 07$  km<sup>2</sup>) et les forêts de faible densité ( $\pm 02$  km<sup>2</sup>).



**Figure 4.24** : Effet de la couverture végétale sur le barrage Bou Hanifia

#### 4.6. Comparaison de N.NE.VA avec différents modèles

Plusieurs modèles ont été développés pour prédire les apports solides à l'exutoire d'un cours d'eau quel que soit son emplacement géographique.

On a utilisé les formules empiriques suivantes : Fournier, Tixeront, Sogreah, Demmak et Saidi (Chapitre 2) sur les données de validation (12 bassins). Malheureusement la formule de l'ANRH n'a pu être utilisée à cause de la complexité de la collecte des données qu'elle fait intervenir dans son équation ; qui sont :

- L'indice lithologique ;
- Superficie des formations marneuses et argileuses du Crétacé supérieur et du Tertiaire;
- Indice des précipitations érosives qui fait intervenir le pourcentage des précipitations annuelles trouvées sous forme de pluie journalières supérieures à 20 mm et le nombre annuel de ce type de précipitation ;
- Fréquence de Talweg élémentaire.

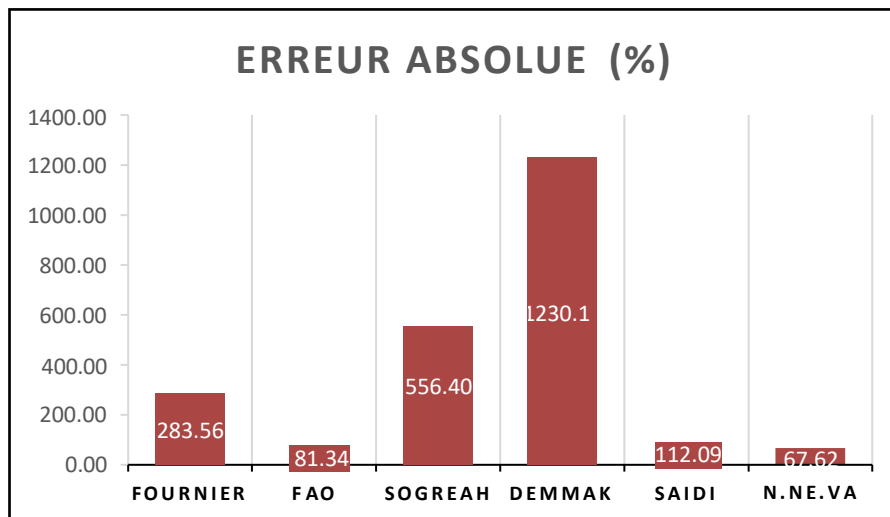
Pour faciliter la comparaison des résultats, les apports solides exprimés en  $\text{hm}^3/\text{an}$  ; ont été convertis en  $\text{t}/\text{km}^2/\text{an}$  en utilisant une densité de  $1,5 \text{ tonne}/\text{m}^3$ . Les résultats sont représentés dans le Tableau (4.3).

Barrage	Fournier	FAO	Sogreah	Demmak	Saidi	N.NE.VA	Observé
Sikkak	272,32	566 ,23	4060,00	823,14	481,06	212,31	169,07
Ain Dalia	329,83	283,92	5360,00	581,77	714,71	2324,81	2600,00
Zardeza	277,94	244,08	4820,00	1210,16	738,01	496,50	1112,25
Sbahia 1	2452,50	780,00	135,00	9724,50	1368,00	1898,97	1738,00
Saadine	991,50	550,50	118,50	4506,00	2926,50	2990,39	2950,00
Es Séguir	5235,00	546,00	16,50	13099,50	1158,00	28,09	187,00
El Melah	1125,00	813 ,00	15,00	42081,00	2047,50	1188,01	971,00
Kamech	5851,50	1572,00	18,00	60897,00	4236,00	2601,58	2682,00
Brahim Zaher	1644 ,00	1216,50	97,50	466,50	1354,50	1288,92	1433,00
Jédéliane	1145,56	610,50	109,34	3574,50	3184,50	1087,11	1227,96
Ham, Grouz	312,24	151,34	3420,00	10,12	165,57	689,98	103,02

Zit Emba	1408,03	301,75	560,00	2696,63	2705,10	1141,47	1237,11
----------	---------	--------	--------	---------	---------	---------	---------

La comparaison des valeurs de dégradation spécifique révèle une très forte disparité spatiale du taux d'érosion des sols. Cette disparité résulte principalement de la différence de la lithologie, du couvert végétal, de la pente et de la taille des bassins versants (Probst et Amiotte, 1992). A cette variabilité spatiale s'ajoute la variabilité temporelle aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle.

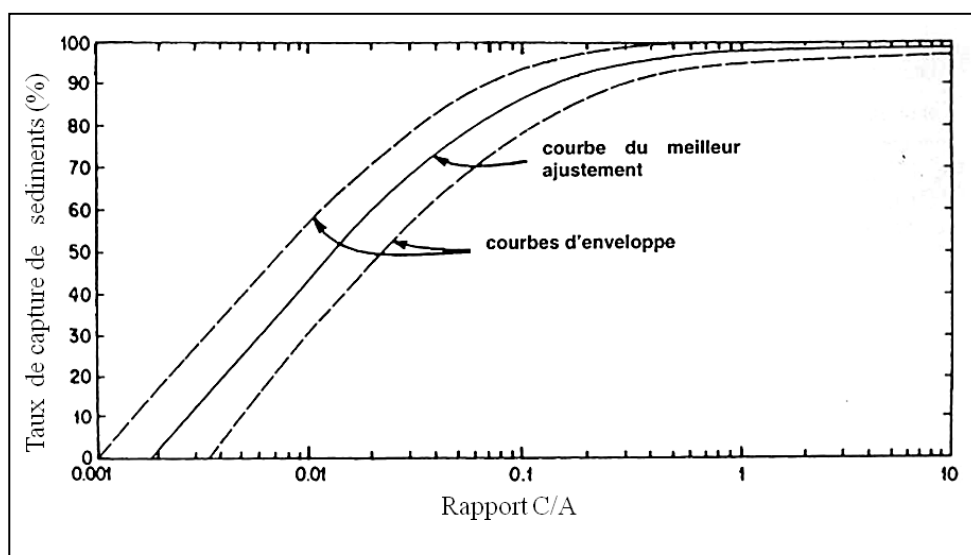
A l'échelle des bassins, les formules d'estimation des apports solides ont résulté en une large fourchette de valeurs avec des écarts très importants. Les apports solides estimés par les formules de Sogreah et Demmak, se démarquent nettement des autres avec des valeurs plus du double que la formule de Fournier. A l'autre extrémité du spectre, l'équation de Saïdi a estimé les plus faibles taux d'apports solides. Le taux d'erreur absolue le plus faible est celui du modèle N.NE.VA (Figure 4.25).



**Figure 4.25 :** Comparaison du taux d'envasement entre les différentes formules.

La plupart de ces formules donne une estimation de l'apport solide total (par charriage et par suspension) à l'exutoire des bassins versants. Il s'avère donc nécessaire de déterminer la quantité réelle de sédiments arrivant à l'exutoire et qui est piégée dans la retenue.

Pour pouvoir prévoir le volume des sédiments déposés dans la retenue, nous disposons de la courbe établie par Brune (Figure 4.26) à partir d'une étude réalisée sur 3600 barrages répartis dans le monde en tenant compte de l'appartenance aux zones bioclimatologiques de ces barrages.



**Figure 4.26 :** Courbe de Brune (Adaptée de K.Mahmood, 1987)

La méthode de Brune donne la relation graphique du pourcentage de l'apport solide total qui se dépose dans la cuvette, et cela en fonction des apports liquides moyens interannuels au lac collinaire. Tel qu'illustré, lorsque le rapport capacité-apport est supérieur à 1, le taux de capture est presque constant et tend vers 100%. Quand le rapport capacité-apport devient inférieur à 1, le taux de capture s'abaisse au fur et à mesure que la capacité diminue (Tableau 4.4).

**Tableau 4.4 :** Valeurs des pourcentages de sédiments piégés dans les retenues déterminés par la courbe enveloppe de Brune.

Bassin	A (m <sup>3</sup> )	C (m <sup>3</sup> )	C/A	Pourcentage des sédiments piégés
Gargar	185 000 000,00	358 000 000,28	1,90	98
S.M.Ben-Aouda	120 000 000,00	153 000 000,71	1,30	98
M'richet el Anse	18 559,25	42 400,00	2,28	97
Hadada	11 1361,50	84 910,00	0,76	94
Janet	516 333,25	94 280,00	0,18	92
El Hanech	102 129,25	77 400,00	0,76	94
Abdessadok	55 499,33	92 530,00	1,67	97
Fidh Ben Naceur	21 540,75	47 110,00	2,19	97
El Gouazine	95 700,75	237 030,00	2,48	97
Saadine	116 500,00	35 620,00	0,31	95
El Melah	22 137,50	19 875,00	0,90	97
Baouejjer	22 270,00	66 030,00	2,96	97

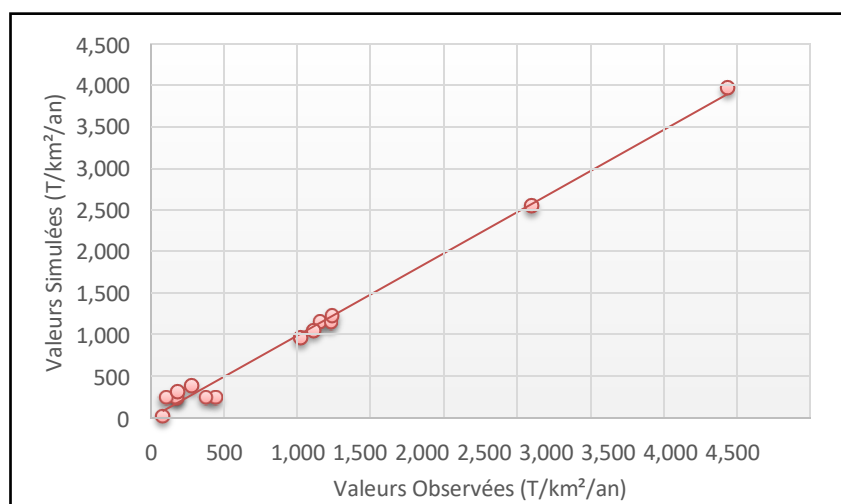
Cependant, selon le graphique de Brune (1953), les barrages maghrébins ont essentiellement un but d'accumulation maximum. Ceci explique que la part des sédiments qui ne sont pas piégés par la retenue est faible. En d'autres termes, on ne commettra pas de grandes erreurs en calculant l'envasement à partir de l'érosion spécifique.

#### 4.7. Classification

Les réseaux neuronaux ont montré une performance exceptionnelle comme outils de régression, surtout pour les problèmes de classification et de reconnaissance des formes. C'est dans ce but que pendant la deuxième étape, on a développé un autre modèle sur 15 bassins Algériens, la sélection de l'architecture et l'apprentissage de celle-ci ont été conduites. Il y avait sept variables d'entrée identifiées et utilisées dans le développement du modèle ; ce sont :

1. La surface du bassin versant (S) ;
2. La couverture végétale (Cv) ;
3. L'indice de compacité (Kc) ;
4. L'indice de pente global (Ig) ;
5. La pluviométrie annuelle ;
6. Le coefficient d'écoulement interannuel (Ce) ;
7. Le module spécifique (Mo).

Après une série de simulations, une architecture de deux couches cachées, avec quatre et deux neurones, respectivement, a été sélectionnée. Le résultat obtenu après apprentissage est présenté sur la Figure (4.27).



**Figure 4.27 :** Classification des barrages Algériens

On a pu mettre en évidence trois groupes de bassins versants (Tableau 4.5) :

1. Un premier groupe (Classe I) présentant des bassins ayant de fortes valeurs du taux d'abrasion du coefficient d'écoulement et une faible surface ; Ain Dalia, Béni-Bahdel, Fergoug, Zardeza et Zit Emba.
2. Un deuxième groupe (Classe II. a) qui est constitué de bassins ayant de faibles valeurs du taux d'abrasion, du coefficient d'écoulement et une surface importante ; Ouizert, Bou-Hanifia, Fontaine des Gazelles, Boughrara, Sidi.Abdelli, Sikkak, Hammam Grouz et Ain Zada.
3. Quant au troisième groupe (Classe II. b), il se caractérise par un caractère intermédiaire entre le taux d'abrasion et la surface du bassin versant, avec un faible coefficient d'écoulement ; Gargar et S.M.Ben.Aouda.

<b>Tableau 4.5</b> : Classification des barrages étudiés			
Classe	Superficie du bassin S (km <sup>2</sup> )	Coefficient d'écoulement Ce (%)	Taux d'abrasion Ta (t/km <sup>2</sup> /an)
I	< 1000	0,1 < Ce < 0,4	> 1000
II. a	> 1000	Ce < 0,1	< 500
II. b	> 1000	Ce < 0,1	> 1000

La surface du bassin de S.M.Ben-Aouda est presque deux fois plus grande que celle de Gargar, mais le taux d'abrasion est moins inférieur. Le bassin versant de S.M.Ben-Aouda n'a pas de plaines qui sont généralement d'importantes zones de dépôts de sédiments. Par ailleurs, il faut souligner que cette augmentation marquée pourrait être expliquée par l'exode rural massif de 1990. Les terres agricoles abandonnées et dénudées de toute végétation seraient alors devenues excessivement vulnérables à l'érosion.

#### **4.8. Conclusion**

Cette étude n'est qu'une approche pour essayer d'expliquer les mécanismes complexes du transport solide et de quantifier les volumes des sédiments transportés par un modèle représentatif et fiable N.NE.VA. Ce modèle a produit de très bons résultats, les variables utilisées sont moins nombreuses, plus faciles à déterminer et leur estimation est moins subjective, ce qui donne à ce modèle une robustesse vis-à-vis des autres méthodes.

On a essayé plusieurs variables d'entrée pour le développement du modèle et on a retenu les variables les plus explicatives et qui sont facilement identifiables tels que ; la surface du bassin versant (S), la couverture végétale (Cv), l'indice de compacité (Kc), l'indice de pente global (Ig), la pluviométrie annuelle (P), le coefficient d'écoulement interannuel (Ce), la densité de drainage (Dd).

- L'architecture adoptée comprend deux couches cachées avec quatre et deux neurones respectivement, la fonction d'activation est du type sigmoïde,
- L'algorithme d'entraînement choisi est celui de la rétro-propagation du gradient,
- La période d'entraînement est de 25 000 itérations,
- L'importance relative des variables montre que la superficie, la couverture végétale, l'indice de pente globale et la pluie moyenne annuelle sont les paramètres les plus importants et expliquent à eux seuls 72% de la variabilité du modèle, ce qui signifie qu'ils ont un impact très important sur le phénomène d'érosion,
- Le modèle choisi présente un taux d'erreur absolue très faible par rapport aux autres modèles,
- Des tests ont été effectués sur des différents bassins versants, le réseau conçu a montré une bonne performance et les résultats obtenus aident à proposer des mesures d'intervention en matière de lutte antiérosive,
- A l'échelle des bassins, les formules d'estimation des apports solides ont résulté en une large fourchette de valeurs avec des écarts très importants. Le taux d'erreur absolue le plus faible est celui du modèle N.NE.VA.



# **Partie II**

Approche cartographique de  
l'érosion spécifique

# **Chapitre 5**

Modélisation du transport solide en  
suspension

# Chapitre 5

## Modélisation du transport solide en suspension

### 5.1. Introduction

De nombreuses études ont été menées en vue de quantifier le transport de la charge en suspension lors d'événements de crue uniques, de cerner l'impact des ouvrages anthropiques sur le bilan sédimentaire, d'estimer le remplissage des barrages par les matières fines et de suivre les variations saisonnières et spatiales de la concentration des matières en suspension dans des contextes morphoclimatiques variés.

En Algérie plusieurs travaux relatifs à la modélisation du transport solide (Benkhaled et Remini, 2003 ; Touaibia, 2000 ; Nekkache et Megnounif, 2013 ; Meddi, 1999) ont mis en point des relations liant le transport solide aux paramètres explicatifs tels que débit liquide et pluie (Achite, 1999). Outre la grande sensibilité des roches à l'érosion, les fortes variations pluviométriques et hydrologiques, la présence d'un relief accidenté et la pauvreté de la végétation constituent des conditions favorables à l'entraînement et au transport des matériaux (Gartet et al. 2005).

L'objectif du travail est d'essayer de décrire et d'expliquer la dynamique temporelle des matières en suspension pour en identifier les origines de la variation géographique de la production sédimentaire. Ce travail consiste en une étude comparative du transport solide en suspension de deux sous bassins-versants appartenant au haut Chélif ; Zeddine et Harreza, bien qu'ils soient voisins, ils présentent des bilans d'érosion et des comportements

hydrologiques différents. Les deux sites d'étude choisis sont équipés de stations limnigraphiques permettant d'obtenir les séries de débits horaires relativement longues.

## 5.2. Présentation de la région d'étude

### 5.2.1. Bassin d'Oued Zeddine

Le sous bassin versant de l'Oued Zeddine est situé sur la rive gauche de l'Oued Rouina, affluent de l'Oued Chelif, wilaya d'Ain Defla s'étend sur 898,54 km<sup>2</sup> (Capolini et al, 1969). (Figure.5.1 et 5.2). L'Oued Chelif reste le plus long fleuve d'Algérie, sa longueur étant de 725 km. Ce fleuve se trouve au nord-ouest de l'Algérie, il prend sa source dans l'Atlas tellien et se jette dans la Méditerranée. Il débite, dans les périodes de crues, 1 500 m<sup>3</sup> par seconde. Il est situé entre 1° et 1° 51' de longitude Est et entre 35° et 36° 15' de latitude Nord (Berbache et Remini, 2013). Pour le Zeddine, les différences d'altitude sont très grandes, l'oued principal passe en effet de 1786 m à 328 m en moins de 30 km (Tableau 5.1). Le bassin versant de Zeddine relève de la tectonique de nappe du massif Tellien, dominé par le Djebel Ouarsenis, piton calcaire de 1983 m mais peu étendu, ceinturé de sources et de venus thermaux. Les autres formations, toutes très imperméables comprennent du flysch de l'Albo-Cénomanién, qui couvre 68% de sa surface (El Mahi et al, 2012). Ce sont essentiellement des flysch qui affleurent le bassin aussi tectonisé et en forte pente. Le reste du bassin est entaillé dans les grès du Djebel Meddad, les marnes et les calcaires marneux du Crétacé.

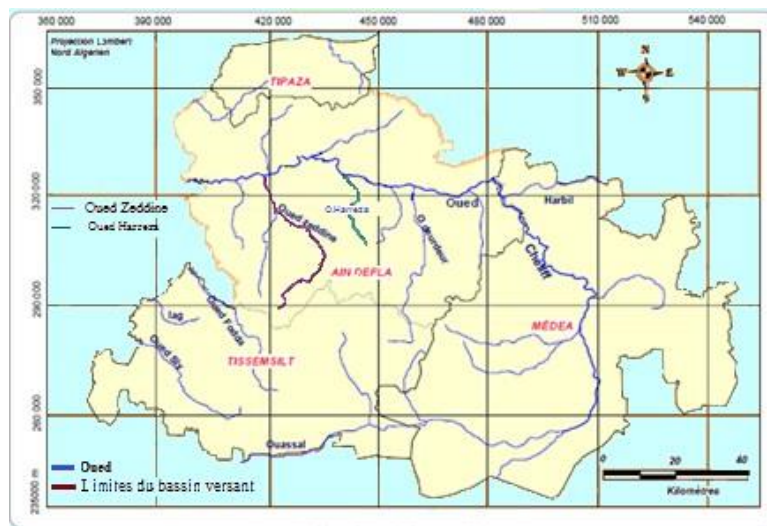
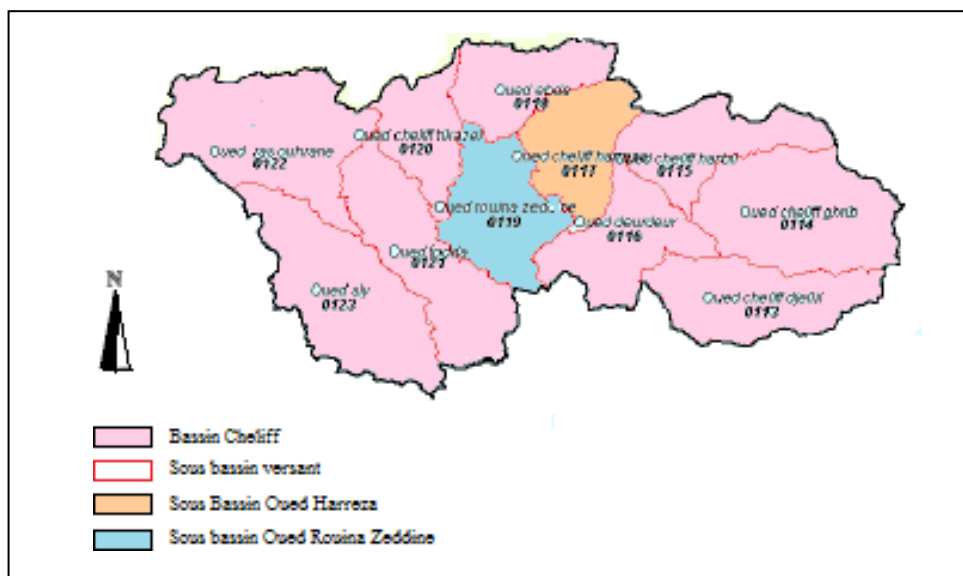


Figure 5.1 : Situation des Oueds de la région d'étude

### 5.2.2. Bassin d'Oued Harreza

Le sous bassin versant de l'Oued Harreza fait partie du bassin de l'Oued Cheliff (Figure. 5.1 et 5.2). Il s'étend sur 743,97 Km<sup>2</sup>. Il est situé, entre 2° et 2°40' de longitude Est et entre 36° et 36°40' de latitude Nord (Megueni et Remini, 2008). L'Oued Harreza parcourt une distance de 40,5 Km suivant une orientation Nord-Ouest. Au sud du bassin, le relief atteint une altitude de 765 mètres (Tableau 5.1), tandis que le point le plus bas est à l'exutoire avec une altitude de 313 mètres. Le bassin versant de Harreza est situé dans la zone géologique comprise entre le massif schisteux de Boumaad et les premiers contreforts de l'Ouarsenis. Il fait partie des reliefs dont l'altitude est supérieure à 1500 mètres qui sont formés de calcaire, de schistes métamorphisés et de roches éruptives profondément entaillées par les ravins abrupts.



**Figure 5.2 :** Situation des sous bassins de la région d'étude

<b>Tableau 5.1 :</b> Caractéristiques morphométriques des deux bassins versants étudiés		
Bassin	Cheliff à l'aval de Boughzoul	
Nom sous bassin	Oued Harraza	Oued Rouina Zeddine
Code Sous bassin	0117	0119
Superficie (km <sup>2</sup> )	743,97	898,54
Périmètre (Km)	142,68	173,69
Longueur équivalente (Km)	58,66	74,84

Largeur équivalente (Km)	12,68	12,01
Altitude moyenne (m)	575	640
Altitude minimale (m)	300	200
Altitude maximale (m)	1600	1700
Indice de compacité (kc)	1,76	1,62
Indice de pente global (Ig) (m/km)	23,87	21,38
Dénivelée spécifique (Ds) (m)	651,09	640,87
pourcentage du couvert végétal (PCV)	20	25
classes hydrogéologiques (CHG)	5	5
Classe de relief	Relief très fort	Relief très fort

### 5.3. Données et méthodes

#### 5.3.1. Données Hydrologiques

L'étude porte sur les valeurs instantanées des débits liquides, donnés en  $m^3/s$  et des concentrations des sédiments en suspension données en g/l sur une période s'étalant de 1990 à 2013. La station de Bir Ouled Tahar de coordonnées :  $X = 443.95$  m ;  $Y = 318.05$  m et  $Z = 320$  m, couvre une surface de  $421.5$   $km^2$  du bassin de Zeddine. La station d'El Ababsa de coordonnées :  $X = 431.10$  m ;  $Y = 313.25$  m et  $Z = 280$  m, couvre une superficie de  $142$   $Km^2$  du bassin de Harreza. Ces mesures ont été effectuées par les services de l'agence nationale des ressources hydrauliques l'ANRH, durant la période allant de Septembre 1990 à Février 2013. Les débits sont calculés de deux façons ; soit à partir des hauteurs d'eau lues sur une échelle limnimétrique soit à partir du dépouillement des hauteurs d'eau enregistrées par un limnigraphe pneumatique (Mehaiguene, 2005).

Pour la mesure de concentration en sédiments en suspension, à chaque lecture de hauteur d'eau, on prélève un échantillon d'eau sur les rives de l'oued. Les sédiments recueillies sur papier filtre sont ensuite séchés à l'étuve et pesés. On détermine ensuite la charge correspondante à un litre d'eau prélevé, ce qui donne la concentration. La cadence de prise des mesures varie selon l'ampleur de l'événement. En période de crue, les prises sont intensifiées jusqu'à des intervalles de temps d'une heure ou même 30 min en fonction de la vitesse de l'augmentation des débits liquides. En période d'écoulement normal ou en période

d'étiage, on se contente d'une prise quotidienne effectuée généralement à 13h00.

Le débit solide est calculé grâce à la formule (5.1) :

$$Q_s = QC \quad (5.1)$$

où  $Q_s$  : débit solide en suspension (kg/s),

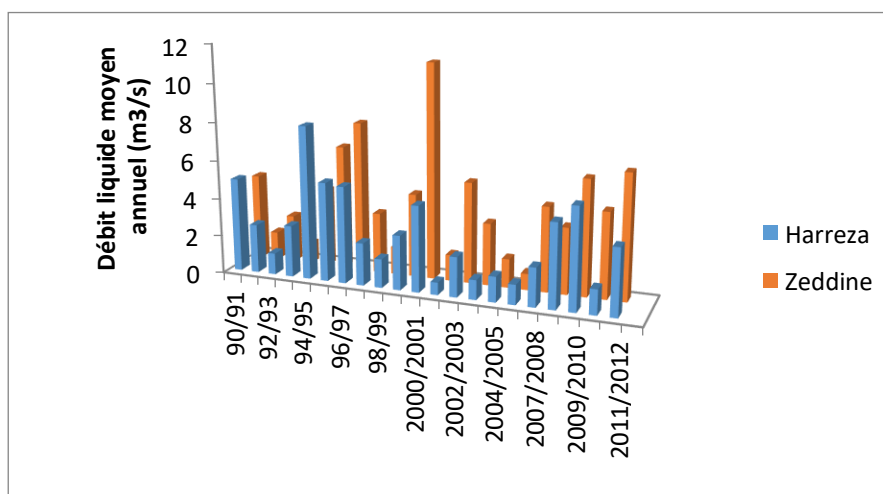
$C$  : concentration (g/l)

et  $Q$  : débit liquide ( $m^3/s$ ).

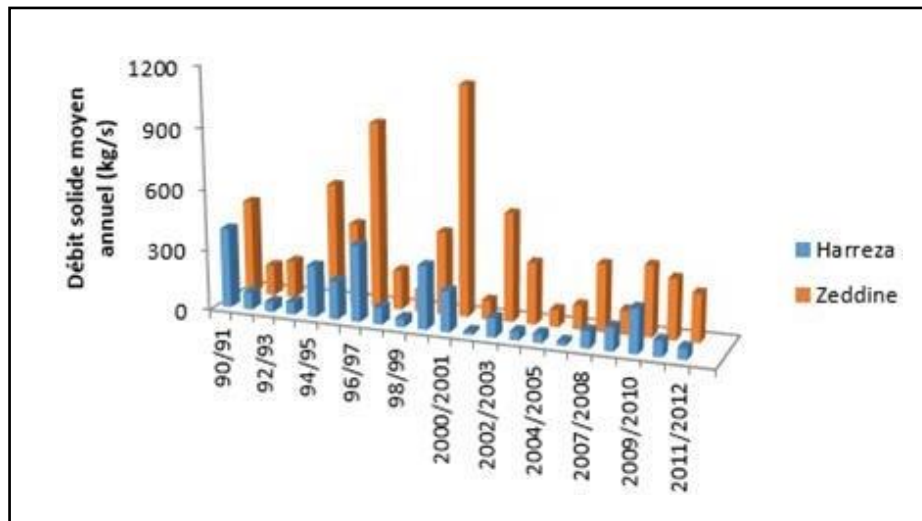
### 5.3.2. Analyse des débits instantanés

Il est nécessaire de préciser autant qu'il est possible les relations entre les différents phénomènes se manifestant dans les cours d'eau. L'une des plus importantes est certainement la relation entre le débit liquide et le débit solide. En comparant le débit solide en suspension et le débit liquide correspondant, on constate qu'à chaque crue correspond un accroissement des matières en suspension. En période de basses eaux, pour des débits liquides moyens, le débit solide prend des valeurs très faibles. Mais dès que s'amorce une crue, même peu importante, le débit solide croit brutalement.

L'année 2000/2001 présente le maximum de variations des débits liquides et solides pour le bassin de Zeddine (Figure 5.3 et 5.4) qui dépasse largement celui de Harreza en nombre de mesures et en quantité de débits. A cet effet nous avons voulu analyser de près cette année hydrologique pour le bassin de Zeddine et la comparer avec les années qui la précèdent et la succèdent.



**Figure 5.3** : Variation du débit liquide moyen annuel



**Figure 5.4 :** Variation du débit solide moyen annuel

### 5.3.3. Analyse des débits liquides de l'année (2000/2001)

L'année 2000/2001 présente un débit liquide moyen de l'ordre de 8,408 m<sup>3</sup>/s nettement plus élevé que la moyenne 2,788 m<sup>3</sup>/s (Tableau 5.2). Elle précède et succède une période où les débits sont restés inférieurs ou voisins au module.

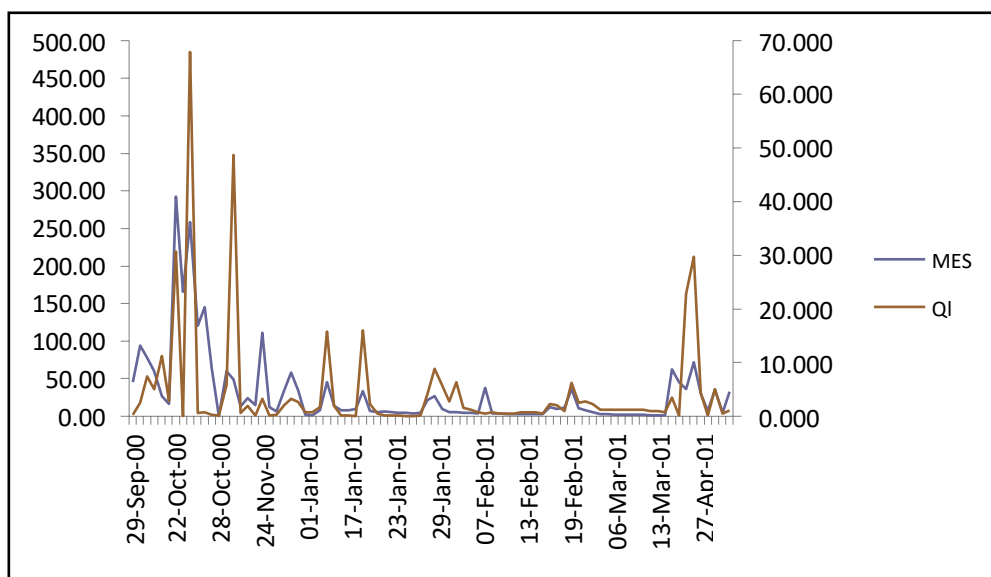
Les débits moyens journaliers varient de 0.016 m<sup>3</sup>/s (le 18 octobre) à 67,890 m<sup>3</sup>/s (le 24 octobre) (Figure 5.5). A partir de mai, les débits décroissent pour rester voisins de 2,313 m<sup>3</sup>/s. Par la suite, on observe une succession de crues durant l'automne le 16, 22 et 24 octobre, elles atteignent respectivement un débit de 52, 23.5 et 168 m<sup>3</sup>/s. Après une décrue rapide et importante (0.740 m<sup>3</sup>/s le 25 octobre), un très bref épisode de reprise est noté le 15 Novembre avec un maximum instantané de 10 m<sup>3</sup>/s.

Après un retour à des valeurs proches du module, une autre crue débute le 16 novembre et arrive à 103.6 m<sup>3</sup>/s. Dès le 17 novembre, les débits se rétablissent à des valeurs proches, voire inférieures au module, jusqu'à mi-janvier. Pendant la période hivernale, un accroissement progressif des débits est noté durant la première semaine de janvier et est suivi d'un pic de crue avec de 22.8 m<sup>3</sup>/s, puis ils s'approchent de la moyenne du février jusqu'à la dernière semaine d'avril où un épisode pluvieux entraîne une dernière crue de 42.4 m<sup>3</sup>/s (le 27 avril). Les évolutions journalières des débits de ces cours d'eau mettent en évidence le caractère méditerranéen de leur régime d'écoulement (Nekkache et Megnounif, 2012).



**Tableau 5.2** : Moyennes mensuelles, maxima et minima du débit en m<sup>3</sup>/s durant la période 1990-2013 et de l'année d'étude 2000-2001

Mois	Période : 1990-2013		Année d'étude 2000/2001
	maximum	moyenne	
Septembre	40.999	7.748	2.252
Octobre	39.620	3.527	39.620
Novembre	27.222	2.497	27.222
Décembre	7.638	1.188	2.422
Janvier	7.107	2.347	6.710
Février	16.682	2.637	1.553
Mars	12.740	3.073	1.425
Avril	25.792	3.371	16.797
Mai	36.125	3.655	2.891
Juin	6.517	1.125	0.000
Juillet	3.417	0.155	0.000
Aout	25.319	2.128	0.000
Moyenne annuelle		2,788	8,408



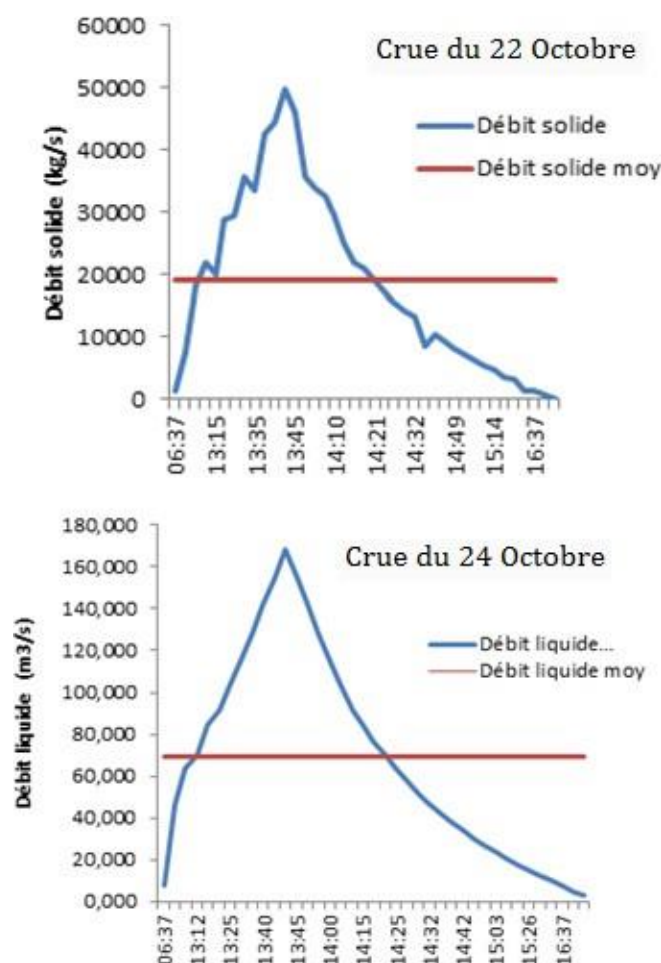
**Figure 5.5** : Evolution du débit liquide et des matières en suspension, période 2000/2001 pour le bassin de Zeddine

### 5.3.4. Analyse des débits solides de l'année 2000-2001

Durant la période étudiée, la teneur moyenne journalière en MES est de 37,176 g/l. Sur l'année, les MES varient de 10,918 à 111,338 g/l. En l'absence de crue, les MES restent comprises en 0.2 et 23.889 g/l. Lors des premières crues de l'automne (septembre), la MES atteint un maximum de 131,89 g/l pour un débit de 4.8m<sup>3</sup>/s. C'est en Octobre qu'une crue extensive permet l'apparition de teneurs extrêmement élevées : 360 et 394,55 g/l le 22 et 24 Octobre.

L'évolution des débits solides met clairement en évidence le rôle prépondérant des crues. Le cours d'eau étudié présente des périodes de crues caractérisées par un débit liquide et un débit solide nettement supérieurs à la moyenne qui est de 726.57 kg/s pour 6.76 m<sup>3</sup>/s.

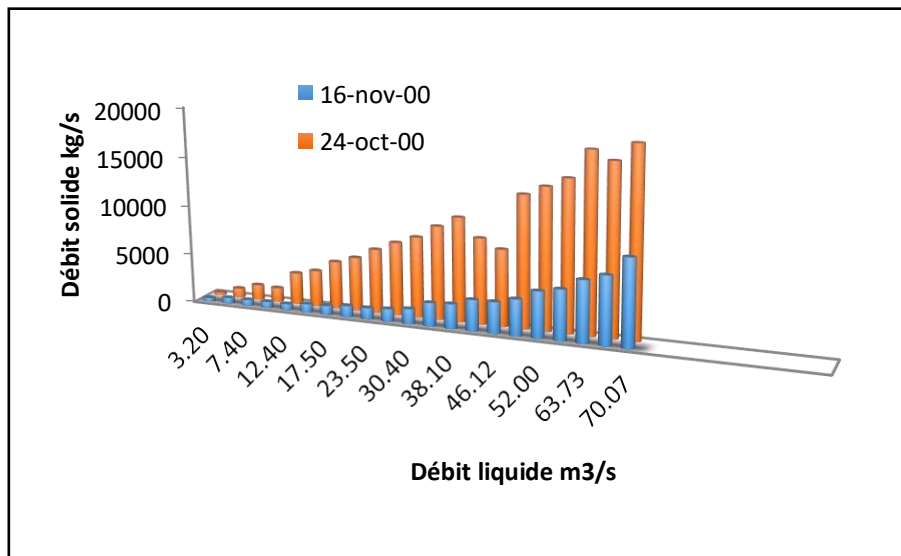
Pour les crues du 22 et 24 Octobre 2000 la moyenne des débits liquides et solides sont respectivement ; 3456.55 kg/s pour 11.20 m<sup>3</sup>/s et 19168.97 kg/s pour 69.48 m<sup>3</sup>/s (Figure 5.6).



**Figure 5.6 :** Variation des débits liquides et solides pendant la crue du 22 et 24 Octobre 2000 pour le bassin de Zeddine

Ce phénomène présente en plus la caractéristique suivante : pour une même valeur de débit liquide mensuel, le débit solide correspondant est généralement moins important pour la deuxième crue que pour la première (Fournier, 1960). Pour la crue du 24 octobre, des débits liquides de 7.40, 46.12, 63.73 et 103.5 m<sup>3</sup>/s leurs correspond respectivement des débits solides de 1513.22, 7768.91, 18133.95 et 29835.94 kg/s. Tandis que pour la crue du 16 novembre, des débits liquides de 8.90, 42.00, 62.80 et 103.6 m<sup>3</sup>/s leurs correspond respectivement des débits solides de 324.58, 1286.04, 2502.58 et 8879.55 kg/s.

En effet on peut conclure qu'en période de crue si deux périodes se succèdent, la seconde rencontrant un lit déjà déblayé par la première et n'aura de chance de se charger que si une seconde période d'érosion pluviale directement liée aux précipitations s'est manifestée sur le bassin versant entre les deux et que, bien entendu, celle-ci aura été plus ou moins intense (Figure 5.7).



**Figure 5.7 :** Variation du débit solide pendant deux crues successives pour le bassin de Zeddine

### 5.3.5. Analyse des débits solides de la période 1990-2013

Depuis longtemps, on a essayé de corrélérer les débits solides  $Q_s$  aux débits liquides  $Q$  et de déterminer une relation qui permettait d'estimer les premiers à partir des seconds. Le débit solide et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance (Capolini et al, 1969 ; Corbonnois, 1998).

$$Q_s = a Q^b \quad (5.2)$$

Pour l'estimation du transport solide par charriage, nous nous disposons que des données de concentration de matières solides en suspension, alors l'évaluation des débits solides totaux ne peut être qu'approximative, étant donné l'absence des données sur le charriage du fond, qui est estimé en général entre 20 et 34% du transport en suspension (Claude et Chartier, 1975 ; Meguenni et Remini, 2008).

Si on compare l'équation (5.2) à l'équation (5.1), en prenant le coefficient  $b = 1$ , on aura alors :

$$Q_s = a Q \quad (5.3)$$

Le débit solide par charriage sera calculé grâce à la formule (5.4), avec :

$$a = (20 \text{ à } 30)\% \cdot C$$

$$\text{Alors :} \quad Q_{sch} = (20 \text{ à } 30)\% \cdot C Q \quad (5.4)$$

où  $Q_{sch}$  : débit solide par charriage (kg/s),

$C$  : concentration (g/l),

$Q$  : débit liquide (m<sup>3</sup>/s).

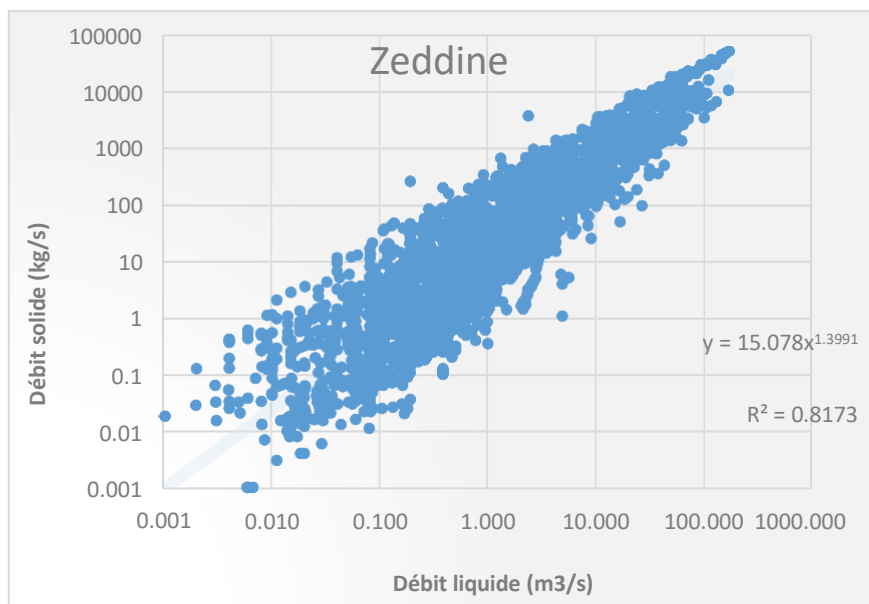
Afin de chercher à fournir une estimation moyenne actuelle du débit solide, nous avons analysé les relations liant les débits liquides et solides pour l'ensemble des mesures (N) effectuées depuis 1990 jusqu'au 2013 (3083 couples de valeurs pour le Zeddine et 1957 pour Harreza) (Tableau 5.3). Cinq cas de regroupements ont été envisagés afin de déceler la meilleure relation possible : à l'échelle interannuelle, annuelle, mensuelle, saisonnière, par saison humide et saison sèche.

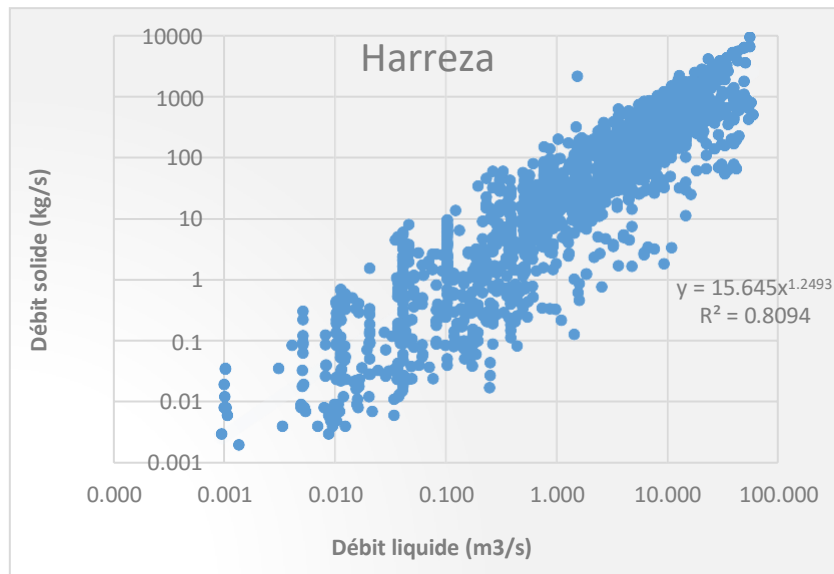
Tableau 5.3 : Coefficients de la régression Qs-Q à l'échelle interannuel								
	Zeddine				Harreza			
	N	R <sup>2</sup>	a	b	N	R <sup>2</sup>	a	b
Totalité des données	3083	0,8173	15.078	1.3991	1957	0,8094	15.645	1.2493

Bien que les paramètres  $a$  et  $b$  soient issus d'une relation empirique, certains auteurs ont pu trouver une explication physique. Ils suggèrent que ces paramètres sont dépendants des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques du bassin versant (Terfous et al,

2001). Plusieurs chercheurs ont essayé d'identifier surtout la valeur de l'exposant  $b$ . Ils les limitent entre 1 et 2 en fonction des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques des bassins versants ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau (Pont, 1997 ; Walling, 1971 ; Walling et Webb, 1981).

La variation du coefficient de détermination  $R^2$  montre le degré de corrélation des débits solides aux débits liquides à travers le modèle puissance (Figure 5.8). L'amplitude de l'intervalle de variation du paramètre  $a$  est plus importante que celle du paramètre  $b$ . On constate que les coefficients  $a$  sont presque de même ordre de grandeur, indiquant que les deux bassins appartiennent à une même classe hydrogéologique 5 (aquifère à nappe libre ne recevant aucune alimentation significative par infiltration par suites de conditions de surfaces défavorables) (Margat, 1975) et possèdent un pourcentage du couvert végétal très proche alors que les exposants  $b$  différents traduisent qu'ils appartiennent à une zone physico - climatique différente (Nekkache Ghenim et Megnounif, 2012).



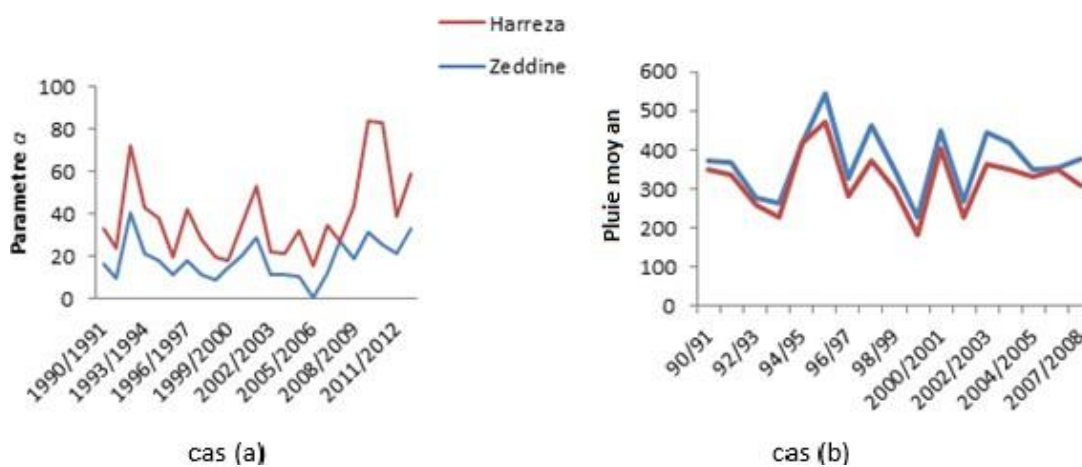


**Figure 5.8 :** Relation entre les débits instantanés liquides et solides

La variation des paramètres  $a$  et  $b$  établis pour chaque année est donnée dans le Tableau (5.4). La valeur du paramètre  $a$  diffère d'une année à une autre mais suit le même sens de variation pour les deux bassins. Cela est peut-être dû au même sens de variation de la pluie pour chaque année (Figure 5.9). De fortes valeurs du coefficient  $a$  correspondent à des sédiments facilement mobilisables lors des événements pluvieux. Le paramètre  $b$  peut être interprété comme la puissance érosive de la rivière (Morgan, 1995).

Tableau 5.4 : Coefficients de la régression Qs-Q à l'échelle annuel								
Année	Zeddine				Harreza			
	N	a	b	R <sup>2</sup>	N	a	b	R <sup>2</sup>
1990/1991	840	16.328	1.382	0.821	196	16.545	1.449	0,858
1991/1992	177	9.874	1.407	0.743	151	13.883	1.186	0,823
1992/1993	109	40.339	1.312	0.764	58	31.958	1.194	0,950
1993/1994	112	21.575	1.696	0.811	62	21.370	1.078	0,825
1994/1995	238	18.121	1.277	0.701	180	19.499	1.126	0,848
1995/1996	257	11.063	1.320	0,815	245	8.575	1.306	0,810
1996/1997	104	18.299	1.488	0,912	99	24.235	1.293	0,846
1997/1998	227	10.939	1.519	0,807	95	16.747	1.199	0,770
1998/1999	197	8.680	1.449	0,791	55	11.145	1.460	0,881
1999/2000	70	14.993	1.603	0,870	34	2.817	1.350	0,758
2000/2001	251	20.439	1.421	0,828	162	15.092	1.361	0,784
2001/2002	45	28.591	1.403	0,846	42	24.612	1.179	0,844
2002/2003	248	11.230	1.452	0,872	180	10.611	1.326	0,788

2003/2004	186	11.590	1.375	0,819	58	9.758	1.512	0,819
2004/2005	79	10.092	1.150	0,616	99	22.008	1.267	0,818
2005/2006					27	15.624	0.962	0.789
2006/2007	109	11.843	1.688	0,848	59	22.577	1.233	0,901
2007/2008	91	27.085	1.295	0,857				
2008/2009	129	18.768	0.971	0,655	88	25.467	0.871	0,708
2009/2010	82	31.387	1.138	0,865	39	52.672	0.819	0,837
2010/2011	64	25.311	1.234	0,779	15	57.743	0.859	0,705
2011/2012	48	21.060	0.976	0,801	20	17.545	0.937	0,967
2012/2013	12	33.040	1.147	0,915	11	25.731	1.118	0,9 8



**Figure 5.9** : Variation sur les deux bassins :  
a) paramètre  $\alpha$ , b) pluie moyenne annuelle.

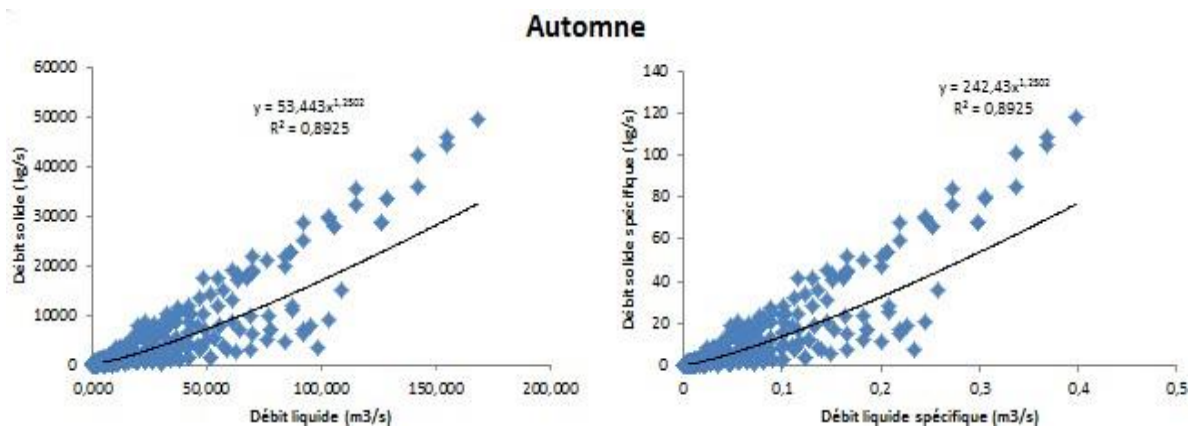
Les tableaux (5.5) et (5.6), révèlent des effets mensuel et saisonnier très distincts. Les valeurs des paramètres sont plus élevées en début de saison de pluies. La charge totale solide exportée du bassin sera plus élevée en début de saison. Cela est dû principalement au faible taux du couvert végétal herbacé des sols et aux premiers lessivages des pluies, après une longue saison sèche où les matériaux éoliens sont disponibles et facilement mobilisables par le ruissellement. L'écoulement est par conséquent fortement concentré en suspensions en début d'hivernage ; le couvert herbacé augmentant lorsque l'on avance dans hivernage, l'érosion pluviale s'atténue, le ruissellement entravé devient moins compétent et la quantité de matériaux facilement mobilisables diminue.

**Tableau 5.5 : Coefficients de la régression Qs-Q à l'échelle mensuel**

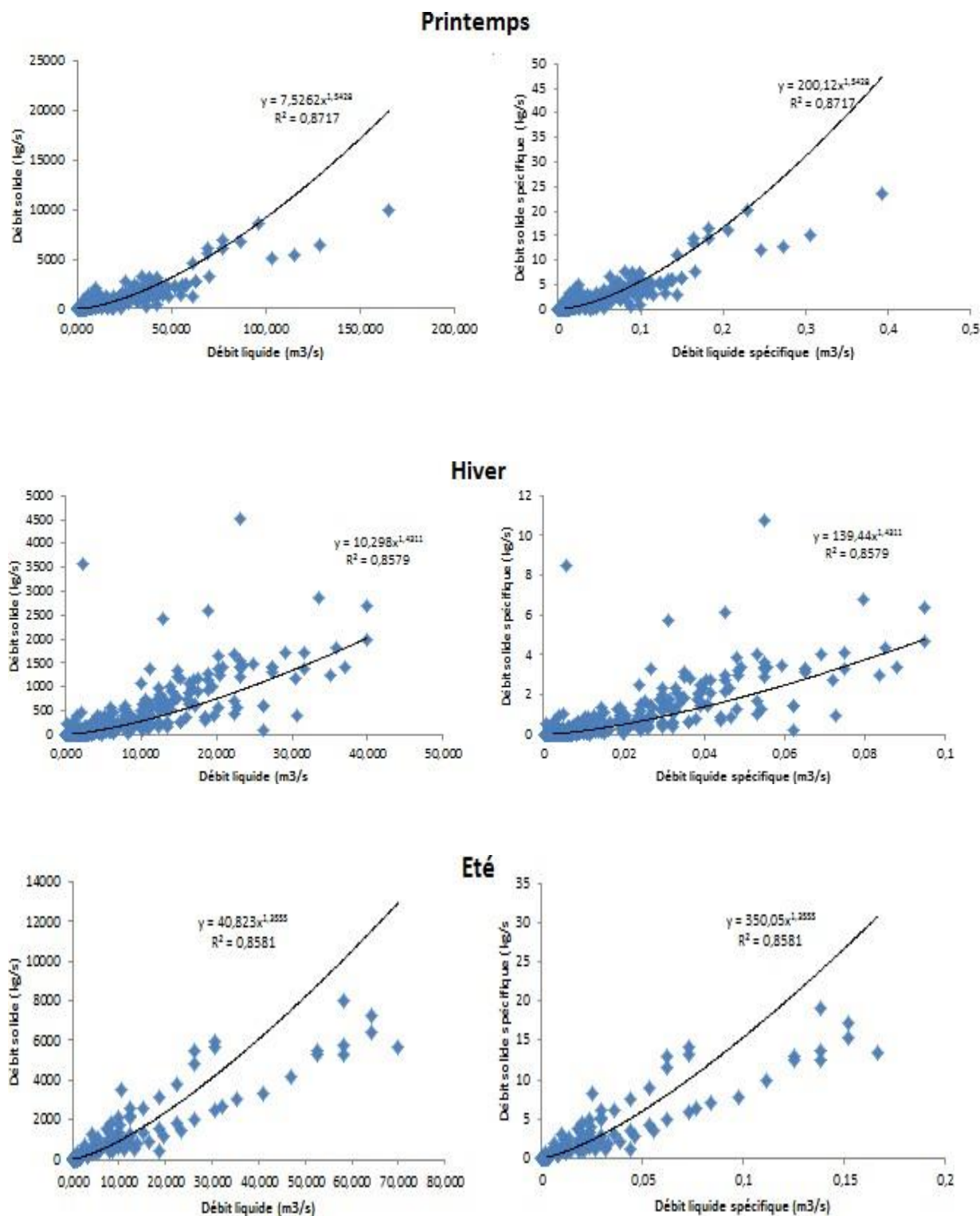
Mois	Zeddine				Harreza			
	N	R <sup>2</sup>	a	b	N	R <sup>2</sup>	a	b
Septembre	230	0,915	68.361	1.2673	180	0.818	44.316	1.0737
Octobre	323	0,902	68,479	1.2060	277	0,829	36.951	1.0617
Novembre	240	0,856	29,396	1.2039	168	0,882	17.983	1.2777
Decembre	283	0,873	17,545	1.4911	167	0,748	12.371	1.1817
Janvier	44	0,877	8,910	1.4556	286	0,777	11.808	1.1567
Fevrier	379	0,841	8,595	1.4735	274	0,816	9.854	1.2861
Mars	462	0,912	6.175	1.5880	244	0,889	7.300	1.4124
Avril	384	0,892	7.632	1.5632	181	0,877	14.301	1.3563
Mai	220	0,804	10.682	1.4868	82	0,794	10.379	1.2078
Juin	85	0,766	34.803	1.4303	42	0,871	42.819	1.0787
Juillet	12	0,952	1.567	1.0179	10	0,807	54.869	1.5481
Aout	70	0,930	53.887	1.2796	27	0,842	67.938	1.1746

**Tableau 5.6 : Coefficients de la régression Qs-Q à l'échelle saisonnier**

Saison	Zeddine				Harreza			
	N	R <sup>2</sup>	a	b	N	R <sup>2</sup>	a	b
Automne	792	0,892	53.443	1.2502	625	0,835	30.674	1.1506
Hiver	1101	0,857	10.298	1.4311	927	0,789	11.390	1.1997
Printemps	1066	0,871	7.526	1.5428	507	0,863	9.937	1.3650
Eté	167	0,858	40.823	1.3555	79	0,874	42.361	1.2352







**Figure 5.10 :** Relation entre les débits spécifiques saisonniers liquides et solides

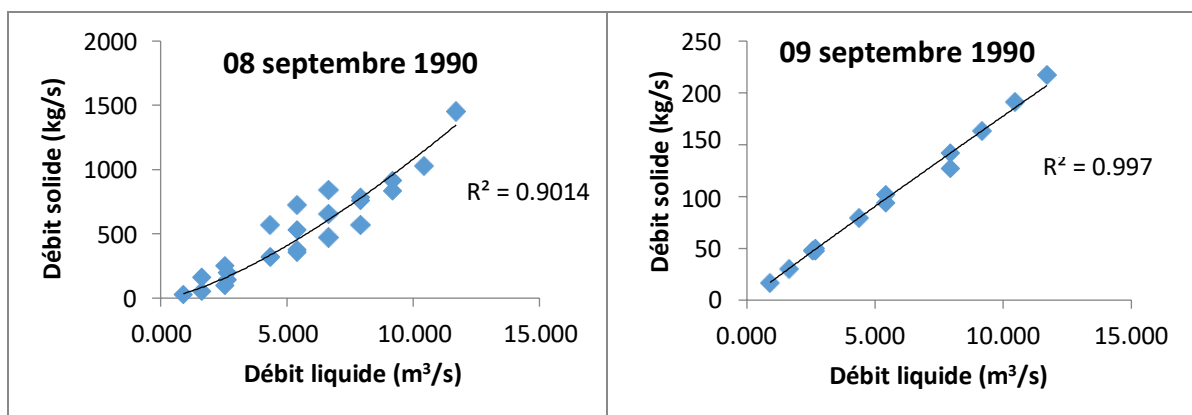
Pour les saisons humides les modèles montrent que les paramètres  $a$  et  $b$  sont compris entre ceux de l'automne et l'Hiver pour les deux bassins (Tableau 5.7). Ainsi, pour les saisons sèches les modèles montrent que le paramètre  $a$  et  $b$  sont compris entre ceux du Printemps et de l'été.

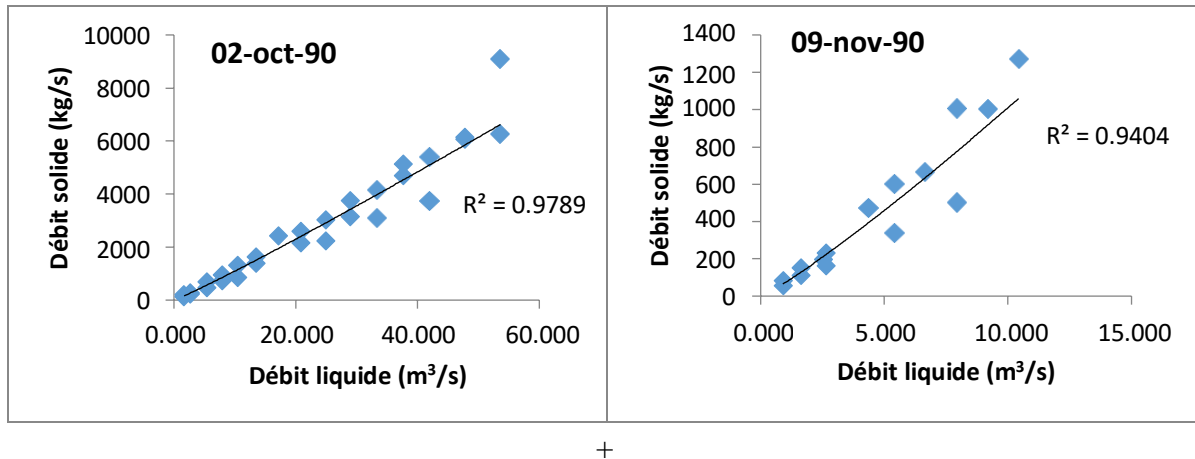
Date	Zeddine				Harreza			
	N	R <sup>2</sup>	a	b	N	R <sup>2</sup>	a	b
Saison Humide	1223	0,830	20.038	1.3671	1353	0,794	17.802	1.1955
Saison Sèche	1894	0,842	9.326	1.5115	586	0,844	12.084	1.3435

### 5.3.6. Variation du débit liquide et solide pendant les crues

Sur l'ensemble d'une période de mesures, des auteurs ont montré que les débits solides ne sont pas étroitement liés aux débits liquides même en travaillant en coordonnées bi-logarithmiques (Van Doren et Bartelli, 1983), les régressions apparaissent de qualité moyenne. Par contre, qu'en travaillant crue par crue, les relations deviennent fortes, surtout lorsque les bassins-versants sont de petite taille (Bourouba, 1997 ; Cambel et Bauder, 1940).

On a donc étudié les relations entre les débits solides et les débits liquides instantanés de quelques épisodes hydrologiques pour le bassin de Harreza qui est de petite taille, pour l'année 1990. Des coefficients de corrélation forts ont été mis en évidence aussi bien pour les crues très violentes, qui s'accompagnent de concentrations élevées, que pour des crues plus modestes, au cours desquelles les concentrations restent faibles (Figure 5.11).





**Figure 5.11** : Relation entre le débit liquide et solide pendant les différentes périodes de crue pour le bassin de Harreza

### 5.3.7. Flux des matières en suspension

Le flux des matières en suspension exporté à l'exutoire est calculé par la formule (5.5) :

$$As = \sum_{j=1}^n \frac{[(Q_{j+1} C_{j+1}) + (Q_j C_j)]}{2} (t_{j+1} - t_j) \quad (5.5)$$

où  $C_j$  et  $C_{j+1}$  sont les concentrations correspondant respectivement aux débits liquides  $Q_j$  et  $Q_{j+1}$  relevées aux instants  $t_j$  et  $t_{j+1}$  séparant deux prélèvements.

L'Oued Zeddine a un bassin ramassé et n'a pas de plaine alluviale. Ce point est capital dans la vitesse d'écoulement et dans la genèse des crues. Il peut être considéré comme susceptible d'un temps de concentration extrêmement court et d'une vitesse de propagation des crues très rapide, ce qui favorise un ruissellement et une érosion violente (Bravard et Petit, 1997). Le bassin de Zeddine couvre une surface qui est quatre fois plus grande que celle de Harreza. Ces points mettent en évidence que le flux des matières solides est plus important dans le bassin de Zeddine que celui de Harreza ce qui confirme que ces deux facteurs sont parmi les paramètres les plus explicatifs du phénomène du transport solide (Bouchelkia et Remini, 2003).

L'essentiel du transport solide se produit assez régulièrement à l'automne (Figure 5.12), lui seul couvre (46%) de l'apport solide pour Zeddine et (43%) pour Harreza. Les périodes contribuant au reste du transport sont ensuite le printemps, l'hiver et de manière plus aléatoire l'été (orage d'août). À l'échelle mensuelle, une partie importante de l'apport solide est observée pendant les mois de début d'automne et de la fin de printemps. L'apport solide

des quatre mois de septembre, octobre, avril et mai, représentent environ 52% de l'apport solide annuel pour le bassin de Zeddine et 51% pour le bassin de Harreza (Figure 5.13).

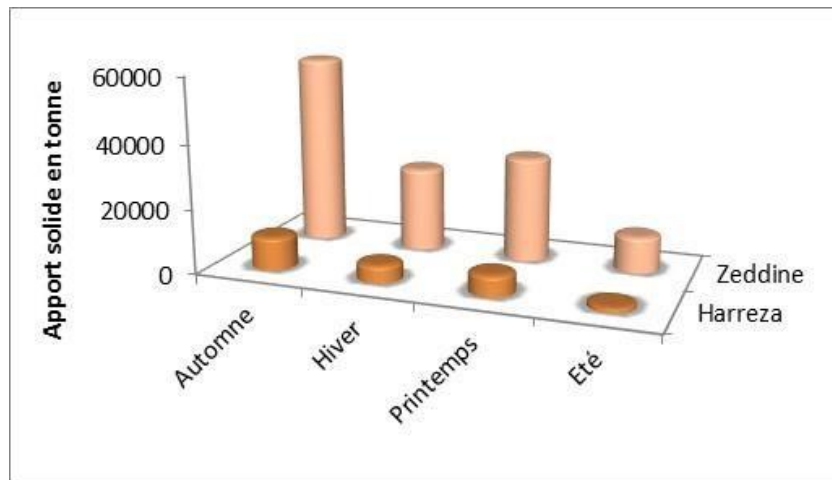


Figure 5.12 : Variation de l'apport solide saisonnier

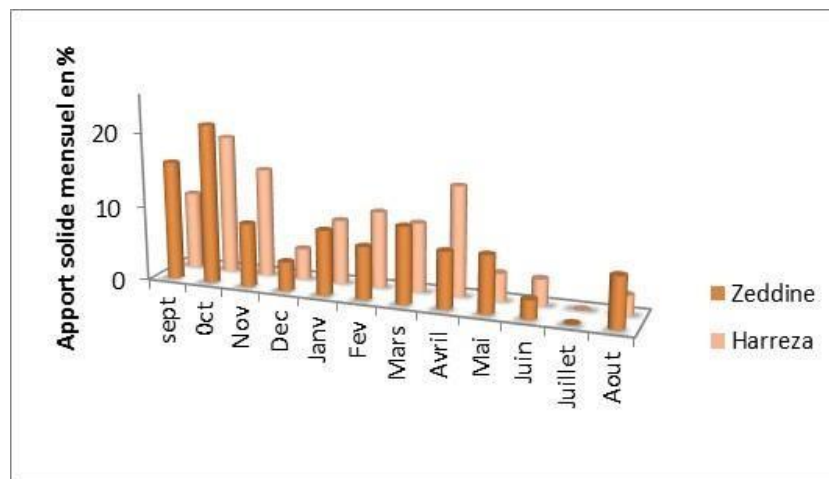


Figure 5.13 : Distribution mensuelle de l'apport solide

### 5.3.8. Erosion hydrique spécifique

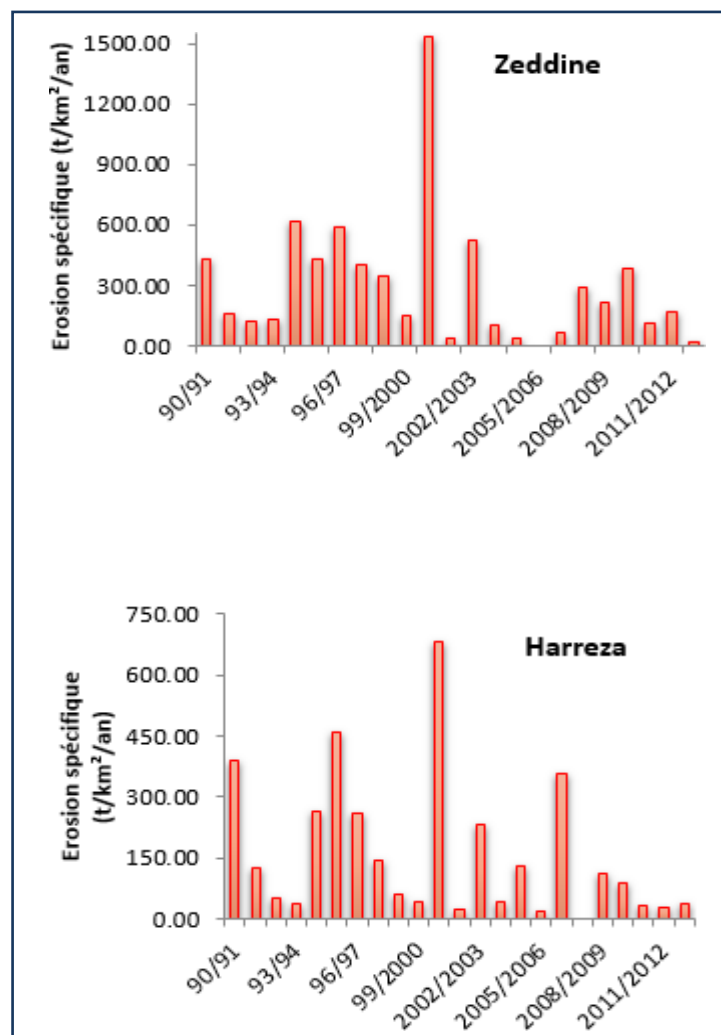
l'érosion hydrique ( $E_s$ ) exprimé en tonne/km<sup>2</sup>/an est calculée en divisant l'apport solide annuel  $A_s$  [t/an] par la surface du bassin  $A$  [km<sup>2</sup>] selon la formule (5.6) :

$$E_s = \frac{A_s}{A} \quad (5.6)$$

Le bassin de Zeddine transporte une moyenne annuelle de 0.131 millions de tonnes de sédiments, soit une érosion hydrique de l'ordre de 312 tonnes/km<sup>2</sup>/an, alors que le bassin de Harreza transporte une moyenne annuelle de 0.023 millions de tonnes de sédiments, soit

une érosion hydrique de l'ordre de 164.39 tonnes/km<sup>2</sup>/an. Les caractères lithologiques, topographiques et la structure des deux bassins sont très proches. Cette différence d'apport solide réside du fait que la superficie du bassin de Zeddine est plus grande que celle de Harreza ce qui confirme ce qui a été trouvé auparavant (Bouras et al, 2010).

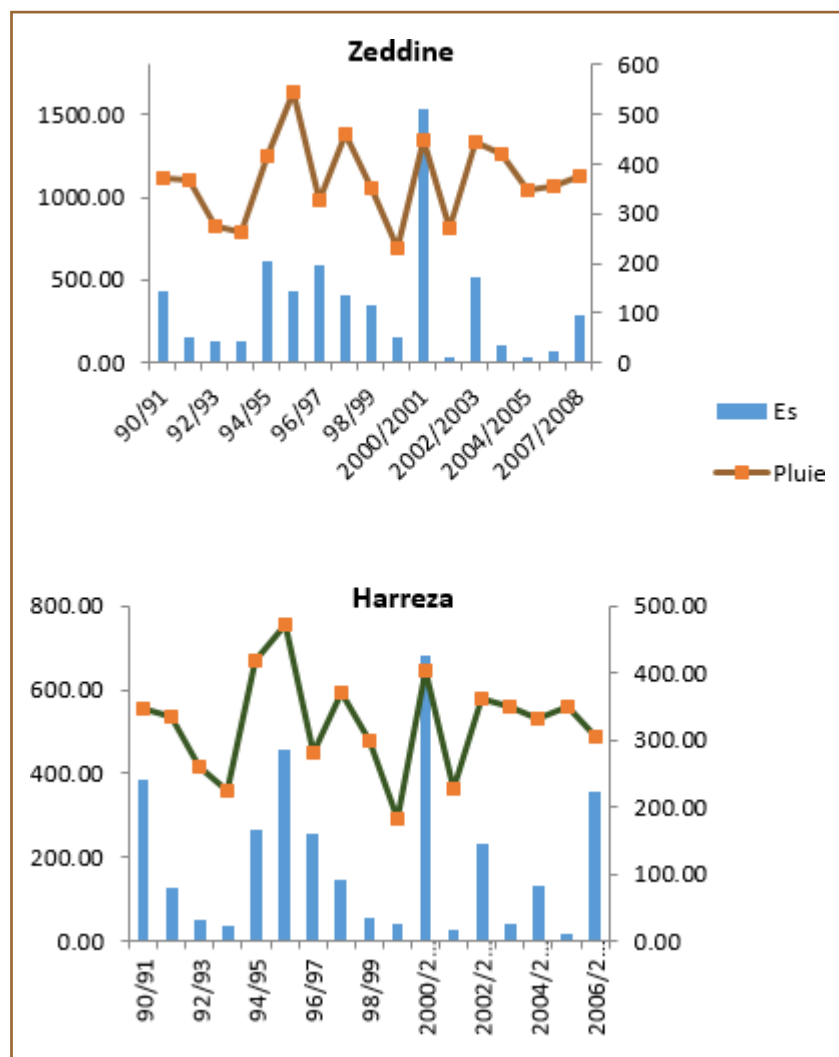
Pendant la période d'étude on remarque une baisse du taux d'érosion pour les deux bassins à partir de l'année 2000-2001 durant laquelle une importante dégradation spécifique a été engendrée : plus de 1530 tonnes/km<sup>2</sup>/an pour le Zeddine et 682.15 tonnes/km<sup>2</sup>/an pour Harreza. Avant cette année ; de 1990 jusqu'à 1999 une moyenne respectivement de 337.26 et 183.14 tonnes/km<sup>2</sup>/an a été engendrée et qui est inférieure que celle de 2001 jusqu'à 2013 et qui vaut 176.36 et 100.27 tonnes/km<sup>2</sup>/an (Figure 5.14).



**Figure 5.14** : Variation annuelle de l'érosion spécifique

Annuellement, le comportement morphologique irrégulier des bassins versants algériens passe d'une année à l'autre d'un régime méditerranéen à érosion élevée et à écoulement abondant au régime de la zone tempérée caractérisée par un écoulement abondant et une érosion faible ou encore au régime de la frange aride à érosion élevée et à faible écoulement (Bourouba, 1997). Cela a été confirmé par une analyse faite pendant l'année 2000/2001.

Avant et après l'année 2000-2001, on remarque une variation brusque de l'érosion spécifique qui passe de 148.57 à 1529.98 puis à 34.86 tonnes/km<sup>2</sup>/an pour le Zeddine et de 42.06 à 682.15 puis à 24.85 tonnes/km<sup>2</sup>/an pour Harreza. Cette variation coïncide presque avec celle de la pluie, qui passe de 229.15 à 448.37 puis à 269.01 mm pour Zeddine et de 182.52 à 403.25 puis à 226.31 mm pour Harreza (Figure 5.15).



**Figure 5.15** : Variation annuelle de l'érosion spécifique et de la pluie

En général, il y a un équilibre entre la formation et l'érosion des sols, la pluie favorise la végétation créant une couche protectrice qui diminue l'impact des gouttes de pluie sur le sol et les effets du ruissellement (Demmak, 1982 ; Fiandino, 2003). Mais, une fois cet équilibre brisé les érosions sont accentuées, l'eau de la pluie, qui était en grande partie absorbée par la végétation, s'écoule vers les côtes les plus basses, transportant et désagrégeant les sols. Ainsi une fois la couche de matériaux meubles lessivée par les eaux de ruissellement le terrain reste nettoyé et protégé contre l'action ultérieure de l'eau.

## 5.4. Conclusion

Les conclusions obtenues de ces chapitres peuvent être structurées comme suit :

- Les modèles obtenus aux échelles mensuelle et saisonnier, explicatifs de la variation du débit solide par rapport au débit liquide pour différents cas de regroupements ont donné les meilleurs coefficients de corrélations.
- En période de crue si deux périodes se succèdent, pour une même valeur de débit liquide mensuel, le débit solide correspondant est généralement plus important pour la première crue que pour la deuxième ;
- Les transports solides en suspension dans les deux bassins versant de Zeddine et Harreza se font essentiellement lors des périodes de crue. On distingue alors, deux périodes d'érosion actives, une première période en automne, la seconde, à plus faible ampleur, au printemps ;
- Sur l'ensemble d'une période de mesures les débits solides ne sont pas étroitement liés aux débits liquides, les régressions apparaissent de qualité moyenne. Par contre, qu'en travaillant crue par crue, les relations deviennent fortes surtout lorsque les bassins-versants sont de petites tailles ;
- L'Oued Zeddine présente un apport annuel moyen de 0.131 millions de tonnes de sédiments en suspension, ce qui correspond à une dégradation spécifique relativement moyenne, de l'ordre de 312 tonnes/km<sup>2</sup>/an. L'apport solide de l'Oued Harreza est de 0.023 millions de tonnes et la dégradation spécifique est de 164.39 tonnes/km<sup>2</sup>/an ;
- Les quantités de sédiments sont très variables d'une année à une autre. L'année 2000-2001 a apporté à elle seule 0.645 millions tonnes, soit une dégradation spécifique de plus de 1530 tonnes/km<sup>2</sup>/an.

# **Chapitre 6**

Cartographie des zones sensibles  
à l'érosion hydrique



# Chapitre 6

## Cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique

### 6.1. Introduction

L'irrégularité de la pluviométrie saisonnière et interannuelle des bassins versants du Tell algérien, dominés par un climat semi-aride ont un impact direct sur l'action érosive et notamment sur le transport solide en suspension. Les particules du sol qui rejoignent les oueds et les retenues sous l'effet de l'érosion contribuent à augmenter la turbidité des eaux et par conséquent le débit solide, ce qui affecte alors les infrastructures en aval telles que les réservoirs d'eau, les canaux d'irrigation, les stations de traitement d'eau potable et les centrales hydroélectriques. Il est donc impérativement primordial d'établir une évaluation détaillée de ce processus avant tout aménagement.

Une évaluation quantitative est nécessaire pour déduire l'étendue et l'ampleur des problèmes d'érosion des sols afin de pouvoir recourir à des stratégies de gestion efficaces. Cependant, la complexité de ses facteurs rend difficile l'estimation précise ou la prédiction de l'érosion. L'évolution des technologies spatiales et des moyens d'acquisition de l'information géographique à distance ont augmenté les méthodes existantes et ont fourni des méthodes efficaces de mesure, d'analyse et de gestion des ressources naturelles à des échelles allant de la parcelle au bassin versant.

Ce travail consiste à évaluer l'ampleur du phénomène d'érosion au niveau de deux sous bassins-versants Zeddine et Harreza et à le spatialiser en élaborant des cartes de risques érosifs. Les bassins de Zeddine et Harreza sont contigus et appartiennent tous deux au bassin hydrographique du Haut Cheliff. Ce bassin, limité au Nord par les monts du Dahra et au sud par l'Atlas saharien, comprend au Nord la vallée du Cheliff, au sud les hauts plateaux, allant de Saida à Tiaret, les plaines de Nahr Ouassel et Ain Ouassera et au centre le massif de l'Ouarensenis. Une description détaillée de la zone d'étude a été détaillée dans le chapitre 5.

Un Système d'Information Géographique (SIG) a été développée et qui a pour objectif de déterminer les cartes des zones vulnérables à l'érosion selon l'équation universelle de pertes de sol USLE.

## **6.2. État de l'art – Choix d'un modèle**

Afin de traiter la spatialisation de l'érosion d'un point de vue quantitatif, il est nécessaire d'utiliser un modèle. Nous nous sommes donc intéressés aux processus de transfert des sédiments depuis le versant jusqu'au réseau hydrographique et aux différents modèles s'y attachant afin de savoir s'il était possible de coupler un modèle hydrodynamique à la spatialisation de l'aléa érosion.

### **6.2.1. Les bases du modèle**

Seulement une proportion, peut-être même plutôt faible, des particules érodées à l'intérieur d'un bassin versant atteint l'exutoire lors d'un événement pluvieux (Dautrebande et Sohler, 2006). Les incertitudes sont grandes quant à l'estimation de cette proportion qui est décrite à l'aide du 'sediment delivery ratio' (SDR). En outre, des discontinuités temporelles peuvent intervenir au cours du processus d'exportation des sédiments introduisant encore davantage de complexité dans le transfert des sédiments depuis les versants jusqu'aux cours d'eau. Des zones de dépôt appelées zones tampons peuvent apparaître à l'intérieur du bassin versant et modifier considérablement la dynamique de l'érosion.

On distingue deux groupes de paramètres susceptibles d'influencer les modèles d'érosion. D'une part, les paramètres physiques du milieu tels que la pente, la pluie, la microtopographie, le sol et la contribution en ruissellement provenant de l'amont du versant. D'autre part, les paramètres propres à la représentation des processus dans le modèle, c'est-à-

dire la façon de calculer les différentes composantes du modèle (par exemple, la manière de calculer l'infiltration de type hortonienne, le ruissellement, le coefficient de frottement, les valeurs de flux de mises en mouvement par splash pour différentes textures de sol...).

Les modèles hydrologiques spatialisés sont basés sur une segmentation de la surface et du milieu souterrain. Les principaux processus étudiés sont les écoulements en milieu non saturé et saturé, le ruissellement de surface sur les versants et les écoulements via le réseau hydrographique. Les paramètres à identifier sont les propriétés hydrodynamiques des sols pour les écoulements en milieu non saturé, la transmissivité pour les écoulements en milieu saturé ainsi que les caractéristiques géométriques (longueur, profil en travers, pente, rugosité) pour les écoulements à surface libre aussi bien sur les versants que dans le réseau hydrographique. A ceci s'ajoute la connaissance des conditions initiales et aux limites du milieu.

### 6.2.2. Les principaux modèles hydrologiques de transfert des sédiments

Les modèles diffèrent essentiellement par les hypothèses de fonctionnement hydrologique, par la procédure de segmentation du bassin versant, par le mode de représentation des liens entre les versants et le réseau hydrographique, par le mode de représentation des processus hydrologiques, et par les stratégies de paramétrisation, de calage et de validation.

- **HYDROTEL** (Fortin et al., 1995)

Le modèle hydrologique HYDROTEL simule six processus hydrologiques : interpolation des données météorologiques, évolution et fonte du couvert nival, évapotranspiration potentielle, bilan d'eau vertical, écoulement sur la partie terrestre du bassin, écoulement dans le réseau hydrographique. Pour certains de ces processus, HYDROTEL offre la possibilité de choisir différents sous-modèles en fonction des données disponibles. Ainsi, lorsque suffisamment de données sont disponibles sur un bassin donné, il est possible d'utiliser des sous-modèles plus précis basés sur les processus physiques. Dans d'autres cas, lorsque les données se font plus rares, des sous-modèles plus conceptuels et moins gourmands en données sont disponibles. Ceci permet d'appliquer HYDROTEL à une large gamme de bassins.

- **USLE** : Universal Soil Loss Equation (Wischmeier et Smith, 1978)

L'équation universelle de pertes en sol s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappes. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques anti-érosives. Malgré les critiques adressées sur l'utilisation abusive de l'USLE dans des conditions autres que celles où elle a été élaborée, il semble, en pratique, que l'approche de modélisation par l'emploi des facteurs de l'USLE demeure une stratégie acceptable pour évaluer l'érosion hydrique des sols. Par ailleurs, le modèle a été complété par un module prenant en compte le dépôt dans le modèle RUSLE, Revised USLE (Renard et al. 1997). Plusieurs modèles qui simulent la pollution diffuse sont dérivés de l'Équation universelle de perte de sol ou utilisent certaines de ses composantes pour estimer l'érosion des sols.

- **SHE** : Système Hydrologique Européen (Abbott et al., 1986 ; Bathurst et O.Connell, 1992)

Parmi les modèles à base physique, c'est le plus connu. Il a été développé conjointement par le Danish Hydraulic Institute, le British Institute of Hydrology et la société française SOGREAH il y a une vingtaine d'années. Le modèle SHE, s'appuyant sur une grille de mailles carrées, a pour ambition de capitaliser toutes les connaissances hydrologiques dans un seul modèle mécaniste dans un but de mieux comprendre le fonctionnement complexe du bassin versant. Depuis la version initiale du SHE, de constantes améliorations ont permis de proposer plusieurs versions intégrant notamment la modélisation des processus d'érosion et de transport de sédiments.

- **SHETRAN** (Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System, Ewen et al., 2000)

Ce modèle recourt essentiellement à trois composantes principales liées à l'écoulement de l'eau ainsi qu'au transfert de sédiments et solutés. La composante « eau » permet la simulation des écoulements de surface ainsi que le transfert de l'eau du sol et des écoulements souterrains. La composante « sédiment » permet d'évaluer les processus d'érosion ainsi que le transfert de particules solides à la surface du sol. La composante « solutés » offre la possibilité

de déterminer le mouvement des substances en solution dans l'eau du sol ainsi que leur acheminement en rivière. Ce modèle est Estimation et spatialisation de l'aléa érosion en Nouvelle-Calédonie PRINTEMPS Julia IRD Nouméa M2 OGDDT, IGA - 2006/2007 14 complètement distribué et ceci dans les trois dimensions. Il nécessite de connaître les conductivités hydrauliques et les teneurs en eau à saturation.

- **MHYDAS** : Modélisation HYdrologique Distribuée des AgroSystèmes (Moussa et al., 2002)

MHYDAS n'est pas un modèle unique, mais une plate-forme de modélisation qui a été développée afin de comprendre et de simuler les processus de transfert d'eau et de polluants en milieu agricole. Sa structure modulaire permet à l'opérateur de choisir les modules les plus appropriés à sa problématique. Dans sa version actuelle, c'est un modèle événementiel de crue. MHYDAS propose huit modèles d'infiltration 1D : - cinq modèles à bases physiques s'appuyant sur les équations de Richards ou leurs simplifications, nécessitant une bonne connaissance des propriétés hydrodynamiques du sol et des conditions initiales d'humidité sur un profil vertical, - trois modèles basés sur une représentation simplifiée du milieu : modèle à réservoir (Diskin et Nazimov, 1995) ou modèles empiriques (Horton, 1933). Ces huit modèles nécessitent la connaissance de l'intensité de la pluie, des conditions initiales d'humidité et des propriétés hydrodynamiques de la couche de surface du sol.

- **SWAT** : Soil and Water Assessment Tool (Arnold et Williams, 1995 ; Neistch et al., 2002)

Les algorithmes du modèle de bassin versant SWAT permettent la modélisation du transport et des transformations de l'azote, du phosphore et des pesticides en milieu terrestre. Le transport dépend des masses de sédiments provenant de l'érosion hydrique des sols. La modélisation des cycles a donné lieu à la construction de deux modules informatiques : un module 'azote-phosphore' simule le cycle de l'azote et du phosphore alors qu'un module 'pesticides' simule le transport et la dégradation de pesticides. L'estimation de la réserve utile et de la perméabilité à l'aide de fonctions de pédotransfert est utilisée pour modéliser les flux de pollution dans les sols. D'autres modèles existent et varient en fonction de l'échelle

utilisée, des propriétés hydrodynamiques des bassins versants et de la précision des données disponibles.

### 6.2.3. Choix d'un modèle pour l'étude

Il existe donc de nombreux modèles hydrologiques. Les modèles mécanistes ont une ambition de compréhension du fonctionnement du bassin, mais essaient de simplifier la complexité du milieu en privilégiant certains processus sur d'autres ou en introduisant de nouveaux concepts. Par ailleurs, la plupart des modèles ont été développés pour répondre à un objectif particulier : gestion de la ressource en eau sur des bassins versants de taille moyenne (quelques centaines de km<sup>2</sup>) dans HYDROTEL, transfert de polluants dans SWAT et prise en compte des particularités du milieu agricole dans MHYDAS. En outre, la modélisation à l'échelle du bassin versant pose essentiellement le problème de la représentation des discontinuités hydrologiques, de la paramétrisation de ces dernières, de la spatialisation sur les différentes unités (donc du maillage).

Le modèle le plus utilisé dans le monde pour prédire la perte de sol est l'équation universelle de perte en sol USLE, en raison de sa commodité d'intégration dans les systèmes d'information géographique (SIG). Bien qu'il s'agisse d'un modèle empirique, il prédit non seulement les taux d'érosion des bassins en connaissant les caractéristiques des bassins versants et les conditions hydroclimatiques locales, mais il présente aussi l'hétérogénéité spatiale de l'érosion des sols.

Afin d'évaluer spatialement et quantitativement les effets de l'érosion des sols pour faire face à ce phénomène et proposer les meilleures stratégies de lutte, de conservation et d'aménagement des terrains ; on a fait appel à l'équation universelle de perte en sol USLE, couplée à un système d'information géographique (SIG).

### 6.2.4. Équation Universelle de Pertes en Sol (USLE)

L'Universal Soil Loss Equation (USLE) est le résultat de plusieurs années de recherche menées par des équipes de chercheurs dans plusieurs régions des Etats-Unis d'Amérique. Sous la direction de W.H. Wischmeier, le National Runoff and Soil Loss Data Center fut créé en 1954 à l'université de Purdue avec pour but de développer une équation de prédiction de l'érosion reproductible sur l'ensemble des Etats-Unis.

Après la mise sur pied du centre, plus de 10 000 parcelles par année dans 49 endroits aux États-unis ont été suivies. Ces parcelles expérimentales (de 22.1 m de long et 9% de pente) ont permis de collecter des données sur le ruissellement et la perte de sol. A l'issue des analyses effectuées, de correctifs et d'améliorations, Wischmeier, Smith et d'autres chercheurs ont développé l'Équation Universelle de Perte de Sol (USLE) et ont publié leur équation en 1978 dans le "Agriculture Handbook" No 537 (Renard et al., 1991).

### 6.2.5. Expression de l'USLE

L'érosion du sol est définie comme la quantité de sol érodé pour une superficie et une durée donnée. Il existe trois types de modèles : empirique, conceptuel et physique. L'USLE est de type empirique puisqu'elle est basée sur des observations et des statistiques. Dans ce sens, les paramètres du modèle doivent être calibrés selon les conditions (climat, etc.) du territoire où il est appliqué. L'USLE est composée de six facteurs qui permettent d'obtenir une estimation de l'érosion (A) en tonnes/hectares.an par la multiplication de chacun des facteurs :

$$A = R K L S C P \quad (6.1)$$

Où

A est la perte annuelle de sol exprimée en t/ha/an,

R est le facteur d'érosivité des pluies exprimé en MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>,

K est le facteur d'érodibilité des sols exprimé en t.ha.h/ha.MJ.mm,

L est la longueur de pente (m),

S est l'inclinaison de pente (%),

C est le facteur adimensionnel de la couverture végétale et des pratiques culturales,

P est le facteur adimensionnel relié aux pratiques de conservation des sols.

### 6.2.6. Définition des facteurs de l'équation

#### 6.2.6.1. Facteur d'érosivité des précipitations (R)

Le facteur R est le facteur climatique déterminant la force érosive des précipitations sur le sol. Il considère les différences régionales du climat selon le type, l'intensité et la fréquence des précipitations. Hudson (1981) définit l'érosivité comme étant la capacité potentielle de la pluie pour produire de l'érosion, souvent attribuée à ses caractéristiques

physiques. La quantité, l'intensité, la dimension des gouttes de pluie, la distribution de la grosseur de ces gouttes et la vitesse de chute en sont quelques exemples. Ces caractéristiques sont liées. En effet, la dimension des gouttes définit la distribution de la grosseur des gouttes et influence la quantité de pluie tombée. Par ailleurs, la grosseur de la goutte affecte sa vitesse de chute et est reliée à l'intensité de la pluie (Hudson, 1981).

Après avoir analysé les données collectées sur des stations expérimentales, Wischmeier et Smith ont déterminé que, parmi les différentes caractéristiques physiques de la pluie, l'intensité était celle qui accusait la plus forte corrélation à la quantité de sol érodé. Ils ont donc établis l'équation (6.2) :

$$R + E.I_{30} \quad (6.2)$$

où :

R est l'érosivité de la pluie pour un épisode pluvieux en MJ.mm/ha.h,

E est l'énergie cinétique de la pluie en MJ/ha,

$I_{30}$  est son intensité maximale en 30 minutes en mm/h.

Cependant, l'indice d'érosivité des pluies R de WISCHMEIER & SMITH (1978), calculé à partir de l'énergie cinétique des gouttes de pluie durant une intensité maximale de 30 minutes, présente une difficulté majeure, car les stations de notre zone d'étude ne disposent pas d'un enregistreur des précipitations maximales pour la période spécifique des 30 minutes. Donc l'indice d'érosivité des pluies a été calculé en se fondant sur la formule d'Arnoldus (1987) qui tient compte du rapport entre la somme carrée de la pluviosité moyenne mensuelle de chaque mois de l'année et la pluviosité moyenne annuelle.

$$R = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (6.3)$$

où :

$P_i$  est la pluie moyenne de chaque mois (mm)

P est la pluviosité moyenne annuelle (mm).

La distribution spatiale et les variations temporelles de l'indice d'érosivité des pluies R sont très importantes pour quantifier l'érosion du sol ( Hamlaoui et Souag, 2013).



### 6.2.6.2. Facteur d'érodibilité des sols (K)

Le facteur K est le facteur d'érodibilité du sol selon un certain type de sol. Ce facteur reflète la résistance d'un sol à l'érosion causée par la force qu'engendrent les précipitations. Contrairement à l'érosivité de la pluie qui est en lien direct avec ses propriétés physiques, l'érodibilité d'un sol est la résultante de plusieurs variables. En effet, ce sont les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des sols ainsi que leurs interactions qui affectent le facteur K. A ceci s'ajoute une grande variabilité spatiale.

L'indice K des différents types de sols est évalué à l'aide des équations de (Masson, 1971) ; Williams, 1995) et en utilisant la carte numérique du sol du monde DSMW (Digital Soil Map of the World). Le traitement de cette carte sous Arcgis nous a donné les taux de différents types de sol ; sable, argile, limon et la matière organique. Le facteur d'érodibilité du sol a été calculé par la formule de Williams (1995) :

$$K_{USLE} = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (6.4)$$

Avec :

$$f_{csand} = \left( 0.2 + 0.3 \cdot \exp \left[ -0.256 \cdot m_s \cdot \left( 1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \quad (6.5)$$

$$f_{cl-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \quad (6.6)$$

$$f_{orgc} = \left( 1 - \frac{0.25 \cdot orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95 \cdot orgC]} \right) \quad (6.7)$$

$$f_{hisand} = \left( 1 - \frac{0.7 \cdot \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[ -5.51 + 22.9 \cdot \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right) \quad (6.8)$$

où :

ms : la teneur en fraction de sable (0.05-2.00 mm de diamètre) [%],

msilt : la teneur en fraction de limon (0,002-0,05 mm de diamètre) [%].

orgC : la teneur en carbone organique (SOC) [%].

### 6.2.6.3. Facteur topographique (LS)

L'érosion connaît une croissance exponentielle au-delà d'une pente de 2% (McCool et al., 1987). La vitesse étant proportionnelle à la distance parcourue, plus la longueur de la parcelle est grande, plus la vitesse augmente. Les particules d'eau qui ruissellent emmagasinent donc une énergie plus importante qui se traduit par la création et le creusement de rigoles. Cependant, même si l'influence de la longueur de la pente est reconnue, il est très difficile de connaître précisément l'exposant qui relie l'érosion et la longueur de la pente. De nombreuses formules ont été proposées, mais elles ne sont pas applicables de manière universelle. De plus, tout comme pour l'inclinaison de la pente, il faut prendre en compte le type d'érosion pour pouvoir déterminer quelle est l'influence de la longueur de la parcelle.

Cependant, le facteur topographique LS de Wischmeier & Smith permet de donner des résultats satisfaisants quant à l'influence de la longueur et de l'inclinaison de la pente dans le phénomène érosif. Il prend donc en compte deux éléments : l'inclinaison (S) et la longueur (L) de pente. Ces deux facteurs sont le plus souvent combinés en un facteur unique adimensionnel (LS). Le facteur LS est généralement défini comme étant le rapport de perte de sol entre deux parcelles ayant des conditions identiques à l'exception de l'inclinaison et de la longueur de pente : l'une d'une longueur et d'une inclinaison de pente données, l'autre ayant 22.1 m de long et 9% de pente (parcelle expérimentale de Wischmeier et Smith, 1978).

Pour tenir en compte l'impact de la concentration de l'écoulement, le facteur longueur de la pente a été remplacé par la surface amont de l'écoulement. La formule proposée par Mitasova et al. (1996) a été utilisée pour calculer le facteur topographique à partir de la carte d'accumulation de l'écoulement et de la carte des pentes tous les deux dérivés d'un modèle numérique du terrain MNT de 30m de résolution lui-même réalisé à travers la digitalisation et l'interpolation des courbes de niveau des cartes topographiques (1/50 000).

$$LS = [(FA * RS) / 22.1]^{0.4} * [(\sin(S * 0.01745) / 0.09)^{1.4}] * 1.4 \quad (6.9)$$

Où

FA : Grille d'accumulation de l'écoulement,

RS : Résolution du modèle MNT (30m),

S : Grille des pentes en degré.

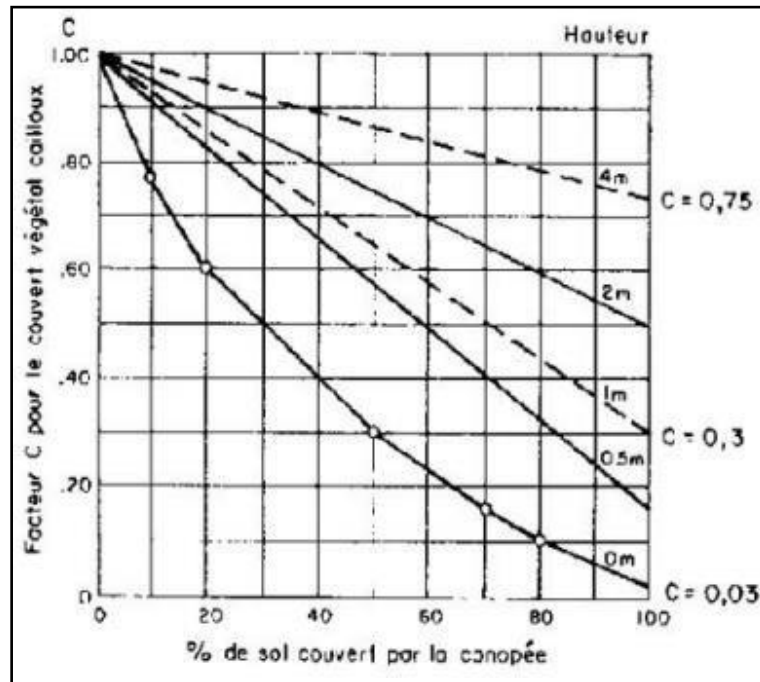
#### 6.2.6.4. Facteur de la couverture végétale et pratiques culturales (C)

Le facteur C prend en compte l'occupation du sol (couvert végétal, aménagements et pratiques agricoles). En effet, l'érosion affecte plus particulièrement certains types de culture tandis qu'elle est moins forte ou tout simplement absente pour certaines activités et aménagements. Le type de couvert végétal est à prendre absolument en compte puisque c'est de lui que va dépendre l'amortissement des gouttes de pluies, le ralentissement du ruissellement et l'infiltration (Roose, 1994). Le facteur C dépend donc :

- du pourcentage de sol à nu, l'érosion intervenant majoritairement sur des sols à nus lors d'épisodes pluvieux agressifs ;
- de la hauteur du couvert végétal, il est intéressant d'avoir un couvert végétal, mais si celui-ci est trop élevé, l'amortissement des gouttes de pluies n'interviendra plus. En effet, après une première interception, les gouttes seront de nouveaux rejetées vers le sol ;
- de l'architecture des plantes, des plantes en forme d'entonnoir auront tendance à drainer l'écoulement et à provoquer des ravinements. A l'inverse, les plantes dites "parapluie" vont disperser les gouttes d'eau et donc diminuer leur énergie. Le facteur C est défini comme un ratio de la perte en sol sur des terrains cultivés sous des conditions spécifiques par rapport à la perte en sol correspondante sur un terrain en jachère (Wischmeier et Smith, 1978).

Il peut être calculé à l'aide de nomogrammes (Roose, 1994) (Figure 6.1)) ou estimé en prenant des valeurs connues pour un certain type de végétation ou de culture (Tableau 6.1).

<b>Tableau 6.1</b> : Valeur de C pour différents types de couvert végétal (Sadiki et al., 2004)	
Reboisement dense	0.058
Foret moyennement dense	0.13
Matorral dégradé, parcours dense	0.17
Reboisement clair	0.18
Matorral clair, parcours dense	0.20
Matorral très dégradé	0.22
Steppes à alfa	0.32
Céréaculture	0.70
Terrain nu	1



**Figure 6.1 :** Valeur du facteur de couvert végétal en fonction du pourcentage de couverture du sol et de la hauteur de la végétation (d'après Roose, 1994)

#### 6.2.6.5. Facteur des pratiques de conservation du sol (P)

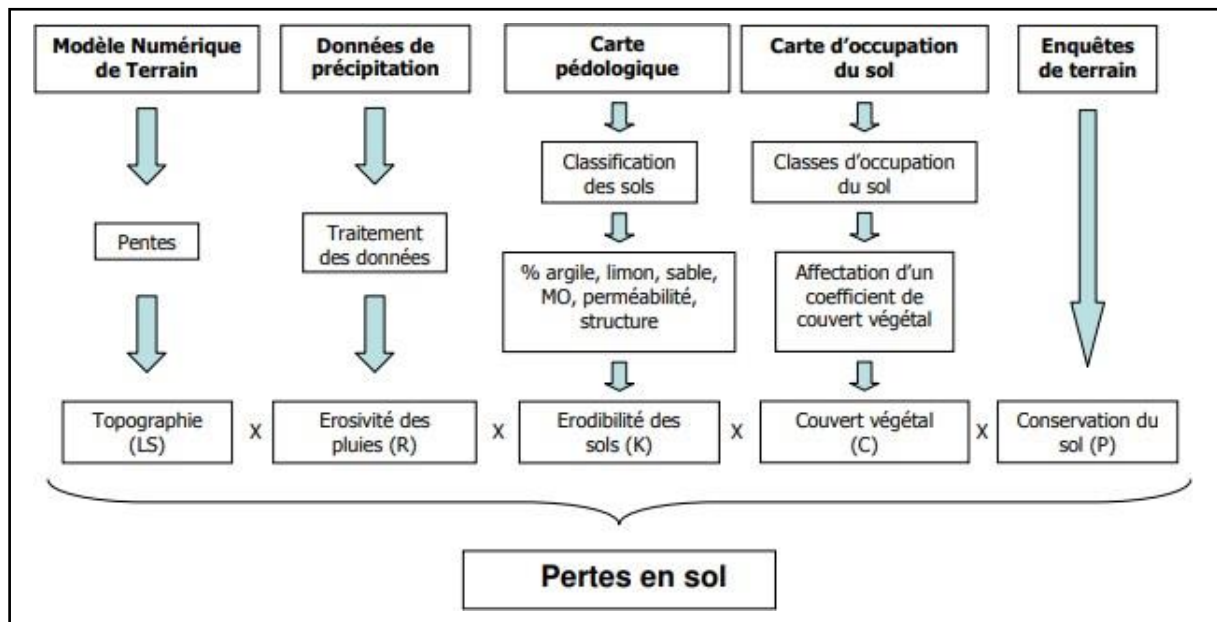
Le facteur P prend en compte les pratiques de conservation du sol. Les pratiques antiérosives concernent toutes les techniques culturales mises en œuvre pour diminuer le ruissellement et l'érosion. Parmi ces techniques, on trouve la culture en courbe de niveau (countouring), la pose de bandes enherbées entre deux zones de culture, le paillage naturel ou artificiel, ou la pose de plantes de couverture (Roose, 1994). Le tableau (6.2) ci-dessous donne quelques exemples de valeurs du facteur P pour un type de pratique antiérosive donnée.

Type de pratique anti-érosive	Pente	Longueur maximale	Facteur P
Culture en courbe de niveau	1 à 8%	61 à 122 m	0.5
Culture en courbe de niveau	9 à 12%	36 m	0.6
Culture en courbe de niveau	13 à 16%	24 m	0.7
Culture en courbe de niveau	17 à 20%	18 m	0.8

Culture en courbe de niveau	21 à 25%	15 m	0.9
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées 1	1 à 8%	30 à 40 m	0.25 à 0.5
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées 1	9 à 16%	24 m	0.3 à 0.6
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées 1	17 à 25%	15 m	0.4 à 0.9

### 6.2.6.6. Distribution spatiale du risque d'érosion

Dans le modèle USLE, l'érosion potentielle est donc le résultat du produit de quatre facteurs : le climat, la nature du sol, la topographie, l'occupation du sol et les pratiques de conservation des sols. Les équations permettant de calculer les différents facteurs ont été calibrés pour intégrer la contribution de chacun d'entre eux dans le phénomène érosif. Cependant, la mise en œuvre de l'USLE nécessite des ajustements propres à la zone d'étude. Le croisement des cartes et l'application des équations mathématiques du modèle de Wischmeier & Smith permettent d'évaluer le taux d'érosion sur tous les points de la zone d'étude et l'élaboration de la carte synthétique des pertes en sol selon l'organigramme méthodologique présenté par la figure (6.2).



**Figure 6.2** : Organigramme méthodologique de l'intégration du modèle USLE dans un SIG (Source : Printemps, 2007)

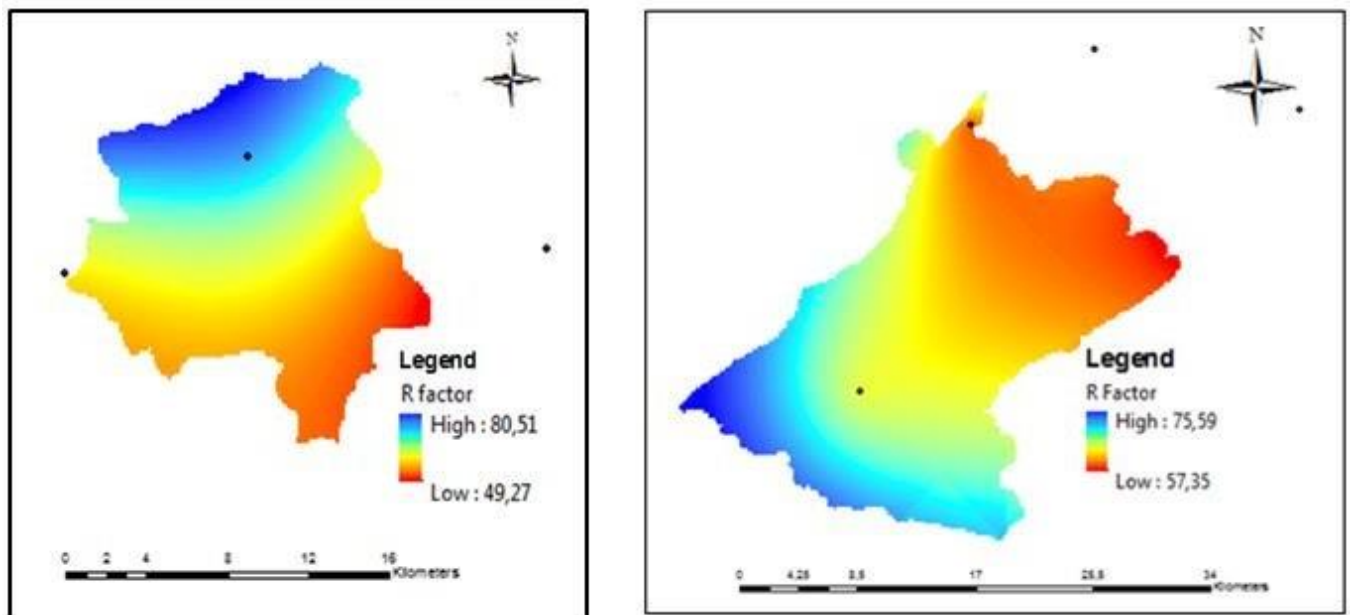
Le modèle USLE a été intégré à un environnement SIG et utilisé pour estimer et analyser les pertes de sol. Pour cela, c'est le logiciel ArcGIS Desktop 10.3, développé par la société ESRI qui fut utilisé. Cette application est utilisée par les professionnels du SIG pour compiler, créer et utiliser les informations et les connaissances géographiques. Elle permet le stockage et la structuration de données géographiques "raster" et "vecteur".

En outre, un ensemble de modules de traitements et d'analyse avancée complètent l'utilisation de ce SIG. Il s'agit notamment de l'extension ArcGIS Spatial Analyst® qui offre les outils nécessaires à la modélisation spatiale.

### 6.3. Analyses et résultats

#### 6.3.1. Facteur d'érosivité des précipitations (R)

Le facteur R a été estimé en fonction de la pluviométrie annuelle. Une valeur élevée du facteur R caractérise une pluie à forte capacité érosive alors qu'une valeur faible traduit un faible pouvoir érosif des pluies. Dans le bassin de Zeddine, les valeurs du facteur R varient de 57 à 76 MJ mm/ha/h (Fig.6.3.a). Pour le bassin de Harreza, l'indice d'érosivité varie de 49 à 81 MJ mm/ha/h (Fig.6.3.b).



a: Bassin de Harreza

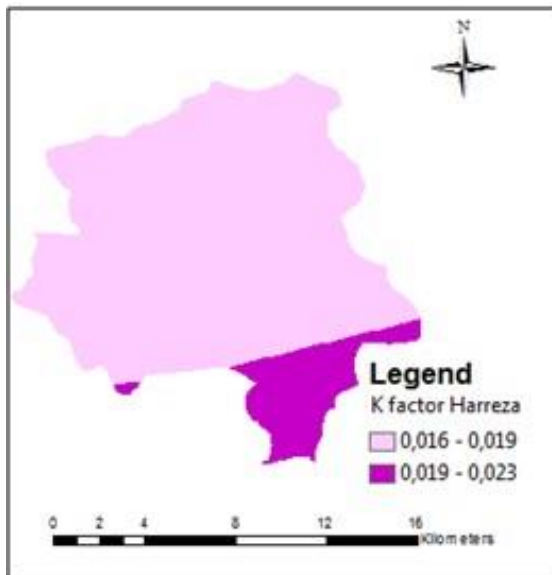
b: Bassin de Zeddine

**Figure 6.3:** Carte du facteur d'érosivité des précipitations (R)

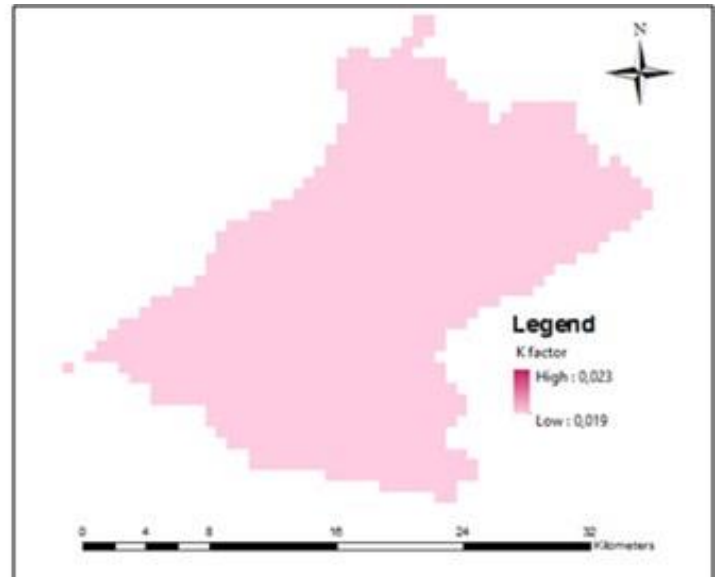
### 6.3.2. Facteur d'érodibilité des sols (K)

La carte d'érodibilité a été créée à partir des données de pédologie de l'organisation Harmonized World Soil Database. La majeure partie du bassin de Harreza est caractérisée par un facteur K variant de 0.016 à 0.019  $t h MJ^{-1} mm^{-1}$  (Fig.6.4.a), sauf la partie Sud du bassin qui possède un facteur K plus élevée, soit 0.023 qui confirme la présence d'un substratum calcaire.

Le bassin de Zeddine présente des valeurs de K comprises entre 0,019 et 0,023  $mJ^{-1} mm^{-1}$  (Fig.6.4.b), en raison de la présence de flysch dans la partie orientale, de marnes et de calcaires marneux du Crétacé dans la partie centrale du bassin.



a: Bassin de Harreza



b: Bassin de Zeddine

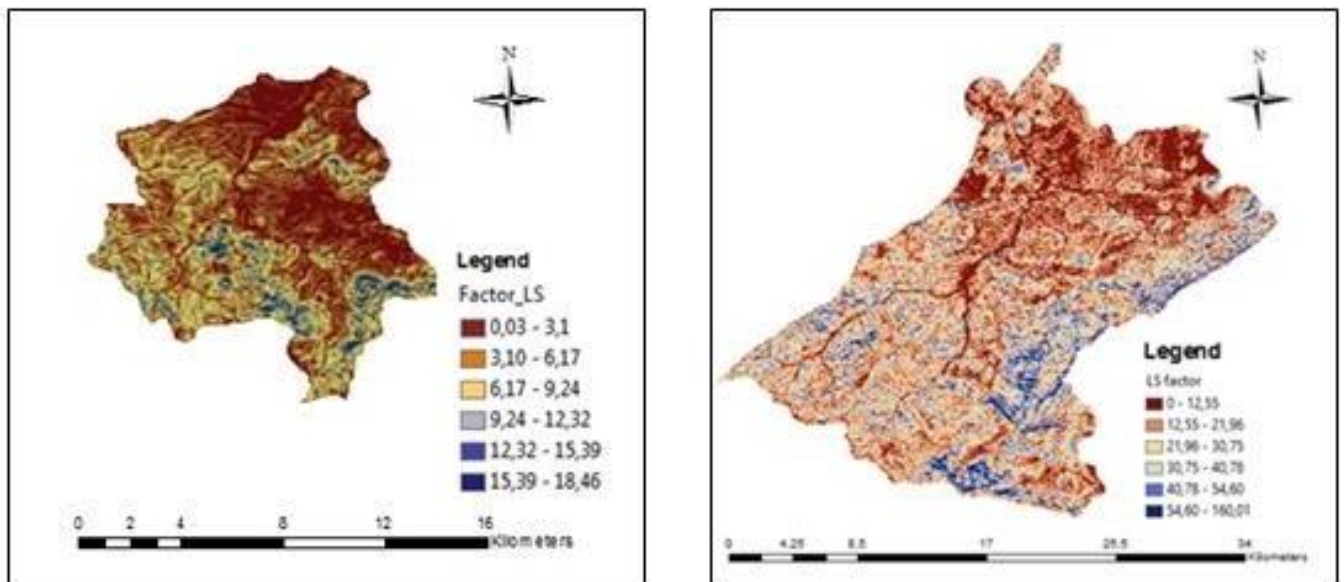
**Figure 6.4:** Carte du facteur d'érodibilité des sols (K)

### 6.3.3. Facteur topographique (LS)

Ce facteur caractérise l'effet de la topographie des versants sur l'érosion des sols en fonction de la longueur (L) et l'inclinaison des pentes (S). Les valeurs de ce facteur ont été obtenues par l'entremise d'un modèle numérique de terrain généré suite à la numérisation de cartes topographiques. En général, le facteur LS est de modéré à faible dans le bassin de

Harreza (Fig.6.5.a), de nombreux secteurs possèdent des valeurs inférieures à 6, notamment la région Nord- Est du bassin. Les zones dont le facteur LS est maximal se situent au Sud-Est et au Sud-Ouest du bassin.

La majeure partie du bassin de Zeddine est caractérisée par un facteur LS inférieur à 30 (Fig.6.5.b). Presque toutes les terres situées au nord et au centre du bassin appartiennent à cette classe. Des valeurs supérieures, comprises entre 30 et 160, sont localisées dans les branches est et sud-ouest du bassin, qui coïncident généralement avec les zones de haute altitude et de fortes pentes.



a: Bassin de Harreza

b: Bassin de Zeddine

**Figure 6.5:** Carte du facteur topographique (LS)

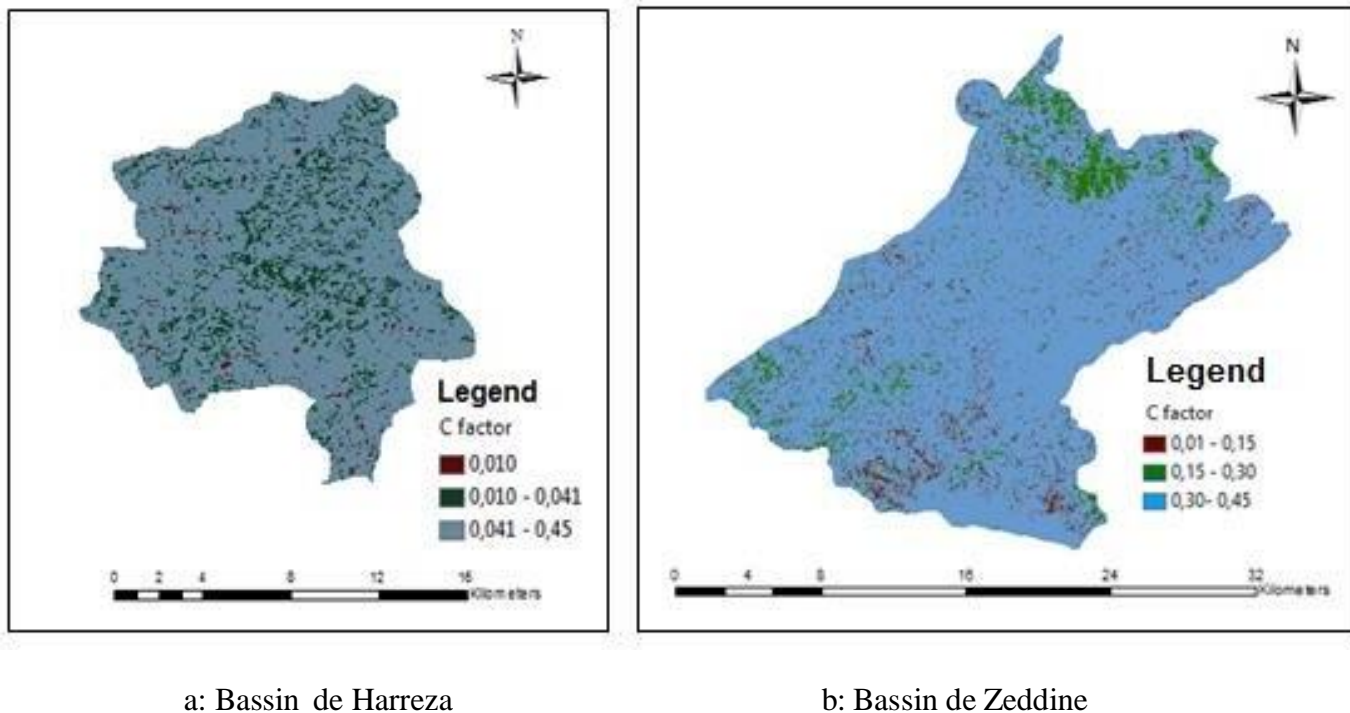
#### 6.3.4. Facteur de la couverture végétale et pratiques culturales (C)

Le facteur C représente l'effet de la couverture végétale. Les différentes classes de végétation et/ou occupation du sol ont été cartographiés à partir de la classification supervisée d'une image satellitaire de haute résolution pour créer la carte de facteur C.

Une forte dominance de valeurs variant de 0.30 à 0.45 est observée sur les deux bassins Harreza et Zeddine pour le facteur C, ces zones sont généralement associés aux formations de maquis /garrigue et de matorral.



Toutefois, une concentration de valeurs variant de 0.01 à 0.04 est observée au centre du bassin de Harreza (Fig.6.6.a), suite aux formations forestières. Une autre classe est constituée par un facteur C compris entre 0.15 et 0.30, qui se situent au Nord et au Sud-Ouest du bassin de Zeddine (Fig.6.6.b), qui se manifeste par la pratique d'activités agricoles.

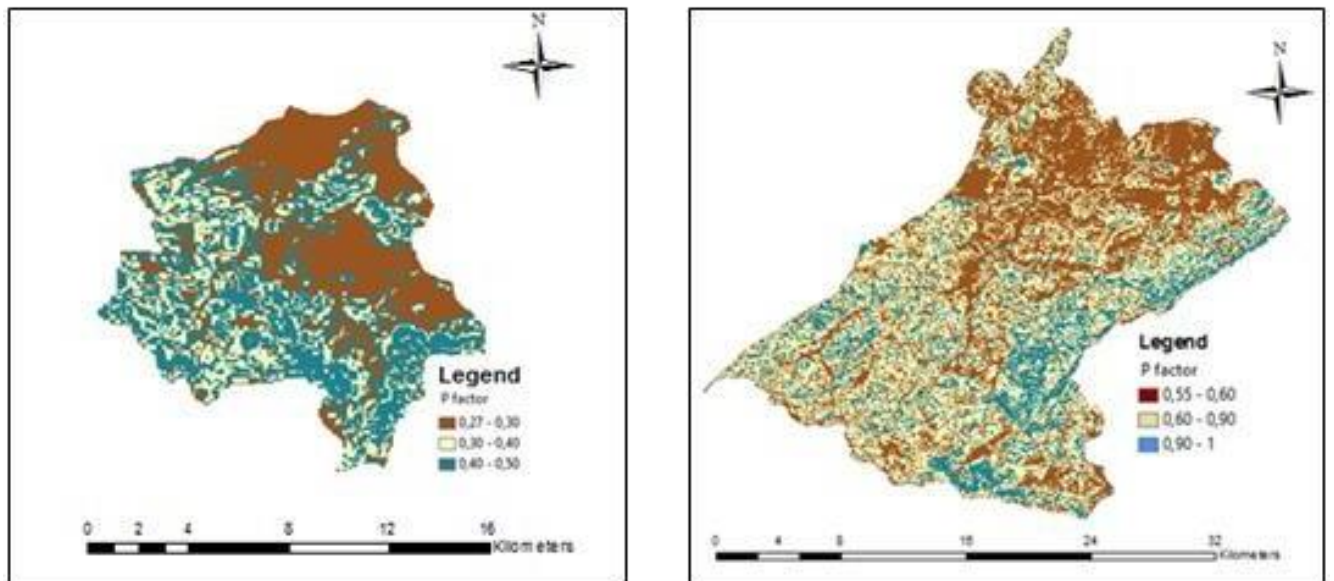


**Figure 6.6:** Carte du facteur de la couverture végétale et pratiques culturales (C)

### 6.3.5. Facteur des pratiques de conservation du sol (P)

Le facteur P décrit les actions humaines conservatrices des sols qui se pratiquent pour contrer l'érosion hydrique. Il varie généralement de 0 à 1, selon la pratique adoptée et selon la pente.

En l'absence de toute intervention de soutien le facteur P prend la valeur 1. Pour générer la carte de pratique de soutien, on a besoin d'un modèle numérique de terrain spécifique pour le bassin. Le facteur P varie généralement dans le bassin de Harreza entre 0,27 et 0,3 pour les zones à faible pente et entre 0,3 et 0,5 pour les fortes pentes (Fig.6.7.a). Les techniques de culture pratiquées sont des cultures en courbes de niveau ou en bandes alternées.



a: Bassin de Harreza

b: Bassin de Zeddine

**Figure 6.7** : Carte du facteur des pratiques de conservation du sol (P)

Dans le bassin de Zeddine, les valeurs du facteur P sont élevées, allant de 0,55 à 0,6, les pratiques de soutien utilisées sont des cultures qui suivent des courbes de niveau. Les valeurs les plus élevées comprises entre 0,8 et 1 se situent dans le bassin oriental, où les pratiques de conservation sont modestes en raison de la présence de pentes aiguës (Fig.6.7.b).

### 6.3.6. Evaluation des zones de production de sédiment

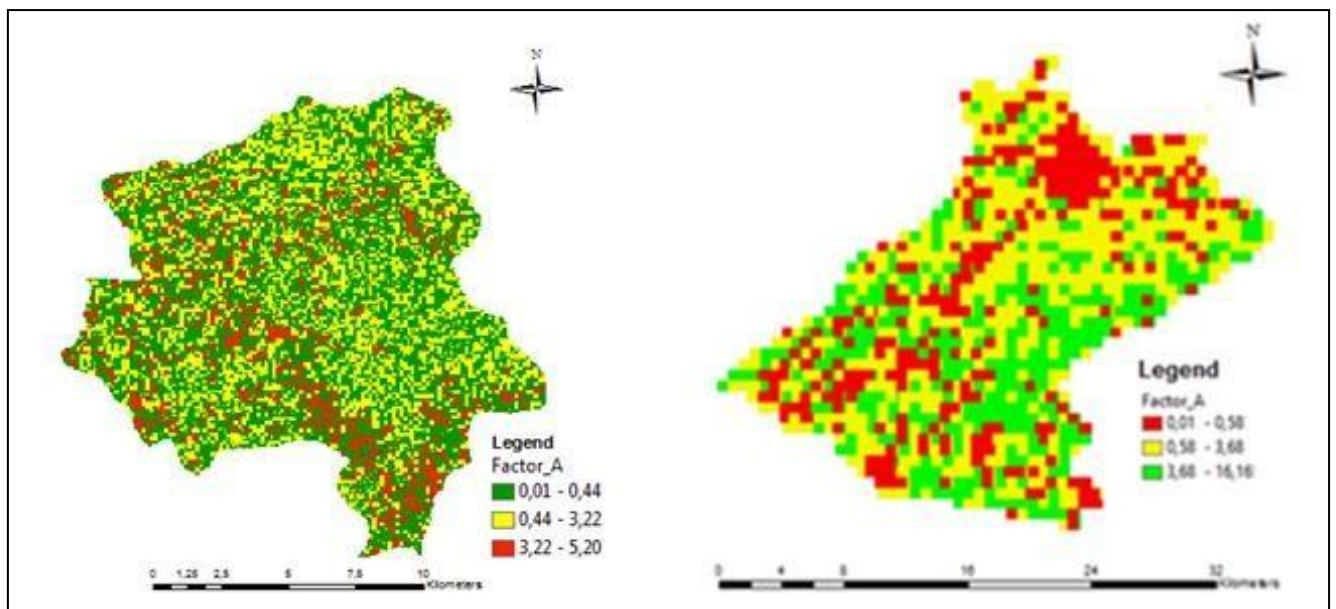
Chacun des quatre principaux facteurs à l'origine du phénomène érosif sur notre zone d'étude a été analysé. Il s'agit maintenant d'intégrer les résultats de ces analyses dans le modèle général et de quantifier les pertes en sol.

Le croisement des données prises en compte dans le processus érosif repose sur une combinaison dans un modèle maillé. C'est-à-dire que chaque couche d'information est représentée par une image (« raster »), dont la valeur de chaque maille est égale à un niveau de sensibilité à l'érosion pour le paramètre considéré. Ce niveau de sensibilité est représenté par une valeur définie précédemment et différente pour chaque paramètre. L'ensemble de ces images constitue un espace multivarié.

Le croisement des données s'effectue par la multiplication des valeurs des quatre facteurs R, K, LS et C dans la "calculatrice raster" du module Spatial Analyst d'ArcGIS. Le résultat de cette multiplication est une couche « raster » donnant la quantité de terre potentiellement érodable en t/ha/an sur l'ensemble de la zone d'étude. Pour des besoins de lisibilité de la carte, les valeurs obtenues ont été regroupées en classes.

Selon le modèle USLE, plus de 78% de la surface du bassin de Harreza est affectée par des taux d'érosion faibles et moyens généralement inférieurs à 3,2 tonnes / ha / an, qui sont dispersés dans tout le bassin (figure 6.8.a). Une érosion plus importante d'environ 5,2 tonnes / ha / an représente près de 22% de la superficie du bassin et se concentre dans les bassins du Nord-Ouest et du Sud-Est. Cette particularité s'explique par la formation de maquis / garrigue et les massifs forestiers.

D'autre part, plus de 92% de la superficie du bassin de Zeddine présente des zones d'érosion faible et moyenne inférieures à 3,6 tonnes / ha / an selon l'USLE (Fig.6.8.b). A l'est du bassin (Tiberkoukine) et à la bordure Sud-Ouest, on identifie les zones très sensibles aux érosions de l'ordre de 16 tonnes / ha / an, généralement caractérisées par des cultures agricoles sur les pentes raides.



a: Bassin de Harreza

b: Bassin de Zeddine

**Figure 6.7:** Carte du potentiel érosif de la zone d'étude

## 6.4. Conclusion

Le croisement des cartes des principaux facteurs intervenants dans l'érosion hydrique des sols permet d'obtenir la carte des pertes en sols en tout point du bassin versant. La perte moyenne par érosion hydrique pour l'ensemble du bassin de Zeddine est d'environ 3,6 tonnes / ha / an alors que celle du bassin Harreza est de l'ordre de 3,2 tonnes / ha / an,

Pour la carte des risques d'érosion, l'étude a révélé que les pertes de sol faibles et moyennes couvraient respectivement 92% et 78% des bassins de Zeddine et d'Harreza. Une forte érosion est plus importante dans le bassin de Zeddine (16 t / ha / an) que dans le bassin de Harreza (5,2 t / ha / an). Le bassin de Zeddine est considéré comme capable d'un temps de concentration extrêmement court, d'un taux de propagation très rapide des inondations, les différences d'altitude sont très importantes dans un très petit bassin, le principal oued passe en effet de 1786 à 328 m (Capolini et al, 1969). Les caractéristiques lithologiques, topographiques et structurelles se complètent pour favoriser une érosion violente. D'autre part, le bassin de Harreza a des plaines alluviales et des terrasses qui lamineront et freineront le flux.

On peut comparer ces résultats avec les valeurs proposées par Walling (1984) et Bouanani (2004) qui, en se fondant sur les travaux réalisés au Maghreb, estime que la dégradation spécifique interannuelle dans le bassin versant varie entre 10 et 50 t/ha/an. Probst et Suchet (1992 in Bouanani, 2004), sur la base de données de mesures de la charge en suspension réalisées dans 130 bassins versants, ont ainsi estimé que la dégradation spécifique moyenne est respectivement de 4 à 6,10 t/ha/an pour les oueds qui se jettent dans la mer Méditerranée et l'océan Atlantique.

Une étude récente a été réalisée par Touahir et al (2018), estime que la majorité du bassin versant de l'Oued Zeddine est caractérisée par une moyenne et forte sensibilité à l'érosion hydrique, couvrant plus de 80 % de la superficie du bassin. Certaines années, les valeurs de l'érosion étant comprises entre 45 et 75 t/ha/an pour 7 des 22 années étudiées (1990-2012), mais ils sont nettement plus faibles mais toujours importantes, entre 3 et 24 t/ha/an, pour les années restantes.

L'intégration du modèle USLE dans un SIG présente beaucoup d'avantages permet :

- de gérer d'une façon rationnelle une multitude de données qualitatives et quantitatives relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols ; ceci nous a permis de conclure que les facteurs décisifs de l'érosion sont la pente, l'agressivité climatique, l'érodibilité des sols et la couverture végétale, et que c'est sur ces facteurs que les interventions doivent être focalisées pour lutter contre l'érosion hydrique ;

- d'introduire la notion d'évolutivité à travers l'enrichissement et l'actualisation permanente des données ; le SIG offre la possibilité de mise à jour continue des données ;

- d'établir une carte synthétique de répartition de la sensibilité potentielle des sols à l'érosion sur l'ensemble de la zone d'étude et d'avoir la combinaison des facteurs intervenant dans le processus érosif pour chaque pixel.

Par ailleurs, la poursuite du travail par une phase de terrain permettrait de valider les résultats. Des données terrain seraient nécessaires pour mieux appréhender les différents facteurs. Les valeurs du facteur K, s'appuyant sur des compositions de sol seraient plus précises à partir d'analyses de relevés de terrain.

L'élaboration de scénarios d'aménagement en fonction de différentes stratégies d'occupation du sol peut être réalisés par le croisement des couches d'information dans un SIG. En effet, il est possible de faire varier le coefficient C sur la zone d'étude en simulant des zones de défrichements, d'urbanisation, de décapage par le feu, ce qui permet d'orienter les décisions des aménageurs lors de l'élaboration de documents d'urbanisme tels que les Plan Urbain de Développement, les Schémas Directeurs d'Aménagement. De même, cet outil permet de tester les conséquences de la mise en place d'aménagements de lutte antiérosifs.

**Conclusions**

**Et**

**Recommandations**

# Conclusion générale et Recommandations

## Conclusions

Après l'évaluation spatiale et quantitative de l'érosion des sols, pour faire à ce phénomène d'envasement dans les barrages et proposer les meilleures stratégies de lutte, de conservation et d'aménagement des sols par les modèles paramétriques et non paramétriques, les résultats de recherche ont abouti à des résultats suivants :

L'analyse en composantes principales (ACP) a mis en évidence les affinités entre les différents sous bassins versants quel que soit leur appartenance et a permis de déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux et les rattacher à des groupes distincts. L'examen des caractéristiques physiques de ces bassins versants a montré que ce sont surtout les caractéristiques de dimension ou de forme (Superficie, Périmètre, Coefficient de compacité) qui ont régi le classement statistique des différents sous bassins versants en groupes distincts.

Dans la première approche où on a traité 36 barrages et retenues collinaires qui se répartissent sur des zones situés au Nord de l'Afrique (l'Algérie, la Tunisie et le Maroc), l'ACP a permis de diviser les individus (Barrage) en des groupes sur la base des valeurs des variables qui les caractérisent. Ainsi cette analyse a fait ressurgir cinq groupes qui se caractérisent par leurs paramètres hydromorphométriques. Eventuellement, les caractéristiques de dimension ou de forme, le régime d'écoulement impacte considérablement sur le taux d'envasement dans les différents sous bassins.

La deuxième approche a consisté à évaluer le taux d'envasement pour 19 barrages de l'Afrique du Nord (de même ordre de grandeur sans les retenues collinaires) En fonction d'autres paramètres morphométriques, Trois groupes se sont formés. Le premier groupe se

caractérise par des bassins occupant tous des superficies largement supérieures à celles des autres bassins et génèrent un taux d'érosion élevé ;le second groupe est représenté par les bassins versants correspondant aux plus faibles valeurs de forme avec des valeurs relativement importantes d'altitude et un taux de sédimentation modéré et enfin le troisième groupe qui est constitué par des bassins versants caractérisés par une pluviométrie importante et un taux d'érosion faible à modéré.

Quant aux réseaux neuronaux ils ont montré une performance exceptionnelle comme outils de régression, surtout pour les problèmes de classification et de reconnaissance des formes. On a développé un modèle qui a produit de très bons résultats.

Les variables utilisées sont moins nombreuses, plus faciles à déterminer et leur estimation est moins subjective, ce qui donne à ce modèle une robustesse vis-à-vis des autres méthodes. L'importance relative des variables montre que la superficie, la couverture végétale, l'indice de pente globale et la pluie moyenne annuelle sont les plus importants et expliquent à eux seul 72% de la variabilité du modèle, ce qui signifie qu'ils ont un impact très important sur le phénomène d'érosion. Le modèle présente un taux d'erreur absolue très faible par rapport aux autres modèles, avec un écart de 45%.

L'analyse des débits liquides et solides pour toutes les mesures effectuées de 1990 à 2013 pour les deux bassins versants de Harreza et de Zeddine montre qu'ils sont généralement liés par un modèle de puissance, avec un coefficient de détermination supérieur à 80%. Les valeurs élevées du coefficient a correspondent à des sédiments facilement mobilisables lors d'événements pluvieux. Le paramètre b peut être interprété comme le pouvoir érosif du bassin.

L'analyse graphique révèle que l'automne se distingue par de forts débits fluviaux entraînant un important transport de solides; elle couvre à elle seule 46% de la contribution totale en solides du bassin de Zeddine et 43% du bassin de Harreza. Sur une base mensuelle, une partie importante de l'apport solide est observée au début de l'automne et à la fin du printemps. Ces résultats corroborent ceux de l'étude de Terfous et al, selon laquelle les pluies torrentielles d'octobre et de novembre dégènèrent une grande quantité de solides. La perte de sol annuelle moyenne estimée pour l'ensemble du bassin versant est de 3,12 t / ha / an pour Zeddine et de 1,64 t / ha / an pour Harreza.



Le comportement morphologique annuel des deux bassins versants est irrégulier ; les résultats obtenus en 2000/2001 montrent une variation soudaine de l'érosion spécifique coïncidant avec celle de la pluie. Ce dernier favorise la végétation qui réduit les effets du ruissellement. Une fois cet équilibre rompu, les érosions sont accentuées, la couche de matériaux en vrac est emportée par le ruissellement et la terre reste nettoyée et protégée contre l'action ultérieure de l'eau

Pour la carte des risques d'érosion, l'étude a révélé que les pertes de sol faibles et moyennes couvraient respectivement 92% et 78% des bassins de Zeddine et Harreza. Une forte érosion est plus importante dans le bassin de Zeddine (16 t / ha / an) que dans celui de Harreza (5,2 t / ha / an). Le bassin de Zeddine est considéré comme capable d'un temps de concentration extrêmement court, d'un taux de propagation très rapide des inondations, les différences d'altitude sont très importantes dans un très petit bassin, le principal oued passe en effet de 1786 à 328 m [26]. Les caractéristiques lithologiques, topographiques et structurelles se complètent pour favoriser une érosion violente. D'autre part, le bassin de Harreza a des plaines alluviales et des terrasses qui lamèneront et freineront le flux.

L'intégration du modèle USLE dans un SIG présente beaucoup d'avantages, il permet de gérer d'une façon rationnelle une multitude de données qualitatives et quantitatives relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols ; ceci nous a permis de conclure que les facteurs décisifs de l'érosion sont la pente, l'agressivité climatique, l'érodibilité des sols et la couverture végétale, et que c'est sur ces facteurs que les interventions doivent être focalisées pour lutter contre l'érosion hydrique ;

Par ailleurs, la poursuite du travail par une phase de terrain permettrait de valider les résultats. Des données terrain seraient nécessaires pour mieux appréhender les différents facteurs. Les valeurs du facteur K, s'appuyant sur des compositions de sol seraient plus précises à partir d'analyses de relevés de terrain.

L'élaboration de scénarios d'aménagement en fonction de différentes stratégies d'occupation du sol peut être réalisés par le croisement des couches d'information dans un SIG. En effet, il est possible de faire varier le coefficient C sur la zone d'étude en simulant des zones de défrichements, d'urbanisation, de décapage par le feu, ce qui permet d'orienter les décisions des aménageurs lors de l'élaboration de documents d'urbanisme tels que les Plan Urbain de Développement, les Schémas Directeurs d'Aménagement. De même, cet outil permet de tester les conséquences de la mise en place d'aménagements de lutte antiérosifs.

## Recommandations

Les résultats très encourageants nous ont poussés à proposer un programme futur qui fait intervenir les éléments suivants :

- Elargir la base de donnée au reste des barrages en Algérie et en Afrique du Nord, vu la ressemblance des conditions physio climatique de la région dans le but de généraliser le modèle ;
- Améliorer les variables indépendantes et inclure d'autres en vue de cerner toutes les variables importants qui affectent le phénomène complexe de l'érosion ;
- Besoin de données plus détaillées pour mieux développer le modèle.
- Mettre en cohérence les propositions d'actions de traitement de bassins versants et de lutte contre l'envasement des barrages avec les autres programmes émanent des budgets de l'état et des collectivités locales (Agriculture, Environnement et Aménagements des territoires ;
- Les mesures antiérosives à caractère biologique et mécanique seront réalisées obligatoirement de concert avec les populations concernées, les propriétaires terriens et les différents services techniques, afin d'effectuer la sensibilisation requise à leur participation effective, pleine et entière dans le choix des interventions à privilégier pour le bon déroulement des travaux et des études, et une efficacité optimum et durable de ces mesures antiérosives ;
- Formulation et réalisation d'un programme national de contrôle de l'érosion ;
- Implication et promotion d'enseignements et de la recherche centrée sur les technologies de lutte-antiérosives.

Enfin, il convient de souligner que la réussite de toute démarche intégrée pour le traitement des bassins versants, se traduira par des impacts positifs, d'ordre économique, social et écologique.

**Références**

**Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

- [1.] Abdelgader A., Achour F., Mudry J. 1996. Validation des écoulements par l'analyse discriminante. *Revue sciences de l'eau* n° 9(2), p. 219-230.
- [2.] Achite M., 1999. Analyse multivariée de la variable - Erosion Spécifique – cas du bassin versant de l'oued Mina. Thèse de Magister, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, Blida, Algérie, 206p.
- [3.] Adjel A., Smail R. 1985. Etude de l'apport moyen interannuel des petits bassins versants de l'Algérie septentrionale. Mémoire fin d'études, Université d'Alger, pp90.
- [4.] Albergel J., Boufaroua M., Pepin Y. 1998. Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires en climat semi-aride Tunisien. *Bulletin de l'ORSTOM*, 18, pp 67-75.
- [5.] Almeida-Teixera M.E. 1991. Prevention and control of landslides and other mass movements. Commission of the European communities report EUR 12918. *américan geophysical union*, vol. 34, n°3, pp. 407 - 418.
- [6.] Arabi M. Roose E. 1989 . Influence de quatre systèmes de production méditerranéenne de moyenne montagne algérienne . *Bulletin Réseau Erosion* 9.
- [7.] Arabi M., Roose E. 1992. Water and soil fertility management (GCES). A new strategy to fight erosion in Algeria mountains. In : 7th ISCO Conference Pro., 3(3), pp 341-347.
- [8.] Ayadi I., Abida H., et Djebbar Y. 2008. Caractérisation de l'envasement des lacs collinaires de la Tunisie Centrale, *International Water Resources Association. XIII<sup>th</sup> World Water Congress*, Montpellier, France.
- [9.] Badraoui A et Hajji A., 2001. Envasement des retenues de barrages, *LA Houille Blanche*, *Revue internationale de l'eau*, N° 6/7, p.72-75
- [10.] Barthè B., De Noni G., Roose E., Asseline J., Albreth A., et Viennot M. 1998. Influences du travail du sol et des apports sur le ruissellement et l'érosion: le cas des Rougiers de Camarés dans le Sud-Aveyron. *Orstom actualités, special erosion*. Bassin versant d'Oued Mina (Willaya de Relizane), pp31-56.
- [11.] Bastarache D., El Jabi N., Turkkan N., et Clair T.A. 1997. Predicting conductivity and acidity for small streams using neural network. *Rev. Can. Gén. Civ.*, 24, 1030-1039.

- [12.] Ben Mammou A., Louati M. H. 2007. Évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie. In *Journal of Water Science. Eau, Terre et Environnement* Vol 20(2), p. 201-210.
- [13.] Benblidia M., Salem A., et Demmak A. 2001. Extraction de sédiments dans les retenues. *La houille blanche* 6(7), pp 76-78.
- [14.] Benkhaled A., Remini B. 2003. Analyse de la relation de puissance: débit solide- débit liquid à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Revue Science Eau*, 1(6), pp333-356.
- [15.] Berbache S., Remini B. 2013. Phénomènes exceptionnels d'érosion et de transport solide, cas des bassins versants de Zeddine et Tikazole. *Proceedings, 5ème colloque international sur les Ressources en eau et le Développement Durable, Alger*, 647-652.
- [16.] Biswas S., Sudhakar S And Desai V R. 1999. Prioritization of sub watersheds based on morphometric analysis of drainage basin. A remote sensing and GIS approach. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 27(3): 155-166.
- [17.] H. Bouchelkia, B. Remini. 2003. Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif. *Ingénieries - E A T, IRSTEA édition*, p. 45 - p. 56
- [18.] Boufaroua M., Albergel J., et Pépin Y. 2000. Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la Dorsale Tunisienne. 5<sup>ème</sup> Conférence International sur la Géologie du Monde Arabe. Le Caire, du 21 au 24 Février 2000, p. 63-71.
- [19.] Boughattas N., Mennoubi S., Snane M., et Boussema M. 2010. Cartographie des risques d'érosion hydrique dans le bassin versant El Azire (Tunisie Centrale), Actes des Xèmes Journées de la Géologie Tunisienne, Tunis, 18-19 Mai.
- [20.] Boukheir R. 1998. Apports de la télédétection et du SIG pour la gestion de l'érosion hydrique des sols dans la région cotiere du Liban ; Projet pilote : Jbail- Qartaba. DEA, AUPELF-UREF en collaboration avec les Universités Libanaise, Saint-Joseph , Saint-Esprit (Liban) et en partenariat avec l'INA PG et l'INRA (France), pp 85.
- [21.] Bouras F., Djebbar Y., & Abida H., 2010. Estimation de l'envasement des barrages, une approche non paramétrique ; *Network Environmental Management Conflicts, Santa Catarina – Brazil, Vol.1(1)*, p. 113-119.
- [22.] Bourouba M. 1997. Les variations de la turbidité et leurs relations avec les précipitations et les débits des Oueds semi-arides de l'Algérie orientale. *Bulletin de l'ORSTOM*, 1(7), pp 345-360.
- [23.] Bourouba M. 1998. Phénomène de transport solide dans les Hauts Plateaux Orientaux. Cas de oued Lougmene et oued Leham dans le basin de la Hodna. *Revue des sciences et Technologies* . 9 : 5-11 p.

- [24.] Boussema H-R. 1996. Système d'information pour la conservation et la gestion des ressources naturelles. Colloque international sur le rôle des technologies de télécommunications et de l'information en matière de protection de l'environnement , Tunis , pp34-45.
- [25.] Brune G-M. 1953. Trapp efficiency of reservoirs. Transactions of the Cambridge, Second printing, ISBN 0-262-01097-6.
- [26.] Cambel F-B., Bauder H. 1940. A rating-curve method for determining silt-discharge of Carpenter G-A.,
- [27.] Capolini J., Pisyns S., & Ramana R. 1969. Etude des Caractères physiographiques et prévision des apports annuels, des crues et des transports solides dans les bassins du Riou - Sly - Fodda -Deurdeur - Zeddine - Ebda. Etude SES, n° 13-12/DH2, S.E.G.G.T.
- [28.] Cattell R. B. 1966. The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*, 1, 245-276.
- [29.] Celic L., Aydin M., et Yazici U. 1996. A review of the erosion control studies during the republic period in Turkey. 1st international conference on land degradation, Adana, Turkey, 10-14 June 1996, pp175-180.
- [30.] Chebbani R., Djili K., et Roose E. 1999. Etude d'érosion dans le bassin versant de l'Isser, Algérie. *Bulletin Réseau Erosion* 1(9), pp 85-95.
- [31.] Chevalier J-J., Pouliot J., Thomson K., et Boussema M-R., 1994. Système d'information géographique utilisant les données de télédétection. Actes du colloque scientifique international , Hammamet, pp 4-12.
- [32.] Clair T. A., Etherman J.M. 1998. Using neural networks to assess the influence of changing seasonal climates in modifying discharge dissolved organic carbon, and nitrogen export in eastern Canadian rivers, *Water Resour.*, 34, 3, 447-455.
- [33.] Claude (J.) Chartier (R.) - 1976 -- «Mesure et estimation des sédiments déposés dans les réservoirs de barrages par la méthode de l'écho-sondeur». *Ressources en Eau de la Tunisie* (publication de la DRE-Tunis) Bullrtin no 3, pp. 37-51.
- [34.] Conesa-G-C. 1990. Soil érosion and fluvial sédimentation in the remblas of South-East Spain. *Méditerranée*, pp 71.
- [35.] Corbonnois J. 1998. Les facteurs de la variation spatiotemporelle des transports solides et dissous. *Géomorphologie*, Vol. 4, p. 313-329
- [36.] Crawford C-G. 1991. Estimation of suspended sediment rating curves and mean suspended sediment load, *journal of hydrology*, 1(29),pp 331-348.
- [37.] Dautrebande S., Sohier C. 2006. L'érosion hydrique et les pertes en sol agricoles en région Wallonne. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon, FUSAGx, 122p.

- [38.] Demmak A. 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en suspension en Algérie septentrionale. Thèse de docteur-Ingénieur, Université Paris VI, France, pp45-49.
- [39.] Demmak A. 1984. Recherche d'une relation empirique entre les apports solides et les paramètres physico-climatique des bassins : cas algérien. IAISH 1(44), pp 403-414.
- [40.] DGACTA. 2003. Deuxième plan national pour la conservation des eaux et des sols (2002-2011). Ministère de l'agriculture, Tunis. pp. 1-23. (Traduction de l'arabe).
- [41.] Djebbar Y., Kadota P. 1998. Dry Weather flow Estimation Model Using Neural Network. Water Science and Technology Journal, 10(38), pp 215-222.
- [42.] El Baraka, M. 2011. Etude des transports solides sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). Mémoire de Master 2, Hydrosiences Montpellier, Université Montpellier 2.
- [43.] El Mahi A., Meddi M., & Bravard J.P. 2012. Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord), Hydrological Sciences Journal, Vol. 57(8), p. 1642-1661.
- [44.] El Mimouni, A., Daoudi, L. & Ouajhain, B. (2005). Rôle de la lithologie des versants sur les écoulements superficiels de l'oued Ksob (bassin d'Essaouira, Maroc). 3ème journées Internationales des Géosciences de l'Environnement-El Jadida, p. 127.
- [45.] Erosion in the Maghreb (North Africa). Discussion. Hydrologie Science Journal, 3(8), pp621-637.
- [46.] FAO.1980. Conservation des ressources naturelles en zones arides et semi-arides. Cahiers FAO : conservation des sols, pp102.
- [47.] Fortin J.P., Villeneuve J.P-, Guilbot A. Seguin B., 1995. Development of a modular hydrological forecasting model based on remotely sensed data, for interactive utilization on a microcomputer. Proc. Int Symp. on Hydrologie Applications of Space Technology. Cocoa Beach Florida. August 18-25, 307-319.
- [48.] Faye C. 2013. Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé. Thèse de doctorat, Es lettres et sciences humaines, UCAD, FLSH, Département de Géographie.
- [49.] Fiandino M., 2003. Apports de matières en suspension par les fleuves cotiers à l'étang de Berre ( Bouches du Rhone, France). Thèse de l'Université de Provence, 325 p.
- [50.] Fournier F, 1960. Le façonnement actuel des modelés en Cote d'Ivoire forestiere.Climat et Erosion, Mém.58, IFAN, 542 p., Dakar.
- [51.] Gabriel K. R. 1971. The biplot graphical display of matrices with applications to principal component analysis. Biometrika 58: 453-467.

- [52.] Gartet A. 2005. Dégradation spécifique et transports solides dans le bassin de l'Oued Lebène (Pré-rif central, Maroc septentrional). *Papeles de Geografía*, Vol. 41–42, p. 85–100.
- [53.] Ghenim A. 2001. Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna : cas d'Oued Isser, Oued Mouilah et de la Haute Tafna. Em. Magister Université de Tlemcen, pp82.
- [54.] Ghorbel A., Claude J. 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie : estimation des transports solides. In : *Erosion and solid matter transport in inland waters*. IAHS, 12(2), pp 219-232.
- [55.] Graf W.H. 1983. The hydraulics of reservoir sedimentation. *Water power and dam construction*, pp 45-52.
- [56.] Haddani H. 2012. Etude de fonctionnement hydrologique des bassins versants de Rhéraya, Ourika et Zat (Tensift-Marrakech ; Maroc) : hydrochimie isotopique, mémoire de fin d'étude de master en sciences et techniques, Université Cadi Ayyad, Marrakech.
- [57.] Hajji O., Abidi S., Habaieb H et Mahjoub M.R. 2014. Regionalization and contribution to the study of reservoirs sedimentation: Lakes of Cape Bon and the Tunisia Central, 11th International Conference on Hydroscience & Engineering. *Hydro-Engineering for Environmental Challenges*, Germany, Proceeding pp. 575-582.
- [58.] Hamlaoui-Moulai L., Mesbah M., Souag-Gamane D., & Medjerab A., 2013. Detecting hydro-climatic change using spatiotemporal analysis of rainfall time series in Western Algeria. *Natural Hazards*, Vol. 65 (3), p.1293–1311.
- [59.] Hanich L., Simoneaux V., Boulet G., et Chehbouni A.G. 2006. Hydrologie des bassins versants du Haut Atlas marocain. Programme d'Action Intégrée Volubilis, Gestion durable des ressources en eau dans le bassin versant de Tensift, région de Marrakec. N°MA/148/06, p.14.
- [60.] Heusch B. 1970. L'érosion dans le Pré-rif : une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-rif occidental. *Annales des recherches forestières*, Rabat, 12, 9-176.
- [61.] Heusch B. 1982. Etude de l'érosion et des transports solides en zones semi-aride. Recherche bibliographique sur l'Afrique du Nord . Projet RAB/80/04/PNUD, 7-22 p.
- [62.] Hjulström F. 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river fyris. *Bulletin of the Geological Institute of Uppsala*, 25: 32-33.
- [63.] Hudson N.W. 1981 - Soil conservation. Batsford, UK, 2d edition, 320 p.
- [64.] Jobson J.D. 1992. Applied multivariate data analysis Vol. II: Categorical and multivariate methods. New York: Springer-Verlag.



- [65.] Kassoul M., Abdelkader A., et Belorgey M. 1997. Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie, *Revue scientifique de l'eau* 10 (3), p. 339-358.
- [66.] Khawlie M. 2000. L'environnement du liban : une ressource perdue ( en arabe ) Menrikh publisher, 45 p.
- [67.] Klingebiel A-A., Montgomery P.H. 1996. Land capability & classification. *Agricultural Handbook* 210, pp 120-156. Soil Conservation Services, USDA.
- [68.] Lahlou A. 1990. Modèles de prédiction de la sédimentation des retenues de barrages des pays du Grand Maghreb. Atelier International UNESCO-AISH-ENIT sur l'application des modèles mathématiques à l'évaluation des modifications de la qualité des eaux. Tunis, pp 312-324.
- [69.] Lattanzi A-R., Meyer L-D., et Baumgardener M-F. 1974. Influences of mulch rate and slope steepness on interrill erosion. *Soil Science Society Proc*, 3(8), pp 946-950.
- [70.] Lee J. A., Lendasse A., Donckers N., and Verleysen M. 2000. A robust nonlinear projection method. In *European Symposium on Artificial Neural Networks*, pages 13–20.
- [71.] Legendre P. 2005. Species associations: the Kendall coefficient of concordance revisited. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 10: 226-245.
- [72.] Lenthe H-R., Krone F. 1981. Soil erosion losses on various geological deposits ecological land survey in key areas of cyprus. *Pedology, part C*, pp 40.
- [73.] Lippmann R-P. 1987. An introduction to computing with neural networks. *IEEE Acoustics, Speech and Signal Processing Magazine*, pp 4-22.
- [74.] Mahjoub M.R., Bergaoui M., Souissi A et Bouferoua M. 2001. Régionalisation de l'envasement des lacs collinaires au niveau de la dorsale tunisienne .*Revue Sud-Sciences et Technologies*, - Numéro 7.
- [75.] Maier H.R., Dandy G.C. 1996. The use of artificial neural network for the prediction of water quality parameters. *Water Resour. Res.*, 32, 4, 1013-1022.
- [76.] Mangeas M. 1997. Propriétés statistiques des modèles paramétriques non-linéaires de prévision temporelle. Application aux réseaux de neurones à propagation directe. PhD thesis, Paris I.
- [77.] Marghmi A. 2013. Simulation des averses au niveau du bassin versant Ghézala par le modèle KINEROS 2, mémoire de Mastère de Recherche en Sciences de la Terre, Université De Tunis El Manar.
- [78.] Margat J., 1975. Projet de nouvelle légende de carte hydrogéologique, 75 SGN 259 AME.

- [79.] Masson, J. M. 1971. L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen. Méthode expérimentale pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ. Thèse université des Sciences et Techniques de Languedoc , 213.
- [80.] McCOOL D., BROWN L., FOSTER G., MUTCHLER C., MEYER L. (1987) - Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers 30, pp. 1387-1396.
- [81.] Meddi M. 1999. Etude du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Ebda (Algérie). Zeitschrift für Geomorphologie, 51 (43), Méditerranéennes Montpellier 11-13 Octobre. Phi-V/Doc. Technologie en hydrologie, pp167-183 p.
- [82.] Meguenni K., & Remini B., 2008. Evaluation du débit solide dans le bassin versant de Harreza. Larhyss Journal, Vol.7, p.7-19.
- [83.] Megnounif A., Terfous A., et Bouanani A. 2000. Étude du transport solide dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). Colloque Méditerranéen Eau-Environnement. Alger.128132, pp 47-48.
- [84.] Mehaiguene M., Touhari F., & Meddi M. 2015. Hydrologic balance and surface water resources of the Cheliff-Zahres basin, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering, Vol 9(12), p. 1435-1438.
- [85.] Meliho M., Khattabi A et Zine El Abidine A. 2016. Etude de la sensibilité à l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). First AMRS Congress and 23rd APDR Congress 'Sustainability of Territories in the Context of Global Changes, pp: 189-196.
- [86.] Merzouki T. 1992. Diagnostic de l'envasement des grands barrages marocains. Revue Marocaines du Génie Civil, 3(8), pp 46-50.
- [87.] Milliman J.D., Meade R.H. 1983. Worldwide delivery of river sediment to the oceans. Journal Geologique, 9(1), pp 1-21.
- [88.] Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M. & Iverson, LR. (1996). Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. Int J GIS 10:629–642
- [89.] Mohamed N., André S.H., et Taha B.O.2008. Utilisation des réseaux de neurones et de la régularisation bayésienne en modélisation de la température de l'eau en rivière. Revue des sciences de l'eau, Vol 21(3), p. 373-382.
- [90.] Molinier M., 1979. Note sur les débits et la qualité des eaux du Congo à Brazzaville. Cah. ORSTOM. Se. Hydrol. Vol. 16, n°1, 55–66.
- [91.] Morgan R. 1986. Soil erosion & conservation. In : D-A Davidson, editor, John Wiley and Sons Inc, pp 24-30.

- [92.] Morgan R.P.C. 1995. Soil erosion and conservation. In : D-A. Davidson, editor, John Wiley and Sons Inc., 253p
- [93.] Moukhchane M., Bouhlassa S., et Bouaddi K. 1998. Quantification de l'érosion des sols du bassin versant El Hachef, par le biais du Césium-137 (région de Tanger, Maroc ). Bulletin de l'ORSTOM,1(8), pp106-118.
- [94.] Nahal I. 1975. Principes de conservation du sol, Masson et Cie, pp140.
- [95.] Nahal I. 1984. Classement provisoire des terrains et remèdes pour la lutte contre la désertification en Syrie. Sols, INA Paris-grignon, pp14.
- [96.] Nahid, A., Benzakour M. (2002). Enregistrements sédimentaires et contrôle tectonique dans la genèse des archives morphosédimentaires quaternaires de la coupe d'Alhnayn (vallée méridienne du N'fis, Maroc). EstudiosGeol., 58: 145-158.
- [97.] Naitali F., Ghoualem H. 2015. Utilisation des réseaux de neurones artificiels comme un outil de gestion et d'aide à la décision application à la quantification de l'effet de rejets d'un mélange de médicaments sur les boues activées des stations d'épuration. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°22, pp. 71-79.
- [98.] Nekkache Ghenim A., & Megnounif A. 2012. Estimation de la précision de la relation en puissance reliant la concentration au débit liquide. Revue « Nature & Technologie ». C- Sciences de l'Environnement, n° 09, p. 54-60.
- [99.] Nyssen J., Poesen J., Deckers J., et Moeyersons J. 1999. Les effets du ramassage des pierres sur la perte du sol et les récoltes en dogua tembien, Tigré, Ethiopie. Bulletin Réseau Erosion 19 : 427-440.
- [100.] Olivry J.C., Bricquet J.P. & Thiébaux J.P., 1989. Bilan annuel et variations saisonnières des flux particuliers du Congo à Brazzaville et de l'Oubangui à Bangui. La Houille blanche, n°3/4, 311—315
- [101.] Poesen J. 1990. Erosion process research in relation to soil erodibility and some implications for improving soil quality. Albaladejo Journal, 1(8), pp123-232.
- [102.] Poesen J., Boardman J., Wilox B., et Valentin C. 1996b. Water erosion monitoring and experimentation for global changes studies. Journal of soil and water conservation, 3(6), pp 386-390.
- [103.] Poesen J-W., Torri D., et Bunte K. 1994. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scale : a review. Catena, 2(3), pp 141-166.
- [104.] Poesen J-W., Vandaele K., et Van W- B. 1998a. Gully erosion : importance and model implications. In : Boardman Journal, 2(4), pp 234-275.
- [105.] Probst J.L., Bazerabachi A. 1986. Transport solide en solution et en suspension par la Garonne supérieure. Science Géologique, 39(1), pp79-98.

- [106.] Probst J.L., Amiotte S-P. 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb(North Africa) . Hydrological Sciences Journal, 37(12), pp621-637.
- [107.] Quine T-A., Navas A., Walling D-E., et Machin J. 1994. Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near las bardenas in the Central Ebro River basin, Spain. Land degradation and rehabilitation 5, pp41-55.
- [108.] Raboudi A. 2016. Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Siliana par le modèle KINEROS2. Thèse Doctorat, Université de Tunis El Manar.
- [109.] Rais S., Abidi M. 1989. Prevision du transport solide sur un bassin versant. Application à l'envasement d'une retenue. La Houille Blanche, pp296-300.
- [110.] Remini B. 1999. Envasement des barrages dans le Maghreb. Bulletin International de l'eau et de l'environnement, pp12.
- [111.] Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Mccool D.K., Yoder D.C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703, 404 p. Ressources Hydrauliques, n°52/SHYL, pp18.
- [112.] Riad S., Salih A. 1999. Options for future water security in the Arab Countries. The First International Conference on the Geology of Africa. 23-25 Assiut EGYPT, (1), pp459-466.
- [113.] Roose E. 1993. Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification sur la production agricole par la GCES: synthèse des campagnes 1984 – 1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion, pp45-70.
- [114.] Roose E. 1994. Introduction à la GCES. Bulletin pédologique FAO, pp70.
- [115.] Roose E. 1999. Evolution historique des stratégies de lutte antiérosives. Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols : (GCES). Bulletin Réseau Erosion19, pp11-25.
- [116.] Ryan Y. 1982. A perspective on soil erosion and conservation. Lebanon Publication 69, American University of Beirut,pp15-38.
- [117.] Snoussi M., Jouanneau J-M., et Latouch C. 1990. Flux de matières issus de bassins versants des zones semi-arides (bassins du Sebou et du Souss, Maroc). Importance dans le bilan global des apports d'origine continentale parvenant à l'océan Mondial . Journal Afrique Earth Science, 1(1), pp 43-54.
- [118.] Sogreah D. 1967. Etude générale des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie. Dossier Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire, Algérie, pp 8.

- [119.] Sogreah D. 1983. Erosion et transport solide au maghreb. Analyse bibliographique. Rapport du projet RAB/80/04/PNUD, pp3-4.
- [120.] Souadi Y. 2011. L'érosion hydrique au Maghreb étude d'un cas : le bassin" versant de l'Oued Barbara (Tunisie Septentrionale), Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en géographie, Université du Québec, Montréal. 143p.
- [121.] Stocking M-A., Diaz E. 1998. Editors soil degradation and rehabilitation in Mediterranean environmental conditions, C.S.I.C., Murcia, pp 159-170.
- [122.] Terfous A., Bounani A., et Megnounif A. 1999. Evaluation du transport solide dans le bassin de l'Isser (Noed-Ouest Algérien). 2e séminaire Maghrébin sur l'eau, 90- 96 p.
- [123.] Terfous A., Bounani A., et Megnounif A. 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Noed-Ouest Algérien). Revue Science de l'Eau, 1(4), pp175-185.
- [124.] Tescult International Limitée. 2005. Rapport de Phase II. Identification et évaluation du degré d'érosion Lot n°5: Barrages Gargar et S.M.Ben-Aouda.
- [125.] Tixeront J. 1960. Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. IAHS Publication UNESCO, 5(3), pp26-42.
- [126.] Touahir S, Asri A, Remini B et Saad H, 2018. Prédiction de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Zeddine et de l'envasement du barrage Ouled Mellouk (Nord-Ouest algérien) , Géomorphologie : relief, processus, *environnement*, vol. 24 – n° 2 | 20.
- [127.] Touaibia B. 2000. Erosion-Transport solide-Envasement des barrages: Cas du bassin versant de l'oued Mina. Thèse de doctorat. INA. Algérie.
- [128.] USDA. 1951. Soil survey manual. United States Department of Agriculture, Handbook, Washington, pp 18.
- [129.] Vapmik V. 1992. Principles of risk minimization for learning theory. Processing System 4, Denver, CO, pp 831 -838.
- [130.] Walling D-E. 1971. The sediment yields of african rivers. I.A.H.S. Publication 144, Harare Symposuim, pp 265-283
- [131.] Walling D-E., Webb H. 1981. The reliability of suspended sediment load data: Erosion and sediment transport measurement. Proceedings of the Florence Symposium, Florence: IAHS publ. 133, pp 177-194.
- [132.] Williams G-P. 1995. Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers. Journal Hydrologique, 11(1), pp 89-106.
- [133.] Wischmeier W-H., Smith D-D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning, Washington, USDA, 53(7), pp58.

# **Annexe 1**

**Fichier Net [4,2] du modèle N.NE.VA**

# Annexe 01

## Fichier Net [4,2] du modèle N.NE.VA

```
3 7 1 0
NDX_Net
Layer 0
4 2 0.020 6.000 -5.000
0.200 0.900
0 0 0 1 7 1 4 1.000 0.300
24.7629 -9.3748 -4.1459 2.7390 -4.2014 1.8640 -21.6703
-8.7650 -11.5921 19.2564 -10.5061 1.8215 14.6482 11.9380
13.6085 11.1014 7.0534 -0.9860 -1.7962 17.0751 -4.7068
3.6534 -37.7023 -0.2648 -3.8458 -2.0563 -6.4193 3.2728
-14.5312 -2.5636 -11.0479 0.9510
Layer 1
2 3 0.040 7.000 -5.000
0.200 0.900
1 4 1 2 1.000 0.300
19.6096 8.8059 5.3145 1.6513
5.7256 6.3049 -14.3653 -11.8571
-0.9720 -0.1916
0 0 0 Layer 2
1 3 0.040 7.000 -5.000
0.200 0.900
0 1 2 1 1 1.000 0.300
-5.8455 -11.4179
-3.9163
0 0
EXTIO
External In
0 0 7
-1
External Out
2 0
-1
Locked Weight Matrices
-1
```

# **Annexe 2**

Article Publié à la

Revue Sciences et

Technologie

**Synthèse**



## Sediment transport study in Zeddine wadi and Harreza wadi

### Etude du transport solide dans Oued Zeddine et Oued Harreza

Farida Bouras<sup>1\*</sup>, Yassine Djebbar<sup>2</sup> & Lakhdar Djemili<sup>1</sup>

\* Departement of hydraulic, Badji Mokhtar University, Po Box 12, 23000, Annaba, Algeria.

\*\* Departement of Civil Engineering, University of Med Cherif Messaadia, 41000, Souk Ahras, Algeria.

---

#### Article Info

##### Article history:

Received 18/09/2018

Revised 07/01/2019

Accepted 20/01/2019

---

##### Keywords

Statistical modeling,  
Geographic Information  
System, Zeddine and Harreza  
watersheds, Specific  
degradation

##### Mots clés

Modélisation statistique,  
Système d'Information  
Géographique, Bassins versants  
Zeddine-Harreza, Dégradation  
spécifique

---

#### ABSTRACT

This work is essentially based on a comparative study of the solid suspension transport modeling of two neighboring Zeddine and Harreza sub-watersheds, both of which belong to the Haut Cheliff watershed. The first part consists of a statistical modeling which aims to study the responses of both watersheds to liquid and solid flows in order to develop a specific model for each watershed, to assess the volume of sediment transported and to determine the specific degradation. Water and sediment flow rates are generally related by a power model. The Zeddine basin carries an average specific solid load of around 3.12 ton / ha / year, while that of the Harreza basin is around 1.64 ton / ha / year. In the second part, the Geographic Information System (GIS) developed in ArcGIS 10.3 was used to determine maps of areas vulnerable to erosion according to the universal USLE soil loss equation. The Zeddine basin has an average specific degradation of 5.28 ton / ha / year, while the Harreza basin has an average specific degradation of 2.94 ton / ha / year.

#### RÉSUMÉ

Le présent travail est essentiellement basé sur une étude comparative de la modélisation du transport solide en suspension de deux sous bassins versants voisins Zeddine et Harreza qui appartiennent tous deux au bassin hydrographique du Haut Cheliff. La première partie consiste en une modélisation statistique qui a pour but d'étudier les réponses des deux bassins versant aux débits liquides et solides pour développer un modèle spécifique à chaque bassin versant, évaluer le volume des sédiments transportés et déterminer la dégradation spécifique. Les débits solide et liquide évoluent en général suivant un modèle en puissance. Le bassin de Zeddine transporte une charge solide spécifique moyenne de l'ordre de 3.12 tonne/ha/an, alors que celle du bassin de Harreza est de l'ordre de 1.64 tonne/ha/an. Dans la deuxième partie on a utilisé le Système d'information Géographique (SIG) développée dans ArcGIS 10.3 qui a pour objectif de déterminer les cartes des zones vulnérables à l'érosion selon l'équation universelle de pertes de sol USLE. Le bassin de Zeddine présente une dégradation spécifique moyenne de 5.28 tonne/ ha/an, de sa part le bassin de Harreza présente une dégradation spécifique moyenne de 2.94 tonne/ ha/an.

---

#### \* Corresponding Author

**Farida Bouras**

Department of hydraulic, University  
of Badji Mokhtar, Po Box 12, Annaba, 23000, Algeria.  
Email: lf.farida@gmail.com

---

## 1. INTRODUCTION

Water erosion is a qualitative and quantitative degradation phenomenon, affecting large areas of soils, particularly in Mediterranean zones [1]. In addition to the high sensitivity of rocks to erosion, heavy rainfall and hydrological variations, the presence of a rugged terrain and poor vegetation are all favorable conditions for materials training and transportation [2].

Erosion agents (wind, rain) pull off fine particles or aggregates from the soil surface. Once detached, these elements are transported by wind or runoff to the streams, resulting in increasing water turbidity and therefore the sediment discharges. This then will affect the downstream infrastructures such as water reservoirs, irrigation canals, water treatment stations and hydroelectric plants.

Many studies have been conducted to quantify the suspended sediment transport during single flood events, to identify the impact of human works on the sediment balance, estimate the filling of dams by fine materials [3-6] and monitor the seasonal and spatial variations in the concentration of suspended solids in various morpho-climatic contexts [7-12]. In Algeria, several modeling works of erosion and sediment transport phenomena, have developed relationships linking solid transport to liquid flows [13-21]. Other studies conducted on erosion showed that soils are particularly susceptible to runoff and erosion [22-26]. Sediment transport is therefore, by its importance, a major problem in Algeria, as the rate of specific erosion reaches values exceeding 2000 t/ km<sup>2</sup>/ year [27].

The aim of the work is to try to describe and explain the dynamics of suspended solids, to quantify water erosion and to evaluate its spatial and temporal distribution, applying the Universal Soil Loss Equation (USLE). We have proceeded to a comparative study of the solid transport in suspension of two neighboring sub-watersheds; Zeddine and Harreza to compare their hydrological behavior and their erosion reports.

## 2. DATA AND METHODS

### 2.1. Study area

#### 2.1.1. Basin of Oued Zeddine

The sub watershed of Oued zeddine is located on the left bank of Oued Rouina tributary of Oued Chelif; it covers an area of 421 km<sup>2</sup> (Tab.1) [28].

Table 1: Morphometric characteristics of the two studied watersheds

Name sub watershed	Harraza	Zeddine
Code sub watershed	0117	0119
Area (km <sup>2</sup> )	142	421
Perimeter (Km)	142,68	173,69
Equivalent length (Km)	58,66	74,84
Equivalent width (Km)	12,68	12,01
Medium elevation (m)	575	640
Minimum elevation (m)	300	200
Maximum elevation(m)	1600	1700
Gravelus index (kc)	1,76	1,62
Overall slope index (Ig) (m/km)	23,87	21,38
Vertical drop specific (Ds) (m)	651,09	640,87
Percentage of vegetation cover (PVC)	20	25

The Oued Chelif remains the longest river in Algeria; its length is 725 km (Figs.1 and 2). This river is located in the north-west of Algeria; it starts in the Tell Atlas and flows into the Mediterranean Sea. It delivers, in times of flood, 1500 m<sup>3</sup> per second [29]. It is situated between 1 ° and 1 ° 51' of east longitude and between 35 ° and 36 ° 15' of north latitude [30]. Altitude differences are very large, the main wadi goes indeed from 1786 m to 328 m in less than 30 km.

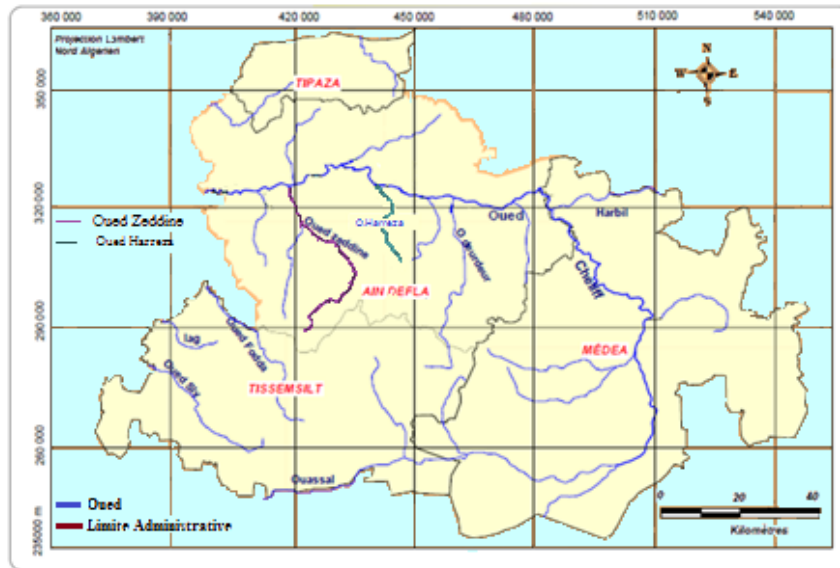


Figure 1: Wadis situation in the study area

The Zeddine watershed is subjected to tectonic ply of the massive Tellien dominated by Jebel Ouarsenis, a limestone peak of 1983 meters but little extended, belted with thermal sources and come. Other formations, all highly impermeable, include flysch of the Albo-Cenomanian, which cover 68% of its surface [28]. It is mostly flysches, which outcrop the tectonized and steep basin. The rest of the pool is cut into the sandstone of Jebel Meddad, marl and marl limestones of the Cretaceous. The selected study sites are those equipped with gauging stations allowing to obtain the relatively long series of hourly flows.

### 2.1.2. Basin of Oued Harreza

The sub watershed of Oued Harreza is part of Wadi Cheliff Basin (Figs. 1 and 2). It covers 142 km<sup>2</sup> (Tab.1). It is located between 2 ° and 2 ° 40' of East longitude and between 36 ° and 36 ° 40' of North latitude. The Oued Harreza travels a distance of 40.5 km in a Northwest direction. South of the basin, the relief reaches an altitude of 765 meters, while the lowest point is at the outlet with an altitude of 313 meters. Watershed Harreza is located in the geological area between the slate mountains Boumaad and the first foothills of the Ouarsenis. It is one of the landforms, with altitudes greater than 1500 meters which are formed of limestone, metamorphic and igneous rocks shale deeply cut by steep ravines [23].

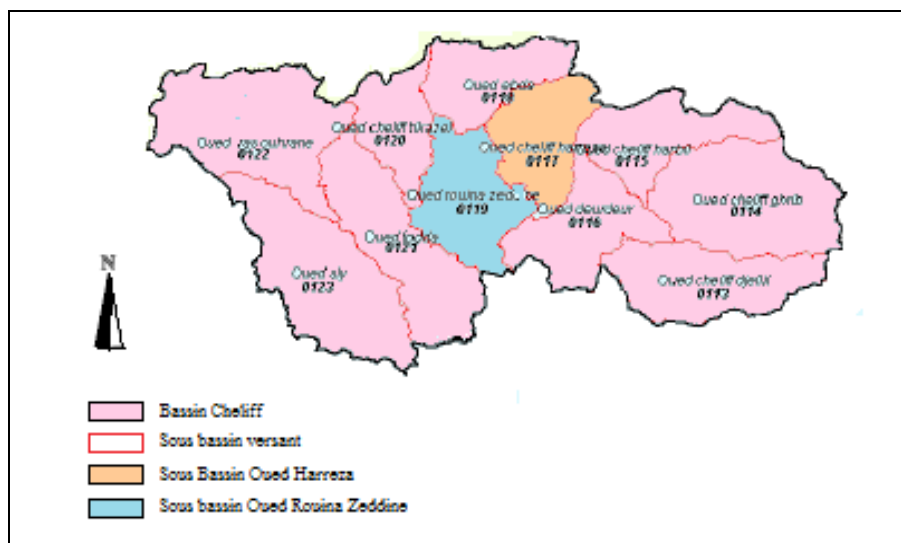


Figure 2: Sub-Basins situation in the studied area

## 2.2. Statistical modeling

The study focuses on the instantaneous values of water flow rates, given in m<sup>3</sup>/s and concentrations of suspended sediment given in g/l over a period stretching from 1990 to 2013. The Bir Ouled Tahar station coordinates are as follow: X = 443.95 m; Y = 318.05 m and Z = 320 m; it covers an area of 421.5 km<sup>2</sup> of the zeddine basin. The El Ababsa station, with coordinates: X = 431.10 m; Y = 313.25 m and Z = 280 m, covers an area of 142 Km<sup>2</sup> of the Harreza basin. These measurements were performed by the services of the National Agency of Water Resources ANRH, during the period from September 1990 to February 2013. The rates are calculated in two ways; either from the water level read on a staff gauge or from the analysis of water level data recorded by a pneumatic gauging station [31].

- The sediment flow is calculated using the formula:

$$Q_s = QC \quad (1)$$

Where;

Q<sub>s</sub>: suspended sediment flow rate (kg/s), C: suspended sediment concentration (g/l) and Q: water flow rate (m<sup>3</sup>/s).

- The flow of suspended solids *As* exported to the outlet is calculated using the formula :

$$As = \sum_{j=1}^n \frac{[(Q_{j+1} c_{j+1}) + (Q_j c_j)]}{2} (t_{j+1} - t_j) \quad (2)$$

Where

C<sub>j</sub> and C<sub>j+1</sub> are the concentrations corresponding to the liquid flow Q<sub>j</sub> and Q<sub>j+1</sub> took in the moments t<sub>j</sub> and t<sub>j+1</sub> between two samples.

- Water erosion (Es) expressed in tons / km<sup>2</sup> / year is calculated by dividing the annual solid contribution As [t / year] by the basin surface A [km<sup>2</sup>] using the following formula:

$$Es = \frac{As}{A} \quad (3)$$

## 2.3. Cartographic modeling

The Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier and Smith, 1978) has been the most widely used model in predicting soil erosion loss [32]. USLE is an empirical equation that estimates the average annual soil loss caused by sheet and rill erosion. The USLE uses the simple equation:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (4)$$

Where *A* is the mean annual soil erosion rate (t /ha/ year), *R* is the rainfall erosivity factor (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>), *K* is the soil erodibility factor (t h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>), *LS* is the topographic factor, *C* is the crop management factor and *P* is the erosion control practice factor.

### 2.3.1. Rainfall erosivity Factor (R)

The rainfall erosivity factor (R) was calculated using the Modified Fournier Index [33].

$$R = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (5)$$

Where R is the rainfall erosivity factor, P<sub>i</sub> is the total amount of precipitation in ith month of the year and P is the total amount of precipitation during the year.

The spatial distribution and temporal variations of the R-factor are very important for quantifying soil erosion [34].

### 2.3.2. Soil erosivity Factor (K)

The K factor was calculated from the textural class of the soil. It depends on the physical and chemical properties of the soil (granulometry, aggregation, structural stability, porosity, organic matter content, etc.). The erodibility map was created from the pedology data of the Harmonized World Soil Database organization. The estimating equation for K<sub>USLE</sub> values given by William's is [35, 36]:

$$K_{USLE} = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (6)$$

Where:

$f_{csand}$  is a factor, that lowers the K indicator in soils with high coarse-sand content and higher for soils with little sand;  $f_{cl-si}$  gives low soil erodibility factors for soils with high clay-to-silt ratios;  $f_{orgc}$  reduces K values in soils with high organic carbon content, while  $f_{hisand}$  lowers K values for soils with extremely high sand content:

$$f_{csand} = \left( 0.2 + 0.3 \cdot \exp \left[ -0.256 \cdot m_s \cdot \left( 1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right)$$

$$f_{cl-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$$

$$f_{orgc} = \left( 1 - \frac{0.25 \cdot orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95 \cdot orgC]} \right)$$

$$f_{hisand} = \left( 1 - \frac{0.7 \cdot \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp[-5.51 + 22.9 \cdot \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)]} \right)$$

Where:

$m_s$ : the sand fraction content (0.05-2.00 mm diameter) [%];  
 $m_{silt}$ : the silt fraction content (0.002-0.05 mm diameter) [%];  
 $m_c$ : the clay fraction content (<0.002 mm diameter) [%];  
 $orgC$ : the organic carbon (SOC) content [%].

### 2.3.3. Topographic factor (LS)

This factor characterizes the effect of slope topography on soil erosion as a function of length (L) and inclination of slopes (S). The values of this factor were obtained from GIS treatments of digital terrain model (MNT) by applying a formula [37]:

$$LS = \text{Power}([\text{Flow accumulation}] * \text{resolution} / 22.1, 0.4) * \text{Power}(\sin([\text{slope}] * 0.01745) / 0.09, 1.4) * 1.4 \quad (7)$$

### 2.3.4. Crop management factor (C)

In the universal soil loss equation, the vegetation action translated by the factor C is the most determining parameter [38]. The different classes of vegetation and / or soil occupation were mapped from the supervised classification of a Landsat satellite images. The C factor ranges from 0 (full cover) to 1 (bare land).

### 2.3.5. Support practice factor (P)

The P factor describes the conservative human actions of soils that are practiced to counter water erosion. It generally varies from 0 to 1 [39], depending on the practice and the slope. In the absence of any support intervention the factor P takes the value 1.

### 2.3.6. Spatial distribution of erosion risk

The multiplicative superposition of the five thematic layers representing the factors of erosion in Raster format made it possible to develop, at the basin scale, the map of potential erosion. The average value of erosion is expressed in ton / ha / year.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Hydrological results

#### 3.1.1. Analysis of sediment discharge

For a long time, sediment discharge  $Q_s$  has been related to water flow rate  $Q$  to determine a relationship that allowed the estimation of the former from the latter. Water and sediment flow rates are generally related by a power model [28,40]:

$$Q_s = a Q^b \quad (8)$$

For the estimation of solid transport by carriage, we only have data on the concentration of suspended sediments, so the assessment of total solid flows can only be approximate, given the absence of data on carriage, which is generally estimated between 20 and 30% of suspended transport [23, 41].

If we compare the equation (8) to the equation (1), using the coefficient  $b = 1$ , we will have:

$$Q_s = a Q \tag{9}$$

The solid flow bed load is calculated with this formula [23, 41], with:

$$a = (20 \text{ à } 30) \% \cdot C$$

$$\text{So: } Q_{sch} = (20 \text{ à } 30) \% \cdot C Q \tag{10}$$

Where:

$Q_{sch}$ : solid rate by bed load (kg/s)

$C$ : concentration (g/l)

$Q$ : liquid flow rate (m<sup>3</sup>/s).

In order to provide a current average estimate of the solid flow, we analyzed the relationships between solid and liquid flow rates for all measurements (N) from 1990 to 2013 (3083 pairs of values for the Zeddine and 1957 for Harreza) (Tab.2).

Table 2: Coefficients of the regression  $Q_s$ - $Q$  for the interannual scale

All data	Zeddine				Harreza			
	N	R <sup>2</sup>	a	b	N	R <sup>2</sup>	a	b
	3083	0,8173	15.878	1.3991	1957	0,8094	15.645	1.2493

The variation coefficient of determination  $R^2$  shows the degree of correlation of the solid discharge to liquid flow rates through the power model (Fig. 3). The magnitude of the variation of the parameter ‘ $a$ ’ is greater than that of the parameter ‘ $b$ ’. It is noted that the  $a$  coefficients are almost of the same magnitude, indicating that the two basins belong to the same hydrogeological Class (Unconfined aquifer receiving no significant alimentation by infiltration by series of conditions of unfavorable surfaces) [42], while the different exponents  $b$  indicate that they belong to a different percentage of the vegetation cover [2].

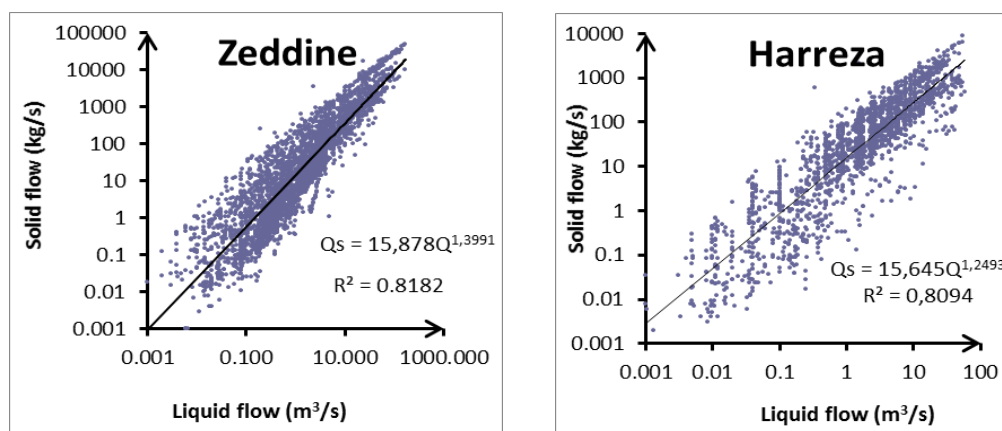


Figure 3: Relation between liquid and solid instantaneous rates

The variation of parameters  $a$  and  $b$  established for each year is given in Table 3. The parameter value differed from one year to another, but follows the same direction of variation for both basins. This may be due to the same direction of rainfall variability each year (Fig. 4). Strong values of the coefficient  $a$ , correspond to easily mobilized sediments during rain events. The parameter  $b$  can be interpreted as the erosive power of the river [8].

Table 3 : Coefficients of the regression  $Q_s$ - $Q$  for the annual scale

	Zeddine			Harreza		
	N	R <sup>2</sup>	Modèle	N	R <sup>2</sup>	Modèle
1990/1991	840	0.821	$Q_s = 16.328 Q^{1.392}$	196	0,858	$Q_s = 16.545 Q^{1.449}$
1991/1992	177	0.743	$Q_s = 9.874 Q^{1.407}$	151	0,823	$Q_s = 13.883 Q^{1.186}$
1992/1993	109	0.764	$Q_s = 40.339 Q^{1.312}$	58	0,950	$Q_s = 31.958 Q^{1.194}$

1993/1994	112	0,811	$Q_s = 21.575 Q^{1.696}$	62	0,825	$Q_s = 21.370 Q^{1.078}$
1994/1995	238	0,701	$Q_s = 18.121 Q^{1.277}$	180	0,848	$Q_s = 19.499 Q^{1.126}$
1995/1996	257	0,815	$Q_s = 11.063 Q^{1.320}$	245	0,810	$Q_s = 8.575 Q^{1.306}$
1996/1997	104	0,912	$Q_s = 18.299 Q^{1.488}$	99	0,846	$Q_s = 24.235 Q^{1.293}$
1997/1998	227	0,807	$Q_s = 10.939 Q^{1.519}$	95	0,770	$Q_s = 16.747 Q^{1.199}$
1998/1999	197	0,791	$Q_s = 8.680 Q^{1.449}$	55	0,881	$Q_s = 11.145 Q^{1.460}$
1999/2000	70	0,87	$Q_s = 14.993 Q^{1.603}$	34	0,758	$Q_s = 2.817 Q^{1.350}$
2000/2001	251	0,828	$Q_s = 20.439 Q^{1.421}$	162	0,784	$Q_s = 15.092 Q^{1.361}$
2001/2002	45	0,846	$Q_s = 28.591 Q^{1.403}$	42	0,844	$Q_s = 24.612 Q^{1.179}$
2002/2003	248	0,872	$Q_s = 11.230 Q^{1.452}$	180	0,788	$Q_s = 10.611 Q^{1.326}$
2003/2004	186	0,819	$Q_s = 11.590 Q^{1.375}$	58	0,819	$Q_s = 9.758 Q^{1.512}$
2004/2005	79	0,616	$Q_s = 10.092 Q^{1.150}$	99	0,818	$Q_s = 22.008 Q^{1.267}$
2005/2006				27	0,789	$Q_s = 15.624 Q^{0.962}$
2006/2007	109	0,848	$Q_s = 11.843 Q^{1.688}$	59	0,901	$Q_s = 22.577 Q^{1.233}$
2007/2008	91	0,857	$Q_s = 27.085 Q^{1.295}$			
2008/2009	129	0,655	$Q_s = 18.768 Q^{0.971}$	88	0,708	$Q_s = 25.467 Q^{0.871}$
2009/2010	82	0,865	$Q_s = 31.387 Q^{1.138}$	39	0,837	$Q_s = 52.672 Q^{0.819}$
2010/2011	64	0,779	$Q_s = 25.311 Q^{1.234}$	15	0,705	$Q_s = 57.743 Q^{0.859}$
2011/2012	48	0,801	$Q_s = 21.060 Q^{0.976}$	20	0,967	$Q_s = 17.545 Q^{0.937}$
2012/2013	12	0,915	$Q_s = 33.040 Q^{1.147}$	11	0,908	$Q_s = 25.731 Q^{1.118}$

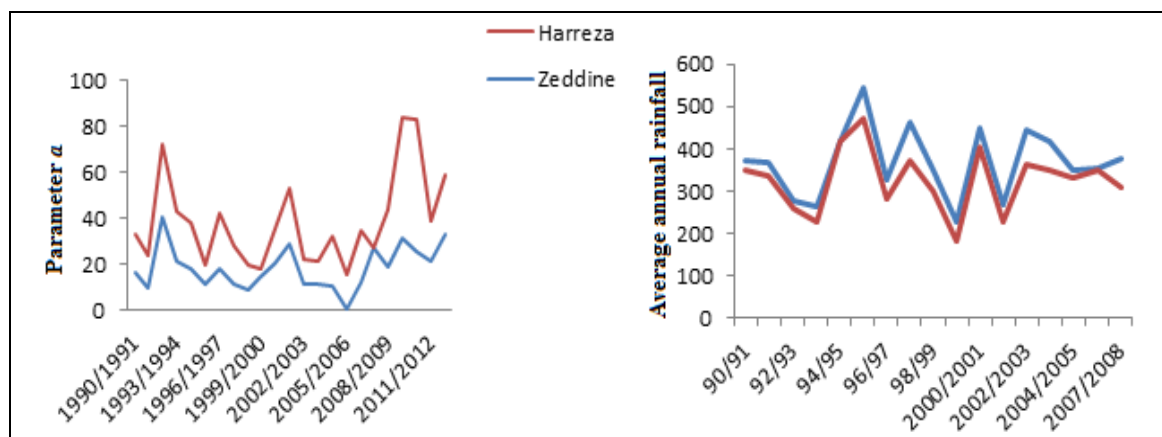


Figure 4: Parameter  $a$  and average annual rainfall in the two basins

### 3.1.2. Flow of suspended solids

The Zeddine basin has no flood plain. This is essential in the flow velocity and the origin of floods. It can be considered capable of an extremely short concentration time and of a fast propagation speed of floods, which encourages runoff and violent erosion [43]. The Zeddine basin covers a surface which is three times greater than that of Harreza. These points show that the sediment transport is more important in the basin Zeddine than Harreza confirming that these factors are among the most explaining parameters of the sediment transport phenomenon [44].

Most of the sediment transport occurs fairly regularly in the fall (Fig.5) it alone covers 46% of solid contribution to Zeddine and 43% for Harreza. Seasons contributing to the rest of the transportation are spring, winter and more randomly summer (August storm). At the monthly level, an important part of the solid contribution is observed during the months of early autumn and late spring. The solid contribution of the four months of September, October, April and May, represent about 52% of the annual solid contribution to the Zeddine basin and 51% for the Harreza basin (Fig.6).

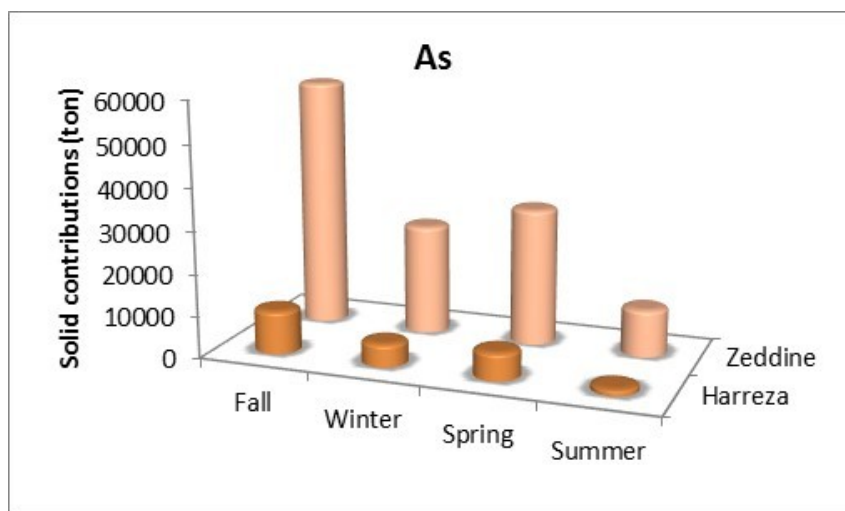


Figure 5: Change in seasonal solid contribution

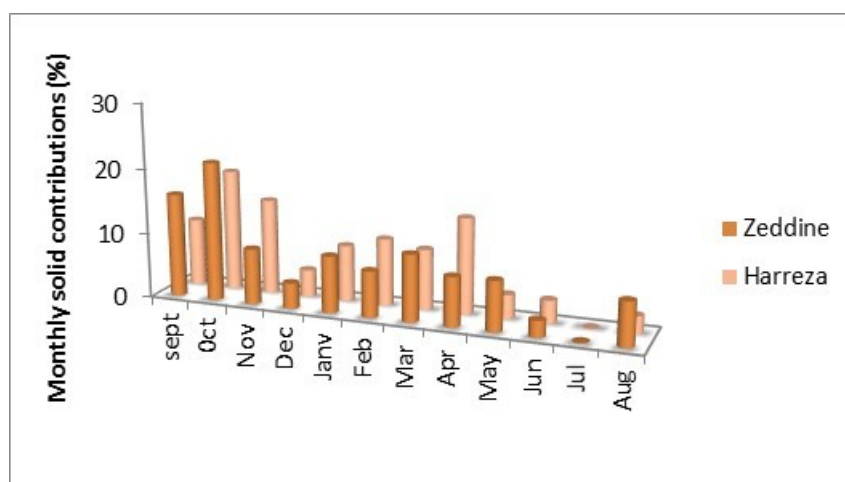


Figure 6: Monthly Distribution solid contribution

### 3.1.3. Specific water erosion

The Zeddine basin carries an annual average of 0.131 million tons of sediment, a water erosion on the order of 3.12 ton / ha / year, while the Harreza basin carries an annual average of 0.023 million tons of sediment, or a water erosion of about 1.64 ton / ha / year. The lithological, topographic characteristics and the structure of both basins are very close. This solid intake difference is due to the fact that the surface of Zeddine basin is greater than that of Harreza which confirms what was found previously by the authors themselves [44].

During the study period, there was a decrease of erosion rates for the two basins since the year 2000-2001 during which, a significant specific degradation was engendered: more than 15.30 ton / ha / year for the Zeddine and 6.82 ton / ha / year for the Harreza. Before this year; from 1990 to 1999 an average of respectively 3.37 and 1.83 ton / ha / year was engendered and which is lower than that from 2001 until 2013 and is worth 1.76 and 1.01 ton / ha / year (Fig.7).



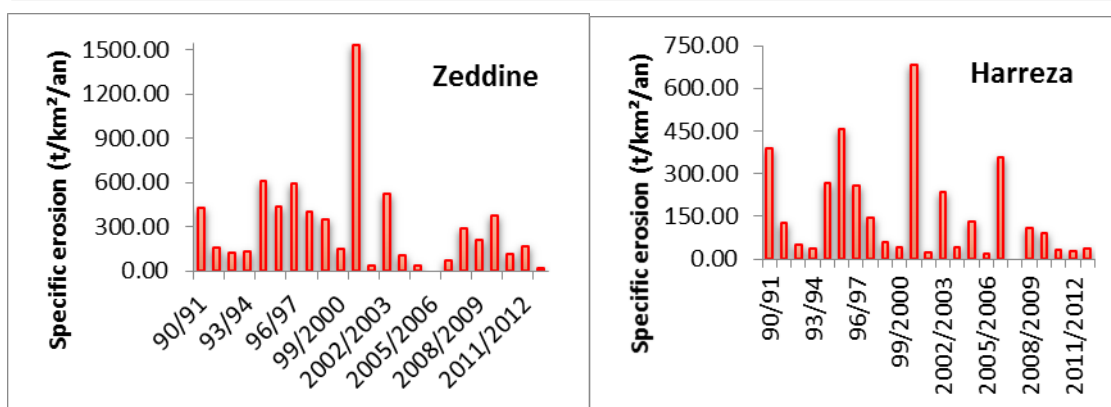


Figure 7: Annual change in specific erosion

Annually, the morphological behavior of Algerian catchments is irregular; there is no proportionality between rain and specific erosion [6, 24]. This has been confirmed by an analysis for the year 2000/2001.

Before and after the year 2000-2001, there is a sudden change of specific erosion passing from 1.48 to 15.29 then to 0.35 ton / ha / year for Zeddine and from 0.42 to 6.82 and then to 0.25 ton / ha / year for Harreza. This change almost coincided with that of the rainfall, which varies from 229.15 to 448.37 and then to 269.01mm for Zeddine and from 182.52 to 403.25 then to 226.31 mm for Harreza (Fig.8). In general, there is a balance between formation and soil erosion, rain promotes vegetation creating a protective layer that reduces the impact of raindrops on the soil and runoff effects [17]. But once this balance is broken, erosions are accentuated, water from the rain, which was largely absorbed by vegetation, flows to the lower coasts, carrying and breaking up the soil. So once the layer of loose material washed away by runoff water, the ground remains clean and protected against subsequent action of water.

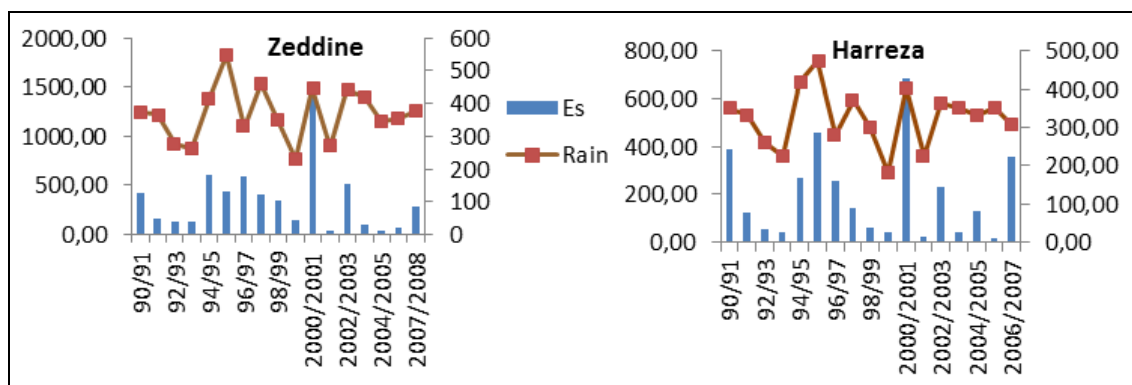
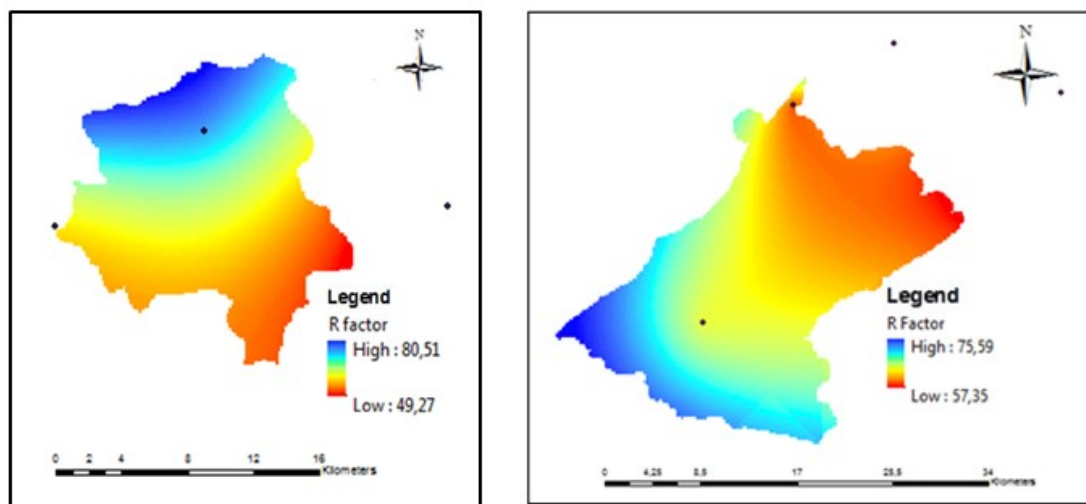


Figure 8: Annual change in specific erosion and rain

### 3.2. Cartographic result

#### 3.2.1. Rainfall erosivity Factor (R)

In the Zeddine Basin, the R-factor values range from 57 to 76 MJ mm / ha / h (Fig.9.a). For the Harreza basin, the R-factor varies from 49 to 81 MJ mm / ha / h (Fig.9.b).



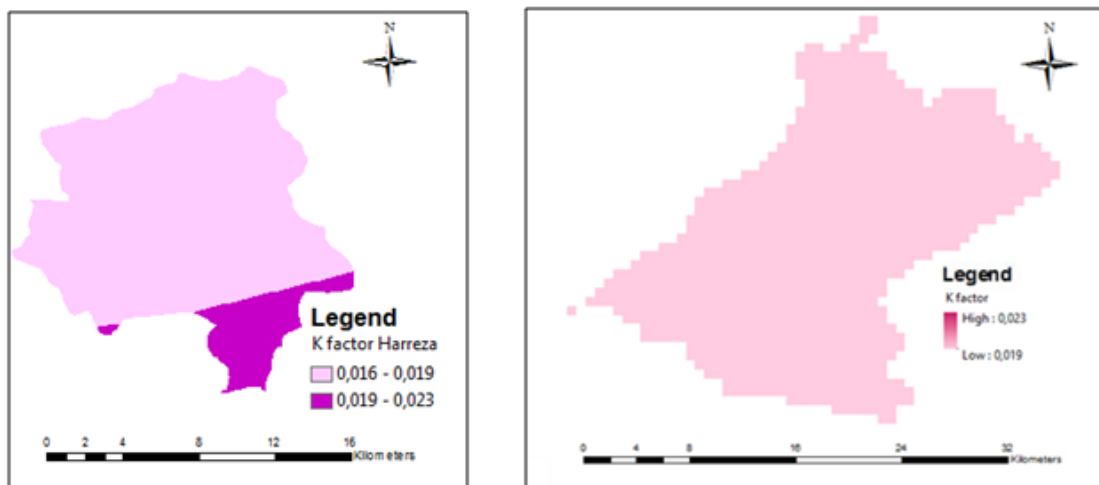
a: Harreza basin

b: Zeddine basin

Figure 9: Rainfall erosivity factor map of study area

### 3.2.2. Soil erosivity Factor (K)

Most of the Harreza Basin is characterized by a K factor ranging from 0.016 to 0.019 th MJ-1 mm-1 (Fig.10.a) except for the southern part of the basin with a higher K factor of 0.023 which confirms the presence of a calcareous substratum. The Zeddine basin has K values that range from 0.019 to 0.023 th MJ-1 mm-1 (Fig.10.b), due to the presence of flysch in the Eastern part, marls and marly limestones of the Cretaceous in The Central part of the basin.



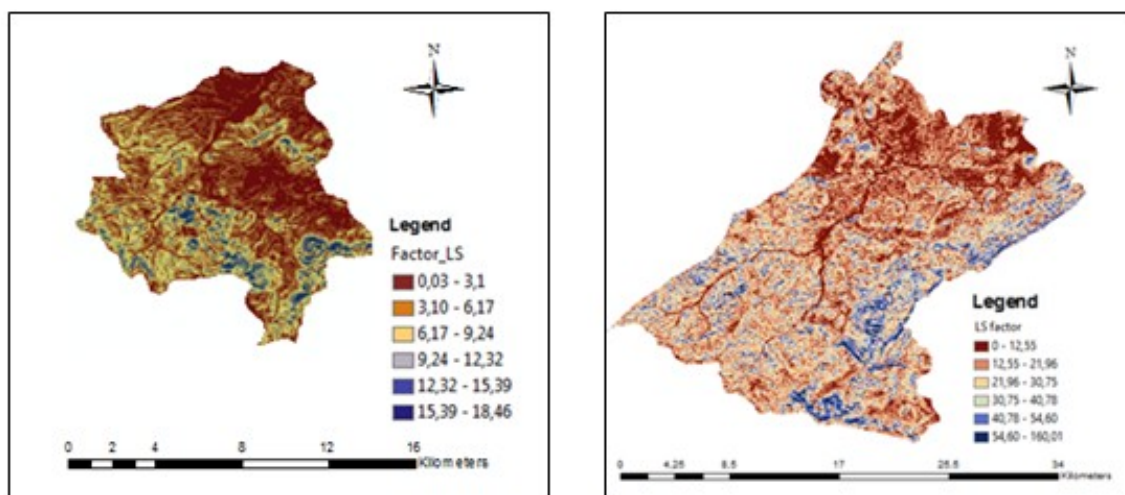
a: Harreza basin

b: Zeddine basin

Figure 10: Soil erosivity factor map of the study area

### 3.2.3. Topographic factor (LS)

In general, the LS factor is low to moderate in the Harreza Basin (Fig.11.a). Many sectors have values of less than 6, including the North-Eastern region of the basin. The areas with the highest LS factor are in the South-East and South-West of the basin. Most of the Zeddine basin is characterized by an LS factor of less than 30 (Fig.11.b). Almost all of the land in the North and Center of the basin belongs to this class. Higher values ranging from 30 to 160 are located in the Eastern and South-Western branch of the basin, which generally coincide with areas of high altitudes and high slopes.



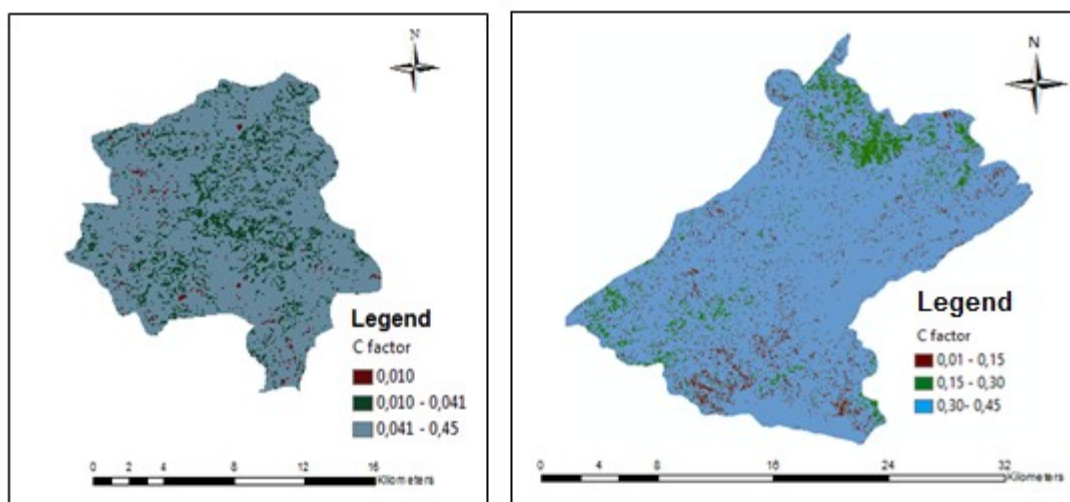
a: Harreza basin

b: Zeddine basin

Figure 11: Topographic factor map of study area

### 3.2.4. Crop management factor (C)

A strong dominance of values ranging from 0.30 to 0.45 is observed for the two Harreza and Zeddine basins for the factor C (Fig.12), these zones are generally associated with the maquis / garrigue and matorral formations. However, a concentration of values ranging from 0.01 to 0.04 is observed in the center of the Harreza basin, following forest formations. Another class consists of a factor C between 0.15 and 0.30, which lies in the North and South-West of the Zeddine basin, which is manifested by the practice of agricultural activity.



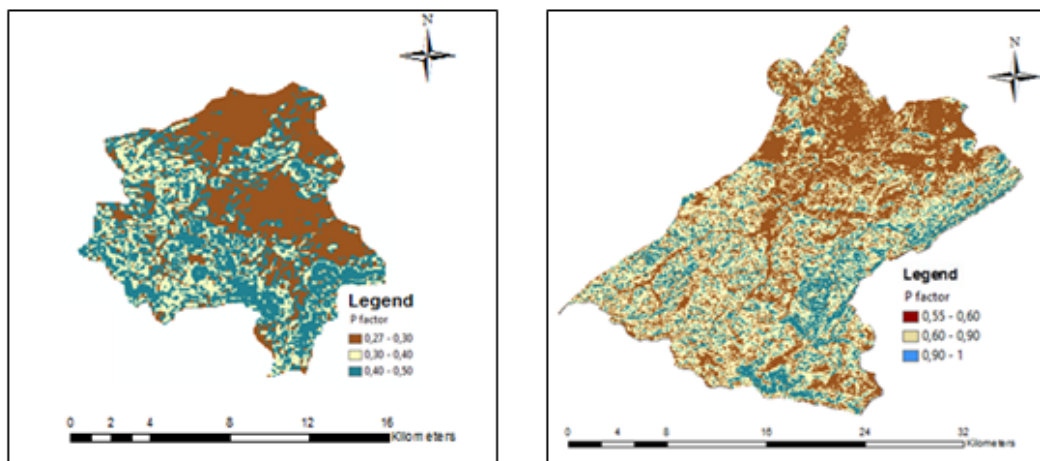
a: Harreza basin

b: Zeddine basin

Figure 12: Crop management factor map of study area

### 3.2.5. Support practice factor (P)

The P factor generally varies in the Harreza basin between 0.27 and 0.3 for the low slope zones and between 0.3 and 0.5 for the steep slopes (Fig.13.a). The cultural techniques practiced are crops in contour, or in alternate bands. In the Zeddine basin, the values of the factor P are high, ranging from 0.55 to 0.6, the support practices used are crops that are following contour lines. Higher values between 0.8 and 1 are located in the Eastern basin where conservation practices are modest because of the presence of acute slopes(Fig.13.b).



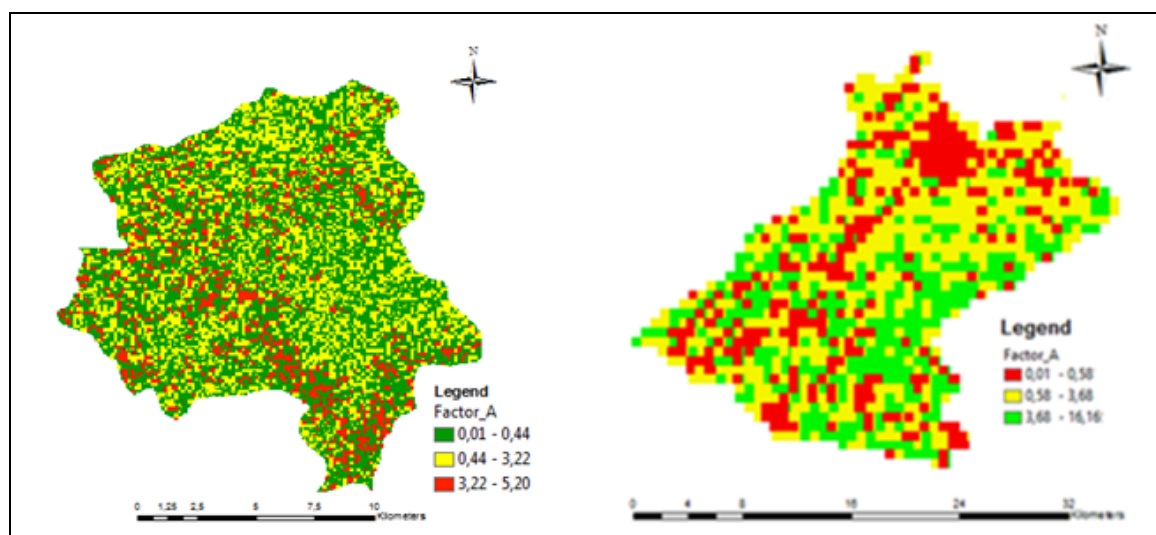
a: Harreza basin

b: Zeddine basin

Figure 13: Support practice factor map of study area

### 3.2.6. Erosion risk map

According to the USLE model, more than 78% of the surface of the Harreza basin is affected by low and average erosion rates generally lower than 3.2 tons / ha / year which are dispersed throughout the basin (Fig. 14.a). A higher erosion approximately 5.2 tons / ha / year represents almost 22% of the basin area and is concentrated in the North-West and South-East basin. This peculiarity is explained by the formation of maquis / garrigue and the forest-massifs. On the other hand, more than 92% of the area in the Zeddine basin has low and medium erosion zones of less than 3.6 tons / ha / year according to USLE (Fig.14.b). On the Eastern part of the basin (Tiberkoukine) and on the South-Western bordure, we identify areas that are very sensitive to erosions in the order of 16 tons / ha / year, which are generally characterized by agricultural crops on steep slopes.



a: Harreza basin

b: Zeddine basin

Figure 14: Erosion risk map of study area

#### 4. CONCLUSION

The analysis of liquid and solid flows for all the measurements carried out from 1990 to 2013 for the two Harreza and Zeddine watersheds shows that they are generally related by a power model [20], with a coefficient of determination exceeding 80%. High values of the coefficient  $a$ , correspond to sediments easily mobilizable during rainy events. The parameter  $b$  can be interpreted as the erosive power of the basin.

Graphical analysis reveals that the autumn is distinguished by strong river discharges leading to important transport of solids; it alone covers 46% of total solid contribution for the Zeddine basin and 43% for the Harreza basin. On a monthly basis, a significant portion of the solid intake is observed during the early fall and late spring months. These results corroborate with those of the study of Terfous et al [24] which states that the torrential rains occurring in October and November degenerate a large amount of solids. The average annual soil loss estimated for the entire watershed is 3.12 ton / ha / year for Zeddine and 1.64 ton / ha / year for Harreza.

The annual morphological behavior of the two watersheds is irregular; the results obtained during the year 2000/2001 show a sudden variation of the specific erosion coinciding with that of the rain. The latter favors vegetation which reduces the effects of runoff, once this equilibrium is broken erosions are accentuated, the layer of loose materials is washed away by the runoff and the land remains cleaned and protected against the subsequent action of the water [13, 15].

For erosion risk map, the study revealed that low and medium soil loss, cover 92% and 78% of Zeddine and Harreza basins respectively. A high erosion is more important in Zeddine basin (16 t / ha / year) than in Harreza basin (5.2 t / ha / year). The Zeddine basin is considered to be capable of extremely short concentration time, a very rapid rate of flood propagation, the differences in altitude are very large in a very small basin, the main wadi passes indeed from 1786m to 328 m [28]. The lithological, topographical and structural characteristics complement each other to promote violent erosion. On the other hand, the Harreza basin has alluvial plains and terraces that will laminate and brake the flow.

The average annual soil loss map will definitely be helpful in identification of priority areas for implementation of soil conservation measures and effective checking of soil loss.

#### ACKNOWLEDGEMENT

Thanks to the ANRH, the ANBT for providing data. Thanks to the USGS, the USDA for making data accessible to the public. Thanks to Pr. Abida Habib for the passionate lecture. Thanks to Dr. Chiraz Laifa for the help to translate this paper.

#### REFERENCES

- [1]. B. Barthès et E. Roose, 2001. "La stabilité de l'agrégation, un indicateur de la sensibilité des sols au ruissellement et à l'érosion: validation à plusieurs échelles. Cahiers Agricultures, Vol. (10), p. 93-185.
- [2]. A. Gartet, 2005. Dégradation spécifique et transports solides dans le bassin de l'Oued Lebène (Préif central, Maroc septentrional). Papeles de Geografía, Vol. 41-42, p. 85-100.
- [3]. G.H. Old et al., 2005. Discharge and suspended sediment dynamics during two jökulhlaups in the Skaftá river, Iceland. Earth Surface Processes and Landforms, 30(11), 1441-1460.
- [4]. J. Boardman and J. Poesen, 2006. Soil erosion in Europe. John Wiley & Sons, Ltd., 878 p.
- [5]. J. Xu and Y. Yan, 2010. Effect of reservoir construction on suspended sediment load in a large river system: thresholds and complex response. Earth Surface Processes and Landforms, 35(14), 1666-1673.
- [6]. E. Hallot et al., 2012. L'envasement du lac de Butgenbach (Ardenne, Belgique). Bulletin de la Société géographique de Liège, 59, 39-57.
- [7]. H.M. Sickingabula, 1998. Factors controlling variations in suspended sediment concentration for single-valued sediment rating curves, Fraser River, British Columbia, Canada. Hydrological Processes, 12(12), 1869-1894.
- [8]. N.E.M. Asselman, 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. Journal of Hydrology, Vol.234 (3-4), p.228-248.
- [9]. A.J. Horowitz, 2002. The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment. In Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, 30 April- 2 May, Reno, Nevada.
- [10]. A.J. Horowitz, 2003. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. Hydrological Processes, 17, 3387-3409.

- [11]. P. Gao and M. Josefson, 2012. Temporal variations of suspended sediment transport in Oneida Creek watershed, central New York. *Journal of Hydrology*, Vol.426-427, p.17-27.
- [12]. A. Gericke and M. Venohr, 2012. Improving the estimation of erosion-related suspended solid yields in mountainous, non-alpine river catchments. *Environmental Modelling & Software archive*, Vol 37, p. 30-40.
- [13]. A. Benkhaled et B. Remini, 2003. Analyse de la relation de puissance: débit solide -débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Revue des sciences de l'eau*, Vol.16 (3) p.333-356.
- [14]. A. Bouanani, 2004. Hydrologie, transport solide et modelisation, etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie). Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid. Tlemcen. 250 p.
- [15]. H. Bouchelkia et B. Remini, 2003. Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif. *Ingénieries - E A T, IRSTEA*, p. 45 - 56.
- [16]. A. Demmak, 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de docteur-ingénieur, Paris. 323 p.
- [17]. A. Nekkache Ghenim et A. Megnounif, 2013. Estimation de la précision de la relation en puissance reliant la concentration au débit liquide. *Revue « Nature & Technologie ». C- Sciences de l'Environnement*, n° 09, p. 54-60.
- [18]. J.L. Probst et A. Bazerabachi, 1986. Transport solide en solution et en suspension par la Garonne supérieure. *Sciences Géologiques. Bulletin, Strasbourg*, 39(1), p.79-98.
- [19]. A. Saïdi, 1991. Érosion spécifique et prévision de l'envasement. Colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages. Alger, 1-3 décembre 1991. Alger: Agence nationale des ressources hydrauliques, 26-204.
- [20]. B. Touaibia, 2000. Erosion-Transport solide-Envasement des barrages: Cas du bassin versant de l'oued Mina. Thèse de doctorat. INA. Algérie.
- [21]. D.E. Walling and H. Webb, 1981. The reliability of suspended sediment load data: Erosion and sediment transport measurement. *Proceedings of the Florence Symposium, Florence: IAHS publ. 133*, p. 177-194.
- [22]. M. Achite and S. Ouillon, 2007. Suspended sediment transport in semi-arid watershed :WadiAbd, Algeria (1973-1995). *Journal of Hydrology*, Vol. 343 (3-4), p. 187-202.
- [23]. K. Meguenni et B. Remini, 2008. Evaluation du débit solide dans le bassin versant de Harreza. *Larhyss Journal*, Vol.7, p.7-19.
- [24]. A. Terfous et al., 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). *Revue des Sciences de l'eau*, Vol. 14 (2), p.173 – 185.
- [25]. J. Tixeront, 1960. Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. Assemblée générale de Helsinki. Wallingford, UK: IAHS Press, IAHS Publ. 53, 26-42.  
<http://iahs.info/redbooks/a053/053004.pdf>.
- [26]. M. Meddi, 1999. Etude du transport solide dans le bassin versant de l'oued Ebda (Algérie). *Zeitschrift für Géomorphologie*, Vol.43, p.167-183.
- [27]. A. El Mahi et al., 2012. Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord), *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 57(8), p. 1642-1661.
- [28]. J. Capolini et al., 1969. Etude des Caractères physiographiques et prévision des apports annuels, des crues et des transports solides dans les bassins du Riou - Sly - Fodda -Deurdeur - Zeddine - Ebda. *Etude SES*, n° 13-12/DH2, S.E.G.G.T.
- [29]. Archive El Mouradia, partie Principaux lacs et cours d'eau.  
<http://www.elmouradia.dz/francais/algerie/geographie/geographie.htm>
- [30]. S. Berbache et B. Remini, 2013. Phénomènes exceptionnels d'érosion et de transport solide, cas des bassins versants de Zeddine et Tikazale. *Proceedings, 5ème colloque international sur les Ressources en eau et le Développement Durable, Alger*, 647-652.
- [31]. M. Mehaiguen et al., 2015. Hydrologic balance and surface water resources of the Cheliff-Zahres basin, *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, Vol 9(12), p. 1435-1438.
- [32]. K.G. Renard et al., 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised

Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Agricultural Handbook No. 703, US Department of Agriculture, Washington DC.

[33]. J.M.J. Arnoldus, 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco Food. Agric. Org., FAO Soils Bulletins, Vol.34, p. 39-51.

[34]. L. Hamlaoui-Moulai et al., 2013. Detecting hydro-climatic change using spatiotemporal analysis of rainfall time series in Western Algeria. Natural Hazards, Vol. 65 (3), p.1293–1311.

[35]. S.L. Neitsch et al., 2000. Erosion Soil and Water Assessment Tool Theoretical. Documentation Texas Agricultural Experiment Station, p. 625.

[36]. J.R., Williams, 1995. The EPIC model in V.P. Singh (ed.) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Chapter 25, p. 909-1000.

[37]. W.H. Wischmeier and D.D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning, USDA. Agriculture Handbook No. 537, Washington, DC.

[38]. K.G. Renard et al., 1991. RUSLE: revised universal soil loss equation. Journal of Soil and Water Conservation, Vol.46 (1), p. 30-33.

[39]. D.D. Smith and D.M. Whitt, 1948. Estimating soil losses from field areas. Agriculture Engineering Soil, Vol.29, p. 394-398.

[40]. J. Corbonnois, 1998. Les facteurs de la variation spatiotemporelle des transports solides et dissous. Géomorphologie, Vol. 4, p. 313-329.

[41]. B. Larfi et B. Remini, 2006. Le transport solide dans le bassin versant de l'Oued Isser. Larhyss Journal, Vol.5, p. 63-73.

[42]. J. Margat, 1975. Projet de nouvelle légende de carte hydrogéologique, 75 SGN 259 AME.

[43]. J.P. Bravard et F. Petit, 1997. Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial, A. Colin, 222 p.

[44]. F. Bouras et al., 2010. Estimation de l'envasement des barrages, une approche non paramétrique ; Network Environmental Management Conflicts, Santa Catarina – Brazil, Vol.1(1), p. 113-119.

# **Annexe 3**

**Estimation de L'envasement des Barrages :  
une Approche non Paramétrique**

**Article publié dans**

**Journal International Environmental  
Conflict Management**





## **Estimation de L'envasement des Barrages: une Approche non Parametrique**

### **Estimation Siltation of Dams: a Non-Parametric Approach**

#### **Bouras Farida**

Etudiante chercheur, Centre Universitaire de Souk-Ahras.

E-mail: rymkarim@yahoo.fr

#### **Djebbar Yassine**

Maître de conférence, Centre Universitaire de Souk-Ahras Antérieurement Ingénieur Senior,  
GVRD, Vancouver, Canada.

E-mail: Ydjebbar@Yahoo.com

#### **Abida Habib**

Maître de conférences, Faculté des Sciences de Sfax, Tunisie

E-mail: habib.abida@voila.fr

### **Résumé**

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en zone méditerranéenne, touchant particulièrement les pays du Maghreb dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol. En Algérie, l'ampleur de ce phénomène est considérable. L'agressivité des pluies conjuguées à une absence de protection végétale, l'alternance de périodes sèches et humides, la fragilité des formations géologiques et l'action anthropique, entraînent l'envasement des retenues des barrages. La présente étude portant sur un échantillon de 15 barrages Algériens et 25 retenues Tunisiennes, situés en zones semi-arides comprise entre les isohyètes 250 et 700 mm. La méthodologie adoptée dans notre étude est innovatrice et vise à produire une relation régionale et ce, grâce à l'utilisation des outils statistiques non paramétriques basés sur la méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour la quantification de la sédimentation. Le modèle développé dans cette étude a produit de très bons résultats.

**Mots-clé:** Envasement; Retenue; Barrages; Réseaux neuronaux; Taux d'abrasion.

### **Abstract**

Water erosion is a widespread complex phenomenon in the Mediterranean zone, concerning particularly the Maghreb countries, where it seriously threatens the potentiality of water and soil. In Algeria, the magnitude of this phenomenon is significant. The aggressive rainfalls coupled with a lack of plant protection, the alternation of wet and dry periods, the fragility of the geological formations and human actions, cause siltation of reservoirs. The present study relating to a sample of 40 medium to small dams located in semi-arid zones distributed in Algeria and Tunisia includes isohyets between 250 and 700mm. The methodology adopted in our study is innovative and aims to produce a regional relationship and this, thanks to the use of nonparametric statistical tools based on the method of artificial neural networks (ANN) for the quantification of sedimentation. The model developed in this study has produced very good results.

**Key words:** Sedimentation; Dams; Neural networks; Abrasion rate.

## Introduction

L'Algérie comptera prochainement un nombre important de barrages de toutes catégories et de toutes dimensions. Malheureusement cette richesse se dégrade de jour en jours 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 ses 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, Salem & Demmak, 2001). L'objectif de cette étude est de contribuer à la quantification de l'alluvionnement afin de mieux cerner le dimensionnement des ouvrages hydrotechniques et leur aménagement, d'accroître leur durée de vie et de réduire les coûts de réalisation. L'étude porte sur un échantillon de quinze barrages Algériens et vingt cinq retenues collinaires Tunisiennes.

## Description de la zone d'étude

Les barrages Algériens étudiés sont situés dans des bassins versants répartis sur une zone qui couvre une partie importante du territoire algérien (Figure 1). Les bassins de Gargar, S.M. Ben-Aouda, Ouizert, Bou-Hanifia, Fergoug et Tafna, sont localisés dans la région Ouest de l'Algérie du Nord. Le bassin versant de la Tafna, comprend quatre barrages fonctionnels ; Béni- Bahdel, Boughrara, Sidi.Abdelli et Sikkak. Alors que les bassins de Zardeza, Ain Zada, Hammam Grouz, Ain Dalia, Fontaine des Gazelles et Zit Emba se situent dans l'Est Algérien. Cette zone d'étude, présente un relief varié (montagne, plaine), une végétation diversifiée (forêt, broussailles, prairies,...) et un climat (subhumide, humide, semi-aride, aride). La majeure partie des quinze bassins versants ont une pluviométrie moyenne interannuelle comprise entre 270 et 720 mm, le climat semi-aride y est fortement représenté. Les températures varient entre 15 et 18°C. L'évapotranspiration annuelle varie de 900 à 1500 mm. La surface des bassins versants varie entre 200 et 5600 km<sup>2</sup> et le taux d'apport solide est compris entre 80 et 4900 T/km<sup>2</sup>/an.

La dorsale tunisienne, où se situent les 25 lacs collinaires (Figure 2), est caractérisée par un climat semi-aride et une pluviométrie comprise entre les isohyètes 250 et 500 mm. Les pluies sont rares et très irrégulières durant l'année, avec un maximum enregistré en automne et au

printemps. Elles sont liées à des humidités relativement faibles en été et assez élevées en hiver. Les températures de cette zone sont fortement continentales et à grande amplitude moyenne annuelle (18 à 20° C). La superficie des retenues varie entre 0,85 et 9,17 km<sup>2</sup> et le taux d'apport solide est compris entre 187 et 2950 T/km<sup>2</sup>/an. La dorsale Tunisienne est une région constituée d'une succession de Jebels, où les affleurements géologiques sont constitués en majorité par des plis calcaires ayant des impluviums très diversifiés allant d'un milieu semi - forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole (Mahjoub, Bergaoui, Souissi & Boufaroua, 2001).

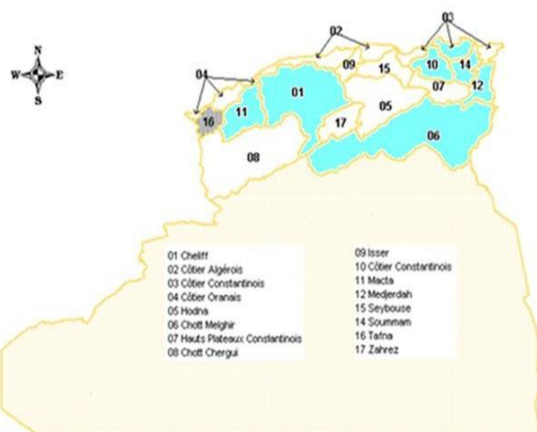


Figure 1: Localisation des bassins Algériens

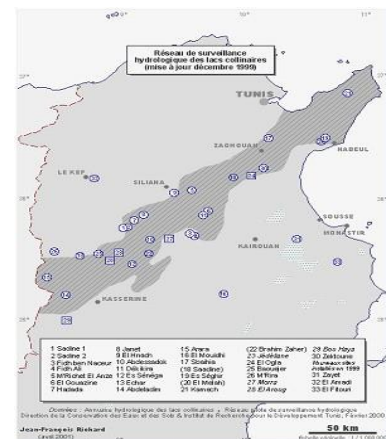


Figure 2: Localisation des retenues Collinaires Tunisiennes

## Méthodologie

Les réseaux de neurones, grâce à leur traitement parallèle de l'information et à leurs mécanismes inspirés des cellules nerveuses (neurones), ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner des problèmes jadis qualifiés de complexes. Le modèle mathématique d'un neurone artificiel est illustré à la Figure (3). Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Le résultat  $n$  de cette somme est ensuite transformée par une fonction de transfert  $f$  qui produit la sortie  $a$  du neurone.

L'apprentissage est une phase durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Il comporte plusieurs choix: le critère d'erreur à atteindre, l'algorithme d'optimisation de ce critère les paramètres de l'algorithme et la gamme des valeurs initiales aléatoires des poids et seuils.

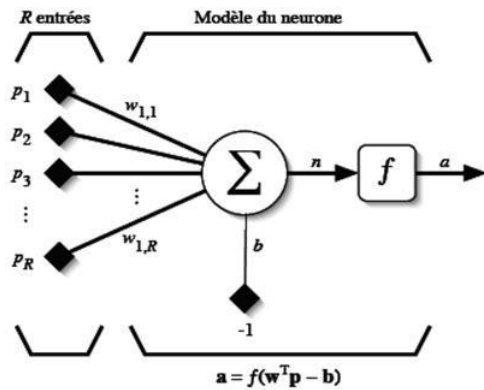


Figure 3: Modèle d'un neurone artificiel .

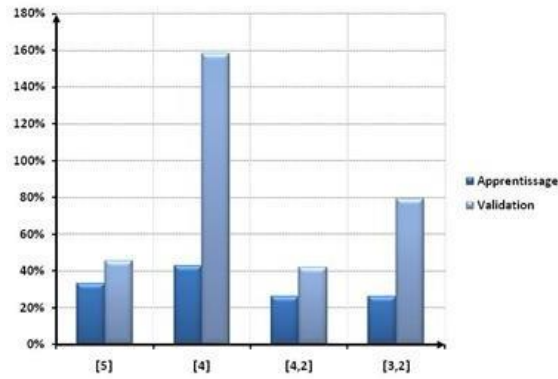


Figure 4: Erreur absolue entre les différents réseaux

La validation est la vérification des performances d'un réseau de neurones hors échantillon et sa capacité de généralisation. Une fois le réseau calculé, il faut toujours procéder à des tests afin de vérifier que notre réseau réagit correctement. Après, vient la phase de l'application, qui a pour but de montrer la performance et l'utilité de ce modèle.

### Developpement du modèle

L'application de cette méthode à pour objectif de chercher une relation entre le taux d'abrasion ( $T_a$ ) et les différentes variables quantifiables.

#### Choix des variables

Pour le développement du modèle, on a retenu les variables les plus explicatives et qui sont facilement identifiables, qui sont : la surface du bassin versant ( $S$ ) ; la couverture végétale ( $C_v$ ) ; l'indice de compacité ( $K_c$ ) ; l'indice de pente global ( $I_g$ ) ; la pluviométrie annuelle ( $P$ ) ; le coefficient d'écoulement interannuel ( $C_e$ ) et la densité de drainage ( $D_d$ ).

#### Choix de l'architecture du modèle

On a simulé plusieurs architectures pour l'apprentissage et la validation, composées respectivement:

1. d'une seule couche cachée composée de cinq (5) neurones,
2. deux couches cachées (4,2) ; avec quatre neurones sur la première couche et deux neurones sur la deuxième couche,
3. deux couches cachées (3,2) ; avec trois neurones sur la première couche et deux neurones sur la deuxième couche,

4. et enfin, une seule couche cachée composée de quatre (4) neurones.

On a comparé les résultats par le calcul des erreurs absolues et arithmétiques (Figure 4), et on a adopté l'architecture présentée sur la Figure (5).

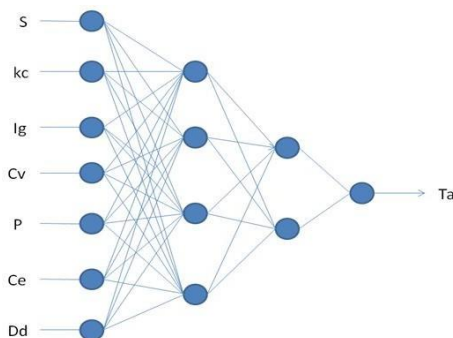


Figure 5: Architecture du modèle développé.

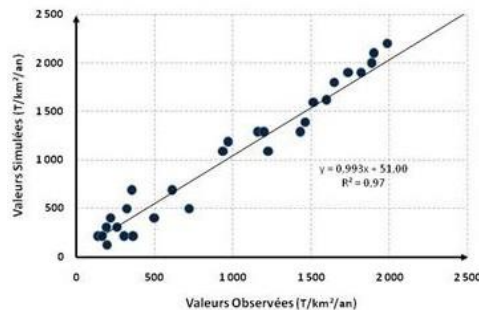


Figure 6: Valeurs d'érosion observées et simulées

### ***Fonction d'activation et choix des paramètres***

Les fonctions de transfert les plus utilisées sont les fonctions «seuil», «linéaire» et «sigmoïde». On a choisi la fonction sigmoïde parce qu'elle est continue et offre de bon résultat (Lippmann, 1987). L'estimation des paramètres comporte plusieurs choix: l'algorithme d'optimisation; on a choisi celui de la rétro-propagation du gradient, la valeur du seuil est de [-4,6], celle du coefficient d'apprentissage est de (0,02) et le nombre d'itérations est de 25000 (Bouras, 2009). Le résultat obtenu est présenté sur la Figure (6), on remarque une très bonne corrélation entre les valeurs simulées et observées avec un très bon coefficient de détermination.

### ***Importance relative des variables***

On constate en premier lieu, que la superficie, la couverture végétale, l'indice de pente globale et la pluie moyenne annuelle sont les plus importants et expliquent à eux seul 72% de la variabilité du modèle. Ceci va nous aider à projeter des mesures antiérosives pour diminuer l'envasement.

### **Application du modèle**

On a réalisé des tests sur différents bassins en diminuant progressivement la pente du bassin et sa surface (Figures 7 et 8) et en augmentant la couverture végétale (Figure 9).

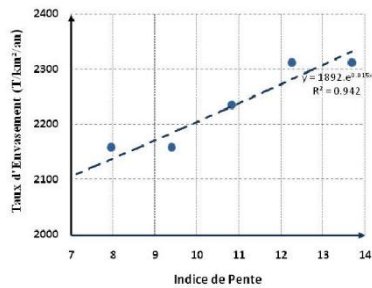


Figure 7: Effet de l'indice de végétale sur lê barrage Bou Hanifia.

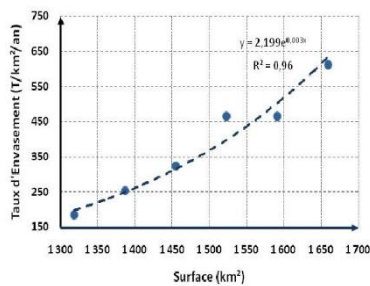


Figure 8: Effet de l'indice pente sur lê barrage Ain Dália.

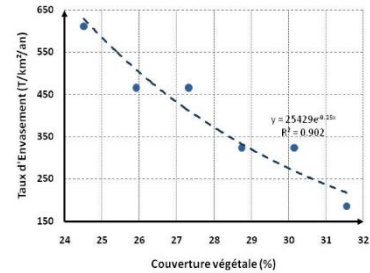


Figure 9: Effet de la couverture de surface sur lê barrage Fontaine dès Gazelles

On constate qu'en diminuant progressivement la pente du bassin versant Ain Dalia, de 4%, le taux d'envasement diminue de 2600 T/km<sup>2</sup>/an à 2100 T/km<sup>2</sup>/an, cette solution peut être assurée par des banquettes ou des murettes. Lorsqu'on diminue la surface du réservoir du barrage Fontaine des Gazelles, le taux d'envasement passe de 600 T/km<sup>2</sup>/an à 350 T/km<sup>2</sup>/an. Ceci peut être réalisé par la construction de retenues collinaires ou des ouvrages de capture de sédiments. La Figure (9), montre l'effet de l'amélioration du couvert végétal sur le barrage Bou Hanifia.

### Conclusion

Les réseaux neuronaux ont montré une performance exceptionnelle comme outils de régression, surtout pour les problèmes de classification et de reconnaissance des formes. Le modèle développé dans cette étude produit de très bons résultats. Les variables utilisées sont moins nombreuses, plus faciles à déterminer et leur estimation est moins subjective, ce qui donne à ce modèle une robustesse vis-à-vis des autres méthodes. Les résultats très encourageants nous ont poussés à proposer un programme futur qui fait intervenir les éléments suivants : améliorer les variables indépendantes et inclure d'autres en vue de cerner toutes les variables importantes qui affectent le phénomène complexe de l'érosion.

Enfin, il convient de souligner que la réussite de toute démarche intégrée pour le traitement des bassins versants, se traduira par des impacts positifs, d'ordre économique, social et écologique.

---

## Références

- Benblidia, M., Salem, A., et Demmak, A. (2001). *Extraction de sédiments dans les retenues. La houille blanche*, 6 (7), 76-78.
- Bouras, F. (2009). Envasement des barrages, une approche non paramétrique. Article soumis à sécurité et environnement (*Séminaire maghrébin Centre Universitaire de Souk-Ahras*).
- Lippmann, R-P. (1987). An introduction to computing with neural networks. *Speech and Signal Processing Magazine*, 4 (2), 4-22.
- Mahjoub, M. R., Bergaoui, M., Souissi, A., & Boufaroua, M. (2001). Régionalisation de l'envasement des lacs collinaires de la dorsale tunisienne. *Sud et Scie*