



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة باجي مختار - عنابة  
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA

FACULTÉ DES SCIENCES  
DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE

THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION D'UN DIPLÔME DE DOCTORAT  
EN

BIOLOGIE

SPECIALITE: PROTECTION, CONSERVATION ET VALORISATION DES  
RESSOURCES NATURELLES

Intitulé

**BILAN DES FLUX DE MATIÈRES PARTICULAIRES  
ET DISSOUTES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED  
K ÉBIR EST**

Présentée par : M<sup>lle</sup> AMAMRA Amina

**Membres de Jury:**

BENSLAMA Mohamed	Président	Professeur	Université Badji Mokhtar-Annaba
KHANCHOUK Kamel	Directeur de thèse	Professeur	Université Badji Mokhtar-Annaba
HADJ ZOBIR Soraya	Co-directrice	Professeur	Université Badji Mokhtar-Annaba
LAIFA Aziz	Examineur	Professeur	Université Badji Mokhtar-Annaba
KACHI Slimane	Examineur	Professeur	Université 8 Mai 1945-Guelma
LABAR Sofiane	Examineur	M.C.A	Université Chadli Bendjedid -El Tarf

Année universitaire: 2017 / 2018

## RÉSUMÉ

L'érosion hydrique est la source majeure de la dégradation des sols en zone méditerranéenne. Ce phénomène qui porte préjudice aux ressources en eau et en sol des bassins versants de l'Algérie dépend d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux. La complexité de sa modélisation nécessite d'importants jeux de données de référence, d'où l'accent mis dans ce travail sur les mesures de terrain et la modélisation dans l'un des bassins versants du Côtier Constantinois.

Ce travail, a pour objectifs : i) une étude physico-chimique menée durant la période 2015-2016 en vue d'estimer la qualité des eaux le long du cours de l'Oued Kébir Est et de son principal affluent (Oued Bougous), et au sein du barrage de Mexa. Un suivi de l'évolution spatiale des variables étudiées a été élaboré, en s'appuyant sur un monitoring analytique saisonnier de 3 stations réparties le long de l'Oued Kébir Est; ii) la quantification et modélisation de l'érosion hydrique et du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est d'une surface de 662,72 km<sup>2</sup>.

Les paramètres physico-chimiques sont analysés en utilisant la procédure standard de titrimétrie et un spectrophotomètre. Les valeurs observées de différents paramètres physiques et chimiques comme la température, le pH, la conductivité électrique, l'oxygène dissous, les ions chlorure, le calcium, le magnésium, le sulfate, le nitrite, le nitrate et l'ammonium ont également été réalisées. L'eau est échantillonnée sur trois sites d'étude avec quatre enquêtes en 2015 et 2016.

Entre autres, cette étude a introduit trois méthodes appliquées à une étude de cas pour estimer la dégradation spécifique en intégrant la méthode statistique dite courbe de transport solide, l'intelligence artificielle (RNA) avec le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool). L'utilisation de réseaux neuronaux de rétropropagation à action directe tels que Multicouche Perceptron et Levenberg Marquardt a été étudiée en appliquant des données sur les débits liquides et débits solides ainsi que des paramètres physiques. Par la suite, la structure optimale du modèle SWAT a été utilisée pour estimer les quantités de la charge solide annuelle et saisonnière transportées par l'oued au cours de la période 1979-2014. Les données climatiques obtenues à partir du modèle régional du SWAT ont été utilisées comme intrants du modèle SWAT calibré pour prédire les apports solides en suspension.

Les résultats montrent l'existence d'une variation saisonnière des concentrations des éléments physico-chimiques. En outre, il y a une eutrophisation causée principalement par les engrais chimiques utilisés pour l'agriculture. Les résultats actuels alertent les habitants en ce qui concerne l'eau d'irrigation et l'hygiène environnementale. Les paramètres utilisés peuvent également lors de la recherche en profondeur des causes de pollution et lors de la planification de mesures préventives à des fins de protection.

En outre, les résultats suggèrent que LM pourrait fournir les estimations les plus précises des débits solides, ( $R^2$  et EF de 0,94) comparé à SRC qui a des valeurs plus faibles de  $R^2$  et EF (0,89, 0,88), et qui entraînait des sous-estimations de ces débits solides (-15 %). La simulation du transport solide par le modèle SWAT a permis de projeter la prédiction jusqu'à l'année 2014 sans considérer l'envasement des trois barrages de la zone d'étude, avec un apport solide total de  $19,24 \times 10^6$  et une dégradation spécifique de 829,48 T/km<sup>2</sup>/an.

**Mots clés** : Analyse physico-chimique, modélisation, transport solide, Kébir Est, bassin versant.

## ABSTRACT

Water erosion is the major source of soil degradation in the Mediterranean area. This phenomenon, which can damage water and soil resources of Algeria's watersheds, depends on a multiplicity of interacting factors. The complexity of its modeling requires large sets of reference data, hence the emphasis in this work on field measurements and modeling in one of the Coastal watersheds of Constantine.

The objectives of this work are: i) a physicochemical study conducted during the 2015-2016 year-period to estimate the water quality along Wadi Eastern Kebir and its main tributary (Wadi Bougous), and within the Mexa dam. A follow-up of the spatial evolution of the studied variables was elaborated, relying on a seasonal analytical monitoring of 3 stations distributed along the Wadi Eastern Kebir; ii) the quantification and modeling of water erosion and sediment transport in the watershed area of Wadi Eastern Kebir having an area of 662,72 km<sup>2</sup>.

The Physicochemical parameters are analyzed using standard titrimetry procedure and spectrophotometer. The observed values of various physical and chemical parameters such as temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, chloride ions, calcium, magnesium, sulphate, nitrite, nitrate and ammonium have also been performed. Water is sampled at three study sites with four surveys in 2015 and 2016.

Moreover, this study has introduced three methods applied to a case study to estimate sediment yield by integrating the statistical method called the sediment rating curve, artificial intelligence (ANN) in association with the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool). The use of direct acting backpropagation neural networks such as Multilayer Perceptron and Levenberg Marquardt has been investigated by applying data on liquid and sediment discharges as well as physical parameters. Subsequently, the optimal structure of the SWAT model has been used to estimate the quantities of annual and seasonal sediment load carried by the wadi during the period 1979-2014. Climatic data obtained from the SWAT regional model have been used as inputs to the calibrated SWAT model to predict suspended sediment loads.

The results show the existence of a seasonal variation in the concentrations of physicochemical elements. In addition, there is eutrophication caused mainly by chemical fertilizers used for agriculture. Current results alert the inhabitant's sanitation of irrigation water and environmental hygiene. The used parameters can also when searching deeply for pollution causes and when planning preventive measures for protective purpose.

In addition, the results suggest that LM could provide the most accurate estimates of sediment discharges ( $R^2$  and EF of 0,94) compared to SRC which has lower values of  $R^2$  and EF (0,89, 0,88), leading to an underestimation of these sediment discharges (-15%). The simulation of sediment transport by the SWAT model has permitted to forecast sediment loads until the year 2014 without considering the siltation of the three dams in the study area, with a total sediment load of  $19,24 \times 10^6$  and sediment yield of 829,48 T/km<sup>2</sup>/year.

**Key words:** Physicochemical analysis, modeling, sediment transport, Eastern Kebir, watershed.

## ملخص

التعرية المائية هي المصدر الرئيسي في تدهور التربة في منطقة البحر الأبيض المتوسط وهذه الظاهرة التي تضر بالموارد المائية والتربة على مستوى الاحواض المائية في الجزائر التي تتوقف على تعدد العوامل المتفاعلة مع بعضها البعض، النمذجة تتطلب مجموعة هامة من البيانات المرجعية ومن ثم التركيز في هذا العمل على القياسات الميدانية والنمذجة في واحدة من الاحواض المائية في ا.س.ال. القسنطيني.

الغرض من هذا العمل هو: (1) دراسة فيزيوكيميائية أجري تلالال الفترة الزمنية 2115-6116 من أجل تقدير نوعية المياه على طول مجرى الوادي الكبير الشرقي وفروعه الرئيسية (واد بوقوس) وداخل سد ماكسه وقد وضعت متابعة لتطور المكاني للتغيرات المدروسة استنادا الى الرصد التحليلي الموسمي لثلاث محطات منتشرة على طول الوادي الكبير. (2) القياس الكمي ونمذجة إنجراف التربة بواسطة المياه والتنقلات الصلبة في الحوض الكبير الشرقي الذي تقدر مساحته  $662,72 \text{ كم}^2$ .

يتم تحليل المعايير الفيزيوكيميائية باستخدام الطريقة التيرمترية والفوتومتر الطيفي، القيم الملحوظة لمختلف المعايير الفيزيوكيميائية مثل درجة الحرارة، الاس الهيدروجيني، الموصلية الكهربائية، الأوكسجين الذائب، ايونات الكلوريد، الكلسيوم، المغنيزيوم، سلفات، نترات، نترت، أموني... وعينت المياه في ثلاث مواقع دراسية مع أربع دراسات استقصائية في 2115 و6116.

أدخلت هذه الدراسة ثلاث أساليب تطبق على دراسة حاله انفرادية لتقدير التدهورات النوعية عن طريق دمج الطريقة الإحصائية المعروفة باسم المنحنى لتنقلات الصلبة، والذكاء الاصطناعي (شبكة العصبية الاصطناعية) مع نموذج سوات (نموذج الموارد المائية). وقد تمت دراسة استخدام شبكة العصبية الاصطناعية الانتشار المباشر مثل تعدد طبقات برسبرتون ولفربيرق ماركارد من خلال تطبيق البيانات على التدفقات السائلة والتدفقات الصلبة وكذلك المعايير الفيزيائية. وبعد ذلك، استخدم الهيكل الأمثل لنموذج سوات لتقدير كميات الحمولة الصلبة السنوية والموسمية التي نقلها الوادي خلال الفترة 1997-4114. واستخدمت البيانات المناخية التي تم الحصول عليها من نموذج سوات كمدخلات لنموذج سوات معايير للتنبؤ.

وتبين النتائج وجود تباين موسمي في تركيز المعايير الفيزيوكيميائية. اضافة إلى ذلك، هناك تلوث ناجم أساسا عن الأسمدة الكيميائية المستخدمة في الزراعة. وتنبه النتائج الحالية السكان فيما يتعلق بمياه الري والصحة البيئية. ويمكن ان تكون العينات المستخدمة أيضا أثناء التحقيق الشامل في أسباب التلوث واثناء التخطيط للتدابير الوقائية لأغراض الحماية.

اضافه إلى ذلك، تشير النتائج إلى انه يمكن لـ (ل م) تقديم أدق تقديرات التدفقات الصلبة ( $R^2 = 0.94$ ) بالمقارنة مع س ر ب قيم أقل من ( $R^2 = 0.88, 0.89$ )، مما أدى إلى توقعات نسبية من هذه التدفقات الصلبة (-15%). محاكاة التنقلات الصلبة من قبل نموذج سوات يسمح لمشروع التنبؤ حتى عام 4114 دون النظر في السدود الثلاثة للمنطقة المدروسة، مع المدخلات الصلبة الإجمالية التي تقلباً بـ  $99.44 * 10^6$ ، وتدهور التربة محدد بـ  $849.48 \text{ طن / كم}^2 / \text{عام}$ .

**الكلمات المفتاحية:** التحليل الفيزيوكيميائي، النمذجة، التنقلات الصلبة، اللايلا الشرقي، الحوض المائي.

## **Remerciements**

*En tout premier lieu, je remercie **ALLAH** le Tout-Puissant de m'avoir donné la force et le courage pour dépasser toutes les difficultés afin de réaliser ce travail.*

*Cette thèse est le fruit d'une recherche de cinq ans qui n'aurait pu voir le jour sans le soutien infailible de mon directeur de thèse Professeur **KHANCHOUL Kamel**. Je le remercie chaleureusement de m'avoir fait confiance tout au long de mon parcours et d'avoir orienté mes recherches. Un grand merci également pour m'avoir donné l'opportunité et la chance de découvrir le terrain. Ce serait un plaisir de travailler de nouveau avec le Professeur **KHANCHOUL Kamel** dans le Futur.*

*Merci également à ma co-directrice de thèse professeur **HADJ ZOUBIR Soraya** pour son accompagnement scientifique et ses conseils tout au long des cinq années de thèse.*

*Mes vifs remerciements vont également au professeur **BENSLEMA Mohamed**, qui m'a fait l'honneur et l'incommensurable plaisir de présider mon jury de thèse.*

*Je remercie professeur **LAIFA Aziz**, professeur **KACHI Slimane**, **Dr. LABAR Sofiane** pour avoir accepté de rapporter ce manuscrit, et pour leur participation au jury de ma thèse. Merci pour leurs commentaires constructifs.*

*Un grand merci pour notre directeur de laboratoire Sols et Développement Durable professeur **BENSLEMA Mohamed**, qui a toujours mis à ma disposition toute la documentation dont j'ai eu besoin. Il a été toujours disponible quel que soit le moment, j'ai beaucoup appris au cours de ces cinq années et j'en suis reconnaissante.*

*Je remercie **Dr. SAYAD Lamine** du Département de Géologie, Faculté des Sciences de la Terre, Université **BADJI Mokhtar–Annaba** pour ses conseils et son aide précieuse.*

*Ma profonde gratitude pour madame **Sabine SAUVAGE** Ingénieur de Recherche au Laboratoire d'Ecologie Fonctionnelle (ECOLAB/ENSAT) de Toulouse et monsieur **José Miguel SANCHEZ-PEREZ** directeur de recherche au laboratoire ECOLAB/ENSAT de Toulouse d'avoir guidé la partie modélisation SWAT de mes travaux. J'ai passé d'agréables moments avec toute l'équipe dont les membres m'ont énormément soutenue durant mon séjour au laboratoire.*

*Merci aux divers organismes financeurs, sans qui cette thèse n'aurait pas été possible : Algérienne des Eaux-Annaba, Direction du Barrage de Mexa, El Taref, Direction du Barrage de Bougous, El-Taref.*

*Je tiens aussi à remercier toute l'équipe de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II Royaume du Maroc : Professeur **CHIKHAOUI Mohamed**; Professeur **NAIMI**; **PEPIN Yannick**, assistant ingénieur IRD; **RACLOT Damien**, chargé de recherche IRD, sans oublier les doctorantes : **CHOUKRI Fatiha** et **EZZAHOUANI Badiaa**.*

*Un grand merci à notre technicienne **BELGHIT Meriem** pour son aide précieuse au laboratoire.*

*Je remercie les doctorants qui m'ont aidée et encouragée au cours de ce travail. Ils sont nombreux : **BOUKHATEM Amel**, **BOULAKSAA Kawla**, **MORGHAD Faten**, **KAHIT Fatima Zahra**, **TOURKI Mahmoud**, **ZETTAM Amin**, **BOUGUERRA Hamza**, **BOUCHAHED Hamza**, **MAMI Amina**, **AISSAOUI Marwa**, etc...*

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

ADE : Algériennes des eaux

ANBT : Agence Nationale des Barrages et transferts

ANRH : Agence nationales des ressources hydrauliques

IBG : indice biologique global

INRA : Institut national de la recherche agronomique

MES : matières en suspension

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

RNA : Réseau de Neurone Artificiel

SWAT : Soil and Water Assessment Tool

## TABLE DES MATIÈRES

Résumé .....	i
Abstract .....	ii
ملخص .....	iii
Remerciements .....	iv
Liste des abréviations .....	vi
Table des matières .....	vii
Liste des figures .....	x
Liste des tableaux .....	xiv
Introduction générale .....	1

### Chapitre 1. Généralités sur les facteurs et processus de l'érosion du sol

Introduction .....	4
1. Notions sur l'érosion du sol .....	4
2. Erosion hydrique .....	5
3. Les processus de l'érosion hydrique .....	5
3.1. Le détachement .....	6
3.1.1. L'humectation par l'effet de l'impact de gouttes de pluies .....	6
3.1.1.1. L'éclatement .....	6
3.1.1.2. Le gonflement différentiel .....	6
3.1.1.3. La dispersion physico-chimique .....	7
3.1.1.4. La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie .....	7
3.1.2. Le ruissellement .....	9
3.2. Le transport .....	10
3.3. La sédimentation .....	10
4. Conséquences de l'érosion hydrique .....	11
4.1. Conséquences de l'érosion hydrique en zones érodées .....	11
4.2. Conséquences de l'érosion hydrique en zones de dépôts .....	12
5. Les différentes formes de l'érosion hydrique .....	13
5.1. L'érosion aréolaire (diffuse ou de surface) .....	13
5.1.1. L'érosion en nappe .....	13
5.1.2. Erosion en rigoles .....	14
5.1.3. Erosion linéaire .....	15
5.2. Erosion en masse .....	15
5.2.1. Les glissements de terrain .....	15
5.2.1.1. Les glissements lents .....	15
5.2.2. Les coulées boueuses .....	17
Conclusion .....	17

### Chapitre 2. Description physiographique du bassin versant de l'Oued Kébir Est

Introduction .....	18
1. Aperçu géographique .....	18
1.1. Le bassin versant de l'Oued El Kébir .....	18
2. Description physiographique .....	20

2.1. L'orographie .....	20
2.1.1. La zone des plaines.....	20
2.1.2. La zone des dunes.....	20
2.1.3. La zone des marécages et des lacs.....	20
2.1.4. La zone des collines.....	21
2.2. Les ensembles morpho structuraux .....	21
2.2.1. Les formations superficielles.....	22
2.2.2. Les affleurements triasiques .....	22
2.2.3. Les marnes et les calcaires .....	23
2.2.4. Les calcaires et les calcaires marneux .....	23
2.2.5. L'ensemble conglomératique .....	24
2.2.6. Les grès numidiens et argiles .....	24
2.3. Les Pentes .....	25
2.3.1. Les pentes de la classe 0 à 5 %.....	26
2.3.2. Les pentes de la classe 5 à 15 %.....	26
2.3.3. Les pentes des classes 15 - 25 % et 25 à 50 %.....	26
2.3.4. Les pentes supérieures à 50%.....	27
2.4. L'occupation du Sol.....	27
2.4.1. La forêt .....	28
2.4.2. Les maquis.....	29
2.4.3. Les cultures.....	30
2.5. Pédologie.....	30
2.5.1. Sols luvisols.....	30
2.5.2. Sols calcisols .....	30
2.5.3. Sols vertisols.....	31
3. Hydrographie.....	32
Conclusion.....	34

### **Chapitre 3. Caractéristiques hydro-climatiques**

Introduction .....	35
I. Analyse climatiques .....	35
1. Les caractéristiques climatiques.....	35
1.1. Répartition des stations pluviométrique dans la zone d'étude.....	35
2. Comblement des lacunes.....	36
3. Variabilité annuelle des précipitations .....	37
3.1. Coefficient pluviométrique.....	39
4. Variabilité mensuelle des précipitations.....	41
4.1. Etude du régime pluvial saisonnier.....	42
5. Répartition des pluies journalières .....	43
6. Diagrammes pluvio-thermiques .....	44
6.1. Température .....	44
II. Analyse hydrologique.....	47
7. Variabilité interannuelle de l'écoulement .....	47
7.1. Coefficient d'hydraulicité .....	48
8. Lambe d'eau écoulée .....	49
8.1. Coefficient de variation (Cv).....	49
9. Variation mensuelle de l'écoulement .....	50
9.1. Coefficient de variation (Cv).....	51
10. Coefficient mensuel des débits (CMD).....	52
11. Coefficient d'écoulement .....	52

12. Variabilité des débits moyens journalières.....	53
Conclusion.....	54

### **Chapitre 4. Caractéristiques physico-chimiques**

Introduction.....	56
1. Sources de pollution.....	56
2. Objectif de l'étude.....	57
3. Etude de la qualité des eaux de surfaces de l'Oued Kébir Est.....	57
4. Plan d'échantillonnage et choix des stations.....	58
5. Inventaire des points de prélèvement.....	59
5.1. Période de prélèvement.....	59
5.2. Echantillonnage.....	59
5.3. Le traitement des échantillons.....	60
5.4. Matériels et Méthodes d'analyses.....	60
6. Résultats et discussions.....	61
6.1. Les paramètres physico-chimiques (Mesure insitu).....	61
- Température(T °C).....	61
- Potentiel d'hydrogène (pH).....	62
- Oxygène dissous (O <sub>2</sub> %).....	63
- Conductivité électrique (CE µs/cm).....	63
6.2. Paramètres mesurés au laboratoire.....	64
- Chlorures (Cl <sup>-</sup> mg/l).....	64
- Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l).....	65
- Calcium (Ca <sup>2+</sup> mg/l).....	66
- Magnésium (Mg <sup>2+</sup> mg/l).....	67
- Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l).....	67
6.3. Les nutriments.....	68
- Nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l).....	68
- Nitrite (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> mg/l).....	69
- Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l).....	70
- Ortho-phosphate (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> mg/l).....	71
7. Qualité des eaux au cours de la période humide.....	71
8. Qualité des eaux en période sèche.....	75
9. Interprétation des résultats.....	79
9.1. Analyse physico-chimiques des eaux de surface des sites.....	79
9.2. Caractérisation physico-chimique des eaux du barrage de Mexa.....	80
Conclusion.....	81

### **Chapitre 5. Modélisation de transports solide en suspension**

Introduction.....	82
1. Matériels et méthodes de mesure des matières en suspension (période 1975/76-1998/99).....	82
2. Quantification des transports solides (période 1975/76-1998/99).....	83
2.1. Utilisation de la méthode de régression.....	83
2.1.1. Relation concentration (C) – débit (Q).....	84
2.1.2. Relation débit solide (Q <sub>s</sub> ) - débit liquide (Q).....	87
2.1.3. Discussion.....	89
2.1.3.1. Variation annuelle des débits solides.....	90

2.1.3.2. Variation mensuelles des charges solides.....	91
3. Estimation de la dégradation spécifique (période 1999/00-2013/14) .....	96
3.1. Utilisation de la méthode de régression multiple .....	96
4. Modélisation par la méthode des réseaux de neurones artificiels .....	101
4.1. Méthodologie .....	101
4.1.1. Disponibilité des bases de données .....	101
4.1.2. Les réseaux de neurones.....	102
4.1.3. Architecture du réseau de neurones.....	103
4.2. Résultats et discussion .....	106
Conclusion.....	112

## **Chapitre 6. Quantification de transport solide en utilisant le modèle SWAT**

Introduction .....	114
1. Matériels et méthodes de mesure des matières en suspension (période 1975/76-1998/99) .....	115
1.1. Le DEM (model numérique du terrain .....	115
1.2. Données météorologiques.....	115
1.3. Données cartographiques.....	117
2. Processus modélisés .....	117
2.1. Subdivision en sous-bassins .....	117
2.2. Unité de réponse hydrologique .....	119
3. Module hydrologique .....	120
4. Configuration du modèle .....	121
4.1. Simulation et calage du modèle.....	122
4.2. Variation saisonnière des apports solides .....	125
Conclusion.....	127
Conclusion générale .....	128
Recommandation.....	130
Références bibliographiques .....	131



## Liste des Figures

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre 1. Généralités sur les facteurs et processus de l'érosion du sol

<b>Figure 1.</b> Processus de l'érosion hydrique.....	6
<b>Figure 2.</b> Eclatement d'un agrégat .....	6
<b>Figure 3.</b> La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie .....	7
<b>Figure 4.</b> Diamètre des gouttes en fonction de vitesse de chute .....	8
<b>Figure 5.</b> Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau ou effet splash .....	8
<b>Figure 6.</b> Détachement par ruissellement .....	9
<b>Figure 7.</b> Modes de transport par ruissellement .....	10
<b>Figure 8.</b> Différents cas de manifestation de pertes du sol par ravinement .....	11
<b>Figure 9.</b> Dégradation de la structure du sol .....	12
<b>Figure 10.</b> Erosion des berges par les cours d'eau d'un cours d'eau .....	13
<b>Figure 11.</b> Erosion en nappe .....	14
<b>Figure 12.</b> Erosion en rigole .....	14
<b>Figure 13.</b> Erosion linéaire .....	15
<b>Figure 14.</b> Processus du sapement de berge et du glissement de terrain dans l'Oued Kébir Est .....	16

### Chapitre 2. Description physiographique du bassin versant de l'Oued Kébir Est

<b>Figure 15.</b> Situation géographique du bassin versant de l'Oued Kébir Est .....	18
<b>Figure 16.</b> Altimétrie et hydrographie du bassin versant étudié .....	19
<b>Figure 17.</b> Carte lithologique du bassin versant étudié .....	21
<b>Figure 18.</b> Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Kébir Est .....	25
<b>Figure 19.</b> Carte d'occupation du sol du bassin versant étudié .....	28
<b>Figure 20.</b> Carte pédologique (FAO) .....	31
<b>Figure 21.</b> Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Kébir Est .....	32

### Chapitre 3. Caractéristiques hydro-climatiques

<b>Figure 22.</b> Répartition des stations pluviométriques au niveau du bassin versant .....	36
<b>Figure 23.</b> Variations annuelles des précipitations des 3 stations pluviométriques .....	38
<b>Figure 24.</b> Variations annuelles des moyenne de précipitations aux stations .....	38
<b>Figure 25.</b> Variation du coefficient pluviométrique au niveau des stations pluviométriques .....	40
<b>Figure 26.</b> Variabilité mensuelle des précipitations dans les trois stations pluviométriques .....	41
<b>Figure 27.</b> Variabilité moyenne mensuelle des précipitations .....	42
<b>Figure 28.</b> Représentation du régime saisonnier des précipitations .....	42
<b>Figure 29.</b> Répartition mensuelle des coefficients de variation .....	43
<b>Figure 30.</b> Diagrammes pluvio-thermiques .....	46
<b>Figure 31.</b> Evolution annuelle des débits liquides .....	47
<b>Figure 32.</b> Représentation de la variation du coefficient d'hydraulicité .....	48
<b>Figure 33.</b> Représentation des valeurs du coefficient de variation .....	50

<b>Figure 34.</b> Evolution mensuelle des débits.....	51
<b>Figure 35.</b> Valeurs du coefficient de variation à l'échelle mensuel.....	51
<b>Figure 36.</b> Représentation de la variation du coefficient mensuel des débits.....	52
<b>Figure 37.</b> Variation du coefficient d'écoulement à l'échelle mensuelle.....	53

#### **Chapitre 4. Caractéristiques physico-chimiques**

<b>Figure 38.</b> Source de pollution pour les cours d'eau.....	57
<b>Figure 39.</b> Présentation des sites d'échantillonnages.....	59
<b>Figure 40.</b> Variation de la température de l'eau pendant les deux périodes d'étude.....	62
<b>Figure 41.</b> Variation de pH de l'eau pendant les deux périodes d'étude.....	62
<b>Figure 42.</b> Variation du taux de l'oxygène dissous en fonction des sites d'étude et du temps.....	63
<b>Figure 43.</b> Variation de la conductivité de l'eau pendant les deux périodes d'études.....	64
<b>Figure 44.</b> Variation de la teneur en chlorure.....	65
<b>Figure 45.</b> Variation du taux de Bicarbonate des échantillons d'eaux étudiés.....	66
<b>Figure 46.</b> Variation du taux de calcium des échantillons d'eaux étudiés.....	66
<b>Figure 47.</b> Variation du taux de Magnésium des échantillons d'eaux étudiés.....	67
<b>Figure 48.</b> Evolution spatio-temporelle du taux des sulfates.....	68
<b>Figure 49.</b> Variation spatio-temporelle de la teneur en nitrate des échantillons étudiés.....	69
<b>Figure 50.</b> Evolution spatio-temporelle de la teneur en nitrite.....	70
<b>Figure 51.</b> Variation du taux d'ammonium des échantillons d'eaux étudiés.....	70
<b>Figure 52.</b> Variation de la teneur en ortho-phosphate des échantillons d'eaux étudiés.....	71
<b>Figure 53.</b> Carte de qualité minérale de la région d'étude (période humide).....	72
<b>Figure 54.</b> Carte de qualité organique de la région d'étude (période humide).....	72
<b>Figure 55.</b> Carte pour signaler le problème du phosphore dans la région (période humide).....	73
<b>Figure 56.</b> Carte pour signaler le problème d'ammonium dans la région (période humide).....	74
<b>Figure 57.</b> Carte pour signaler le problème de nitrite dans la région (période humide).....	74
<b>Figure 58.</b> Carte pour signaler le problème de nitrate dans la région (période humide).....	75
<b>Figure 59.</b> Carte de qualité minérale de la région d'étude (période sèche).....	76
<b>Figure 60.</b> Carte de qualité organique de la région d'étude.....	76
<b>Figure 61.</b> Carte pour signaler le problème du phosphore dans la région (période sèche).....	77
<b>Figure 62.</b> Carte pour signaler le problème d'ammonium dans la région (période sèche).....	78
<b>Figure 63.</b> Carte pour signaler le problème de nitrite dans la région (période sèche).....	78
<b>Figure 64.</b> Carte pour signaler le problème de nitrate dans la région (période sèche).....	79

#### **Chapitre 5. Modélisation de transport solide en suspension**

<b>Figure 65.</b> Représentation graphique des débits et des concentrations sous forme de courbes (à gauche) et de relations non linéaires (à droite).....	84
<b>Figure 66.</b> Relation concentration-débit des données journalières.....	85
<b>Figure 67.</b> Relation entre les concentrations moyennes des MES et les débits moyens en utilisant la méthode des classes des débits.....	87
<b>Figure 68.</b> Courbe de transport solide Q versus Qs.....	88
<b>Figure 69.</b> Relation entre les débits solide et les débits liquides journaliers en utilisant la méthode des classes des débits.....	89
<b>Figure 70.</b> Evolution annuelle des transports solides (As), des ruissellements (E) et des précipitations (P).....	91

<b>Figure 71.</b> Crue du 17-22 Novembre 1976.....	92
<b>Figure 72.</b> Crue du 29/12/1984 au 5 /01/ 1985.....	94
<b>Figure73.</b> Représentation des crues du 21-22/04/1977 (à gauche) et 31/03/-2/04/1983 (à droite).....	96
<b>Figure 74.</b> Sapement de berge et glissement de terrain au niveau de l'Oued Bougous.....	100
<b>Figure75.</b> Meilleures courbes de performance de la méthode LM.....	109
<b>Figure 76.</b> Représentation du nuage de points des débits solides observés et estimés dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est.....	110
<b>Figure 77.</b> Variation des débits solides observés et estimés dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est.....	110
<b>Figure 78.</b> Variation saisonnière de la charge solide en suspension dans le bassin versant étudié.....	111

## **Chapitre 6. Quantification de transport solide en utilisant le modèle SWAT**

<b>Figure 79.</b> Modèle numérique de terrain.....	115
<b>Figure 80.</b> Cartes des pentes, occupation du sol, Altitude, pédologie recalculées suivant la nomenclature de SWAT 2009.....	117
<b>Figure 81.</b> Délimitation et subdivision du bassin versant de l'Oued Kébir Est en sous-bassins versants.....	118
<b>Figure 82.</b> Principe de délimitation des Unités des Réponse Hydrologique (URH) (Grusson, 2016).....	119
<b>Figure 83.</b> Composante hydrologique de modèle SWAT.....	120
<b>Figure 84.</b> Apports solides observés et simulés dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est, période août 1999 à juillet 2014.....	122
<b>Figure 85.</b> Apports solides observés et simulés dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est, période août 1999 à juillet 2014.....	124
<b>Figure 86.</b> Répartition spatiale des transports solides en suspension annuels selon les sous-bassins.....	125
<b>Figure 87.</b> Répartition spatiale saisonnière des transports solides en suspension des sous-bassins selon : A: Automne, B: Hiver, C: Printemps, D: Eté.....	126



## **Liste des Tableaux**

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre 2. Description physiographique du bassin versant de l'Oued Kébir Est

<b>Tableau 1.</b> Répartition des formations lithologiques du bassin versant étudié .....	22
<b>Tableau 2.</b> Répartition des classes des pentes dans le bassin versant étudié.....	26
<b>Tableau 3.</b> Répartition de la couverture végétale dans le bassin versant étudié.....	29
<b>Tableau 4.</b> Les principales cultures rencontrées dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est.....	30
<b>Tableau 5.</b> Répartition de la couverture végétale dans le bassin versant étudié.....	31

### Chapitre 3. Caractéristiques hydro-climatiques

<b>Tableau 6.</b> Coordonnées géographiques des stations pluviométriques utilisées .....	35
<b>Tableau 7.</b> Précipitations moyennes annuelles des trois stations pluviométriques .....	37
<b>Tableau 8.</b> Représentation du nombre d'années humides et sèches au niveau des trois stations.....	39
<b>Tableau 9.</b> Classes des pluies journalières pour les trois stations .....	43
<b>Tableau 10.</b> Température moyennes mensuelles au niveau des 3 stations.....	44
<b>Tableau 11.</b> Classification des débits journaliers .....	54

### Chapitre 4. Caractéristiques physico-chimiques

<b>Tableau 12.</b> Données GPS des sites d'échantillonnage.....	58
<b>Tableau 13.</b> Classes de minéralisation d'après la conductivité .....	64
<b>Tableau 14.</b> Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009).....	72
<b>Tableau 15.</b> Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009). Grille utilisée pour signaler les problèmes du phosphore.....	73
<b>Tableau 16.</b> Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009). Grille utilisée pour signaler les problèmes de l'azote.....	73
<b>Tableau 17.</b> Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009).....	75
<b>Tableau 18.</b> Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009). Grille utilisée pour signaler les problèmes du phosphore.....	77
<b>Tableau 19.</b> Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009). Grille utilisée pour signaler les problèmes de l'azote.....	77
<b>Tableau 20.</b> Teneur des éléments physico-chimiques durant la période sèche et humide .....	80

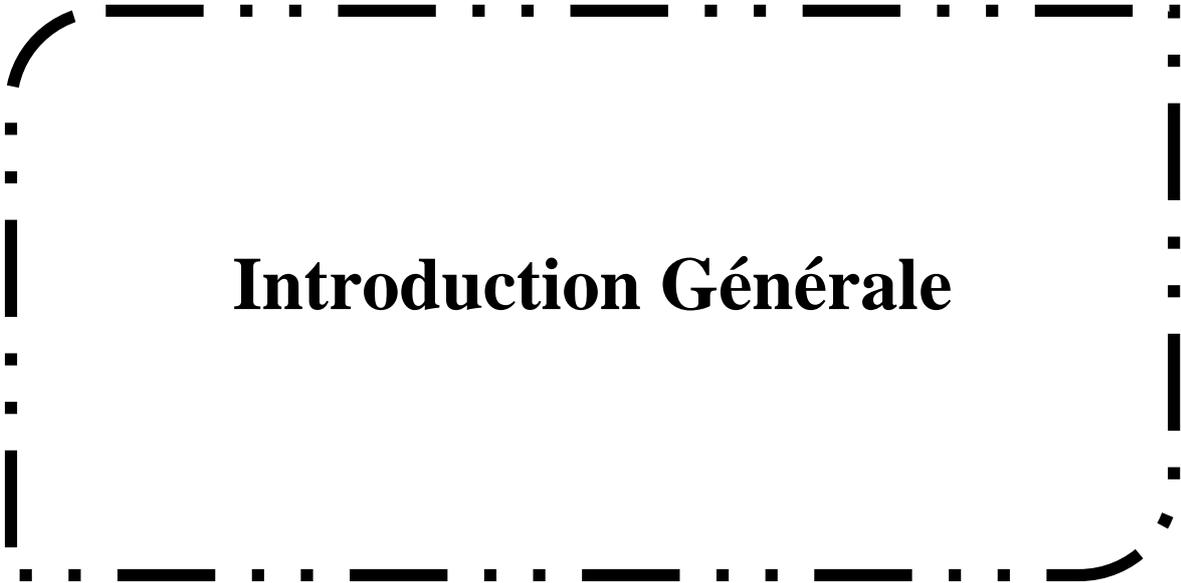
### Chapitre 5. Modélisation de transport solide en suspension

<b>Tableau 21.</b> Comparaison des courbes de transports solide des apports estimés avec les apports calculés issus des concentrations mesurées.....	90
<b>Tableau 22.</b> Variations mensuelles des précipitations, coefficients d'écoulement, concentrations et des apports solides dans le bassin versant étudié.....	93

<b>Tableau 23.</b> Représentation de quelques crues importantes dans les oueds étudiés.....	95
<b>Tableau 24.</b> Coefficient d'érodabilité des roches ( $K_{ER}$ ) pour les différentes formations lithologiques	97
<b>Tableau 25.</b> Coefficient d'érodabilité des roches ( $K_{ER}$ ) du bassin versant au barrage de Mexa.....	99
<b>Tableau 26.</b> Performance statistique des modèles RNA pour la prédiction des débits solides .....	108

## **Chapitre 6. Quantification de transport solide en utilisant le modèle SWAT**

<b>Tableau 27.</b> Format des données d'entrée pour les précipitations .....	116
<b>Tableau 28.</b> Format des données d'entrée pour les températures (3 champs) .....	116
<b>Tableau 29.</b> Format des données d'entrée pour la radiation solaire (2 champs).....	116
<b>Tableau 30.</b> Table de localisation spatiale de la station des précipitations .....	116
<b>Tableau 31.</b> Valeurs des paramètres calés dans SWAT (SWAT calibration technique).....	123



# **Introduction Générale**

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

L'eau est l'élément constitutif le plus important à la surface de la terre. Elle se présente sous des formes différentes dans toutes les composantes de l'espace terrestre : lithosphère, hydrosphère, atmosphère, biosphère. Mais c'est bien sur l'hydrosphère qui constitue le réceptacle principal de l'eau, elle-même étant composée de différents réservoirs tels que les océans, les calottes glacières, les lacs et rivières, nappes souterraines, etc... L'eau circule entre ces différents réservoirs de l'hydrosphère sous forme de nuages et des pluies (Baechler, 2017).

Les matières particulières transférées entre le continent et l'océan sont pour l'essentiel le résultat du transport par les fleuves et reflètent les processus d'érosion « naturels modifiés » par la pression anthropique à l'échelle des bassins versants (Meybeck, 1988). En effet, la quantité et la qualité des matières arrachées transportées dans le sens de la pente ouvre la voie à l'intervention du ruissellement.

Les processus d'érosion, et de transport des matières en suspension (MES) sont des composants clés pour la compréhension des phénomènes et des mesures du fonctionnement du système Terre. L'érosion et les processus de redistribution de MES conditionnent les principaux événements de développement du paysage et jouent un rôle important dans le développement de sol (Oeurng, 2010).

Le transport des matières en suspension (MES) dans les cours d'eau accélère la sédimentation dans des réservoirs, et provoque des problèmes pour le développement de la ressource en eau, des impacts défavorables sur des habitats aquatiques et des écosystèmes. La quantification des flux des matières en suspension (MES) peut donner des informations sur la quantité de sols érodés dans le bassin, ainsi la quantité des polluants dans le cours d'eau.

Plusieurs études ont été faites dont un grand nombre de chercheurs ont tenté d'expliquer les mécanismes complexes du transport solide et de quantifier les volumes des sédiments transportés dans ce contexte, on note les travaux de Meddi (1999, 2004), Terfous (2001, 2003), Ghenim (2001), Benkhaled et Remini (2003), Bouanani (2004), Khanchoul (2006), qui ont quantifié le transport solide et ont expliqué l'érosion hydrique dans les bassins versants algériens.

Ces travaux ont montré que la matière fine transportée en suspension a pu être quantifiée et évacuées vers l'exutoire. Ainsi, ils présentent des informations intéressantes sur les flux hydro-sédimentaires transportés par les cours d'eau des bassins versant.

Presque les seuls travaux qui ont abordé les transport des sédiment dans le Nord-Est algérien sont ceux Demmak (1982), Ghachi (1982), Bourouba (2003), Khanchoul (2006), (Khanchoul *et al.*, 2008, 2009, 2012). Ils ont traité le phénomène de l'érosion et des transports solides dans plusieurs bassins versants dont ceux des oueds Kébir Ouest, Kébir Est, Ressoul, Bouhamdane et Mellah (période 1972/73-1998/99 et 2012).

A présent, très peu d'études ont été réalisées pour comprendre le taux de la matière fine transportée en suspension MES (particulaire et dissous). Les sédiments transportés dépendent aussi bien des contraintes climatiques, topographique, lithologique, pédologique que des contraintes édaphiques. Le manque des données aussi constitue un handicap majeur dans l'évaluation et la prévision des charges solides (Khanchoul, 2006). Les mesures sur le terrain et les échantillonnages sont généralement des actions difficiles, rarement achevées sur une longue période dans les bassins versants.

Les modèles jouent un rôle essentiel pour caractériser sur le long terme les flux de MES et le transport solide sur les bassins versants. Beaucoup de modèles ont été développés tels que les modèles statistiques, empiriques, conceptuels et déterministes, afin de résoudre le problème de l'érosion hydrique (Oeurng, 2010).

Le travail de thèse présent dans ce document traite des données acquises à l'échelle d'un bassin versant. Le cas d'étude choisi se situe dans le Nord de l'Afrique (extrême Nord-Est d'Algérie) et ce afin de répondre aux deux grands objectifs cités ci-dessous :

- Quelle sont les dynamiques de transport et les facteurs influençant le transport des matières en suspension (MES) et dissoutes à l'échelle du bassin versant ?
- Quelles sont les caractéristiques physico-chimiques des eaux courantes du bassin versant?
- Comment fournir une meilleure estimation des apports solides sur le long-terme par l'approche de la modélisation.

Cela passe alors par :

- Le traitement et analyse des facteurs de l'érosion à savoir la lithologie, topographie, occupation des sols et les paramètres hydro-climatiques.
- Le traitement et analyse statistique des données hydrométriques (débit liquide et concentration des sédiments en suspension), pour cela les données des prélèvements instantanés et journaliers effectués par l'Agence Nationales des Ressources Hydrauliques (ANRH) entre 1979 et 1999 à la station hydrométrique située à l'aval du barrage ont été exploitées.
- L'estimation de la dégradation spécifique des sols et de la charge solide transportée par les cours d'eau vers le barrage en utilisant un modèle basé sur un modèle stochastique basé sur la méthode du réseau de neurone artificiel (RNA).

La thèse comprend 01 Publication indexée dans la base de donnée SCOPUS, avec l'intitulé: **Suspended sediment estimation using regression and artificial neural network models Kebir watershed, Northeast of Algeria, North Africa.**

Les chapitres que comprend la thèse sont :

- Le premier chapitre de cette étude présente des généralités sur les facteurs et processus de l'érosion.
- Le second chapitre consiste en une description des caractéristiques physiques du bassin versant étudié, à savoir le relief, les roches et les formations superficielles, l'occupation des sols et la nature des sols.
- Dans le troisième chapitre, nous procédons à une étude des paramètres hydro-climatiques qui sont aussi un outil indispensable à la compréhension du phénomène hydro-sédimentaire. Les processus et les facteurs intervenant dans la formation des écoulements et la quantification de leurs rôles respectifs y sont mis en évidence.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse physico-chimique des eaux courantes du bassin versant de l'Oued Kébir Est.
- Le cinquième chapitre s'attache à quantifier le transport solide par la méthode statistique et la méthode stochastique (réseau de neurone artificiel).
- Enfin le sixième chapitre sera consacré à l'estimation de la dégradation des sols par le biais du modèle SWAT.

**Chapitre 1 :**  
**Généralités sur les facteurs et processus**  
**de l'érosion du sol.**

## **Introduction**

Les processus d'érosion, le transport des matériaux jouent un rôle important dans le fonctionnement du système terrestre. Les sédiments qui arrivent aux cours d'eau sont produits dans le bassin versant par les agents naturels et par les processus chimiques qui dégradent les roches et les transforment en sols. En même temps, le type de climat, les précipitations, la topographie et la couverture végétale agissent sur les sols provoquant le déplacement de leur couche superficielle et causant une diminution des niveaux des terrains.

Le phénomène de l'érosion hydrique commence avec l'impact de la goutte de pluie initiale. Des particules minérales ou des fragments de roches se détachent et sont déplacés à courte distance, quelques-uns sont entraînés par l'eau de ruissellement et transportés plus loin (Sundborg, 1986).

L'existence de sédiments dans les cours d'eau crée un environnement défavorable aux poissons, détruit l'équilibre écologique et provoque la mort de plusieurs espèces aquatiques puisqu'ils peuvent être chargés en éléments chimiques de haute toxicité (Borges, 1993). Les sédiments causent la pollution des eaux, réduisent leur potabilité, provoquent la sédimentation des canaux d'irrigation et de navigation et diminuent la vie utile des ouvrages hydrauliques (étangs, réservoirs).

### **1. Notion sur l'érosion du sol**

Le mot érosion vient de « erodere », verbe latin qui signifie « ronger ». L'érosion ronge la terre et transporte le sol. Selon Foucault et Raoult (1995) on la définit comme « l'ensemble des phénomènes externes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, enlèvent tout ou une partie des terrains existants et modifient ainsi le relief ». C'est un processus naturel qui cherche à aplanir le relief, il abaisse les montagnes tout en engraisant les vallées et forme les riches plaines qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. Il n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable, tolérable (Roose, 1994).

Nous nous intéressons dans cette étude plus particulièrement à l'érosion hydrique, qui est un phénomène largement répandu et dont les conséquences peuvent entraîner des pertes de terres irréversibles et une diminution des capacités de stockage des barrages.

## **2. Erosion hydrique**

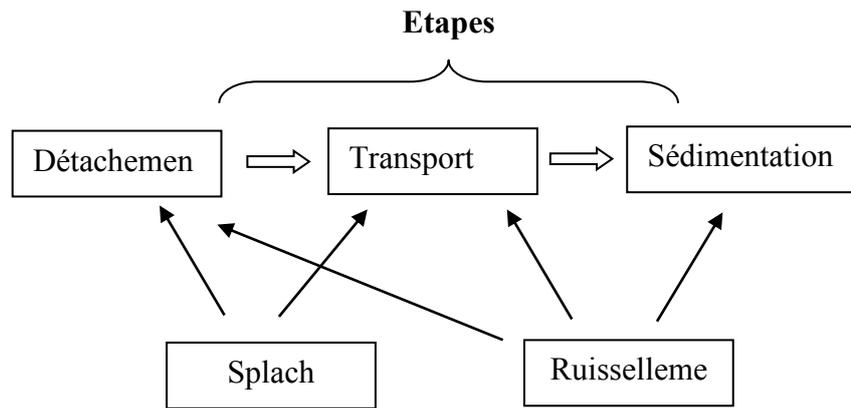
L'érosion hydrique est un phénomène naturel essentiel de l'évolution des paysages et de la modification du relief terrestre. Elle correspond à un déplacement de matière sous l'action de l'eau. Principalement dans l'extrême Nord Est Algérien, l'observation sur le terrain et la recherche de divers documents et les différentes mesures nous seront utiles pour déterminer les processus de l'érosion (Cheggour, 2008).

Les flux de matière générés sont transférés sur la surface continentale et conduisent à l'arasement des zones montagneuses et à la formation de riches plaines alluviales. À l'amont l'érosion entraîne une dégradation et une perte du potentiel de production des sols : création de ravines qui font obstacle au travail du sol, perte nette d'éléments nutritifs et diminution de l'épaisseur du sol. À l'aval, les dégâts sont d'ordre environnemental avec des inondations boueuses parfois violentes, des atterrissements sur les voiries et l'arrivée d'une eau turbide contenant phytosanitaires et nutriments dans le système aquatique et les réservoirs d'eau (Leguédois, 2003).

L'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion de versant en nappe ou en rigoles et l'érosion linéaire ou ravinaire. Les principaux facteurs sont : la pluie, la végétation, le sol, la géomorphologie (pentes en particulier) et les impacts de l'utilisation des sols par l'homme (Cheggour, 2008).

## **3. Les processus de l'érosion hydrique**

L'érosion hydrique est un phénomène complexe, qui menace particulièrement les potentialités en eau et en sol. Elle se définit comme le détachement et le transport de particules de sol de son emplacement d'origine par différents agents vers un lieu de dépôt (Roose, 1994). Donc, les trois étapes par lesquelles passe l'érosion sont le détachement, le transport et la sédimentation. Cependant, il est à signaler que la pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine du détachement, du transport et du dépôt des particules du sol arrachées comme schématisé dans la figure 1 (Dahmani, 2012).



**Figure 1.** Processus de l'érosion hydrique (Smiri, 2010).

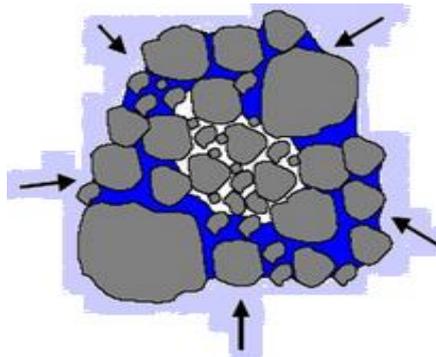
### 3.1. Le détachement

Les principaux mécanismes conduisant au détachement sont (Le bissonnais *et al.*, 1995):

#### 3.1.1. L'humectation par l'effet de l'impact de gouttes de pluies

Les quatre processus qui peuvent être identifiés comme responsables de la désagrégation sont :

**3.1.1.1. L'éclatement** : correspondant à la désagrégation par compression de l'air piégé lors de l'humectation. L'intensité de l'éclatement dépend entre autres, du volume d'air piégé, donc de la teneur en eau initiale des agrégats et de leur porosité (Figure 2).

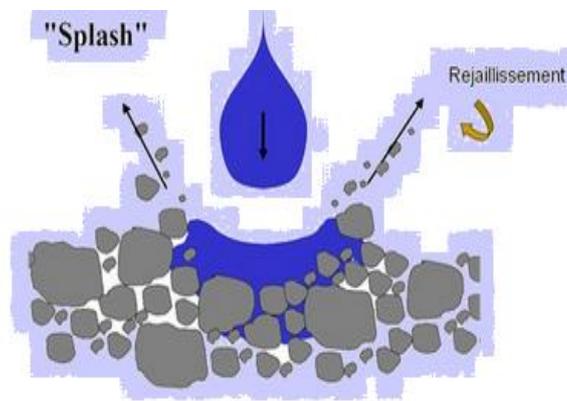


**Figure 2.** Eclatement d'un agrégat (Smiri, 2010).

**3.1.1.2. Le gonflement différentiel** : Ce phénomène intervient suite à l'humectation et la dessiccation des argiles, entraînant des fissurations dans les agrégats. L'importance de ce mécanisme dépend en grande partie de la teneur et de la nature de l'argile des sols.

**3.1.1.3. La dispersion physico-chimique :** Elle correspond à la réduction des forces d'attraction entre particules colloïdales lors de l'humectation. Elle dépend de la taille et la valeur des cations (particulièrement du sodium) pouvant lier les charges négatives dans le sol.

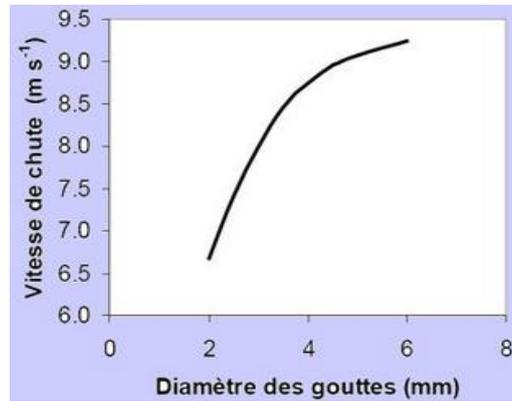
**3.1.1.4. La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie :** (détachement par splash), c'est l'impact des gouttes de pluie qui peut fragmenter les agrégats et surtout détacher les particules de leur surface. Ce mécanisme intervient en général conjointement aux autres mécanismes cités précédemment et nécessite une pluie d'une certaine énergie qui est variable selon les sols. L'énergie cinétique des gouttes n'est plus absorbée mais elle est transformée en force de cisaillement qui provoque le détachement et le splash (Figure 3).



**Figure 3.** La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie (Smiri, 2010).

Cette action combinée de détachement et déplacement par splash des gouttes d'eau est probablement la raison pour laquelle on l'a souvent considéré comme le seul processus à l'origine de la battance et de l'érosion. Cependant, il ne faut pas forcément assimiler splash et dégradation structurale car le splash peut dans certains cas déplacer des agrégats sans qu'aucune désagrégation n'intervienne. Les particules détachées par les gouttes de pluie sont généralement des micro-agrégats ou des particules élémentaires  $< 100 \mu\text{m}$ .

La taille et l'impact des gouttes sont des facteurs importants dans ce processus de destruction et d'arrachement (éclaboussement par l'effet du splash) (Figure 4).



**Figure 4.** Diamètre des gouttes en fonction de vitesse de chute (Smiri, 2010).

L'énergie d'une seule goutte de pluie cause une érosion par éclaboussement ou rejaillissement qui peut déplacer les particules sur quelques dizaines de cm, sans oublier la distance dépendant de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluies par rapport à la surface (Figure 5). La masse de sol détachée peut être de l'ordre de plusieurs dizaines de tonnes par hectare et par an.



**Figure 5.** Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau ou effet du splash (Smiri, 2010).

L'énergie cinétique des gouttes qui tombent est généralement utilisée comme paramètre pour déterminer le pouvoir érosif des pluies. Cette énergie cinétique peut être très élevée dans les régions humides ou semi-arides. En Afrique, par exemple, elle peut être deux à six fois plus importante que dans les zones tempérées.

Les particules de sol très fines qui sont détachées de la surface par l'impact des gouttes sont piégées entre les éléments plus grossiers et peuvent obstruer les pores de la couche supérieure du sol et réduire considérablement le taux d'infiltration (battance). Cette obstruction augmente les risques d'érosion et de ruissellement en surface.

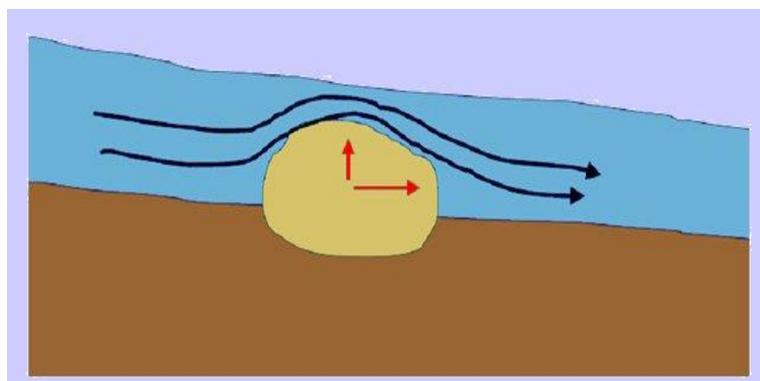
Les sols limoneux sont particulièrement touchés par ce phénomène. La croûte de battance ainsi formée s'épaissit dans les petites dépressions où l'eau stagne, permettant la sédimentation des éléments fins. La perméabilité de la surface peut descendre en dessous de 2 mm/h en période humide. Le micro relief s'estompe et le sol perd toute capacité de rétention d'eau superficielle. Lorsque la croûte de battance est formée, les pluies ultérieures, même si elles sont de faible intensité, engendreront du ruissellement (Benkhadra, 1997).

### 3.1.2. Le ruissellement

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation) (Chebbani *et al.*, 1999).

Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux. Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace pouvant donner naissance soit une érosion diffuse et /ou soit une érosion concentrée.

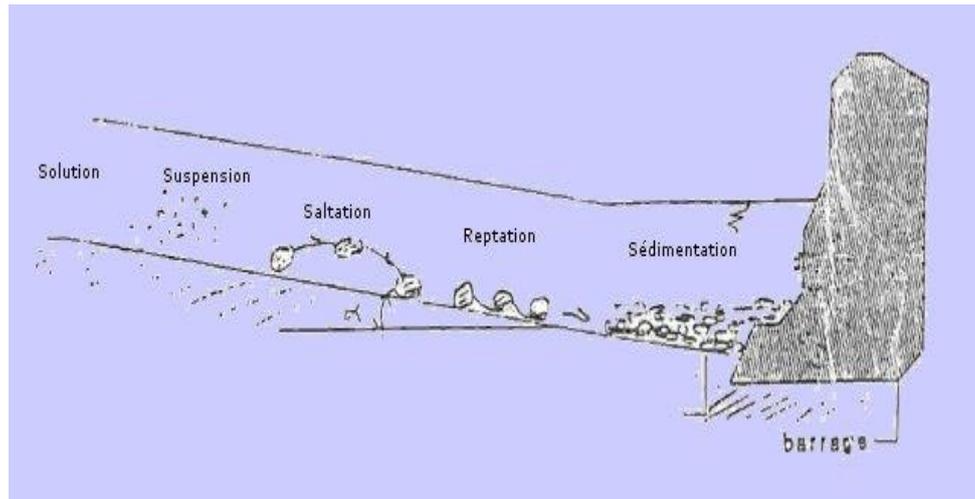
Il est donc à noter qu'il y a détachement par ruissellement lorsque la force de friction de l'eau sur les particules du sol est supérieure à la résistance du sol au cisaillement comme schématisé sur le graphique suivant (Smiri, 2010) :



**Figure 6.** Détachement par ruissellement (Smiri, 2010).

### 3.2. Le transport

Il est dû à la fois aux gouttes d'eau de pluie (par rejaillissement = effet splash) et aux eaux de ruissellement. Ainsi, le transport est assuré par ces eaux. Cependant, il est à signaler que le mode de transport par l'effet du splash est généralement négligeable sauf sur pente forte (Vanoni, 1977). Alors que les eaux de ruissellement sont les plus responsables du transport des particules du sol détachées. Les modes de transport par ruissellement sont illustrés dans la figure 7.



**Figure 7.** Modes de transport par ruissellement (Zaher, 2010).

### 3.3. La sédimentation

L'agent responsable de la sédimentation est l'eau de ruissellement. Les particules arrachées du sol se déposent entre le lieu d'origine et l'aval en fonction :

- 1- de leur dimension,
- 2- de leur densité,
- 3- de la capacité de transport du ruissellement ou du cours d'eau.

Les particules se déposent dans l'ordre suivant :

- 1- sable grossier,
- 2- sable fin,
- 3- limon.

Les argiles et l'humus colloïdal sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où ils se déposent soit après évaporation de l'eau, soit après floculation (Zaher, 2010).

## 4. Conséquences de l'érosion hydrique

### 4.1. Conséquences de l'érosion hydrique en zones érodées

Tous les sols sont naturellement soumis à l'érosion. En agriculture, l'érosion du sol renvoie à l'amincissement de la couche arable d'un champ sous l'effet des forces érosives naturelles de l'eau et du vent, ou sous l'effet des activités agricoles, comme le travail du sol.

La cause de l'érosion par l'eau ou le travail du sol, dans tous les cas, le sol : se détache, se déplace, puis se dépose. La couche arable, fertile, vivante et riche en matière organique, est emportée ailleurs sur le terrain, où elle s'accumule avec le temps, ou hors du terrain, dans les réseaux de drainage. L'érosion du sol abaisse la productivité de la terre et contribue à la pollution des cours d'eau, des terres humides et des lacs adjacents (Smiri, 2010).

Il s'agit des pertes en terre et en éléments nutritifs : les griffes, fines rigoles formées par l'eau, particulièrement en haut des pentes, sur le bord des pistes ou dans les champs sillonnés par les labours (Figure 8). Elles deviennent des ravines dû à la concentration de ruissellement excessif, pertes d'engrais et de matière organique, destruction de la structure du sol, réduction de la profondeur du sol (Figure 9).



**Photo 1.** Transport solide en suspension suite au décapage de la surface du sol.



**Photo 2.** Formation de rigoles.

**Figure 8.** Différents cas de manifestation des pertes du sol par ravinement dans le bassin de l'Oued Bougous.



**Figure 9.** Dégradation de la structure du sol (Smiri, 2010).

L'érosion des rives entraîne non seulement le recul des rives des cours d'eau, menaçant ainsi la disparition d'habitats fauniques, mais également une augmentation de la charge particulaire des eaux du fleuve. Une fois arrachées, les matières particulaires sont transportées dans les cours d'eau, parfois sur de longues distances et se déposent sur le lit pour former des sédiments jusque dans l'estuaire. De plus, si elles sont contaminées, elles contribuent à la contamination du milieu récepteur en aval.

#### **4.2. Conséquences de l'érosion hydrique en zones de dépôts**

Il s'agit de charger les rivières matières en suspension. L'augmentation de la turbidité des eaux modifie l'équilibre trophique. L'entraînement des particules de sols dans les eaux superficielles s'accompagne également de celui des intrants agricoles (engrais, pesticides) et des polluants d'origine industrielle, urbaine et routière.

En ce qui concerne l'eutrophisation des eaux de surface, l'apport important de sédiments dans les eaux de ruissellement a pour effets biologiques et physiques néfastes sur la qualité de l'eau. Ces apports peuvent inclure des éléments azotés et phosphatés et même des métaux lourds capables d'être également transportés. La qualité de l'eau est détériorée par eutrophisation à cause du réchauffement de la température de l'eau et l'intensification du développement d'algues et de bactéries causant le vieillissement prématuré des eaux des exutoires et, par le fait même, une perte de la biodiversité.

## 5. Les différentes formes de l'érosion hydrique

### 5.1. L'érosion aréolaire (diffuse ou de surface)

Elle dépend des caractéristiques du sol (granulométrie, humidité, teneur en matières organiques) et des caractéristiques de surface (inclinaison, longueur et forme de la pente, rugosité, couvert végétale). L'érosion aréolaire regroupe l'érosion en nappe et l'érosion en rigoles (Elahcen, 2013).

#### 5.1.1. L'érosion en nappe

Le processus de l'érosion en nappe dépend de l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement. Ensuite, elle dépend de l'énergie cinétique des pluies, c'est-à-dire l'impact des gouttes qui arrachent les particules. En effet, la battance des gouttes de pluie va envoyer des gouttelettes dans toutes les directions, de plus, elle dépend de la durée des pluies et/ou l'humidité avant les pluies (Zaher, 2010).

Ce type d'érosion entraîne des conséquences morphologiques et pédologiques fâcheuses suite à un décapage de l'horizon superficiel diminuant un décapage de l'horizon superficiel diminuant insidieusement sa réserve en élément fertilisant et un entraînement préférentiel des particules les plus fines de la matière organique et du carbonate de calcium (Elahcen, 2013). Le plus souvent l'érosion hydrique commence par un ruissellement diffus ou érosion en nappes qui se développe plus tard au ruissellement concentré. Ce sont les cas illustrés dans les figures 10 et 11 qui montrent une érosion aréolaire où il n'y a pas encore la formation de chenaux.



**Figure 10.** Erosion hydrique aréolaire dans le bassin de l'Oued Kébir Est.



**Figure 11.** Erosion en nappe dans le bassin de l'Oued Bougous.

### **5.1.2. Erosion en rigoles**

C'est la deuxième phase de l'érosion aréolaire, 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 (Elahcen, 2013).



**Figure 12.** Erosion en rigole.

### 5.1.3. Erosion linéaire

L'érosion linéaire est un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses.

Elle se produit lorsque l'écoulement liquide est concentré dans le lit des talwegs. Ce type d'érosion dépend des caractéristiques géométriques et hydrauliques de l'écoulement, ainsi que de la granulométrie du substrat en place. La connaissance de ces paramètres permet de déterminer la force tractrice qui agit sur le lit et qui représente l'ensemble des forces érosives. Ces forces, beaucoup plus grandes que celles qui contrôlent l'érosion aréolaire, permettent de mobiliser des grains de diamètre élevé (Elahcen, 2013).



**Figure 13.** Erosion linéaire (Oued Bougous).

## 5.2. Erosion en masse

Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux mais on peut citer :

### 5.2.1. Les glissements de terrain

#### 5.2.1.1. Les glissements lents

C'est un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans décollement, qui s'observe assez généralement sur les pentes fortes grâce à la forme couchée des jeunes plants forestiers et à la forme en crosse de la base des arbres adultes. Dans les zones sylvo-pastorales; la circulation des animaux le long des

versants peut également entraîner la formation d'escaliers encadrés par des réseaux de fissures.

Une autre forme de glissement, causée par les techniques culturales, a été traitée à part: c'est l'érosion mécanique sèche. L'ensemble de ces processus aboutissent, comme l'érosion en nappes et rigoles, au décapage des sommets de collines et à l'empâtement des bas de pentes (Dahmani, 2012). Le sapement de berge est un processus morphogénique capable de provoquer des glissements de terrain souvent en masse au niveau de la partie concave du cours d'eau (Figure 14).



**Photo 3.** Oued Bougous.



**Photo 4.** Affluent de l'Oued Kébir Est.

**Figure 14.** Processus du sapement de berge et du glissement de terrain.

### 5.2.1.2. Les glissements rapides

Les glissements de terrain en planches sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plan de glissement.

Ce phénomène est très courant sur les schistes dont le pendage est parallèle à la topographie (pendage conforme) sur les gneiss et sur les marnes en voie d'altération (Dahmani, 2012).

### 5.2.2. Les coulées boueuses

Ce sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité et qui emportent à grande vitesse des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante. Lorsqu'elles viennent de se produire, elles se présentent sous forme d'un canal terminé par une langue de matériaux de texture très hétérogène (exemple. cône de déjection). Les matériaux fins sont repris ultérieurement par l'érosion hydrique en nappe ou en rigole, laissant en place une masse de cailloux et de blocs de taille très hétérogène. Elles apparaissent souvent à la suite d'un glissement en planche ou dans une ravine lors d'une averse exceptionnelle nettoyant les altérites accumulées depuis quelques années (Temple et Rapp, 1972).

### Conclusion

Le bassin versant du Kébir Est, exposé au Nord où se développe un couvert végétal consistant sous forme de forêt ou de maquis sur des pentes assez fortes (>17%), se distingue par une multitude des processus morphogéniques qui le sculpte et façonne son relief. On a essayé dans ce chapitre de donner un aperçu général sur la morphogénèse qui peut toucher le bassin versant de l'Oued Kébir Est en commençant par l'érosion aréolaire jusqu'aux mouvements de masse.

L'action érosive des différents processus est spatialement variable dépendant des facteurs physiographiques. On trouve un glissement de terrain provoqué par le sapement de berge et la ravine. Le terrain à pente forte est dominé le plus souvent par l'érosion linéaire. Ceci permet de supposer que les conditions sont réunies à l'apparition d'une importante activité érosive dominée par l'érosion hydrique et matérialisée par les mouvements de masse marquant souvent une évolution très avancée. C'est le cas de l'Oued Bougous qui présente au mieux ces formes d'érosion.

**Chapitre 2 :**

**Description physiographique du bassin**

**versant de l'Oued Kébir Est.**

## Introduction

L'érosion dans les bassins versants du Nord-Est Algérien présente un problème complexe. L'utilisation des caractéristiques physiques du milieu est très utile car elle permet d'expliquer l'ampleur et l'évolution du processus de l'érosion sur les versants.

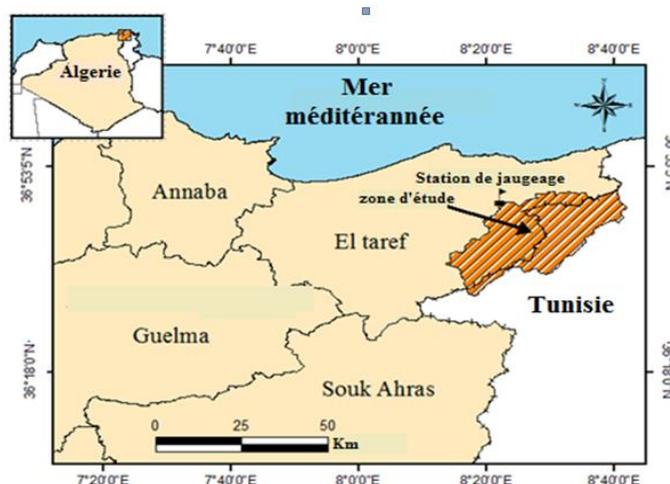
C'est pourquoi, nous avons consacré ce chapitre à l'étude des caractéristiques physiques du bassin versant de l'Oued Kébir Est pour montrer l'influence des facteurs de la lithologie, la topographie, l'occupation du sol et la nature du sol à la stabilité du milieu. Le tracé hydrographique est fortement influencé par la lithologie et la topographie; leur influence se fait sentir d'une part sur le régime des cours d'eau, et d'autre part sur l'érosion et le transport solide. Aussi la sensibilité du milieu à l'érosion peut être réduite par la potentialité de la couverture végétale.

## 1. Aperçu géographique

### 1.1. Le bassin versant de l'Oued Kébir Est

Situé à l'extrémité Nord-Orientale de l'Algérie, le bassin versant de l'Oued Kébir Est fait partie des bassins versants côtiers constantinois. La confluence des Oueds Kébir Est et Bounamoussa forme l'Oued Mafragh. Le bassin versant de l'Oued Kébir Est (limite naturelle) occupe une superficie de 1700 km<sup>2</sup> et s'étend du Nord au Sud sur plus de 30 km.

Le bassin versant de l'Oued Kébir Est atteint, à l'Ouest, l'embouchure de l'Oued Maffragh et s'étend jusqu'aux sources des oueds Ballouta et Bougous à l'Est. Il est limité au Nord par la ligne de partage des eaux située sur le cordon dunaire de Bouteldja et au Sud par les lignes topographiques où prennent source les oueds Bouhalouffa et Boulathan (Figure 15).



**Figure 15.** Situation géographique du bassin versant de l'Oued Kébir Est.

Le bassin versant de l'Oued Kébir Est est un sous-bassin de l'Oued El Kébir. En raison de l'existence de deux oueds portant le nom de l'Oued Kébir (région Skikda et région Annaba-El Kala), appartenant aux bassins côtiers constantinois, l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) a attribué le nom de Oued Kébir Est à ce bassin.

Le présent bassin est situé à l'amont de la commune d'Ain Assel. Il se trouve inclus, à environ 50%, dans chacun des deux pays voisins : l'Algérie et la Tunisie. Sa plaine, formée par la réunion de trois oueds importants (Kébir, Ballauta, Bougous), draine les flancs des montagnes de Kroumerie et reçoit, dans sa vallée moyenne, de nombreux affluents sur sa rive gauche : Guergour, Bouhaloufa et Boulathan (Figure 16).

Le bassin versant de l'Oued Kébir Est est limité :

- Au Nord, par le cordon dunaire de Bouteldja formant un obstacle avec la mer Méditerranée.
- Au Sud, par les collines d'Oum Diss et Rhorra.
- A l'Est, par les communes d'Ain Drahem et Fernana.
- A l'Ouest, par le bassin versant de l'Oued Bounamoussa .

Le bassin versant de l'Oued Kébir Est s'étend sur une longitude allant de 7°58' à 8°35', une latitude de 36°30' à 36°55'. Il occupe une superficie de 662,72 km<sup>2</sup> et englobe les communes de : Bouteldja, El Taref, Bougous, Chaffia, Ain Assel, Ain Kerma, Roum El Souk, Lac des Oiseaux, Berrihane et aussi Ain Drahem et Fernana en Tunisie.

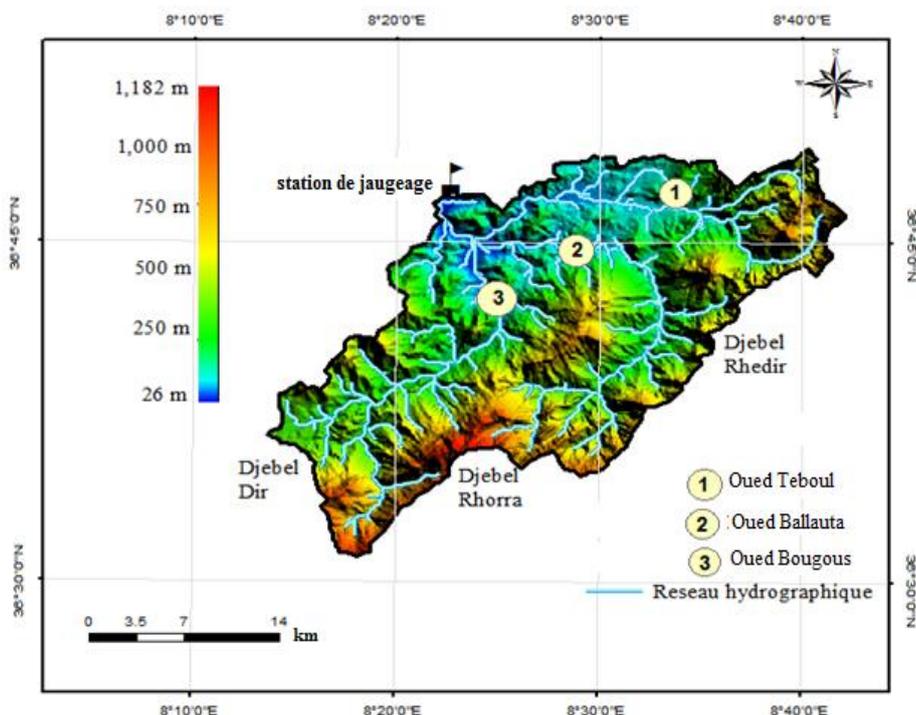


Figure 16. Altimétrie et hydrographie du bassin versant étudié.

## **2. Description physiographique**

### **2.1. L'orographie**

Sur le plan géomorphologique, il est possible de diviser le bassin versant en quatre zones bien différenciées:

- La zone des plaines,
- La zone des dunes,
- La zone des marécages,
- La zone des collines.

#### **2.1.1. La zone des plaines**

Elle est formée par le couloir Bouteldja-El-Taref-Ain Assel et se trouve encadrée par les massifs de la chaîne numidique. La plaine de Bouteldja se situe au Nord-Est du bassin versant, entre les dunes du Nord et les monts du Sud; par contre, la plaine d'El Taref se situe au Nord-Est du bassin, entourée par des collines de la chaîne Numidique.

Ces deux plaines ont pratiquement le même type de dépôts : argile des marécages, alluvions limoneuses du fond des vallées, alluvions des basses et moyennes terrasses, les alluvions des hautes terrasses qui n'affleurent que dans la plaine d'El Taref.

#### **2.1.2. La zone des dunes**

Elle s'étend sur une superficie de l'ordre de 150 km<sup>2</sup> ayant approximativement la forme d'un triangle dont les sommets sont à la jonction de l'Oued Bounamoussa à l'Ouest, la plaine de Bouteldja au Sud où elle s'enfonce sur une vingtaine de kilomètres jusqu'aux pieds des djebels Bourdim et Hadja Siah à l'Est.

Par endroit, ces masses de sable sont séparées les unes des autres par des bas-fonds occupés par d'innombrables garaets, mares d'eau, etc.

#### **2.1.3. La zone des marécages et des lacs**

Elle est située surtout à l'Ouest du bassin versant où l'on rencontre, entre autres, les marais de M'krada qui s'étendent sur plus de 12 000 ha, la gareat d'El Khoubzi ainsi que le Lac des Oiseaux. C'est une zone à très faible pente où les deux principaux cours d'eau (Bounamoussa et Kébir Est) se trouvent dans l'incapacité de drainer les eaux des saisons pluvieuses ; ce qui engendre la stagnation des eaux sur une très longue période de l'année.

### 2.1.4. La zone des collines

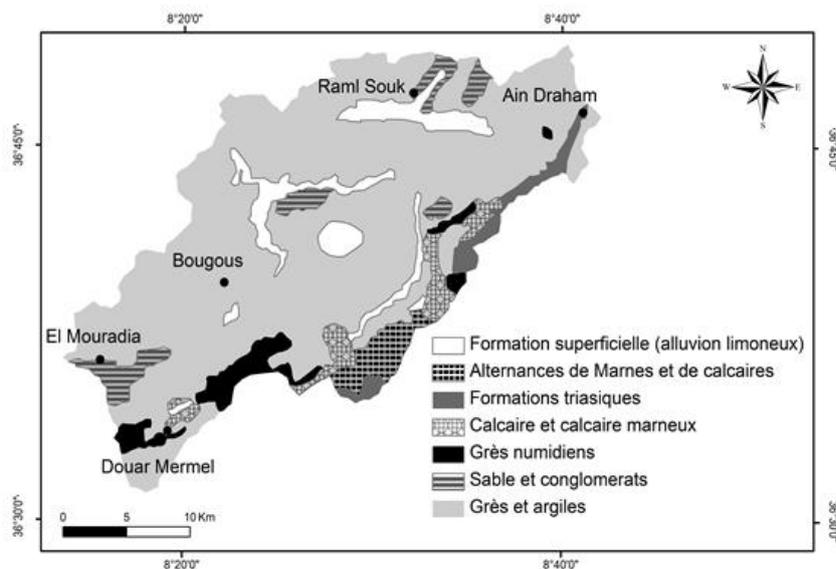
Représentée par les monts de Chaffia, cette zone est située essentiellement dans la partie Sud du bassin versant et constitue un ensemble de chaînes de montagnes allongées sur une dizaine de kilomètres et orientées NNE-SSO.

Les points culminants sont les djebels Rhorra (1202 m), Oum El Diss (1150 m), Dir (1041 m), Ghedhir (713 m), Ain El Erg (981 m), Souani (808 m) et Halloufa (786 m). Le Djebel Rhorra de direction SO-NE correspond à des crêtes de roches au pendage très fort où l'on observe une structure synclinale qu'utilise en partie l'Oued Bougous.

## 2.2. Les ensembles morfo-structuraux

La nature de la roche joue un double rôle, son influence se fait sentir, d'une part, sur le régime du cours d'eau, et, d'autre part, sur l'érosion et le transport solide. La lithologie de notre zone d'étude présente peu de variétés. Ce bassin comporte trois principales formations de roches allant du Sénonien à l'Oligocène numidien. Cette région possède des structures plissées qui ont subi pour la plupart des contacts anormaux et des failles.

Sous l'effet de ces accidents tectoniques, le réseau hydrographique devient largement influencé par cette nature géologique instable. A l'aide des cartes géologiques de 1/50.000 et du travail de Demmak (1982), la carte lithologique du bassin versant a pu être réalisée. Cette carte englobe cinq principales formations lithologiques à savoir : les affleurements triasiques, les marno-calcaires, les calcaires et calcaires marneux, les conglomérats argileux et les grès numidiens (Figure 17). En utilisant le logiciel Global Mapper version 15 et Arcgis 10.1 on a pu digitaliser les superficies des formations lithologiques du bassin.



**Figure 17.** Carte lithologique du bassin versant étudié (Demark, 1982 modifiée).

### 2.2.1. Les formations superficielles

Dans cette région, on peut observer plusieurs dépôts quaternaires qui jalonnent les étapes du creusement de la vallée, avec une répartition moins importante soit 7,41% de la superficie totale du bassin de l'Oued Kébir Est (Tableau 1 et Figure 17). Deux endroits sont particulièrement intéressants : le piémont du Djebel Rhorra et la vallée de l'Oued Ballouta. Les formations colluviales qui caractérisent le piémont de Rhorra correspondent à de longs sommets d'interfluvés aplanis et boisés qui se terminent par une convexité avoisinant les 600 m d'altitude. Cette formation Quaternaire tronque nettement les sommets des massifs gréseux de la rive droite de l'Oued Bougous, au niveau des Djebels Hadid, Bat Hat et Maouguène.

Le matériel alluvial se caractérise essentiellement par trois niveaux de dépôts; la basse terrasse caillouteuse du Pléistocène récent (village Mexna). Les alluvions sablo-limoneuses du Néopleistocène (moyenne terrasse) du fond de la vallée de l'Oued Bougous se répartissent à Mechtat Bougous et au village de Mexna.

**Tableau 1.** Répartition des formations lithologiques du bassin versant étudié.

Type de lithologie	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)
Formations superficielles	50,60	7,41
Formations triasiques	18,96	2,77
Alternance marnes et de calcaires	17,93	2,62
Calcaires, calcaires marneux	24,19	3,54
Conglomérats, sables, argiles	28,64	4,19
Grès et argiles	494,37	75,33
Grès numidiens	28,03	4,10
Total	662,72	100

La basse terrasse (Pléistocène récent) est peu représentée en aval de l'Oued Ballouta. Elle est constituée, de bas en haut, par des blocs et des galets de grès arrondis emballés dans une matrice argilo-sableuse. Les alluvions actuelles (troisième type de dépôts) du lit majeur des trois principaux oueds du bassin versant sont peu répandues et très dispersées. Elles apparaissent souvent sous forme de petites lentilles de vase argileuse, de limon et de sable.

### 2.2.2. Les affleurements triasiques

Le Trias gypso-salifère, de faible étendue (presque 3%), affleure à Ain Draham et en divers lieux d'Ain Draham jusqu'au voisinage du Djebel Ghedir (713m). Le Trias est très

attaqué par les eaux courantes qui entraînent les argiles gypsifères et laissent en saillie les brèches calcaires.

A Ain Draham, il y a présence de soulèvement, de plis et même d'accidents tectoniques tels que les failles et les chevauchements qui ont favorisé le creusement de talwegs. Dans les confins de la Kroumerie, les zones déprimées, dont le terrain triasique, ce qui révèle une longue évolution morphologique du pays où l'érosion linéaire, en particulier, a créé, partout, un modelé de relief ressemblant aux badlands.

### **2.2.3. Les marnes et les calcaires**

C'est un ensemble constitué de marnes et calcaires d'âge Sénonien à Eocène qui tend vers une formation de marno-calcaire (superficie faible d'environ 3%). Il s'étend du Nord-Est, à Ain Draham, jusqu'au Sud-Ouest non loin du Djebel Rhorra. Ces formations lithologiques forment une topographie assez forte de collines morcelées parmi lesquelles figurent Djebel Sra (942m) et Djebel Tadj Zit (846 m).

La nature structurale du terrain est très complexe; la tectonique est traduite par l'existence de plis qui sont fortement à l'origine des reliefs et de grands accidents cassants (failles) de direction SO-NE et NO-SE. Les accidents tectoniques et la nature du substratum ont engendré une forte érosion hydrique des marnes en alternance avec les calcaires par le réseau hydrographique amont de l'Oued Ballauta. Une partie de ce dernier est creusé le long du contact anormal du flysch mixte et des formations marno-calcaires (Torki, 2010).

### **2.2.4. Les calcaires et les calcaires marneux**

D'une superficie assez réduite (presque 4%), cette formation s'étend du Sud-Ouest au Nord-est en Tunisie. Au pied de la barre gréseuse de Djebel Sra, un large piémont se développe composé de calcaire marneux de l'Eocène et du Crétacé (Marre, 1992).

Vu sa nature lithologique assez vulnérable, cette formation est fortement disséquée par les affleurements de l'Oued Ballauta et ses affluents. A Sidi Trad un ensemble en anticlinal du Crétacé constitué essentiellement de marne et calcaire du Crétacé, Eocène marneux et marno-calcaire.

### **2.2.5. L'ensemble conglomératique**

Ce faciès du Mio-Pliocène est réparti au Sud-Ouest, au centre et au Nord-Est du bassin. Il se présente en lambeaux sous forme de dépôts continentaux argilo-détritiques, sables et les dépôts du fond des vallées de l'Oued Barbara et l'Oued Kébir.

L'altération puis l'érosion de ces roches a donné des accumulations de sols dans le lit de l'Oued Kébir Est. Au Nord de Djebel Dir (entre 200 et 400 m d'altitude), nous décelons un piémont argilo-conglomératique tranché par l'altération physico-chimique. Le matériel ainsi altéré in situ est appelé éluvion; il permet le développement du processus de la pédogenèse sur une profondeur assez importante.

### **2.2.6. Les grès numidiens et argiles**

Occupant 79,43% de superficie, les grès et argiles de l'Oligocène sont les plus étendus dans le bassin (Tableau 1). Les grès représentent la masse des reliefs du bassin versant de Kébir Est et supportent en général la forêt de chêne liège et des maquis. Ils sont quartzeux, plus au moins fortement consolidés. Leur modelé comporte de petites crêtes déchiquetées et des roches abruptes.

La série des grès présente des anticlinaux et des synclinaux de direction SO-NE. A cet ensemble structural, viennent s'ajouter des failles normales de direction SO-NE. La faille de l'Oued Bougous, installée dans le fond de la dépression, est un exemple d'accidents tectoniques d'âge Plio-Quaternaire. Au niveau du Djebel Rhorra, il y a une structure synclinale, considérée auparavant comme une dépression, qu'utilise en partie l'Oued Bougous. Le flanc Sud-est de ce synclinal gréseux se dresse abruptement et constitue la barre du Djebel Rhorra (Marre, 1992). Vu la raideur de ses versants, le ravinement a pu grimper plus en amont et a formé un dense chevelu hydrographique.

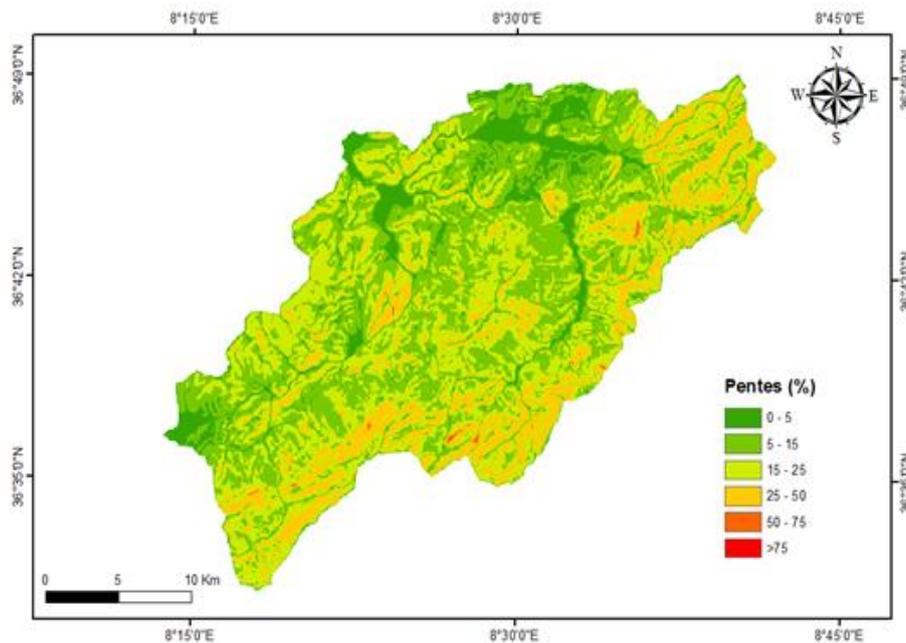
L'ensemble des couches subordonnées aux grès apparaît comme étant des roches assez tendres plus facilement attaquées par l'érosion que la masse gréseuse supérieure. Il en résulte une inversion du relief comme c'est le cas des djebels Rhorra et Mekmene Djaballah.

Le mélange des grès numidiens et des argiles constitue l'ensemble des formations lithologiques qui constitue le bassin, soit 75,33 % de la surface totale. Les limites entre les argiles et les grès sont difficilement perceptibles sur le terrain en raison de l'épaisseur du

recouvrement et de la couverture végétale à l'exception de la partie amont de l'Oued Bougous où prédominent les argiles sur les niveaux gréseux.

### 2.3. Les Pentes

L'établissement de la carte des pentes est un élément fondamental dans toute étude de l'érosion. La topographie, représentée par les pentes, constitue un des facteurs essentiels de la dégradation du milieu physique et un élément important influant sur l'écoulement des eaux et l'occupation des sols. L'accroissement de l'énergie du relief s'accompagne d'une brusque augmentation de la puissance érosive qui déclenche le creusement sur l'ensemble du profil. De remarquables illustrations concrètes de la concentration linéaire des eaux courantes sont apportées par la dissection généralisée des reliefs bordiers de la Mer Méditerranée au Miocène supérieur à la suite de son assèchement (Marre, 1992). Afin d'établir la carte des pentes, nous étions contraints d'utiliser le modèle numérique de terrain (MNT). Le MNT, de résolution de 30 m du bassin, considéré nous a permis de créer la carte des pentes à l'aide du logiciel Arcgis version 10.1 (Figure 18).



**Figure 18.** Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Kébir Est.

Connaissant les surfaces occupées par chaque classe de pente du tableau 2, nous avons procédé à une description des pentes du bassin.

**Tableau 2.** Répartition des classes des pentes dans le bassin versant étudié.

Classes	Superficie (km <sup>2</sup> )	Superficie (%)
0 – 5	74,76	10,97
5 – 15	162,28	23,82
15 – 25	189,98	27,88
25 – 50	176,05	25,84
>50	22,51	11,49
Total	662,72	100,00

### 2.3.1. Les pentes de la classe 0 à 5 %

C'est une classe assez dominante qui occupe 10,97 %, soit 74,76 km<sup>2</sup> de la superficie du bassin (Tableau 2). Elle se localise essentiellement au Nord-Ouest du bassin (au niveau de la plaine) notamment à Bouteldja, Remel souk et la vallée de l'Oued Ballouta et ses affluents (Figure 18).

### 2.3.2. Les pentes de la classe 5 à 15 %

Couvrant une superficie de 162,28 km<sup>2</sup>, soit 23,82 % de la surface totale du bassin versant. Cette classe est surtout localisée dans la partie Sud-Ouest à proximité des vallées des Oueds Ras Oum Ali, Bougous, Chaffia. Ces pentes comportent l'unité morphologique des glacis souvent polygéniques.

D'une façon générale, l'érosion est peu active dans le secteur où dominant les pentes inférieures à 7% à cause de la faiblesse des pentes et du bon drainage des formations superficielles épaisses. Les surfaces inférieures à 10% représentent les glacis, qui sont des surfaces morphologiques souvent recouvertes par les formations superficielles épaisses.

### 2.3.3. Les pentes des classes 15 - 25 % et 25 à 50 %

La classe des pentes 15 – 25% représente une surface importante dans le bassin versant (Tableau 2). Cette classe qui occupe 189,76 km<sup>2</sup>, soit 27,90 % de la superficie totale de bassin, se localise un peu partout dans le bassin et essentiellement là où se développent essentiellement les versants des parties extrêmes Est et Sud-Est.

Elles sont fréquentes au pied des croupes et des collines dominées par les formations lithologiques marneuses, argileuses et surtout gréseuses.

La classe 25 – 50% occupent une superficie de 176,05 km<sup>2</sup> soit 25,84 % du bassin. Cette classe également importante se localise surtout sur les versants supérieurs de Bougous,

Barbara et Oued Dib. Ces pentes constituent les versants gréseux et calcaireux qui sont souvent disséqués par les rigoles et les ravines.

Ces versants montrent souvent une apparition de la dynamique des mouvements de masse et des ravinements sur des pentes supérieures à 12%.

#### **2.3.4. Les pentes supérieures à 50%**

Cette classe occupe 11,49% de la superficie totale de bassin versant. Les versants de cette classe sont de moindre importance par rapport aux autres classes (Tableau 2 et Figure 18). Les versants raides de cette classe sont essentiellement au Sud et à l'Est du bassin. C'est surtout les formations gréseuses et conglomératiques qui forment les versants de ce paysage.

Par ailleurs, ces pentes sont développées surtout au niveau de la ligne de partage des eaux. Ce secteur est généralement occupé par le ruissellement concentré développé sur les formations tendres telles que les argiles et les marnes, ce qui engendre une forte sensibilité à l'érosion.

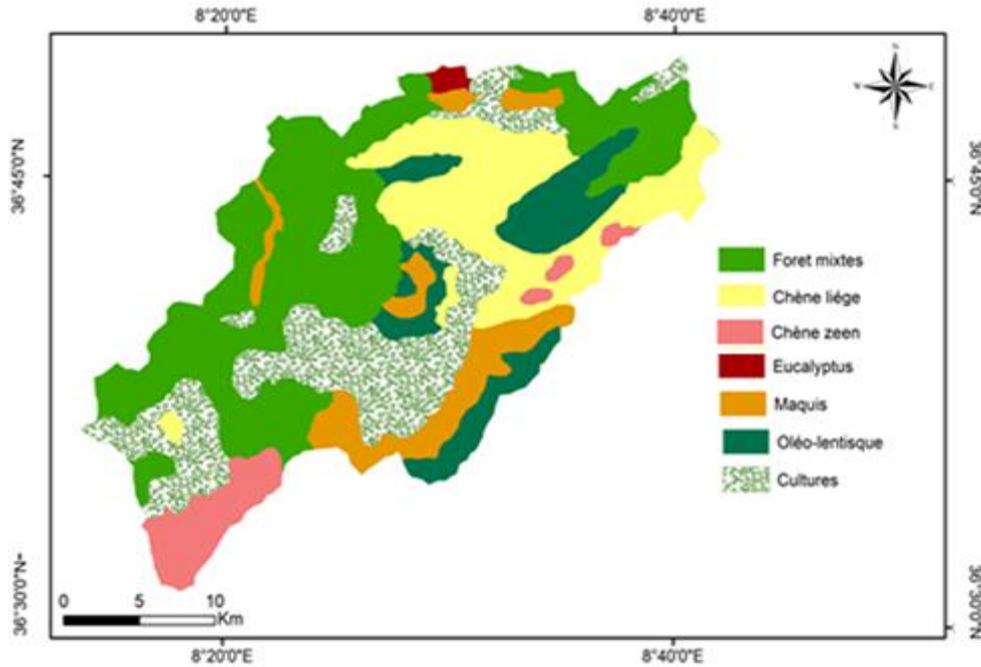
De là, on peut dire que la raideur des pentes est un acteur contraignant, défavorable à la stabilité du milieu et au développement de la végétation.

### **2.4. L'occupation du Sol**

Le développement de la couverture végétale dépend de la combinaison des facteurs physico-géographiques tels que le climat, le relief, la lithologie et l'action humaine qui s'imposent par la mise en culture des terres. Pour cela, il est nécessaire de connaître les différents types de végétaux et leur répartition dans le bassin de l'Oued Kébir Est.

La couverture végétale joue un rôle important dans l'écoulement superficiel et la protection du sol contre l'érosion hydrique et le transport des matériaux solides. La répartition du couvert végétal au niveau du bassin versant de l'Oued Kébir Est est donnée par la carte d'occupation du sol, illustrée par la Figure 19. Cette carte a été élaborée à partir du traitement des images satellitaires Raster sous le logiciel Arcgis 10.1 et les sorties sur terrain.

L'occupation du sol du bassin est constituée de deux domaines : le domaine forestier (forêt et maquis) et le domaine agricole (différents types de cultures).



**Figure 19.** Occupation du sol du bassin versant étudié.

#### 2.4.1. La forêt

Elle représente une bonne partie de la superficie du bassin, avec 60 %. Le couvert forestier englobe principalement le chêne liège et le chêne zeen. La forêt mixte comporte les deux espèces végétales : le chêne liège et le chêne zeen avec un sous-bois plus au moins dense (Figure 19, Tableau 3).

Très peu développé dans un milieu frais et ombragé (5,81%), le chêne zeen élimine les autres essences à partir de 700 m. A l'état de peuplement pur, le chêne zeen crée des conditions ignifuges; les incendies qui s'y déclarent se réduisent à des feux de surface qui peuvent s'étendre d'eux mêmes à la tombée de la nuit (dans les conditions météorologiques normales).

**Tableau 3.** Répartition de la couverture végétale dans le bassin versant étudié.

Type de lithologie	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)
Forêt mixte	212,69	34,06
Chêne liège	124,86	18,30
Chêne zeen	39,68	5,81
Eucalyptus	3,65	0,53
Maquis	61,08	8,95
Oléo-lentisque (maquis dégradé)	71,10	10,42
Cultures	149,66	21,93
Total	662,72	100

Sur les dunes consolidées et les grès fracturés couverts de formations quaternaires épaisses, le chêne liège montre une exigence hydrophile. Le chêne liège descend à sa plus basse altitude dans la vallée de l'Oued Teboul (Figure 19). Dans les positions ombragées et en présence des sources, le chêne liège est accompagné de chêne zeen isolé à partir de 50 m d'altitude.

L'Eucalyptus est peu évolué dans notre zone d'étude (à moins de 1% de la surface du bassin). Il a été introduit en Algérie afin d'assainir les zones marécageuses, d'où sa présence dans les zones humides et les bas fonds à drainage difficile.

#### 2.4.2. Les maquis

Ce sont des broussailles sous forme d'un maquis méditerranéen, dispersé dans plusieurs endroits et particulièrement sur les piémonts (Figure 19) ayant subi une agression (incendie). Ils sont constitués surtout d'*Erica arborea*, *Collicotum villosa*, *Cistus triflorus*, etc.

La série de l'oléo-lentisque est assez bien représentée dans notre bassin versant avec 10% ; nous la retrouvons dans les terrains lourds du Tell et au niveau des piémonts dégradés entre Ain el Karma et Bouhajar. Ce couvert forestier souvent clairsemé est développé sur les marnes argileuses laissant apparaître, entre la végétation éparse et un sol nu.

En ce qui concerne l'association hydrophile, l'inondation temporaire a favorisé le développement de plusieurs types de végétation dont on peut citer quelques espèces comme le peuplier et le laurier-rose que nous retrouvons également dans les lits des oueds.

### 2.4.3. Les cultures

Elles occupent les formations grés-argileuses du numidien, les alluvions du quaternaire et les piémonts des reliefs montagneux où on rencontre principalement les cultures céréalières.

Ces terres occupent presque 21% de la superficie du bassin (tableau 4). Pour des raisons pratiques et pour ne pas surcharger la carte du couvert végétal, nous avons préféré ne représenter que les associations végétales des terres cultivées que nous citerons à titre indicatif dans le tableau ci-dessous. Ainsi, les principales spéculations rencontrées (d'après les services agricoles de la wilaya d'El Taref) sont illustrées dans le tableau 4 qui englobe essentiellement la prédominance des cultures céréalières et des fourrages.

**Tableau 4.** Les principales cultures rencontrées dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est.

Cultures	Surface (%)
Céréales	24,70 %
Légumes secs	3,30 %
Fourrages	23,80%
Cultures industrielles	12,90 %
Cultures maraîchères	15,60 %
Arboriculture	8,30 %
Jachères	11,40 %

## 2.5. Pédologie

L'étude des sols du bassin versant de l'Oued El Kebir Est présente encore une faible information, la base de donnée **SWAT** nous a permis de mettre en évidence un certain nombre de sols pour notre bassin versant regroupés en 3 catégories : luvisols, calcisols, vertisols (Figure 20).

**2.5.1. Sols Luvisols :** Les luvisols se forment sur des paysages plats ou légèrement inclinés sous des régimes climatiques allant de la fraîcheur tempérée à la Méditerranée chaude. La minéralogie mélangée, la teneur élevée en nutriments et le bon drainage de ces sols rendent ces sols aptes à un large éventail d'agriculture (les céréales) qui présente 10% du total du bassin (Tableau 10).

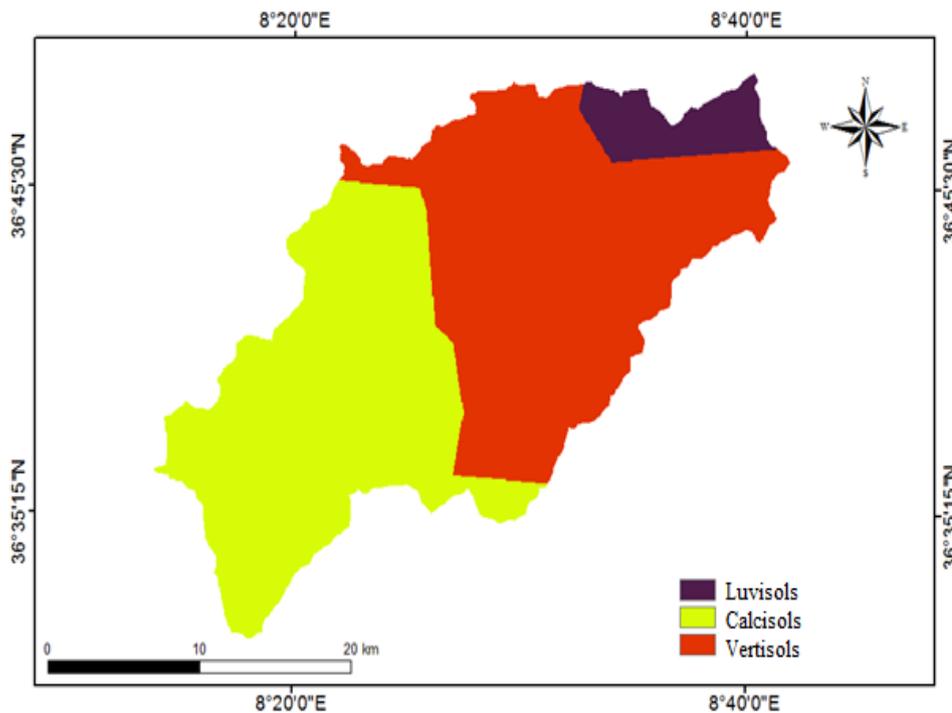
**2.5.2. Sols Calcisols :** D'après le système de classification de l'Organisation des aliments et de l'agriculture (FAO). Les calcisols sont caractérisées par une couche de carbonate de

calcium déplacée, qu'elle soit molle et poudreuse ou dure et cimentée, à une certaine profondeur dans le profil du sol. Ces sols présentent 43% de la surface du bassin (Tableau 10).

**2.5.3. Sols Vertisols :** Les vertisols sont des sols riches en argile qui subissent des fissures verticales importantes pendant les saisons sèches. Typiquement se formant sous la végétation de prairie dans le bassin ou les paysages de pente de roulement, ils conviennent mieux pour l'usage comme les pâturages. Ils présentent 50% de la surface du bassin.

**Tableau 5.** Répartition de la couverture végétale dans le bassin versant étudié.

Type de Pédologie	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)
Luvisols	40,00	9,44
Calcisols	295,00	43,23
Vertisols	303,26	47,33
Total	662,72	100,00

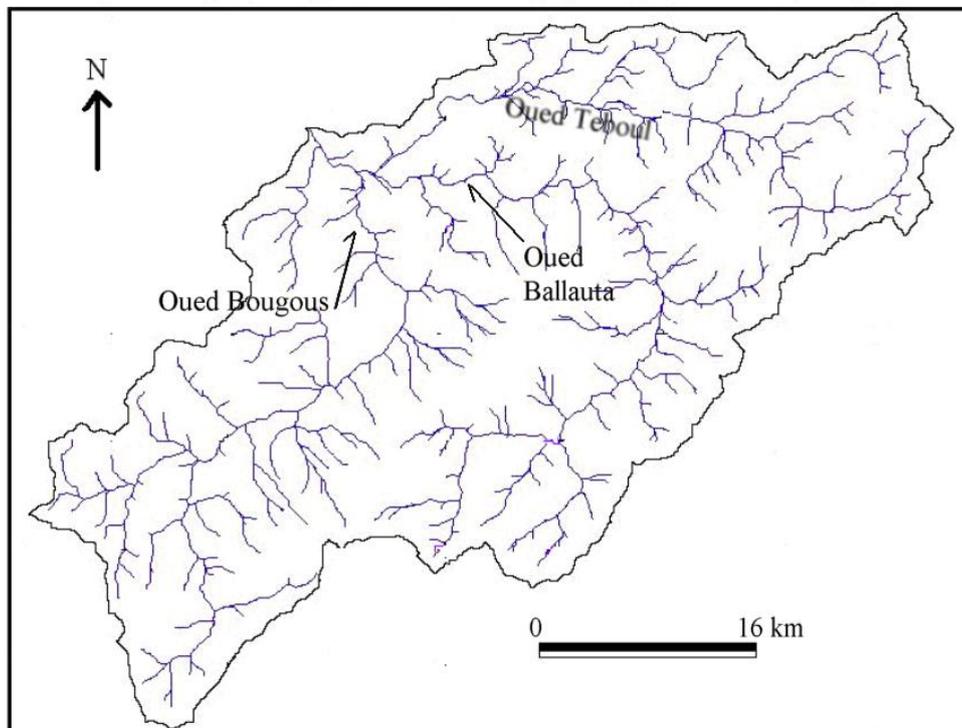


**Figure 20.** Carte pédologique (FAO).

### 3. Hydrographie

La mise en place du réseau hydrographique des bassins du Tell Oriental algérien s'est faite à partir d'une topographie qui existait au Pliocène. A la fin du Pliocène, des mouvements tectoniques donnèrent au Tell son volume montagneux (Marre, 1992). Ces mouvements sont à l'origine de la reprise de creusement des cours d'eau qui ont pu inciser de profondes vallées et des gorges. Des constatations peuvent être faites sur l'adaptation du réseau hydrographique à la structure d'un nombre de cours d'eau du Tell Nord Constantinois et Guelmien. Cependant, d'autres sections de ces cours sont inadaptées à la structure (Tourki, 2010).

Le bassin versant de l'Oued Kébir Est est composé de la jonction de trois principaux cours d'eau : l'Oued Bougous, l'Oued Ballauta et l'Oued Teboul.



**Figure 21.** Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Kébir Est.

Afin d'analyser l'érosion hydrique; il est préférable d'aborder en premier lieu une analyse morpho-métrique du bassin afin de faire ressortir les zones susceptibles de contribuer à la dégradation du milieu. De ce fait, on a choisi d'utiliser la densité de drainage et la fréquence des drains pour expliquer l'intensité de l'érosion qui est fortement liée aux facteurs physiques.

La densité du drainage est l'un des paramètres importants pour comprendre le potentiel hydrique d'un bassin versant. Le nombre de drainage (fréquence) peut exprimer la propriété de densité de drainage, et il a la relation la plus forte avec la recharge de l'eau dans les milieux sub-superficielles. La densité du drainage a été interprétée comme reflétant l'interaction entre le climat et la géologie (Ritter et Major, 1995). La densité de drainage est le rapport entre les longueurs totales des segments des cours d'eau cumulées pour tous les ordres dans un bassin et la superficie du bassin. Il est considéré comme un indicateur important de l'échelle linéaire des éléments de forme de terrain dans la topographie érodée. Le facteur de densité est lié au climat, à la lithologie, au relief, à la capacité d'infiltration, à la couverture végétale, à la rugosité de surface et à l'indice de ruissellement.

Langbein (1947) a reconnu l'importance de la densité de drainage comme facteur déterminant le temps de parcours de l'eau et a déclaré que les valeurs de densité de drainage comprises entre 0,55 et 2,09 km / km<sup>2</sup> correspondent aux régions humides. Nag (1998) a constaté qu'une faible densité de drainage se trouve généralement dans des zones de roches très résistantes ou de matériaux de sous-sol perméables, une végétation dense et un faible relief. La densité de drainage est élevée en raison de la surface vulnérable ou imperméable, de la végétation clairsemée et du relief montagneux. Une faible densité de drainage conduit à une texture de drainage grossier tandis qu'une densité de drainage élevée conduit à une texture de drainage fine. Strahler (1964) a conclu que Dd faible se produit là où le relief du bassin est fort. La subdivision du bassin versant de l'Oued Kébir Est en deux principaux sous-bassins des oueds Bougous et Ballauta a permis d'expliquer l'intensité de l'érosion hydrique. Le calcul de la densité de drainage a donné une valeur de 2,82 km/km<sup>2</sup> pour le bassin versant de Kébir Est, de 2,98 km/km<sup>2</sup> pour le bassin de l'Oued Bougous et 2,85 km/km<sup>2</sup> pour celui de l'Oued Ballauta. On constate que le bassin et ses deux sous bassins possèdent les valeurs très élevées de Dd, excédant 2,80 km/km<sup>2</sup> ; qui est indicatif d'un milieu ayant un matériau moins perméable, une couverture végétale clairsemée et un relief modéré à élevé.

La fréquence des drains est un autre paramètre qui peut contribuer à expliquer la nature lithologique et structurale du milieu. Il est exprimé par le rapport du nombre de cours d'eau par la superficie du bassin. Les valeurs de la fréquence des drains sont supérieures à 4,00 km<sup>-2</sup> (Fréquence BV Kébir = 4,29 km<sup>-2</sup>; Fréquence S/B Bougous = 4,20 km<sup>-2</sup>; Fréquence S/B Ballauta = 4,47 km<sup>-2</sup>). Ces valeurs élevées indiquent aussi qu'on est dans un milieu dominé par un matériau de sub-surface assez résistant mais fracturée (grès, conglomérats et calcaires), de la végétation clairsemée et d'un relief encore élevé.

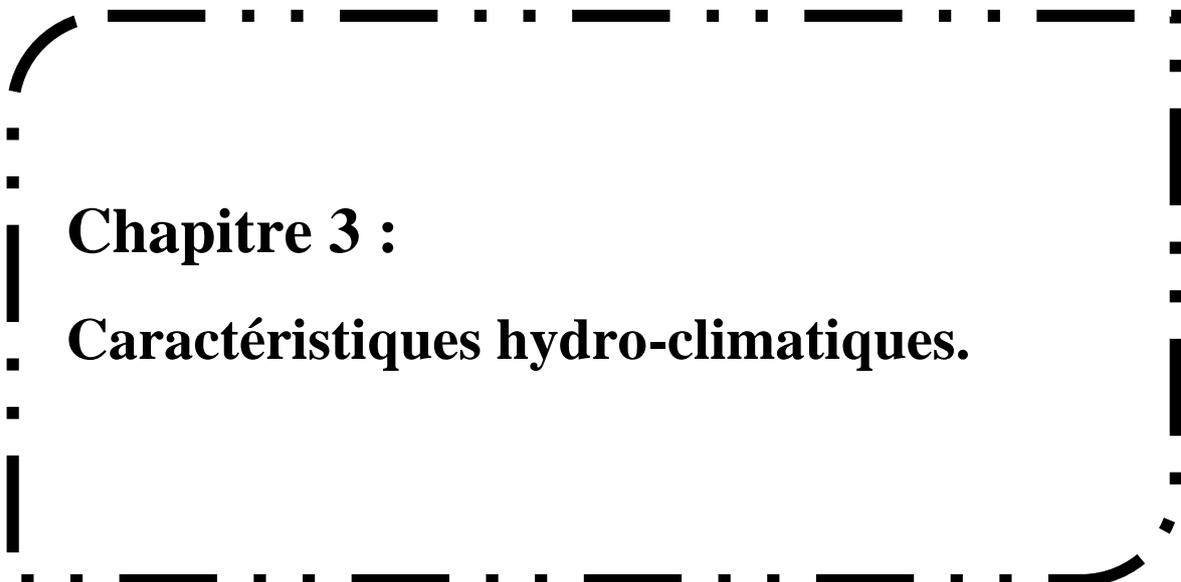
Par ailleurs, le nombre d'infiltration (coefficient de torrentialité) est le produit de la densité de drainage et de la fréquence des cours d'eau du bassin. Le nombre d'infiltration du bassin est de 12,10 indiquant une faible infiltration et un fort ruissellement.

## **Conclusion**

L'analyse des ensembles lithologiques révèle une grande hétérogénéité de faciès. L'étendue assez considérable des affleurements rocheux souvent érodables donne à ce bassin l'étiquette d'une région susceptible de fournir une érosion hydrique importante, avec un réseau hydrographique dense, des glissements de terrain et des sapements de berges.

Après analyse des pentes de l'Oued Kébir Est, nous constatons que les versants aux pentes assez fortes à fortes sont considérablement répartis. Ceci permet de supposer que les conditions sont favorables à l'apparition de l'érosion linéaire en particulier. L'enlèvement de la matière fine devient donc possible grâce à la raideur des pentes.

L'analyse de la couverture végétale montre que notre zone d'étude se caractérise par une couverture végétale forestière importante. Cependant, cette dernière est assez faiblement protectrice car elle comporte souvent un sous-bois clairsemé qui laisse l'avantage au ruissellement de s'y installer. En outre, la forte répartition des terrains dégradés et des terres agricoles (cultures annuelles) surtout sur des versants raides va présenter un danger pour la stabilité du milieu. Qu'il s'agisse du relief, de la lithologie, de la couverture végétale et du réseau hydrographique bien développé, ces critères ne font que contribuer à aggraver la sensibilité de ces milieux à l'érosion hydrique. Entre autres, d'autres facteurs doivent être insérés dans cette étude pour mieux expliquer le phénomène de l'érosion. Dans ce contexte le prochain chapitre sera consacré à l'étude des caractéristiques hydro-climatiques et spécialement les précipitations et les écoulements.



**Chapitre 3 :**

**Caractéristiques hydro-climatiques.**

## Introduction

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencée par une multitude de facteurs tels que ceux liés à la morphologie du bassin versant (forme, dimension, orientation), aux propriétés physiques du bassin (natures des sols, couverture végétale) qui sont des facteurs internes et aux conditions climatiques : précipitation, température, humidité, vent, rayonnement solaire, évaporation qui sont des facteurs externes au milieu.

A travers ce chapitre, nous discuterons aussi du climat du bassin versant étudié et plus spécialement des précipitations et températures.

## I. Analyse climatiques

### 1. Les caractéristiques climatiques

#### 1.1. Répartition des stations pluviométrique dans la zone d'étude

Pour caractériser le climat de notre bassin versant nous avons choisi 3 stations pluviométriques proches de la limite géographique de la zone d'étude, d'une longue série de données pluviométriques et de températures journalières qui s'étalent de 1979/1980 à 2013/2014 sur l'ensemble de ces stations. Les caractéristiques des stations pluviométriques utilisées dans cette étude sont représentées dans le tableau suivant (Tableau 6):

**Tableau 6.** Coordonnées géographiques des stations pluviométriques utilisées.

Nom de la station	Longitude	Latitude	Altitude moyenne (m)
Ain Assel	8°21'56,53"E	36°46'23,19"N	31
Ain kerma	8°11'23,09"E	36°35'19,91"N	225
Roum El Souk	8°32'19,54"E	36°47'14,15"N	131
Station voisine 1	8°7'30,00"E	36°41'12,84"N	35
Station voisine 2	8°26'15,00"E	36°41'12,84"N	274
Station voisine 3	8°45'0,00"E	36°41'12,84"N	106

Vu qu'il y a un manque de données climatiques au niveau des stations pluviométriques du bassin, nous avons utilisé la base de données (SWAT) pour combler les valeurs manquantes par celle de la station la plus proche (voisine).

Grâce au service de l'ANRH de Constantine, nous avons pu acquérir une série de données pluviométriques (1979-1980/2011-2012) des stations concernant le bassin à étudier, mais malheureusement ces données contiennent des lacunes en différentes années hydrologiques, et pour cela on va reconstituer ces lacunes par des méthodes statistiques.

## 2. Comblement des lacunes

Les données pluviométriques recueillies au niveau des stations précédemment citées contiennent quelques lacunes des précipitations mensuelles et même annuelles. Ainsi, nous avons procédé à leur comblement en utilisant la méthode du rapport qui consiste à estimer les valeurs des précipitations mensuelles manquantes à partir des formules suivantes (relations entre la station du bassin et la station voisine) :

$$Y = K * X$$

$$K = Y_{\text{moy}} / X_{\text{moy}}$$

Y : la valeur manquante du mois incomplet

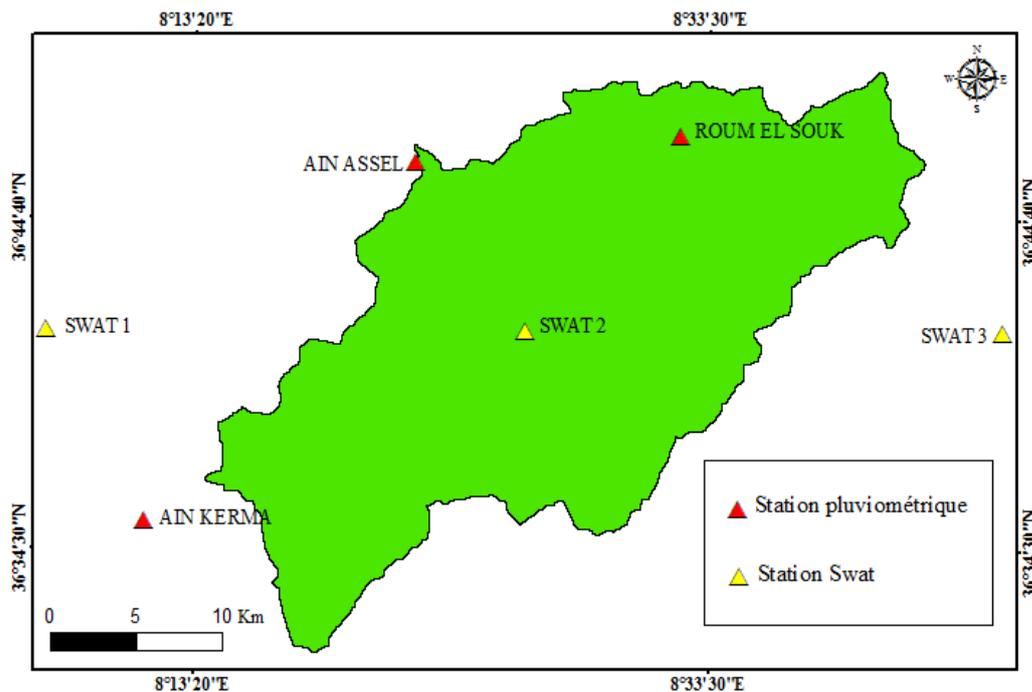
X : la valeur disponible du mois complet

K : Coefficient multiplicateur

Y<sub>moy</sub> : Précipitation moyenne mensuelle du mois incomplet.

X<sub>moy</sub> : Précipitation moyenne mensuelle du mois de référence.

La figure 22 donne la distribution des 3 stations par rapport au bassin versant et par rapport aux 3 stations données par la base de données simulées de SWAT (station voisine).



**Figure 22.** Répartition des stations pluviométriques au niveau du bassin versant.

### 3. Variabilité annuelle des précipitations

La lame moyenne annuelle précipitée au niveau du bassin est calculée en rapportant la somme des valeurs des précipitations annuelles des stations de Ain Assel, Ain Kerma et Roum El Souk au nombre d'années de la période d'étude comme le montre la formule suivante :

$$\bar{P} = \Sigma P_i / n$$

Avec :  $\bar{P}$  : précipitation moyenne

$\Sigma P_i$  : la somme des précipitations annuelles pour les trois stations

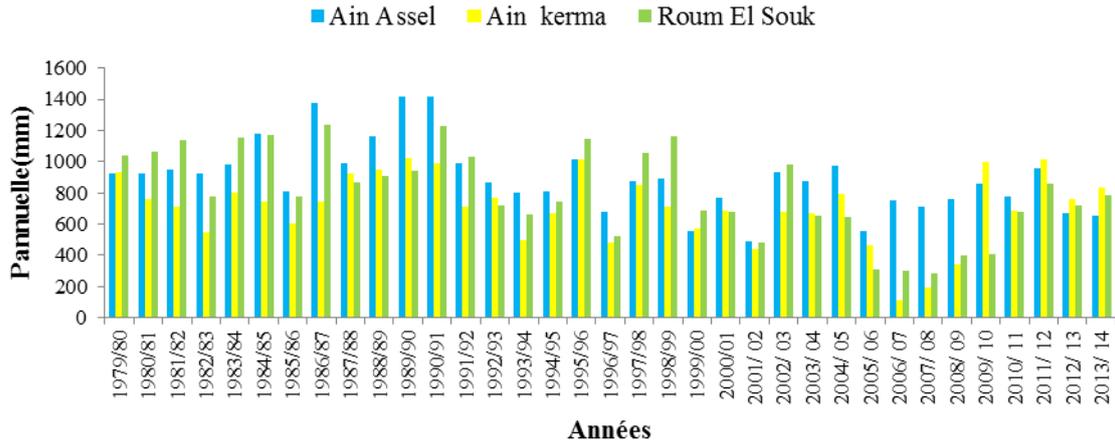
n : le nombre des années de la période d'étude

La précipitation moyenne annuelle au niveau du bassin versant de l'Oued Kébir Est durant la période d'observation de 35 années (1979/80 à 2013/14) est estimée à 801,71mm. De la même manière, nous avons déduit les précipitations moyennes annuelles pour chaque station.

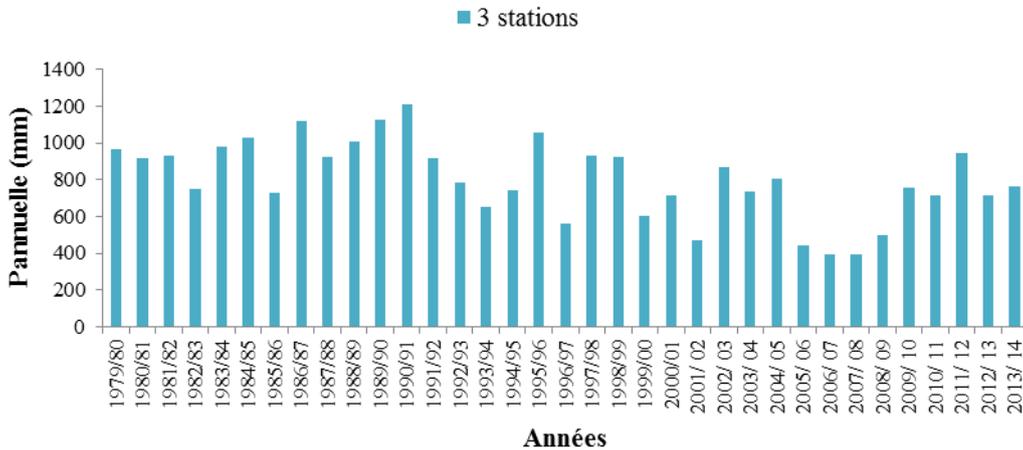
**Tableau 7.** Précipitations moyennes annuelles des trois stations pluviométriques.

Stations	$\bar{P}$ (mm)
Ain Assel	893.64
Ain Kerma	705.11
Roum El Souk	806.39
Moyenne 3 stations	801.71

La pluviométrie moyenne annuelle des 3 stations (tableau 7) caractérisée par des régimes pluviométriques passent de 705,11mm (station Ain Kerma) à 806,39mm (station Roum El Souk) jusqu'à 893,64mm (station Ain Assel). Pour une meilleure apparition, nous avons montré la répartition annuelle des précipitations des 3 stations utilisées (Figure 23) ainsi que la moyenne des précipitations relatives aux 3 stations (Figure 24).



**Figure 23.** Variations annuelles des précipitations des 3 stations pluviométriques.



**Figure 24.** Variations annuelles des moyennes des précipitations aux stations pluviométriques.

Les valeurs des précipitations annuelles de station d’Ain Assel et Roum El Souk sont marquées par des intensités très proches, alors que la station d’Ain Kerma présente une décroissance par rapport aux autres stations à partir de la période de (1982/1983) jusqu’à la fin de la série. Il apparait de l’étude de l’évolution des pluies annuelles que la variabilité de la précipitation change souvent d’une station à l’autre.

Le régime pluviométrique des trois stations dont les données pluviométriques représentées dans la Figure 23 sont caractérisé par un maximum de 1211.77 mm dans l’année (1990/91) ; par contre, les faibles précipitations coïncident avec l’année (2006/07) avec 390.36 mm.

Notre zone d'étude fait partie d'une région soumise à un climat de type méditerranéen humide. Elle est l'une des régions les plus arrosées de l'Algérie.

### 3.1 Coefficient pluviométrique

Afin de distinguer les années sèches des années humides, on définit le coefficient pluviométrique qui est exprimé par le rapport de la précipitation annuelle sur la précipitation moyenne annuelle. Ce coefficient est défini par :

$$C_p = P_i / \bar{P}$$

D'où :  $P_i$  : la précipitation annuelle (mm),

$\bar{P}$  : précipitation moyenne annuelle (mm).

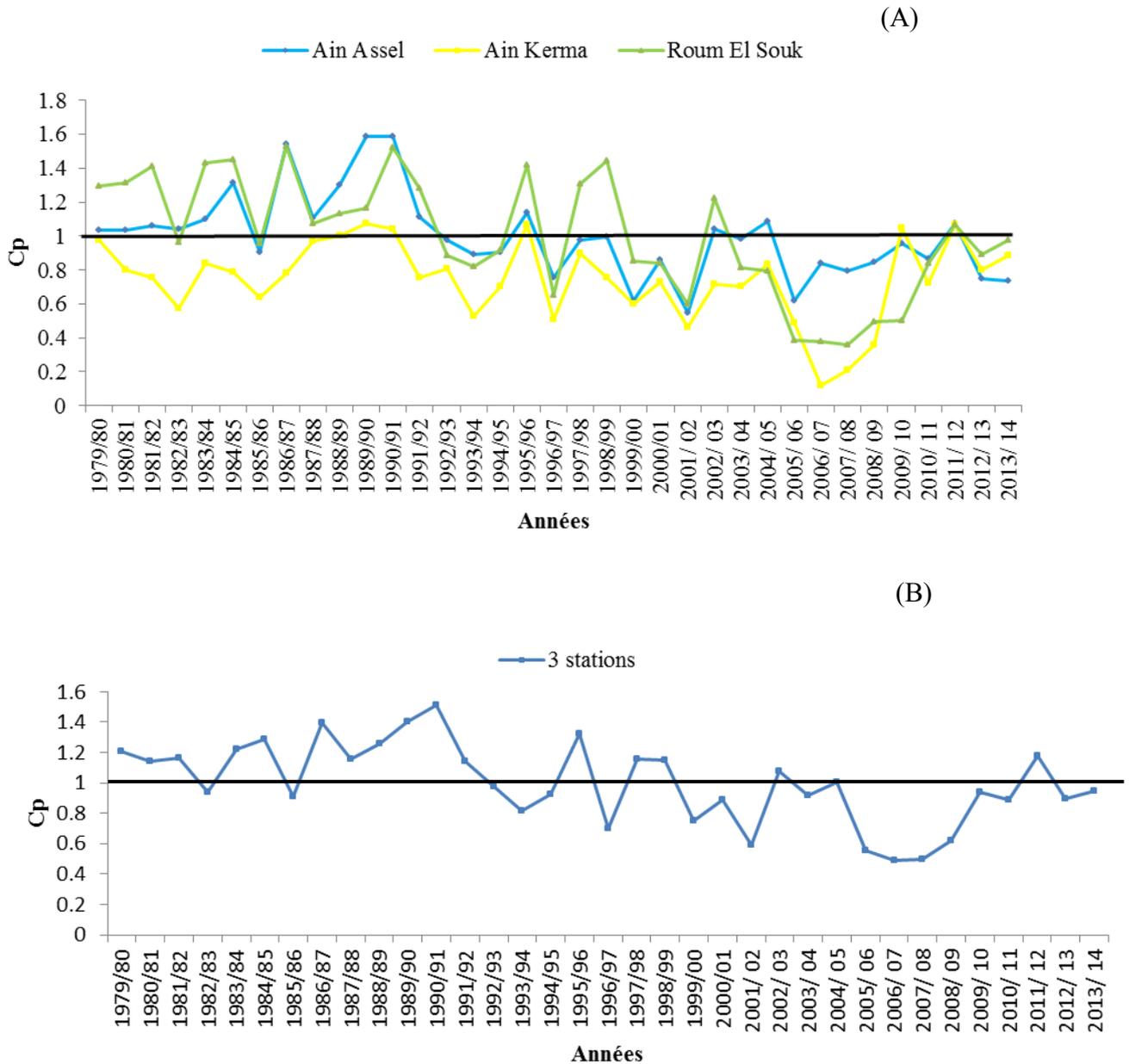
Pour les valeurs du coefficient pluviométrique supérieures ou égales à l'unité ( $CP \geq 1$ ), on considère que l'année est humide et les valeurs inférieures à l'unité ( $CP < 1$ ) correspondent aux années sèches. Les valeurs du coefficient pluviométrique pour les trois stations sont portées sur le (Tableau 8) Ainsi, on déduit pour chaque station le nombre d'années humides et celui des années sèches.

**Tableau 8.** Représentation du nombre d'années humides et sèches au niveau des trois stations.

	Nombre d'années humides	Nombre d'années sèches
Station Ain Assel	16	19
Station Ain Kerma	06	29
Station Roum El Souk	16	19
Moyenne	17	18

On remarque que le nombre des années humides est inférieur à celui des années sèches pour les 3 stations. Par contre, la station d'Ain Kerma comporte une prédominance d'années sèches. Cette prédominance caractérise la station d'Ain Kerma comme étant la plus sèche par rapport aux autres stations avec une pluie moyenne annuelle de 705,11mm.

Les valeurs du coefficient pluviométrique varient d'une station à l'autre et pour donner une meilleure interprétation, ces valeurs ont été représentées sur des graphiques en fonction des années d'observation (Figure 25).



**Figure 25.** Variation du coefficient pluviométrique au niveau des stations pluviométriques (A: 3station, B : moyenne des 3station).

La courbe ci-dessus présente respectivement la variation interannuelle de la pluviométrie des 3 stations sur la période 1979-2014.

Pour la station d'Ain Assel et Roum El Souk, 2 séquences peuvent être retenues :

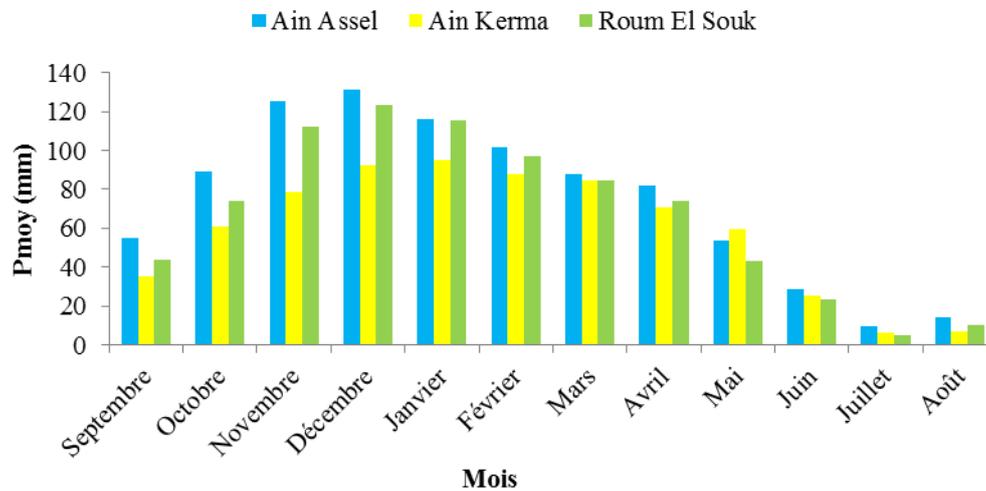
- Une période sèche marquée par 3 pics observés en 1996/1997, 2001/2002, 2005/2006 pour Ain Assel et Roum El Souk; 2006/2007 pour Ain Kerma.
- Une période principalement pluvieuse de 1979/1980 à 1992/1993 et 1995/96 à 1999/2000. Après l'année 2000, on remarque qu'il y a une réduction des précipitations malgré les quelques années assez pluvieuses au nombre de 3 années.

La combinaison des trois stations à donner des coefficients pluviométriques maximum en 1986/1987 et 1990/1991 et 1995/1996 ; ils correspondent aux valeurs de la station de Ain Assel et Roum El Souk. Malgré toutes les variations du coefficient pluviométrique observées au niveau des stations, on peut dire d'une façon générale qu'il y a un équilibre des années entre la période sèches (18 ans) et la période humides (17 ans).

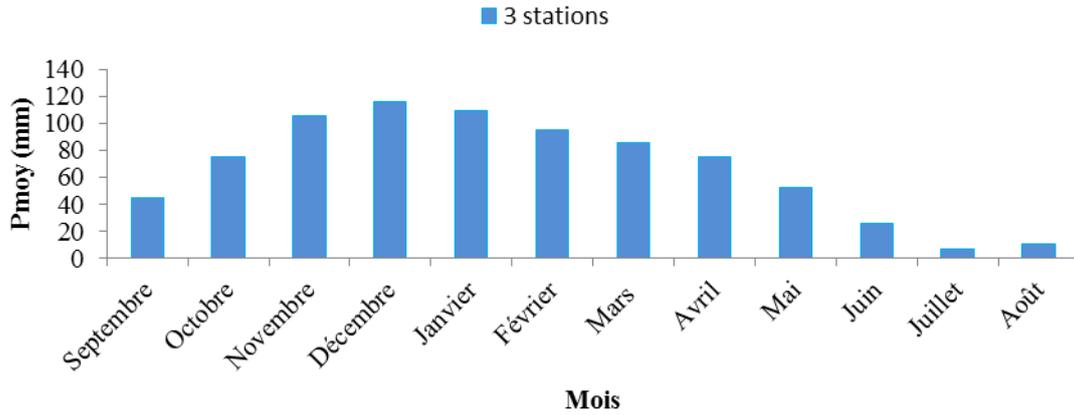
#### 4. Variabilité mensuelle des précipitations

L'étude des précipitations mensuelles a clairement montré une augmentation à partir du mois de septembre jusqu'au mois le plus humide, celui de décembre avec 131,11mm (Figure 26). Cependant, pour la station d'Ain Kerma, c'est le mois de janvier qui est le plus humide suivi de décembre. L'association des 3 stations donne une valeur maximale des précipitations de 115,96 mm enregistrée également en décembre.

Le gradient mensuel des précipitations commence à chuter après le mois de décembre, le mois de juillet et août considérés comme les plus secs avec des valeurs comprises entre 4 et 14 mm.



**Figure 26.** Variabilité mensuelle des précipitations dans les trois stations pluviométriques.



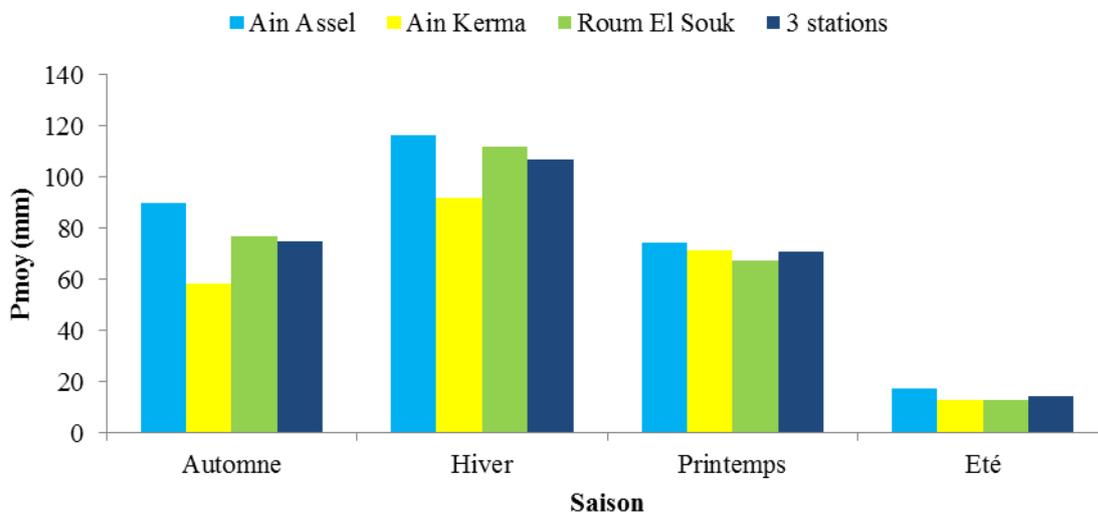
**Figure 27.** Variabilité moyenne mensuelle des précipitations.

En ce qui concerne la répartition inter-mensuelle des pluies, on remarque que :

- La période humide est située entre septembre et avril.
- La période très sèche est représentée par les mois de mai, juin, juillet et août.

#### 4.1. Etude du régime pluvial saisonnier

La pluie se fait très rare en été, avec des valeurs de 12,81mm et 17,41mm; cependant, cette saison est considérée la plus sèche de l'année. La saison hivernale est la plus humide dont les précipitations moyennes varient entre 91,89mm à Ain Kerma et 116,20mm à Ain Assel. En outre, nous constatons que la saison automnale et la saison printanière présentent des périodes de pluviosité presque identiques (Figure 28).



**Figure 28.** Représentation du régime saisonnier des précipitations.

En analysant la dispersion mensuelle des précipitations, on constate que les valeurs du coefficient de variation calculées varient entre 0,45 en janvier et 1,89 en juillet (Figure 29). Cependant, on remarque une plus grande variabilité pendant la saison estivale avec les coefficients de variation très élevés, dépassant l'unité. La saison hivernale présente une plus faible variabilité si on la compare à celle de la saison automnale ou printanière. Ainsi, la variation de coefficient Cv présente dans la figure 28 une forme de cuvette où les deux bouts à savoir les saisons automnales et estivales montrent les plus grands redressements.

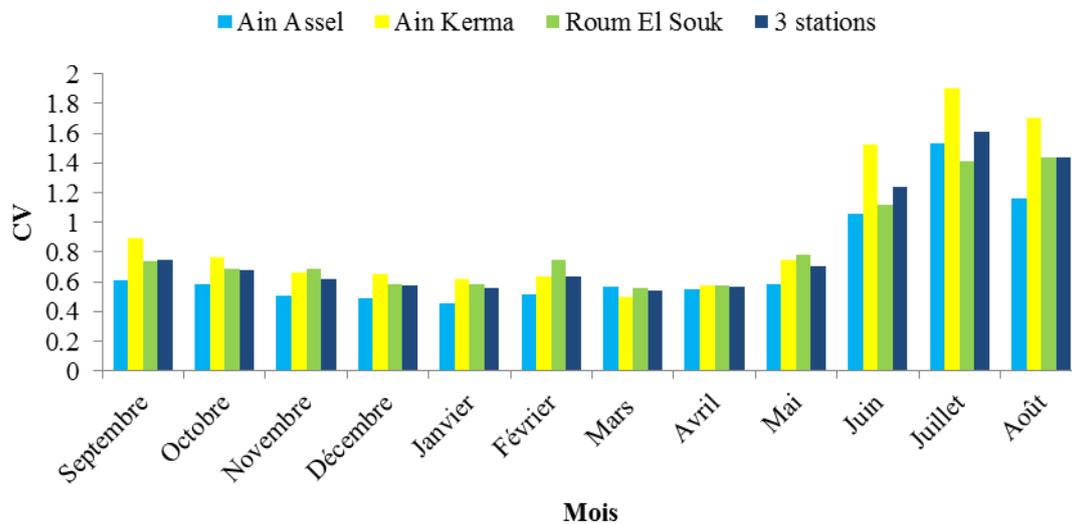


Figure 29. Répartition mensuelle des coefficients de variation.

### 5. Répartition des pluies journalières

Afin de bien évaluer la répartition des pluies journalière des 3 stations, nous avons procédé au calcul des différents effectifs et fréquences des classes des pluies journalières (Tableau 9).

Tableau 9. Classes des pluies journalières pour les trois stations.

classes	Ain assel		Ain Kerma		Roum El Souk	
	NI	F (%)	NI	F (%)	NI	F (%)
20-30 mm	247	66	185	66	237	71
30-40 mm	101	27	77	27	73	22
40-50 mm	27	7	19	7	24	7
>50 mm	0	0	0	0	0	0

Les pluies journalières ayant une hauteur inférieure à 30 mm varient entre 66% et 71% des averses tombées durant les 35 années d'observation, tandis que presque 34% d'entre elles correspondent aux pluies torrentielles dans les stations de Ain Assel et Ain Kerma, et 29% dans la station de Roum El Souk. De ce fait, on s'attend à une érosion intense durant les averses ayant des intensités supérieures ou égales à 30mm/jour surtout pendant les périodes automnales et estivales où les sols sont sans couverture végétale protectrice. L'effet de battance va avoir une importante contribution dans le ruissellement diffus et le lessivage des particules du sol déjà sèches et sans protection. Plusieurs chercheurs dont Eric Roose ont estimé que l'érosion du sol efficace commence souvent à partir d'une intensité de pluie journalière de 30 mm.

## 6. Diagrammes pluvio-thermiques

### 6.1 Températures

La température de l'air du bassin versant de l'Oued Kébir Est a été analysée à partir de la statistique descriptive (valeurs moyennes) et des représentations graphiques. Cette analyse a été effectuée à partir des données disponibles des trois stations : Ain Assel et Roum El Souk représentant la partie nord du bassin et Ain Kerma représentant la partie sud. Vu qu'il y a un manque de données au niveau des stations pluviométrique du bassin, nous avons utilisé la base de données SWAT pour remplacer les valeurs manquantes par celles de la station la plus proche (voisine).

**Tableau 10.** Température moyennes mensuelles au niveau des 3 stations.

Stations/mois	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
Ain Assel	23,25	19,33	13,37	9,51	8,27	8,63	10,84	13,58	18,02	23,00	26,55	26,96
Ain Kerma	22,92	18,99	13,78	10,85	9,78	10,32	12,57	15,26	19,55	24,03	26,27	26,13
Roum El souk	23,18	19,09	13,74	10,78	9,65	10,17	12,49	15,40	20,08	24,70	26,82	26,65

La température moyenne annuelle varie entre 16,77°C à Ain Assel, 17,53 °C à Ain Kerma et 17,72°C à Roum El Souk. La température moyenne annuelle de chaque station est supérieure aux moyennes mensuelles de novembre à avril qui représentent des périodes plus froides et humides et devient inférieure aux moyennes mensuelles à partir de mai jusqu'à octobre ou l'écoulement est de plus en plus faible à rare en été.

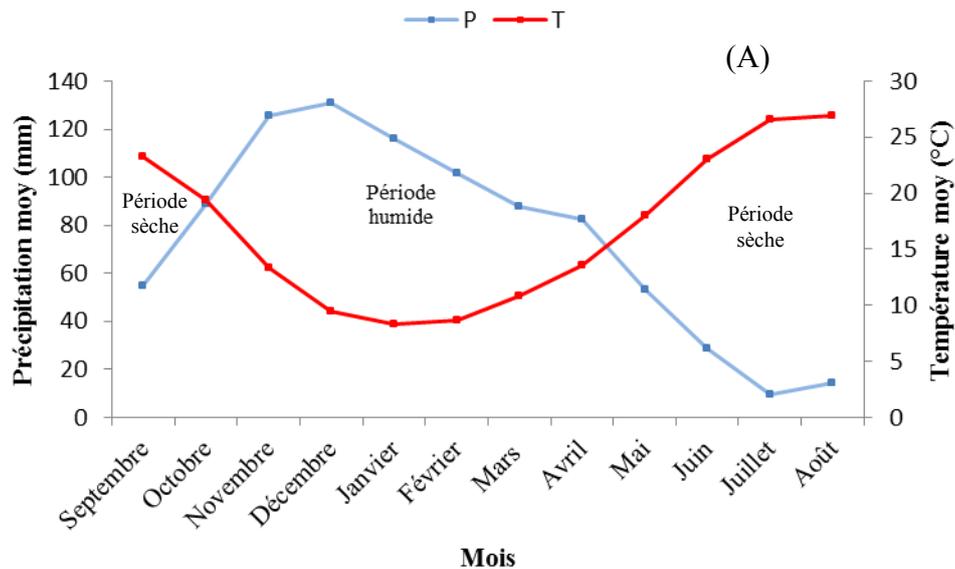
En ce qui le diagramme pluvio-thermique, on a représenté sur un même système d'axes, la variation des températures et celle des précipitations moyennes mensuelles. Nous

avons porté les valeurs des températures moyennes à l'échelle double des précipitations moyennes mensuelles sur l'axe des ordonnées; les différents mois de l'année figurent sur l'axe des abscisses (Figure 30). L'utilisation de la méthode pluvio-thermique va nous permettre, avec plus de précision, de déterminer les périodes humides et sèches.

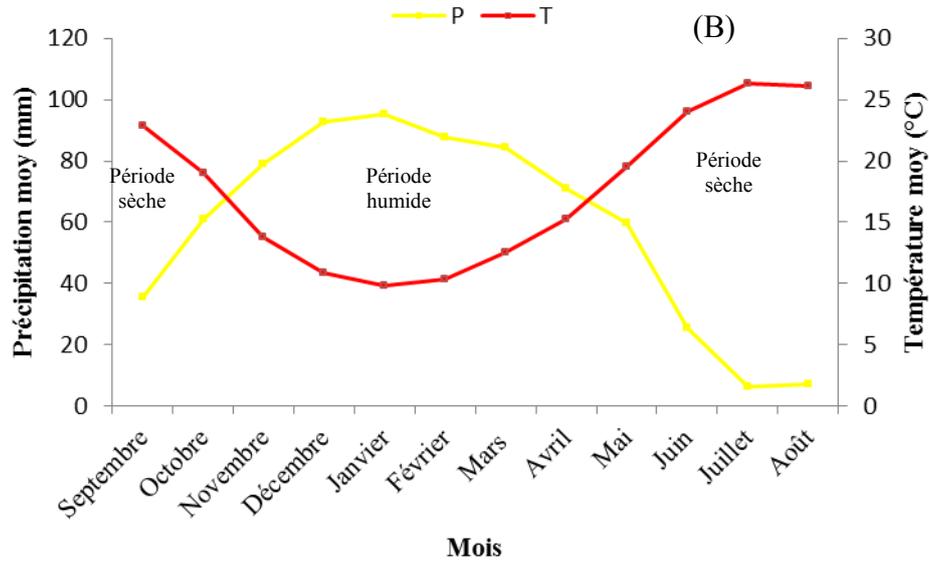
Les courbes de variation des précipitations sont en opposition avec celles des variations des températures moyennes indiquant la présence au niveau des trois stations de deux périodes :

- Une longue période humide constituée de 7 à 8 mois. Pour les stations d'Ain Assel et Roum El Souk, la période humide est située entre octobre et avril. Par contre, la station de Ain Kerma montre une période humide qui débute en novembre et s'étale jusqu'à avril.
- Une période sèche débutant à partir de mai, proprement dite, jusqu'à septembre.

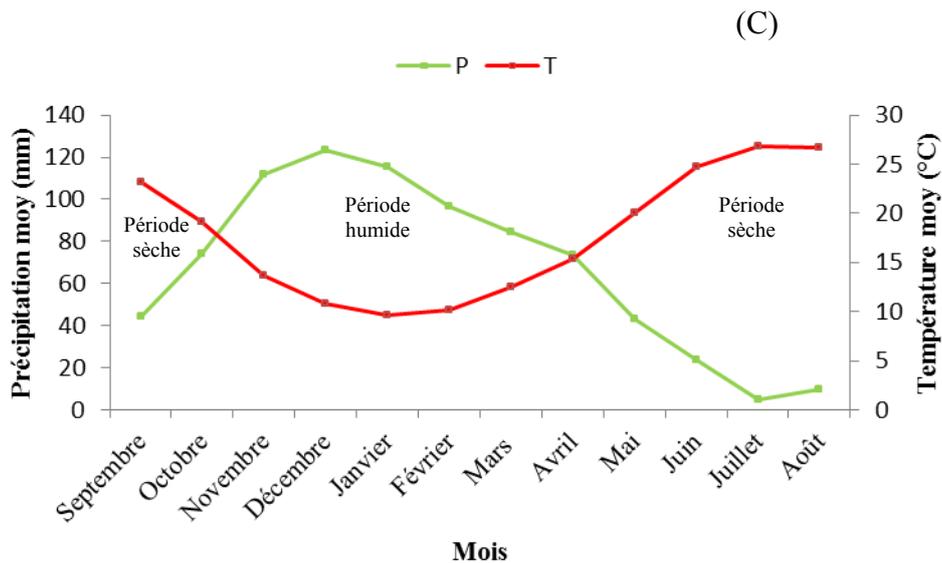
Station Ain Assel



## Station Ain Kerma



## Station Roum El Souk



**Figure 30.** Diagrammes pluvio-thermiques.

Les courbes de variation des précipitations et de température révèlent une période humide pour les stations étudiées marquées par des températures très faibles par rapport à la température moyenne annuelle notamment pour le mois de janvier, et des hauteurs de précipitations maximales observées surtout entre les mois de novembre et décembre ou décembre et janvier. Les périodes sèches sont caractérisées par la rareté des pluies surtout

pour les mois de juin, juillet et août, au cours desquels les températures atteignent leurs maximums.

## II. Analyse hydrologique

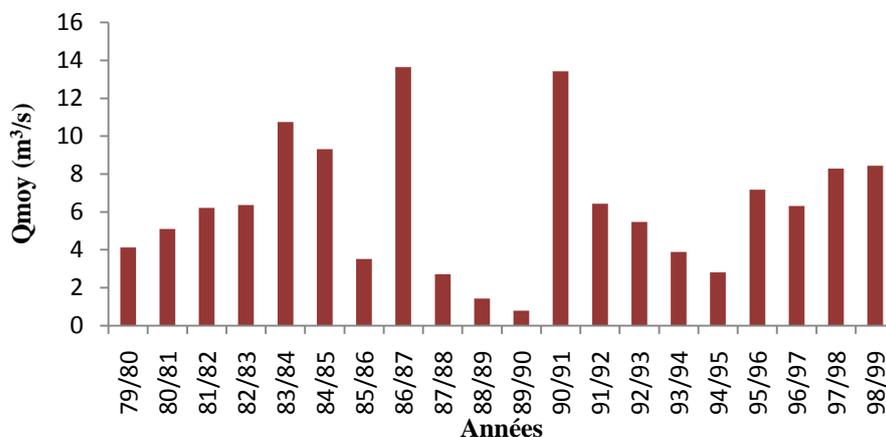
Le régime des débits des cours d'eau est le plus souvent la donnée de base indispensable pour le comportement hydrologique donc l'écoulement se définit comme le phénomène de drainage des eaux pluviales au niveau de la surface du bassin versant. L'hydrologie constitue l'élément essentiel pour l'alimentation des cours d'eau.

Les débits des oueds qui entrent dans notre zone d'étude sont mesurés au niveau de la station hydrométrique d'Ain Assel, située à l'exutoire du bassin de l'Oued Kébir Est. Les observations hydrométriques dont nous disposons sont celles des débits journaliers d'une série de 20 années (1979/1980 à 1998/1999) avant la construction du barrage de Mexa.

### 7. Variabilité interannuelle de l'écoulement

Le débit moyen annuel de chaque année de la série est calculé en divisant la somme des débits annuels par les douze (12) mois de l'année. La somme des débits interannuels et leur division par la période d'observation, soit 20 années, donne le débit moyen annuel.

L'évolution interannuelle des débits montre une grande fluctuation des valeurs. Les débits les plus élevés sont observés en 1986/87 et 1990/91, alors que les valeurs les plus basses sont enregistrées en 1988/89 et 1989/90 (Figure 31). Les débits montrent principalement une distribution bimodale des valeurs.



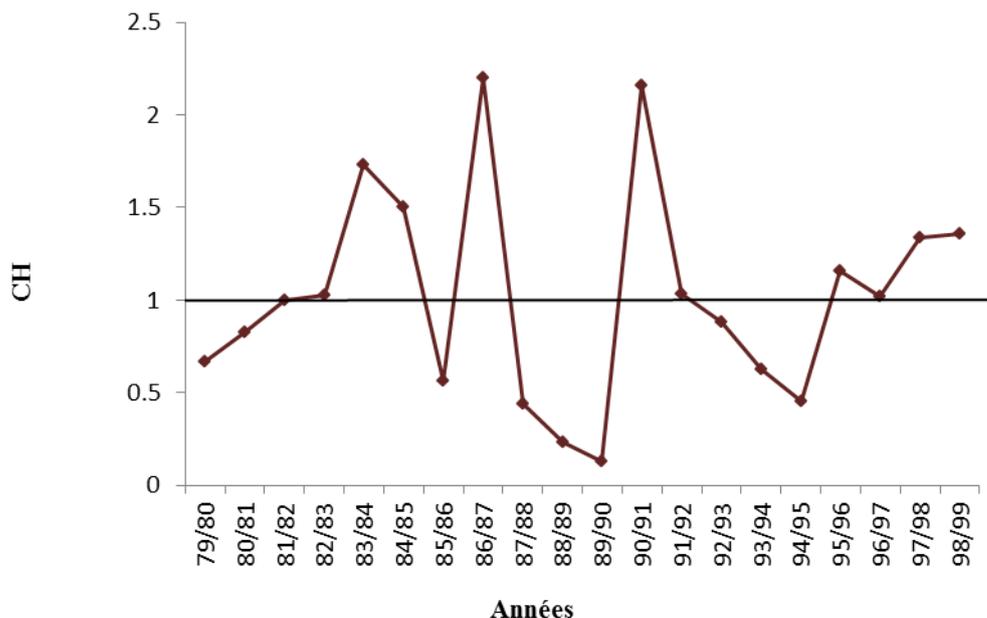
**Figure 31.** Evolution annuelle des débits liquides.

### 7.1. Coefficient d'hydraulicité

C'est le rapport du débit moyen de l'année à celui de la période d'observation. Ce rapport permet d'identifier et de classer les années humides et sèches et d'observer leur variation dans le temps.

Après avoir analysé les périodes humides et sèches en utilisant le coefficient pluviométrique, on va encore une fois définir ces deux périodes avec le coefficient d'hydraulicité. On constate que le nombre des années humides dépasse celui des années sèches, il s'agit de 11 années humides et 9 années sèches (Figure 32). En comparant les coefficients pluviométriques avec ceux d'hydraulicité de la période commune 1979/80 – 1998/99 ; on constate qu'il y a une certaine discordance entre les années humides et sèches. Ainsi, la période 79/80-1980/81 est vue humide avec le Cp mais sèche avec CH ; de même pour la période 1987/88-1989/90. Pour l'année 1985/86, on a une année sèche avec Cp et humide avec CH.

Les valeurs de l'hydraulicité appartenant à la période humide oscillent entre 1,02 (1981/82) et 2,19 (1986/87). L'année hydrologique 1989/1990 a connu un grand déficit d'écoulement avec un coefficient très faible de 0,13; correspondant à la période la plus sèche de la série. L'importance de l'écart entre les valeurs extrêmes du coefficient d'hydraulicité exprime une forte fluctuation des débits d'une année à autre.



**Figure 32.** Représentation de la variation du coefficient d'hydraulicité.

## 8. lame d'eau écoulée

L'écoulement ou le débit se définit comme étant le volume d'eau écoulé dans une période de temps, il est donc possible d'en déduire la hauteur d'eau écoulée, appelée aussi « lame d'eau écoulée » sur toute la surface du bassin durant les 20 années d'étude.

La lame d'eau moyenne écoulée durant les 20 années d'observation est estimée à 291,28mm; celle-ci est calculée à partir de la formule suivante :

$$Le = (Q \times T/S) \times 10^3 \dots\dots\dots (\text{mm})$$

avec :

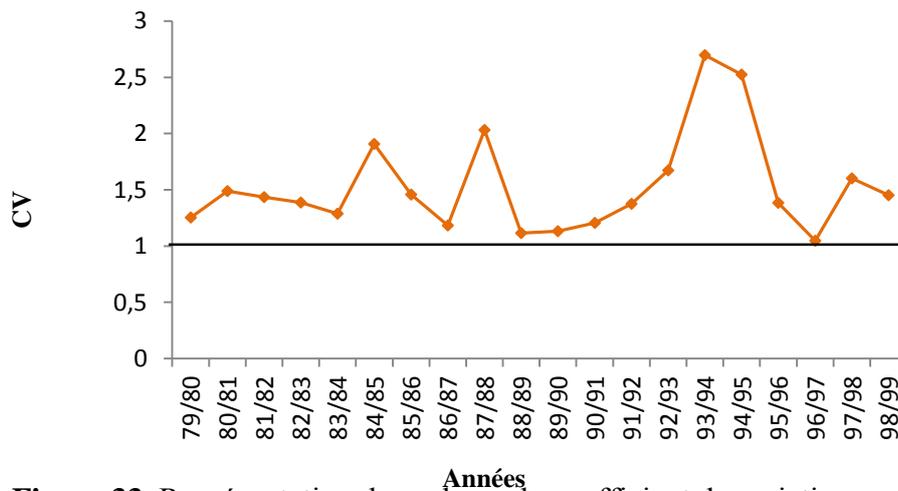
- Q : le débit moyen en m<sup>3</sup>/s,
- T : le temps de la période considérée en seconde,
- S : la surface du bassin versant en m<sup>2</sup>.

Les valeurs maximales des lames d'eau écoulées enregistrées en 1986/87 et 1990/91 sont égales respectivement à 640,02 mm et 629,72mm. Les années les plus sèches de 1988/89 et 1989/90 ont fourni des ruissellements de 67,28mm et 37,42mm.

Il est connu que la variation de l'écoulement dans les bassins versants est liée, d'une part au comportement hydrologique de la région et, d'autre part, aux caractéristiques physico-géographiques du bassin lui-même, à savoir la géologie et la couverture végétale.

### 8.1. Coefficient de variation (Cv)

L'approche de la dispersion relative des débits autour de leur moyenne est exprimée par le coefficient de variation qui est déterminé en divisant l'écart type par la moyenne de chaque année. Les valeurs obtenues sont représentées sur le graphique (Figure 33).



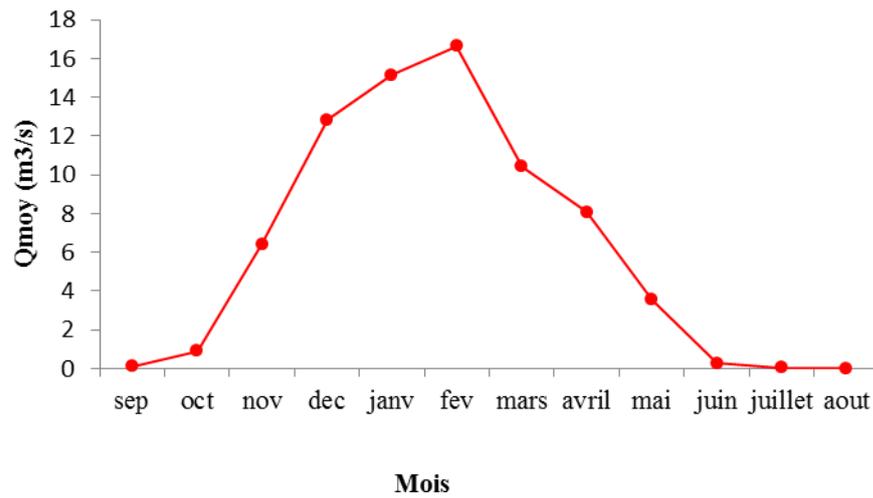
**Figure 33.** Représentation des valeurs du coefficient de variation.

Il est à noter que les valeurs du coefficient de variation calculées pour les écoulements annuels sont toutes supérieures à 1 et oscillent entre 1,04 (1996/97) et 2,69 (1993/94). De ce fait, on peut affirmer que la distribution des débits se caractérise par une forte dispersion des données et qu'elles ne suivent pas une distribution de la loi normale. Sachant que la règle de la normalité stipule que le Cv doit être souvent inférieur ou égal à 0.50.

### 9. Variation mensuelle de l'écoulement

L'étude de l'écoulement à l'échelle mensuelle peut donner une meilleure explication, notamment sur le régime fluvial et ses fluctuations. Pour ce faire, nous avons utilisé quelques paramètres intéressants tels que le coefficient de variation, le coefficient mensuel des débits (CMD) et le coefficient d'écoulement.

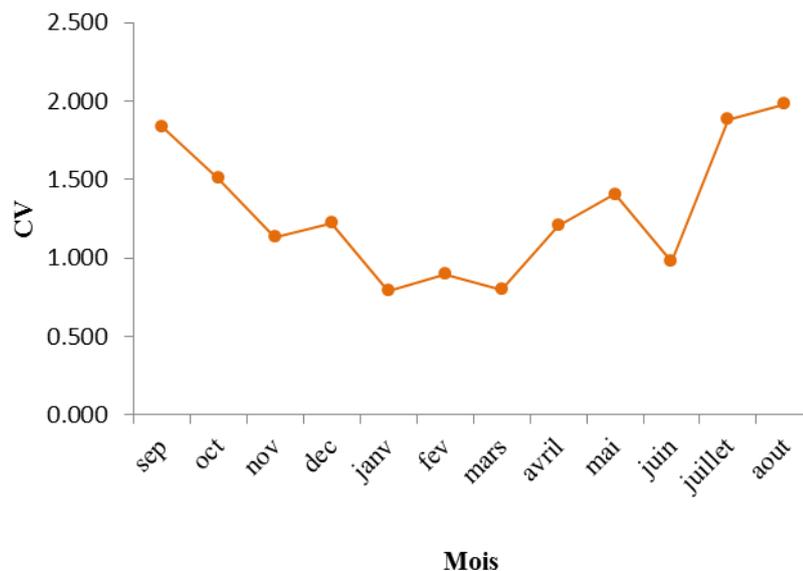
La valeur du débit la plus élevée correspond au mois de février avec une valeur de 16,63 m<sup>3</sup>/s (Figure 34). Décembre et janvier présentent aussi des valeurs élevées des débits, avec respectivement 12,84 m<sup>3</sup>/s et 15,14 m<sup>3</sup>/s. Les valeurs les plus faibles sont observées à partir de juin jusqu'à septembre dont elles varient entre 0,01 et 0,2 m<sup>3</sup>/s.



**Figure 34.** Evolution mensuelle des débits.

### 9.1. Coefficient de variation

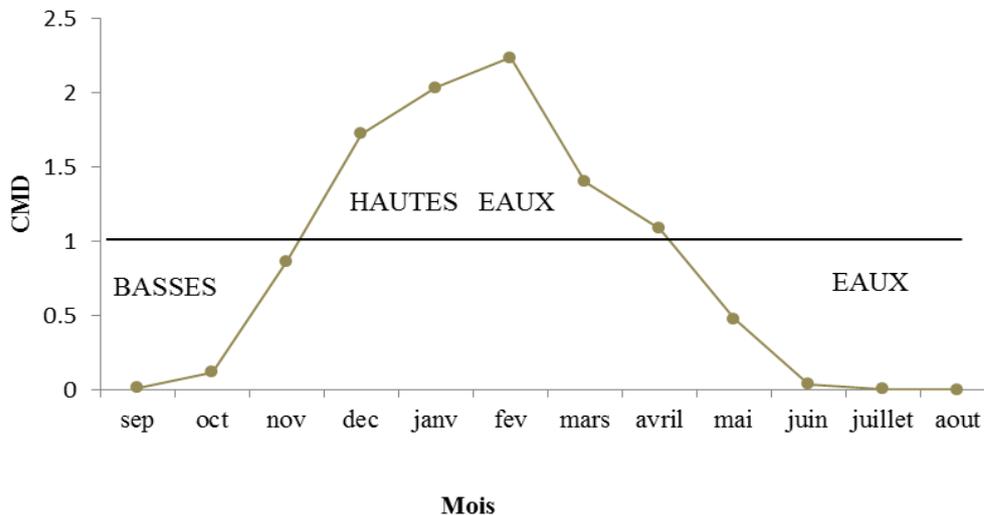
A partir des moyennes et des écarts types de la série des débits mensuels, nous avons calculé les coefficients de variation pour chaque mois; ces valeurs varient entre 0,79 et 2,24 ce qui montre aussi une forte fluctuation et irrégularité de cette distribution (Figure 35). Les plus faibles dispersions sont observées entre janvier et mars et les plus fortes en juillet, août et septembre où les coefficients de variation dépassent 1,80.



**Figure 35.** Valeurs du coefficient de variation à l'échelle mensuel.

## 10. Coefficient mensuel des débits (CMD)

La variation mensuelle des débits est souvent exprimée par le coefficient mensuel des débits (CMD) qui est le rapport du débit moyen mensuel à la moyenne annuelle de la série. Ce coefficient caractérise les mois des basses et hautes eaux (Figure 36).



**Figure 36.** Représentation de la variation du coefficient mensuel des débits.

On constate que la période des hautes eaux se situe entre les mois de novembre et avril, et on remarque aussi une période sèche qui débute à partir du mois de mai et persiste jusqu'à la fin du mois d'octobre. En se référant au diagramme pluvio-thermique, on constate que la période humide liée aux écoulements vient un peu en retard. La période pluvieuse commence généralement en octobre; cependant, le ruissellement de surface ne débute qu'en novembre comme le montre la figure 36. Entre autres, dans les deux méthodes utilisées la période humide se termine en avril.

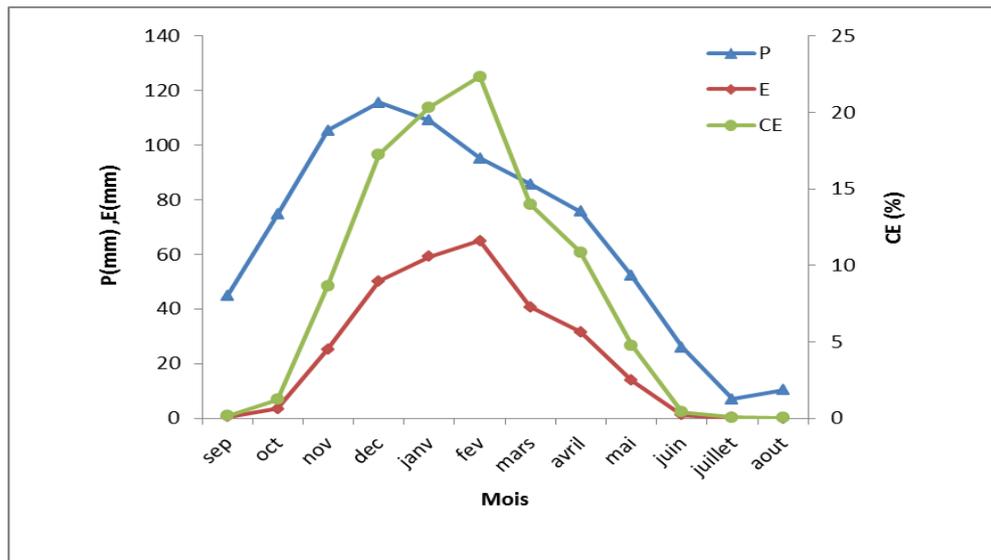
Les valeurs du CMD varient d'un mois à l'autre avec un maximum de 2,23 observé durant le mois de février et une valeur très faible qui caractérise le mois d'août comme le mois le plus déficitaire en écoulement.

## 11. Coefficient d'écoulement

L'étude de la variation du coefficient d'écoulement à l'échelle mensuelle donne une bonne approche du régime fluvial et saisonnier du bassin. A cet effet, nous avons calculé les valeurs mensuelles des lames précipitées (P en mm) et ruisselées (E en mm), ensuite nous avons déduit les coefficients d'écoulement correspondants au mois de la façon suivante :

$CE \text{ (coefficient d'écoulement)} = E \text{ (mm)}/P \text{ (mm)}$

Les valeurs extrêmes du coefficient d'écoulement mensuel coïncident parfaitement avec celles de l'écoulement ; ceci démontre que le coefficient d'écoulement est directement lié à l'écoulement, puisqu'en effet, on a  $CE_{\max} = 22,33\%$  et  $E_{\max} = 65,04\text{mm}$ . Par contre, le pic des précipitations se trouve avant celui de l'écoulement, ceci est dû aux conditions géomorphologiques du terrain et le temps de concentration des eaux de ruissellement à l'exutoire du bassin versant.



**Figure 37.** Variation du coefficient d'écoulement à l'échelle mensuelle.

## 12. Variation des débits moyens journaliers

L'étude des débits à l'échelle journalière est très intéressante car le régime fluvial peut subir des variations importantes pendant des durées très courtes de 24 heures. Puisque nous disposons des données des débits journaliers pour la période allant de 1979/1980 jusqu'à 1998/1999, nous avons procédé à une analyse, par classes, des différentes valeurs observées. Le résultat de cette analyse est illustré dans le (Tableau 11).

**Tableau 11.** Classification des débits journaliers.

classes Q (m <sup>3</sup> /s)	Effectifs (%)
(0 - 0.5)	52
(0.5 - 1)	10
(1 - 10)	26
(10 - 50)	9
(50 - 100)	2
>100	1

On remarque que la moitié des débits observés pendant les 20 années sont inférieurs ou égales à 0,5 m<sup>3</sup>/s. Après cette classe, vient une prédominance de 26 % des valeurs des débits contribuant à une classe de 1 à 10 m<sup>3</sup>/s (Tableau 11). Les valeurs fortes et extrêmes (supérieures à 10 m<sup>3</sup>/s) des débits ne représentent que 12%. Ce sont ces classes de débits qui peuvent provoquer des crues et accentuation de l'érosion des sols surtout par les sapements de berge, ce qui produit des glissements de terrain et même des coulées boueuses. En théorie, on peut affirmer que les débits journaliers peuvent contribuer à donner des productions en sédiments considérables. Cependant, lorsqu'il y a dilution, les quantités des concentrations en suspension deviennent moins importantes et ce malgré que les transports solides soient élevés. Par ailleurs, ces débits seront utilisés avec les concentrations en suspension pour quantifier les débits solides.

### Conclusion

D'après l'étude élaborée dans ce chapitre, je me suis basée sur l'étude climatique d'une série de mesures correspondant à une période de 35 années d'observation (de 1979/1980 à 2013/2014). Le bassin versant de l'Oued Kébir Est exposé à une région bien arrosée qui correspond à environ 801,71 mm de précipitation moyenne annuelle et que son climat est caractérisé par d'importantes irrégularités interannuelles. Les caractéristiques climatiques du bassin versant indiquent qu'il appartient au climat méditerranéen subhumide de l'Afrique du Nord.

La période humide est caractérisée par des températures très faibles par rapport à la température moyenne annuelle notamment pour le mois de janvier; les précipitations

maximales sont observées surtout entre décembre et janvier. En revanche, la période sèche est connue par la rareté des pluies surtout pour les mois de juin, juillet et août dont les températures atteignent leurs maximums.

L'érosion hydrique suit souvent la répartition des pluies dont elles sont distinguées par une saison humide et une autre sèche. La période vulnérable pour la dégradation des sols est donc le début de la saison humide quand la pluie est forte et la végétation n'a pas encore poussé pour protéger le sol.

La mesure et l'analyse des débits d'une série de 20 années d'observation (du période allant de 1979/1980-1998/1999) ont montré que le bassin versant de l'Oued El Kébir Est possède un débit moyen annuel de 13,10 m<sup>3</sup>/s. Ce débit correspond à une lame d'eau moyenne annuelle estimée à 291,28mm.

L'année hydrologique 1986/1987 représente la plus forte abondance en écoulement. Elle coïncide parfaitement avec l'année extrême humide au regard des précipitations annuelles, ce qui explique que le régime hydrologique, à l'échelle annuelle, est fortement lié aux conditions climatiques qui caractérise le bassin.

En revanche, le régime hydrologique mensuel se résume à deux grandes périodes: une période des hautes eaux qui se remarque surtout en hiver et persiste jusqu'au milieu de la saison printanière et une période des basses eaux qui débute à partir du mois de mai et s'étale pendant toute la saison estivale, se prolongeant jusqu'au début de l'automne. L'écoulement est plus fort entre décembre et février; par conséquent, ce sont les facteurs physico-géographiques qui influencent le comportement hydrologique du milieu physique.

**Chapitre 4 :**

**Caractéristiques physico-chimiques.**

## Introduction

La qualité des eaux d'un hydro-système dépend de nombreux facteurs et processus environnementaux. Elle est définie plus particulièrement par les caractéristiques géomorphologiques (altitude, pente, ...), pédologiques et géologiques (origine et nature des terrains) et anthropiques (degré d'urbanisation, activités industrielles, agricoles ...) du bassin versant. Celui-ci constitue un espace délimité par une ligne de partage des eaux et possédant son propre réseau hydrographique. Les versants du bassin collectent les eaux d'origine atmosphérique et les concentrent vers les éléments constitutifs du réseau (Amoros et Petts, 1993). Au cours de leur transfert à la surface du sol et/ou en profondeur (ruissellement, infiltration, ...) puis de leur circulation dans l'hydro-système, les eaux sont soumises à des processus physico-chimiques et biologiques qui conditionnent leur composition. Celle-ci définira ce qui est communément appelé la «qualité de l'eau» (Thurman, 1985; Madigou, 2005).

Cette étude porte sur l'analyse des paramètres physico-chimiques des ressources en eaux du bassin hydrographique de l'extrême Nord-Est de l'Algérie, d'étudier la qualité des eaux de l'Oued Kèbir Est et de révéler le problème de la pollution qui peut menacer ces eaux par les rejets agricoles. Pour cela une série d'analyses physico-chimiques de l'eau a été menée. Les analyses effectuées à partir des campagnes de mesure ont été réalisées durant les deux années 2015 et 2016.

### 1. Sources de pollution

La pollution des eaux peut avoir de multiples origines (Figure 38) qu'il s'agisse des pollutions domestiques et urbaines, industrielles ou agricoles.

Parmi les plus importantes sources de pollution dans la région, on trouve : L'activité agricole constitue la première cause de pollution diffuse des ressources en eau. L'impact des activités agricoles sur la qualité des eaux est la conséquence des pertes de fertilisants (engrais chimiques, effluents d'élevages) et des produits de traitement des cultures (produits phytosanitaires). Ces pollutions peuvent empêcher certaines utilisations de l'eau, notamment son emploi pour l'alimentation humaine et animale et entraîner une dégradation des milieux aquatiques. Dont les conséquences économiques s'ajoutent au dommage environnemental et écologique.



**Figure 38.** Source de pollution pour les cours d'eau.

## 2. Objectif de l'étude

L'objectif principal de notre étude est la caractérisation des eaux d'Oued Kébir Est. Cet objectif peut être atteint par l'étude des points suivants :

- L'étude de la qualité de l'eau par l'analyse des paramètres physico-chimiques, des eaux d'Oued Kébir Est.
- Recherche d'une probable variation spatiale entre les différents sites étudiés.
- Recherche d'une probable variation temporaire entre les deux saisons sèche et humide étudiées.
- Recherche des polluants et l'identification des sources de pollution si c'est possible.

## 3. Etude de la qualité des eaux de surfaces de l'Oued Kébir Est

La qualité de l'eau dépend de facteurs naturels déterminants (sol, sous-sol, etc.....) et d'activité humaine (agricole, domestique et industrielle) produisant des rejets qui se trouvent directement ou indirectement dans les milieux aquatiques, cette dernière est définie selon quatre classes de qualité déterminés à partir d'une grille à double entrée (classe de qualité / Paramètres mesurés), et qui est composée de quelques paramètres, importants certes, mais qui ne recouvrent pas toutes les formes de pollution. Elle est complétée, pour faire apparaître

Le risque d'eutrophisation, par deux autres grilles (azote et phosphore). Dans l'avenir on prendra également en compte des critères biologiques tel que l'indice biologique global (I.B.G) qui s'avèrent indispensables pour mentionner des problèmes ponctuels aux endroits où l'on dispose de données (ANRH, 2009).

#### • Définition des quatre classes de qualité

\* Classe I : Eau de bonne qualité, utilisée sans exigence particulière ; Elle est représentée graphiquement par la couleur bleue.

\* Classe II : Eau de qualité moyenne, utilisée après un simple traitement. Elle est représentée en vert.

\* Classe III : Eau de mauvaise qualité, ne peut être utilisée qu'après un traitement très poussé. Elle est représentée en jaune.

\* Classe IV : Pollution excessive, ne peut être utilisée qu'après traitements spécifiques et très onéreux. Elle est représentée en rouge.

#### 4. Plan d'échantillonnage et choix des stations

Le choix des sites d'échantillonnages a été établi selon un plan fondé sur la recherche des sites les plus pollués et afin que ce choix soit logique, représentatif et justifié, nous avons opté pour l'hypothèse de la diversité des sources de pollution de ce cours d'eau ; c'est pour cette raison que nous avons choisi 03 principaux sites : l'un en amont du bassin et l'autre en aval qui sont respectivement les sites N°1 et N°3. L'autre site N°2 se trouve près d'une zone urbaine. On a effectué 04 campagnes de mesure réalisées entre 2015 et 2016:

- Campagne 1 (02/01/2015).
- Campagne 2 (30/05/2015).
- Campagne 3 (30/01/2016).
- Campagne 4 (25/05/2016).

La localisation des sites par GPS des 3 sites d'échantillonnage est résumée dans le tableau et la figure suivants (Tableau 12 et Figure 39) :

**Tableau 12.** Données GPS des sites d'échantillonnage.

Les sites	Latitude	Longitude	Altitude(m)
Site 01	36°39,137'N	8°22,017'E	202
Site 02	36°42,620'N	8°24,45'E	67
Site 03	36°45,955'N	8°21,989'E	31



**Figure 39.** Présentation des sites d'échantillonnages.

## 5. Inventaire des points de prélèvement

### 5.1. Période de prélèvement

Afin de mettre en évidence les principales caractéristiques physico-chimiques des eaux durant les différentes saisons humide et sèche de l'année 2015 et 2016, quatre prélèvements ont été effectués durant la période humide (hautes eaux) et la période sèche (basses eaux).

### 5.2. Echantillonnage

L'échantillonnage d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin a été adapté, il conditionne la fiabilité de nos résultats analytiques et l'interprétation qui en sera décelée.

L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc...).

Il est donc nécessaire de mettre en place tous les moyens nécessaires, de procéder à un choix judicieux des points de prélèvement et d'utiliser le matériel convenable. Il est tout aussi

important de connaître le devenir de l'échantillon entre le prélèvement et l'arrivée au laboratoire (Rodier *et al.*, 2009).

Les eaux de surface ont été collectées dans des flacons en plastique de 1 litre pour l'analyse physico-chimique, les bouteilles ont été plongées à une certaine distance de la surface (10 cm), assez loin des rives ou des bords ainsi que des obstacles naturels ou artificiels, en dehors des zones mortes, en évitant la remise en suspension des dépôts et en tenant compte de la dilution, des débits, et de la vitesse des courants tout en respectant le protocole suivant :

- Se désinfecter les mains.
- Les flacons ont été rincés 3 fois avec de l'eau à analyser puis remplis jusqu'au bord.
- Les bouchons ont été placés de telle façon qu'il n'y ait aucune bulle d'air et qu'il ne soit pas éjecté au cours du transport.
- Inscrire sur le flacon et sur la fiche toutes les informations concernant le prélèvement (site, lieu, date, heure, éventuels problèmes rencontrés...).

Ensuite ils ont été conservés dans une glacière à une température approximative de 4°C et retournés au laboratoire pour subir les analyses appropriées 4 heures après les prélèvements selon les normes **AFNOR NF T90-420**.

### **5. 3. Le traitement des échantillons**

Les échantillons d'eau ramenés au laboratoire sont filtrés avant d'être analysés, afin d'empêcher d'une part l'action des micro-organismes sur la solution et d'autre part pour retirer les éléments solides en suspension pouvant interagir ultérieurement avec les sels solubles de la solution, le traitement et l'analyse des différents paramètres ont été réalisés au niveau de notre laboratoire Sols et Développement Durable de l'Université Badji Mokhtar-Annaba.

### **5. 4. Matériels et Méthodes d'analyses**

Durant nos analyses, nous avons utilisé le matériel suivant:

- De la verrerie et des outils ont été aussi utilisés tels que : Les capsules, Les fioles, les erlenmeyers, les éprouvettes, les béchers, les pipettes graduées et les entonnoirs... etc.
- D'autres paramètres tels que le chlorure, bicarbonate, calcium, magnésium ont été mesurés par titrimétrie c'est-à-dire par l'utilisation de quelques verreries (pipette, erlenmeyer, burette, fiole ...) et réactifs.

Certains paramètres tels que la température, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous ont été mesurés in situ par un multi-paramètre de terrain de marque **HANNA HI9828/x**.

Au laboratoire, les analyses d'eau ont été effectuées selon les protocoles normalisés.

❖ **Dosage des anions :**

- Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) : par titrimétrie à l' $\text{AgNO}_3$
- Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) : par gravimétrie au  $\text{BaCl}_2$
- Nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) : par spectrophotomètre, la méthode utilisée pour le dosage est celle du réactif de Zambelli (Rodier, 1978)
- Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) : par spectrophotomètre, la méthode utilisée pour le dosage est celle de la méthode au salicylate de sodium (Rodier, 1978)
- Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) : par titrimétrie à  $\text{H}_2\text{SO}_4$
- Ortho-phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) : par méthode spectrométrique

❖ **Dosages des cations :**

- Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ): par titrimétrie à l'EDTA
- Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ): par titrimétrie à l'EDTA
- Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ): par spectrophotomètre

## 6. Résultats et discussion

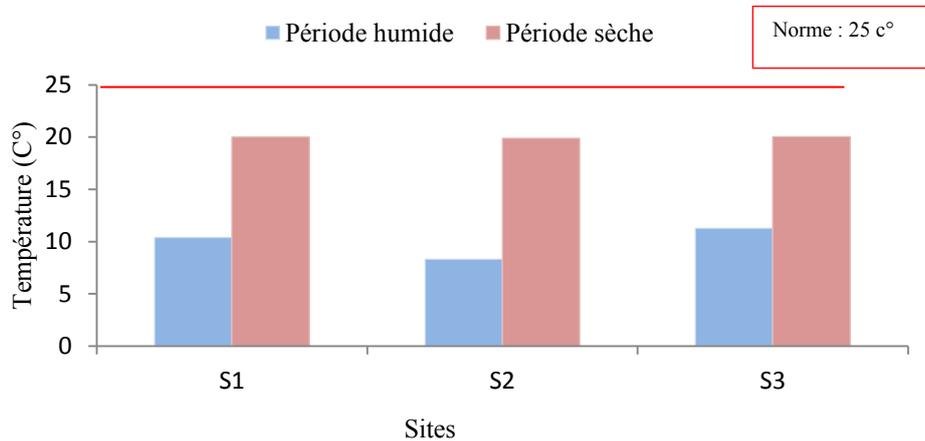
L'analyse physico-chimique des eaux de l'Oued Kébir Est et son affluent (Oued Bougous) montre que les teneurs des éléments chimiques et leur relation sont différents d'un point à l'autre. La diversité de leur composition est influencée, d'une manière directe, par la nature et l'origine des rejets agricoles et urbaine.

### 6.1. Les paramètres physico-chimiques (Mesure insitu)

- **Température ( $T$  °C)**

La température est un facteur écologique important du milieu, Son élévation peut perturber fortement la vie aquatique. Ce paramètre régit pratiquement la totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques (Chapman et Kimstach, 1996). Cette température agit sur la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau, la dissociation des sels dissous, de même que sur les réactions chimiques et biochimiques, le développement et la croissance des organismes vivant dans l'eau et particulièrement les microorganismes (W.H.O, 1987).

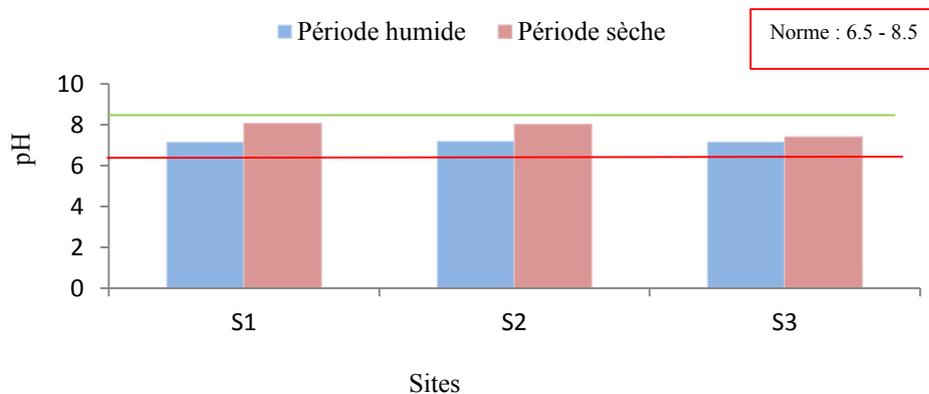
L'évolution temporelle de la température de l'eau montre des valeurs maximales en période sèche et minimales en période humide. La Figure 40 montre que la température varie de 20,04°C (site 3) à 19,88°C (site 2) avec une moyenne de 19,97°C durant la période sèche, par contre durant la période humide elle varie de 11,28°C (site 3) à 8,29°C (site 2), avec une moyenne de 9.98°C. On remarque que les eaux de l'Oued Kébir Est sont directement influencées par la température de l'air.



**Figure 40.** Variation de la température de l'eau pendant les deux périodes d'étude.

- **Potentiel d'hydrogène (pH)**

Le pH est un paramètre qui permet de mesurer l'acidité, l'alcalinité ou la basicité d'une eau (Gomella *et al.*, 1978). La figure 41 montre que le pH mesuré au niveau de tous les sites s'échelonne entre 7,16 (site 3) et 7,19 (site 2) avec une moyenne de 7,16 en période humide et entre 8,06 (site 1) et 7,40 (site 3) avec une moyenne de 7.82 en période sèche, Ce qui traduit généralement un caractère d'eau légèrement neutre à basique.

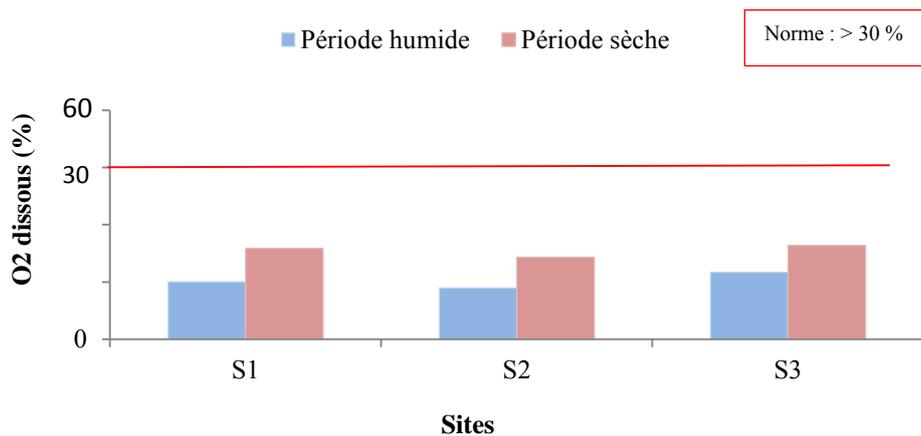


**Figure 41.** Variation de pH de l'eau pendant les deux périodes d'étude.

- **Oxygène dissous (O<sub>2</sub> %)**

La quantification de la concentration de l'oxygène dissous dans l'eau d'un hydro-système, est un facteur assez important du fait qu'il participe à la majorité des processus chimiques et biologiques dans ces milieux aquatique (Brahimi *et al.*, 2014). Si les teneurs en oxygène gardent des valeurs inférieure à 30 %, cela d'ordinaire aura pour conséquence la mort des poissons .Une teneur de 90 à 100% d'O<sub>2</sub> caractérise une eau de bonne qualité (IBGE, 2005). Dans notre étude, l'évolution saisonnière de l'oxygène dissous montre des concentrations plus élevées en période sèche que celles en période humide (Figure 42).

En effet, les teneurs enregistrées varient entre 12% (site 2) et 20% (site 3) avec une moyenne de 16% en période humide 20 % (site 2) à 28% (site 3) avec une moyenne de 24% en période sèche. En effet c'est le site 3 qui présente la concentration la plus élevée. Les eaux de ces oueds peuvent être classées dans la catégorie de l'eau moins oxygénée.



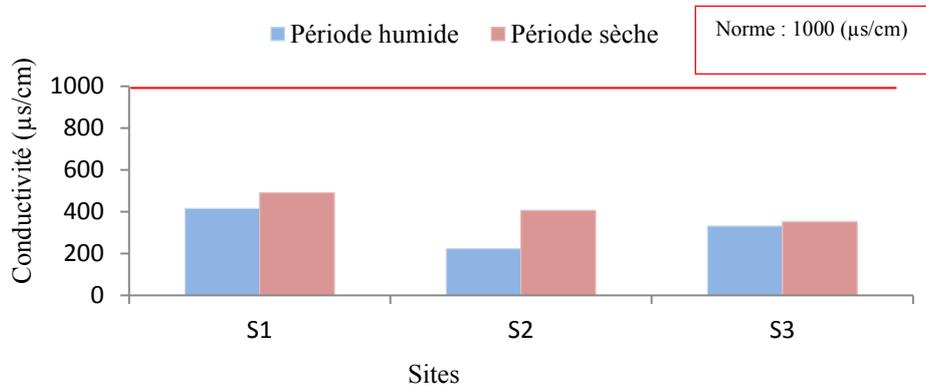
**Figure 42.** Variation du taux de l'oxygène dissous en fonction des sites d'étude et du temps.

- **Conductivité électrique (CE  $\mu\text{s/cm}$ )**

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique et elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent, elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau (Derwich *et al.*, 2010).

La figure 43 montre que la conductivité est plus élevée dans les sites S1 et S2 durant les périodes sèches. Par contre, elle devient plus élevée dans les sites S1 et S3 durant les périodes

humides. Par ailleurs, le tableau 13 donne quelques indications sur la relation existante entre la minéralisation et la conductivité. Les valeurs de la conductivité au niveau de toutes les stations et à travers les deux périodes ne dépassent pas (500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). On remarque que la conductivité est plus au moins faible en période humide avec un moyenne de (323,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et plus au moins élevée en période sèche (415 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Ces valeurs montrent clairement que les eaux de l'Oued Kébir Est ont une minéralisation moyenne.



**Figure 43.** Variation de la conductivité de l'eau pendant les deux périodes d'études.

**Tableau 13.** Classes de minéralisation d'après la conductivité selon Rodier *et al.*, (2009).

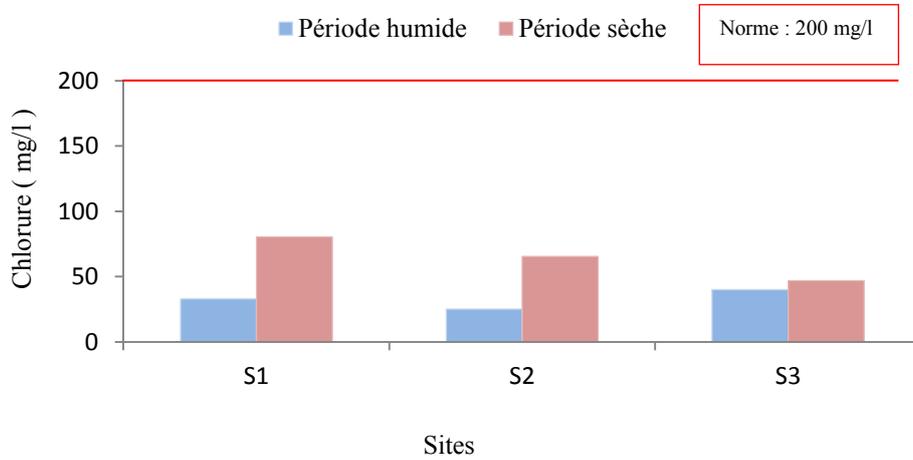
<i>Conductivité</i>	<i>Minéralisation</i>
conductivité < 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ :	très faible;
100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < conductivité < 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ :	faible;
200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < conductivité < 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$ :	moyenne;
333 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < conductivité < 666 $\mu\text{S}/\text{cm}$ :	moyenne accentuée;
666 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < conductivité < 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ :	importante;
conductivité > 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ :	élevée.

## 6.2. Paramètres mesurés au laboratoire

- **Chlorures ( $\text{Cl}^-$  mg/l)**

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium ( $\text{NaCl}$ ) et de potassium ( $\text{KCl}$ ). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Ils ont une influence sur la faune et la flore aquatique ainsi que sur la croissance des végétaux (Makhoukh *et al.*, 2011). La réglementation française fixe comme valeur limite 200 mg/l.

Les valeurs obtenues s'échelonnent entre 80,36 et 46,79 mg/l durant la période sèche, 40 et 25 mg/l durant la période humide. Les valeurs maximales sont observées au niveau du site 1 et site S2 en période sèche (Figure 44). L'évolution temporelle est marquée par un léger abaissement des teneurs en chlorures pendant la saison humide par rapport à la saison sèche.



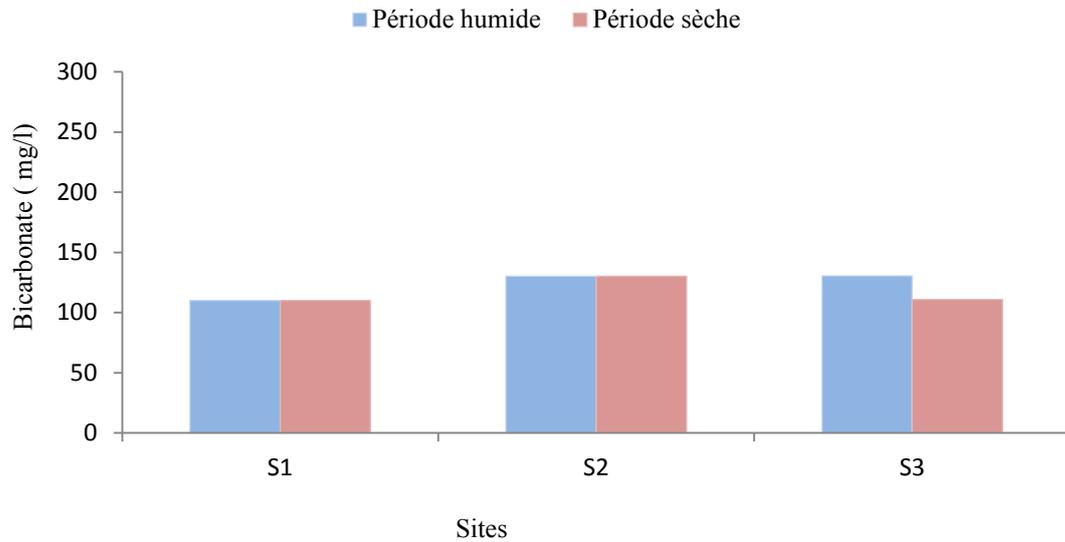
**Figure 44.** Variation de la teneur en chlorure.

- **Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$  mg/l)**

La présence des bicarbonates de calcium dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaz carbonique. La réaction de dissolution est donnée par l'équation suivante :



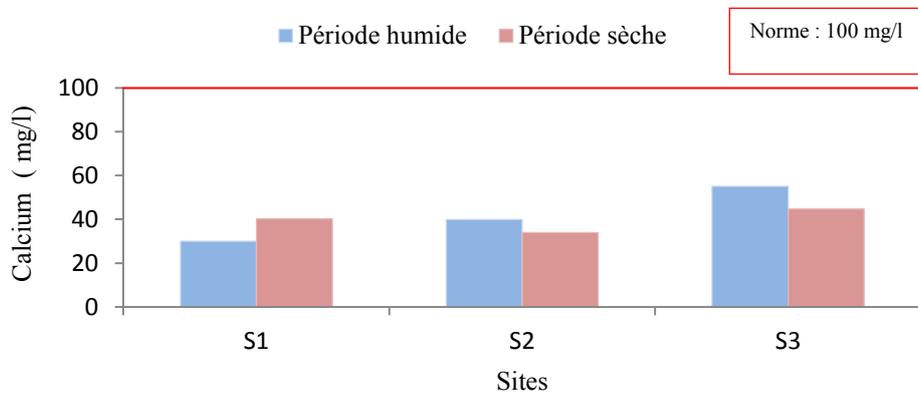
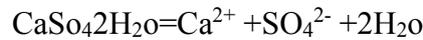
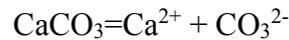
La Figure 45 montre une faible variation de concentrations des bicarbonates pendant toute la période et au niveau des trois sites.



**Figure 45.** Variation du taux de Bicarbonate des échantillons d'eaux étudiés.

- **Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$  mg/l)**

La présence des ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles, soit la dissolution des formations carbonatées ( $\text{CaCO}_3$ ), soit la dissolution des formations gypseuses ( $\text{CaSO}_4$ ).



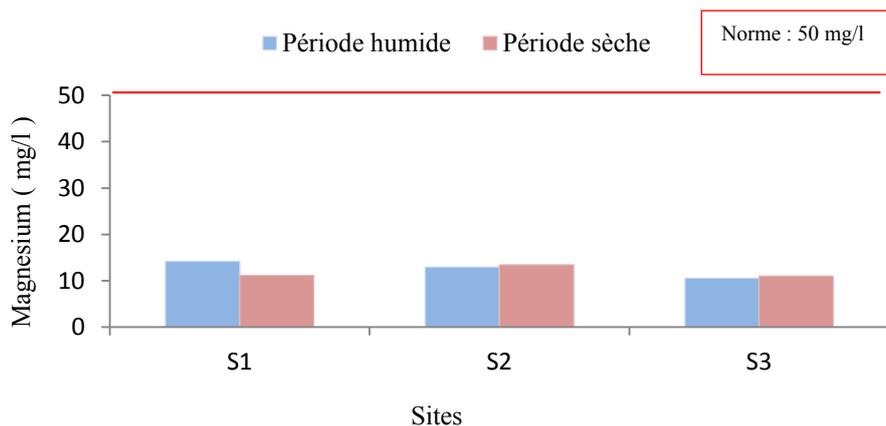
**Figure 46.** Variation du taux de calcium des échantillons d'eaux étudiés.

La Figure 46, montre que les concentrations de calcium sont inférieures à la norme (100 mg/l) pour toutes les stations.

- **Magnésium ( $Mg^{2+}$  mg/l)**

Le magnésium est un élément très répandu dans la nature, il constitue environ 2,1 % de l'écorce terrestre. Son abondance géologique, sa grande solubilité, sa large utilisation industrielle font que les teneurs dans l'eau peuvent être importantes (quelques mg/l à plusieurs centaines de mg/l). La plupart des eaux naturelles présentent des teneurs comprises entre 5 et 10 mg/l. Cette concentration est en relation directe avec la nature géologique des terrains traversés. Le magnésium dans l'eau provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution de magnésium sous forme de carbonates ( $MgCO_3$ ) et de bicarbonates ( $Mg_2HCO_3$ ).

D'après la figure 47 on note que l'évolution des teneurs en  $Mg^{2+}$  durant la période humide est de 14,15 mg/l au site 01 à 10,5 mg/l au site 03. Durant la période sèche, les valeurs varient entre 11 mg/l au site S3 et 13,11 mg/l au site S2. Toutes ces valeurs restent inférieures aux normes de potabilité (50mg/l) à travers toutes les stations.

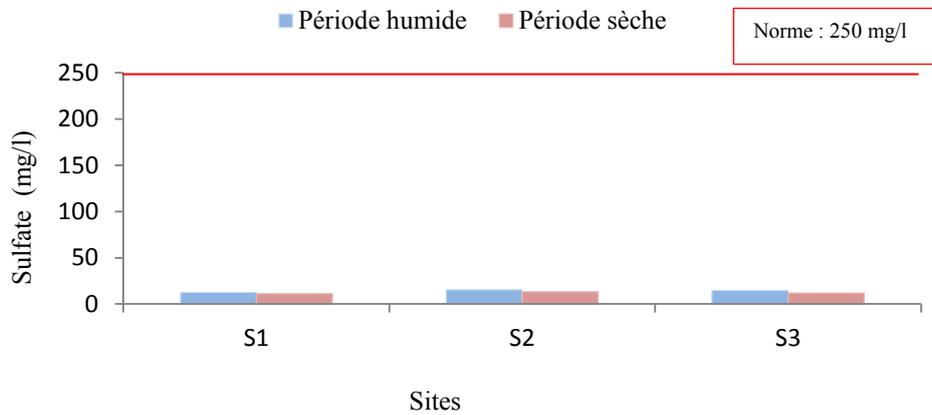


**Figure 47.** Variation du taux de Magnésium des échantillons d'eaux étudiés.

- **Sulfates ( $SO_4^{2-}$  mg/l)**

La présence des ions sulfates dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses d'une part, et aux pesticides provenant des eaux d'irrigation d'autre part (Bahroun, 2016). D'une façon générale, les eaux très chargées en sulfates ne sont pas favorables à la vie piscicole et en agriculture. Les concentrations élevées (plusieurs centaines de milligrammes par litre) peuvent poser des problèmes, pour l'irrigation et l'abreuvement. Une teneur supérieure à 480 mg /l rend l'eau impropre à l'agriculture. C'est pour cette raison que les ministères de l'environnement et de la santé canadiennes ont retenu une valeur limite de 250 mg/l (CCME, 1995c; CCME, 2002 et SC, 2008).

Les concentrations en sulfate oscillent entre 15, 22 mg/l (site 2) et 14,5 mg/l (site 3) lors de la saison hivernale et entre 11,93 mg/l (site 3) à 13,18mg/l (site 2) lors de la saison estivale. La variation temporelle des sulfates montrent que tous les points d'eaux se présentent avec des teneurs inférieures aux valeurs guides des eaux superficielles qui sont de 250 mg/l. De ce fait, ces points d'eaux sont à la norme de potabilité (Figure 48).



**Figure 48.** Evolution spatio-temporelle du taux des sulfates.

### 6.3. Les nutriments

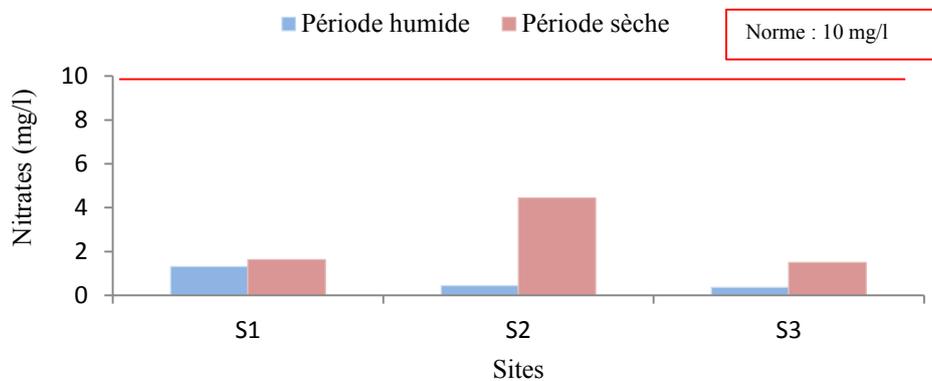
L'azote est un constituant essentiel de la matière vivante, mais sa présence en quantité importante dans les eaux nécessite une surveillance attentive (Mecalf and Eddy, 1991; NRC, 1993). L'azote des eaux se trouve sous formes organique et inorganique. Les formes inorganiques doivent être minéralisées par les micro-organismes, la forme de l'azote ciblée par cette étude est la forme minérale, l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ).

- **Nitrate ( $\text{NO}_3^-$  mg/l)**

Les nitrates sont naturellement présents dans la nature à des concentrations de quelques milligrammes par litres d'eau, qui sont des polluants très solubles et représentent la forme la plus oxydée de l'azote (Salamon, 2003). Dans l'eau, les nitrates peuvent provenir de la décomposition de matières végétales ou animales, d'engrais utilisés en agriculture, du fumier, d'eaux usées domestiques et industrielles et des précipitations ou de formations géologiques renfermant des composés azotés solubles (Adam, 1980; Egboka, 1984).

L'analyse des concentrations des nitrates montre que les quantités les plus élevées sont enregistrées au niveau du site 2 avec 4,44 mg/l lors de la période sèche et au niveau de site 1

avec 1,62 mg/l lors de la période humide (Figure 49). Alors que les valeurs les plus faibles sont enregistrées au niveau du site 3. Les moyennes varient entre 0,70 mg/l en hiver et 2,51 mg/l en été. Les valeurs restent inférieures à la valeur admissible par les normes (10 mg/l). De ce fait, les eaux étudiées ne sont pas assujetties à une pollution ponctuelle par les nitrates.

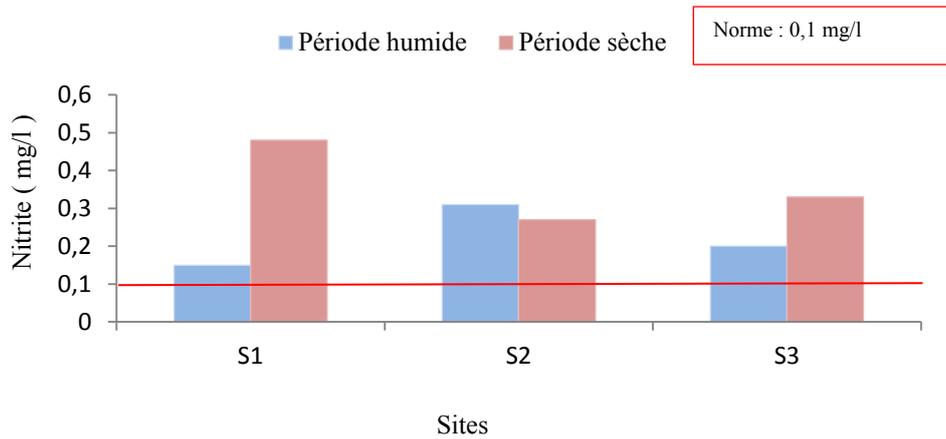


**Figure 49.** Variation spatio-temporelle de la teneur en nitrate des échantillons étudiés.

- **Nitrite ( $\text{NO}_2^-$  mg/l)**

Les nitrites constituent un poison dangereux pour les organismes aquatiques, même à de très faibles concentrations. Sa toxicité augmente avec la température. Ils provoquent une dégradation de l'hémoglobine du sang des poissons qui ne peut plus véhiculer l'oxygène. Il en résulte la mort par asphyxie (Sevrin *et al.*, 1995). Les nitrites proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque, la nitrification n'étant pas conduite à son terme, soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiant. Une eau qui renferme des nitrites est à considérer comme suspecte car lui est souvent associée à une détérioration de la qualité microbiologique (Rodier *et al.*, 2009).

Les concentrations moyennes durant notre période d'observation montrent des teneurs moyennes en nitrites comprises entre 0,15 et 0,48 mg/l au niveau des différentes stations (Figure 50). On remarque la présence des nitrites avec des fortes teneurs qui dépassent les normes (0,1 mg/l) dans l'eau de l'oued pendant presque toute la période; cela est dû aux rejets urbains des agglomérations chargés en élément organiques, aux détergents utilisés dans les activités ménagères et au lessivage des sols riches en matières fécales animales et humaines ainsi à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium.



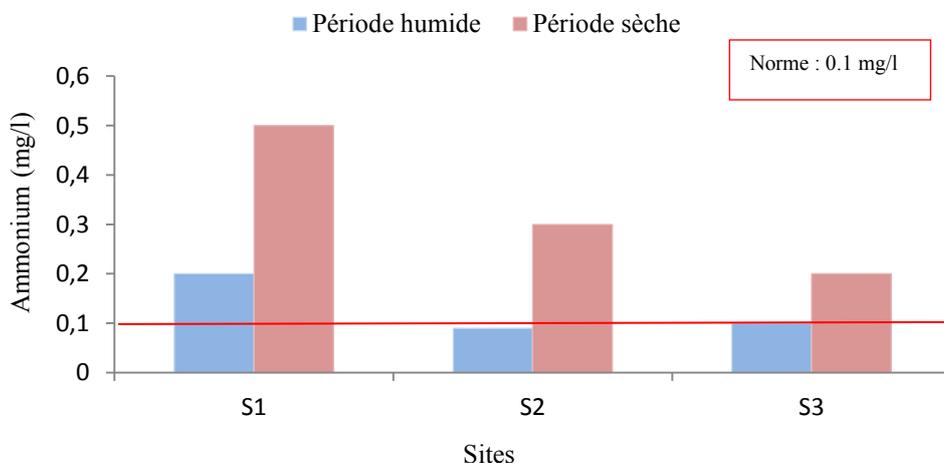
**Figure 50.** Evolution spatio-temporelle de la teneur en nitrite.

- **Ammonium ( $\text{NH}_4^+$  mg/l)**

L'ammonium dérive des déjections des organismes vivants, de la matière organique azotée, des échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère et de la réduction et la biodégradation des déchets, sans oublier les apports d'origine domestique, agricole et industrielle (Chapman and Kimstach, 1996).

Le seuil de sensibilité à long terme quelle que soit la vie piscicole serait de 0,01 mg /l de  $\text{NH}_3$ , La toxicité s'élève rapidement et devient aiguë selon les espèces entre 0,5 et 1,5 mg/l, les salmonidés étant les plus sensibles (Rodier *et al.*, 2009).

La Figure 51 montre que les valeurs les plus élevées dépassant les normes sont marquées dans les stations S1 et S2 avec des valeurs qui atteignent 0,5 mg/l, ceci s'explique soit par la réduction des formes azotées (nitrate et nitrites) ou par la contamination des eaux de l'oued (rejet urbain et lessivage agricole).



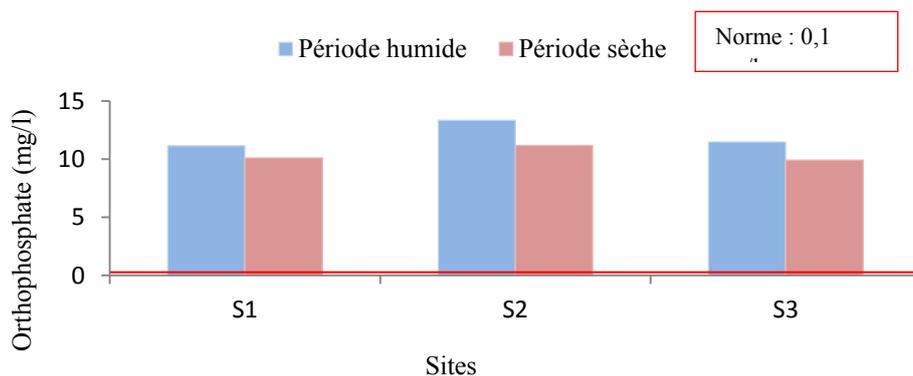
**Figure 51.** Variation du taux d'ammonium des échantillons d'eaux étudiés.

- **Ortho-phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$  mg/l)**

Les phosphates font partie des anions facilement fixés par le sol; leur présence naturelle dans les eaux est liée aux caractéristiques des terrains traversés et à la décomposition de la matière organique. Des teneurs supérieures à 0,5 mg /l doivent constituer un indice de pollution (Rodier *et al.*, 2006).

Les eaux de surface ou de nappes peuvent être contaminées par des rejets industriels (industries agro-alimentaires, ateliers de traitement de surface, laveries) et domestiques ou par le lessivage des terres cultivées renfermant des engrais phosphatés ou traités par certains pesticides (Bahroun, 2016).

Les eaux d'Oued Kébir Est contiennent des teneurs qui s'échelonnent de 11,15 mg/l (site 1) à 13,37mg/l (site 2) avec une moyenne de 11,88 mg/l en hiver, et de 9,93 mg/l (site 3) à 11,18 mg/l (site 2) avec une moyenne de 10,41 mg/l en été (Figure 52).



**Figure 52.** Variation de la teneur en ortho-phosphate des échantillons d'eaux étudiés.

La comparaison des concentrations saisonnières se révèle plus fortes en hiver qu'en été ; cependant, l'ensemble des concentrations en ortho-phosphates sont hors la norme de 0,1 mg/l. Ceci est expliqué par un apport de phosphate lessivé par les eaux aux niveaux des parcelles agricoles et au fort rejet d'eau usée.

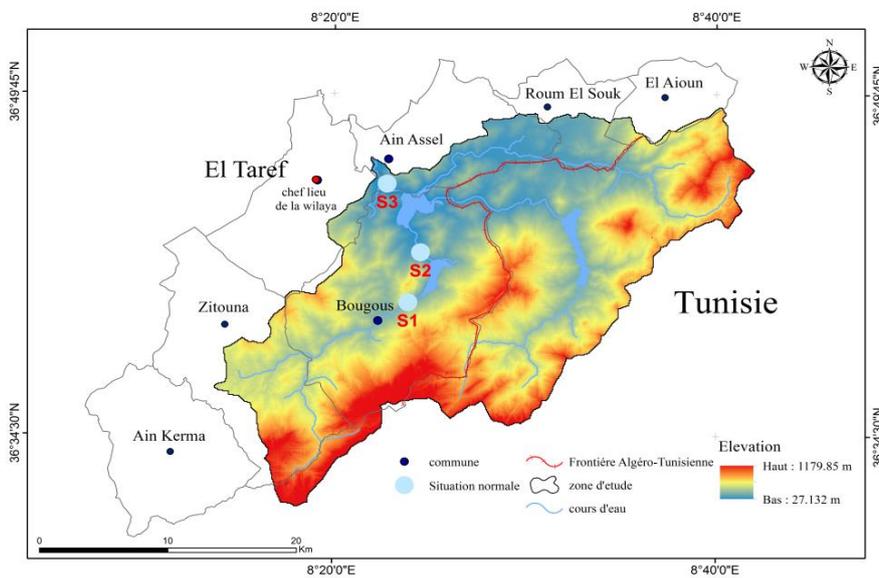
## 7. Qualité des eaux au cours de la période humide

La période humide est caractérisée par des températures très faibles, des précipitations élevées ; ceci explique le phénomène de dilution des éléments de pollution dans les milieux

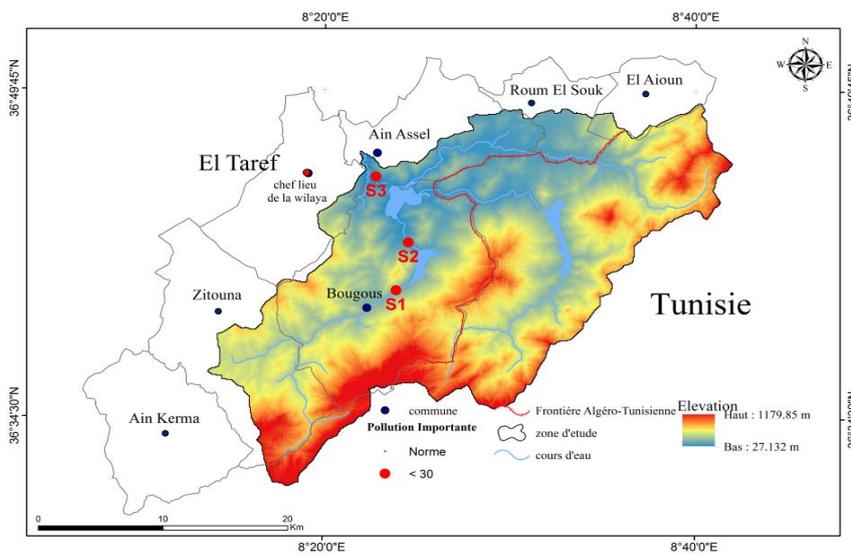
aquatiques. Le tableau 14 montre les différents types de classement de qualités dans la zone étudiée.

**Tableau 14.** Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009).

Qualité / paramètre	I	II	III	IV
<b>a- Qualité Minérale</b>				
Ca <sup>2+</sup> Mg/l	40-100 (S1, S2, S3)	100-200	200-300	> 300
Mg <sup>2+</sup> Mg/l	<30 (S1, S2, S3)	30-100	100-150	> 150
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Mg/l	50-200 (S1, S2, S3)	200-300	300-400	> 400
Cl <sup>-</sup> Mg/l	10-150 (S1, S2, S3)	150-300	300-500	> 500
<b>b- Qualité organique</b>				
O <sub>2</sub> %	100-90	90-50	50-30	> 30 (S1, S2, S3)



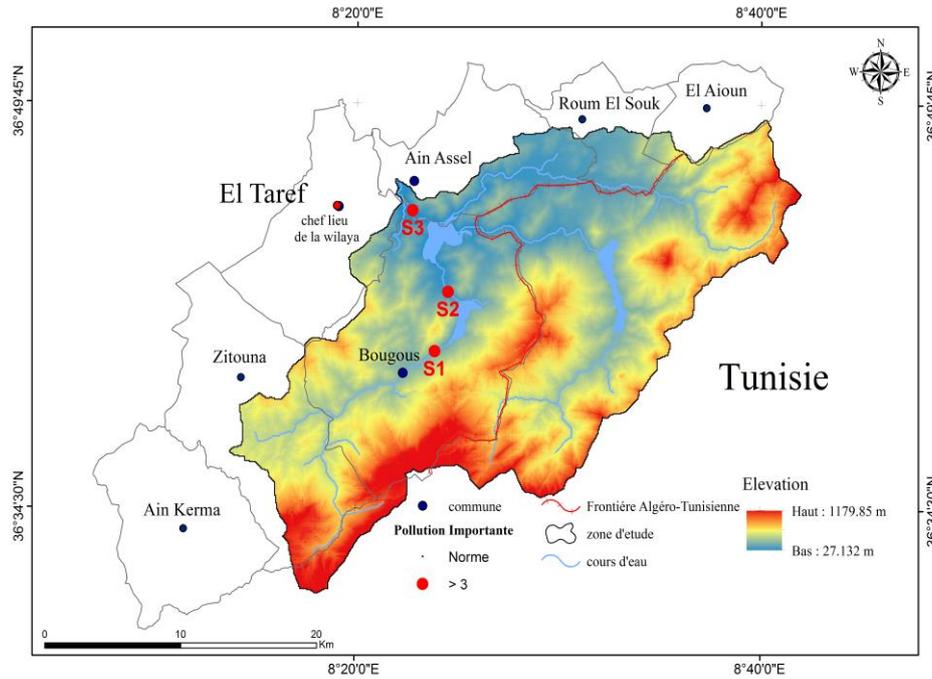
**Figure 53.** Carte de qualité minérale de la région d'étude (période humide).



**Figure 54.** Carte de qualité organique de la région d'étude (période humide).

**Tableau 15.** Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009). Grille utilisée pour signaler les problèmes du phosphore.

Formes du phosphore	Situation normale	Pollution modérée	Pollution notable	Pollution importante
$\text{PO}_4^{3-}$ Mg/l	$\leq 0.01$	0.01-0.1	0.1-3	$>3$ (S1, S2, S3)



**Figure 55.** Carte pour signaler le problème du phosphore dans la région (période humide).

**Tableau 16.** Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009). Grille utilisée pour signaler les problèmes de l'azote.

Formes de l'azote	Situation normale	Pollution modérée	Pollution notable	Pollution importante
$\text{NH}_4^+$ Mg/l	$< 0.01$	0.01-0.1 (S2, S3)	0.1-0.3 (S1)	$> 3$
$\text{NO}_2^-$ Mg/l	$< 0.01$	0.01-0.1	0.1-0.3 (S1, S2, S3)	$> 3$
$\text{NO}_3^-$ Mg/l	$< 10$ (S1, S2, S3)	10-20	20-40	$> 40$

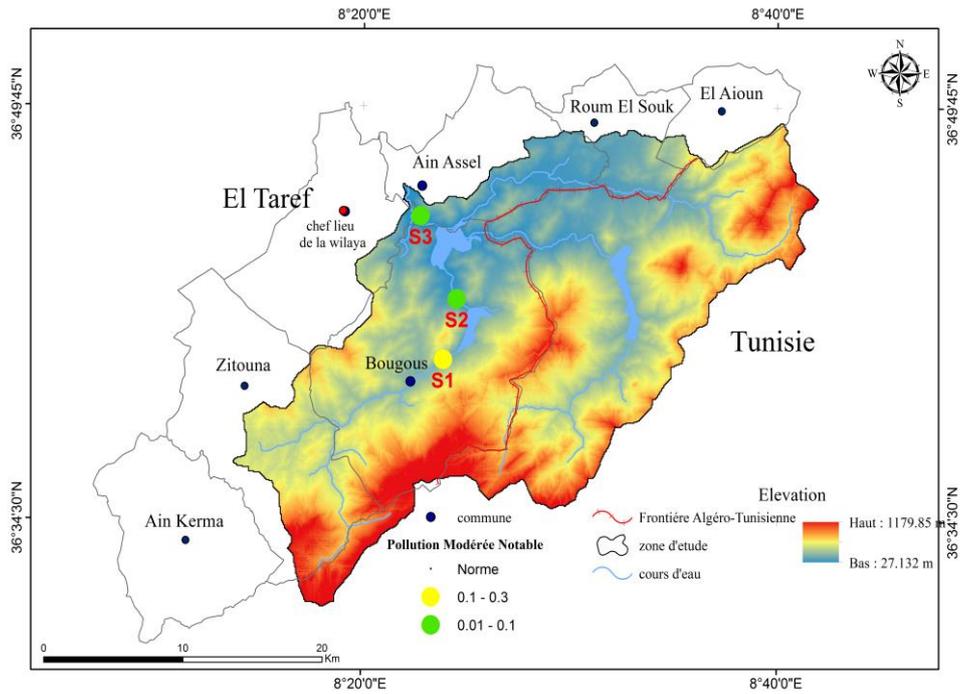


Figure 56. Carte pour signaler le problème d'ammonium dans la région (période humide).

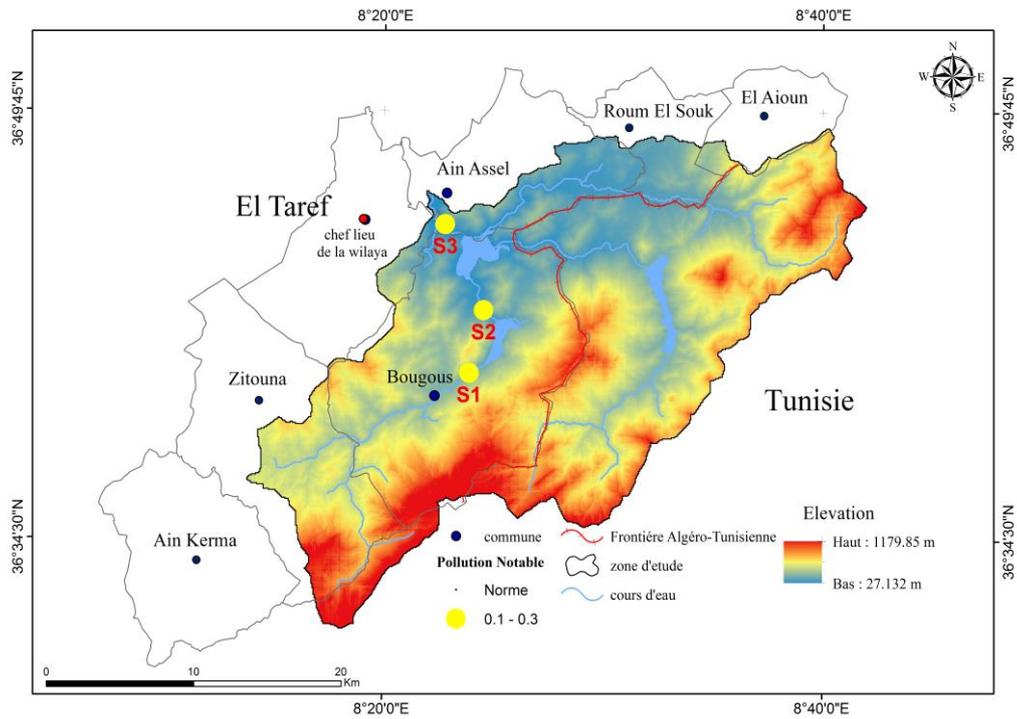
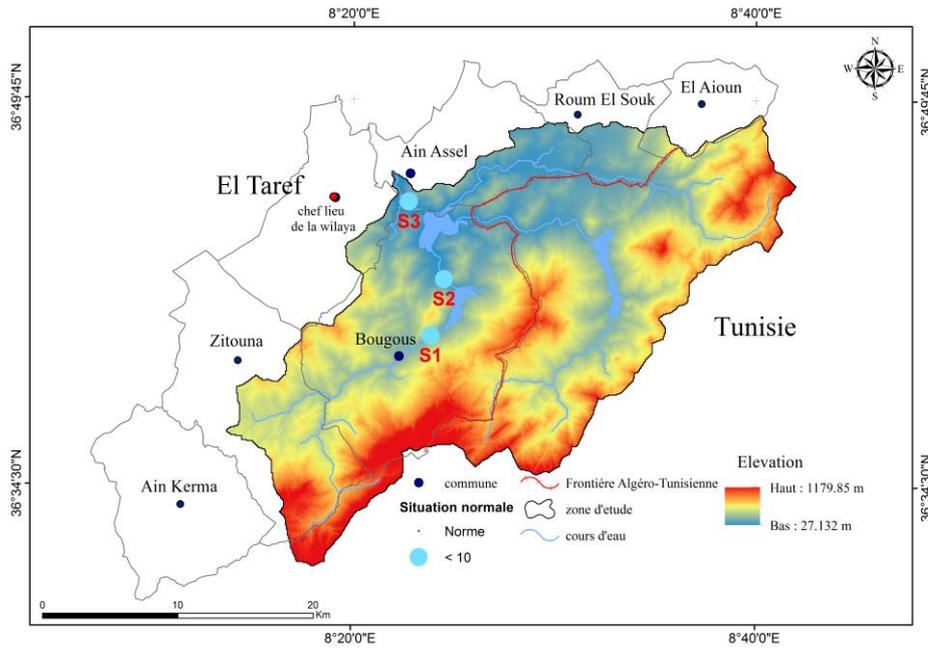


Figure 57. Carte pour signaler le problème de nitrite dans la région (période humide).



**Figure 58.** Carte pour signaler le problème de nitrate dans la région (période humide).

### 8. Qualité des eaux en période sèche

Cette période est connue par la rareté des pluies, dont les températures atteignent leurs maximums. Ceci explique le phénomène de concentration des éléments de pollution (tels que les paramètres organiques) dans les milieux aquatiques.

Le tableau au-dessous montre les différents types de classement de qualités dans la zone étudiée.

**Tableau 17.** Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009).

Qualité paramètre	I	II	III	IV
<b>a- Qualité Minérale</b>				
Ca <sup>2+</sup> Mg/l	40-100 (S1, S2, S3)	100-200	200-300	> 300
Mg <sup>2+</sup> Mg/l	<30 (S1, S2, S3)	30-100	100-150	> 150
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Mg/l	50-200 (S1, S2, S3)	200-300	300-400	> 400
Cl <sup>-</sup> Mg/l	10-150 (S1, S2, S3)	150-300	300-500	> 500
<b>B- Qualité organique</b>				
O <sub>2</sub> %	100-90	90-50	50-30	> 30 (S1, S2, S3)

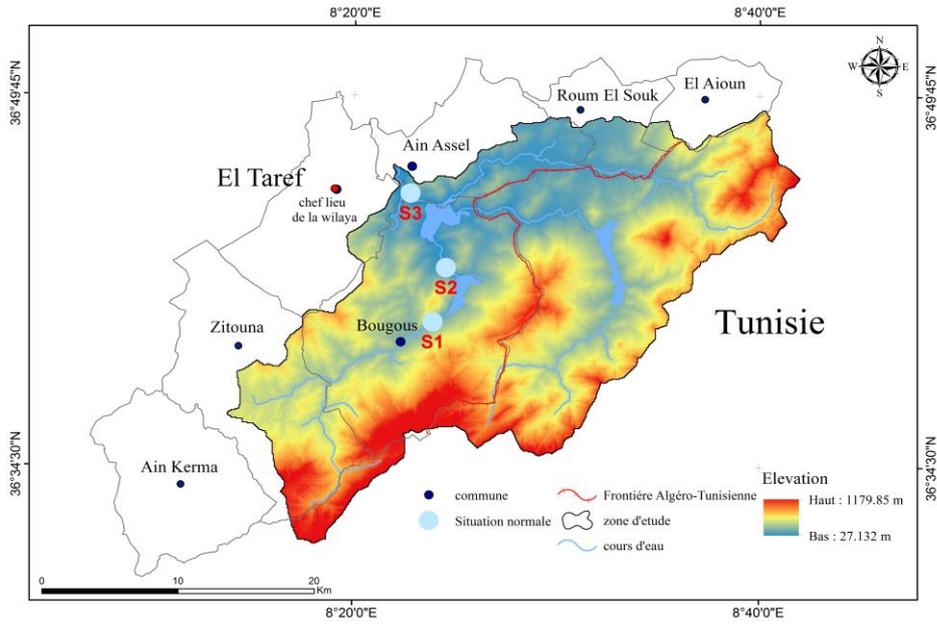


Figure 59. Carte de qualité minérale de la région d'étude (période sèche).

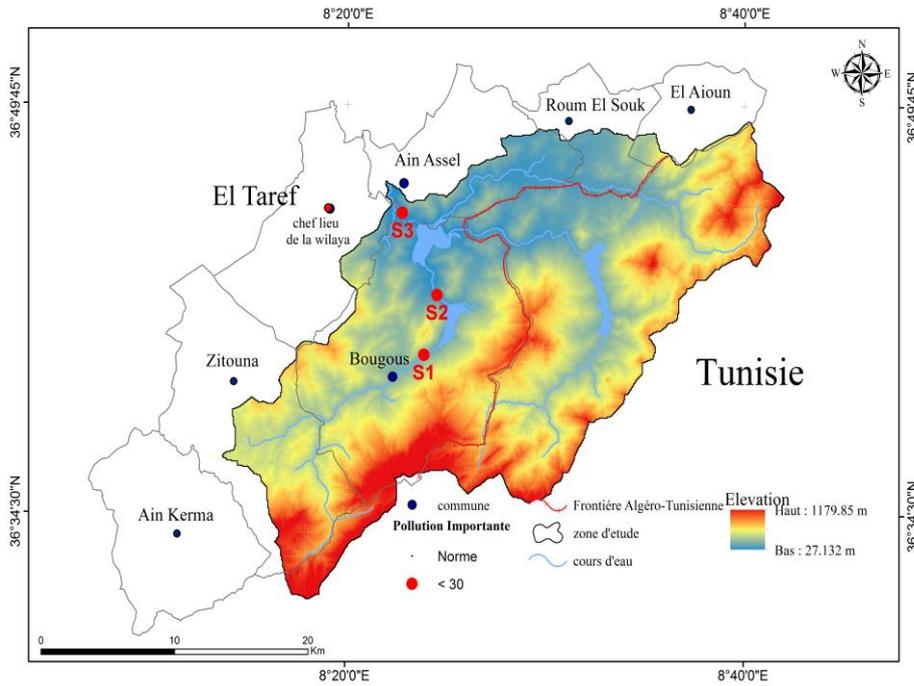
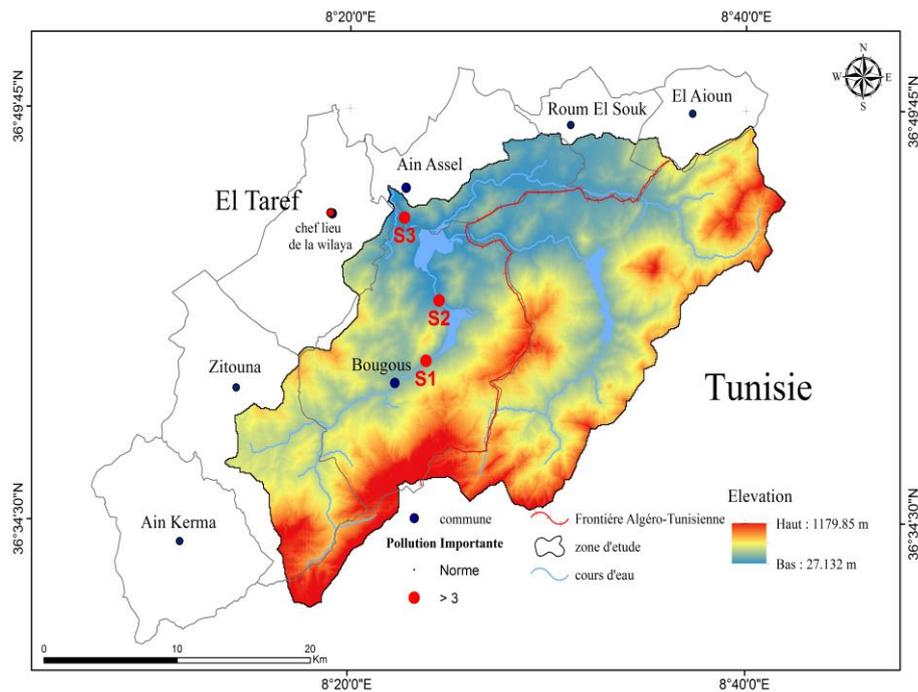


Figure 60. Carte de qualité organique de la région d'étude.

**Tableau 18.** Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009). Grille utilisée pour signaler les problèmes du phosphore.

Formes du phosphore	Situation normale	Pollution modérée	Pollution notable	Pollution importante
$PO_4^{3-}$ Mg/l	$\leq 0.01$	0.01-0.1	0.1-3	$>3$ (S1, S2, S3)



**Figure 61.** Carte pour signaler le problème du phosphore dans la région (période sèche).

**Tableau 19.** Estimation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2009). Grille utilisée pour signaler les problèmes de l'azote.

Formes de l'azote	situation normale	pollution modérée	pollution notable	pollution importante
$NH_4^+$ Mg/l	$< 0.01$	0.01-0.1	0.1-0.3 (S1, S2, S3)	$> 3$
$NO_2^-$ Mg/l	$< 0.01$	0.01-0.1	0.1-0.3 (S1, S2, S3)	$> 3$
$NO_3^-$ Mg/l	$< 10$ (S1, S2, S3)	10-20	20-40	$> 40$

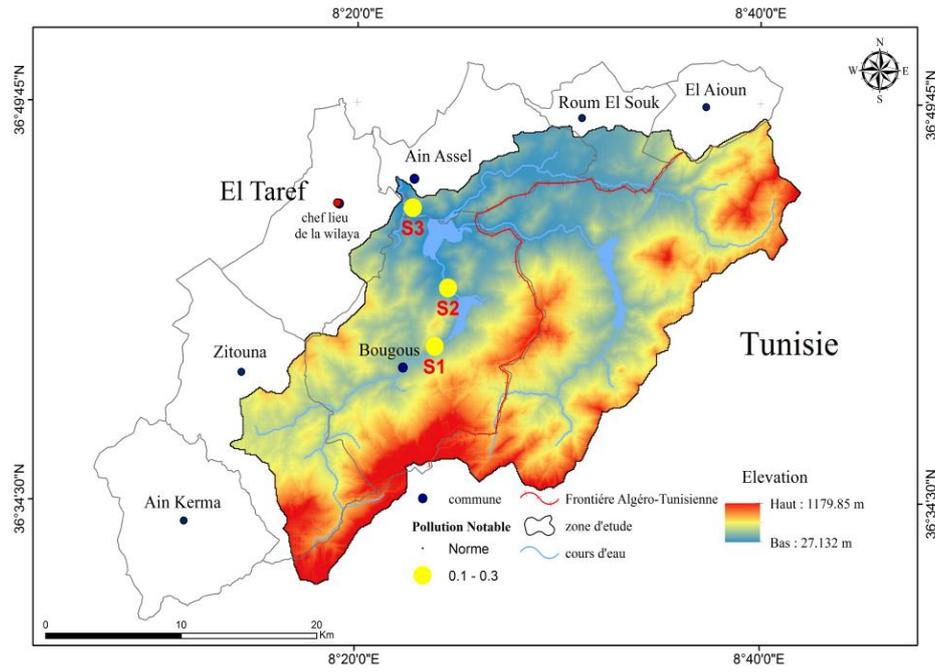


Figure 62. Carte pour signaler le problème d'ammonium dans la région (période sèche).

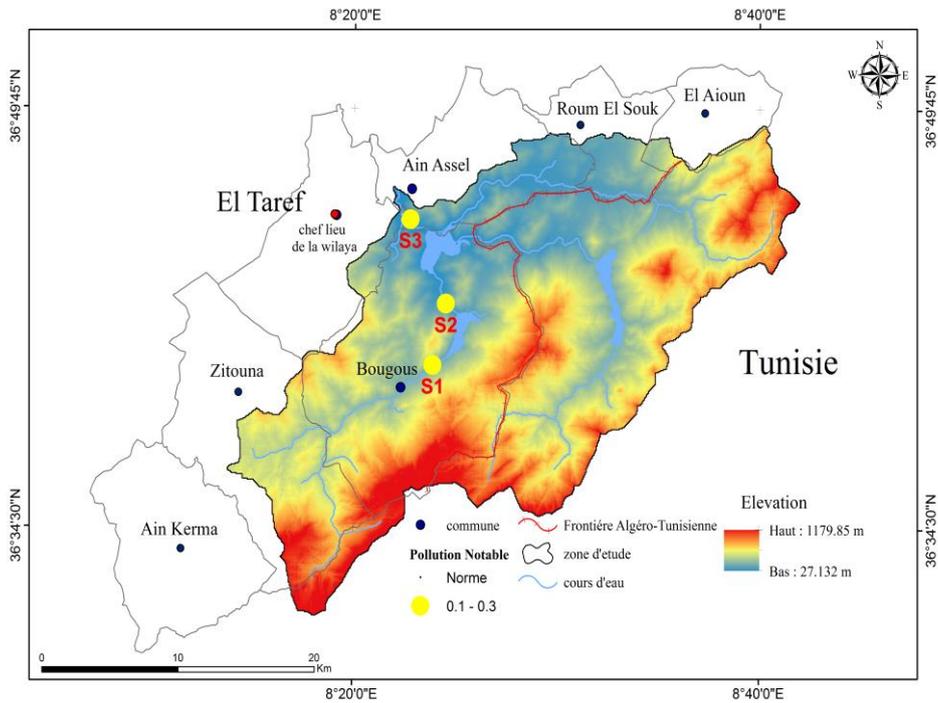
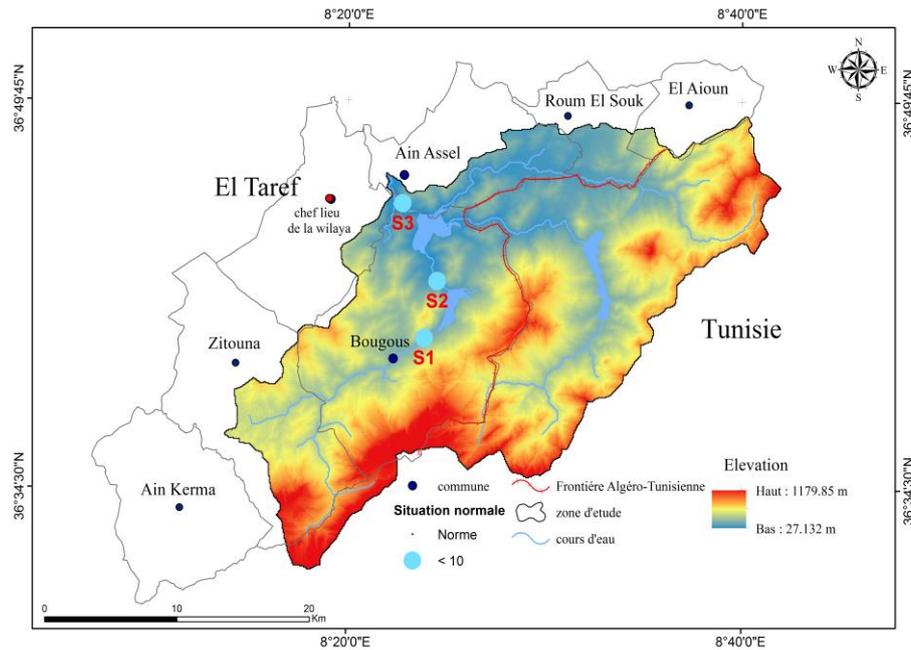


Figure 63. Carte pour signaler le problème de nitrite dans la région (période sèche).



**Figure 64.** Carte pour signaler le problème de nitrate dans la région (période sèche).

## 9. Interprétation des résultats

### 9.1. Analyse physico-chimiques des eaux de surface des sites

Concernant les paramètres de la qualité minérale ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{3-}$ ) dans les deux périodes humide et sèche, les points de prélèvement dans la zone d'étude présentent des valeurs ne dépassant pas les normes.

La classification de la qualité organique vis-à-vis de l'oxygène dissous, montre que les points de prélèvement, sont inférieure à la norme de 30%, et présentent une pollution classée mauvaise ce qui explique qu'il ya une décomposition de grandes quantités de matières organiques dans ce milieu aquatique.

Selon la Grille utilisée pour signaler les problèmes du phosphore, les points de prélèvements (S1, S2, S3) au cours les deux Compagnes (sèche et humide), pressentent une pollution importante vis-à-vis des Ortho-phosphates ceci explique, spatialement, par les rejets additionnels des agglomérations avoisinantes des communes de Bougous et Ain Assel, aussi de leur utilisation en agriculture sous forme d'engrais chimiques ou de pesticides.

Concernant l'ammonium, Le points de prélèvement (S1, S2 et S3), présentent une pollution classé notables au cours de la période sèche, contrairement au période humide qui

est caractérisé par deux classes de pollution modéré pour les stations (S2, S3) qui représentent les oueds Bougous et Kébir Est respectivement, et notable au niveau de l'Amont de l'Oued Bougous (S1). D'après Nisbet et Verneaux (1970) rapportent que l'azote ammoniacal existe dans les eaux riches en matière organique en décomposition lorsque la teneur en oxygène est insuffisante pour assurer sa minéralisation.

Considéré comme élément toxiques, les nitrites sont la forme la moins stable dans le cycle de l'azote. Ils sont issus de la réduction de l'ammonium  $\text{NH}_4^+$ , dans notre zone d'étude, les points de prélèvement (S1, S2, et S3) caractérisent par des teneurs variées entre de 0,1 mg/l et 0,3 mg/l aux périodes sèche et humide, donc avec une pollution notable. Ces dernières sont dues à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium. Leur origine est liée à l'agriculture ou aux rejets urbains cependant aux teneurs des nitrates qui sont inférieures à la norme recommandé par l'Algérie (10 mg/l), et donc les points de prélèvement ont une bonne qualité.

## 9.2. Caractérisation physico-chimiques des eaux du barrage de Mexa

La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, et ce pour son attribution à l'alimentation en eau potable ou d'autres usages tels: irrigation, industrie...etc. En ce qui concerne l'échantillonnage et le dosage des éléments, ceci a été assuré par les opérateurs de l'Algériennes des Eaux (ADE). Les résultats obtenus sont résumés ainsi dans le tableau 19.

**Tableau 20.** Teneur des éléments physico-chimiques durant la période sèche et humide.

Elément	Période humide	Période sèche
pH	7,26	7,53
T (°C)	11	27
CE ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	370	501
O <sub>2</sub> (%)	82,40	60
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	52,10	56,11
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	1,90	12,5
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	27,63	42,38
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	0,06	0,11
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0,08	1,10
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0,01	0,06

Les eaux brutes du barrage Mexa au cours de la période d'étude (2015-2016) ont un pH qui ne dépasse pas les normes de potabilité ( $6,50 < \text{PH} < 8,50$ ), la température des eaux varie

en fonction de la température extérieure (l'air), donc leur variation est saisonnière. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées pendant la saison estivale (la valeur maximale est de 27°C) et les plus faibles pendant la saison hivernale (11°C).

Les conductivités des eaux du barrage fluctuent entre 370 et 501  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; on remarque qu'elles ne dépassent pas les normes de l'OMS. Les eaux brutes du barrage de Mexa au cours de la période d'étude (2015-2016) ont un oxygène dissous qui dépasse les normes de potabilité (>30%), L'intervalle de variation des teneurs en calcium des eaux du barrage fluctue entre 52,06 et 56,11 mg/l, ces teneurs restent toujours inférieures aux normes. Le magnésium est l'élément majeur le moins abondant dans les eaux du barrage que les autres éléments (cations et anions); les teneurs en  $\text{Mg}^{2+}$  sont inférieures à 50 mg/l et donc ne dépassent pas les normes. Elles varient entre 1,9 et 12,5 mg/l.

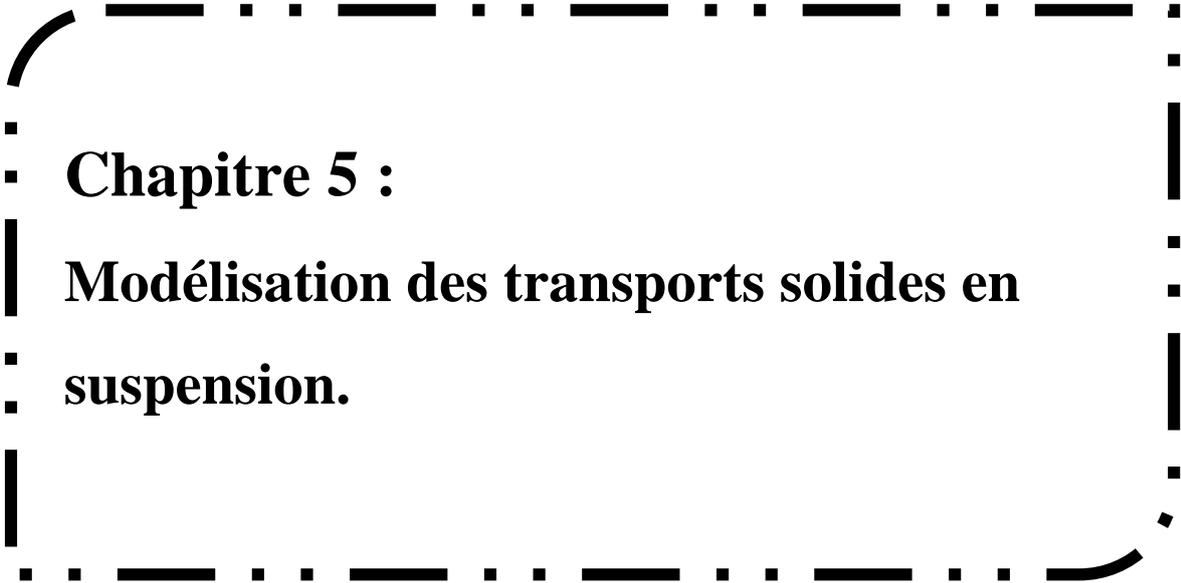
Les concentrations du  $\text{Cl}^-$  observées au niveau des eaux du barrage montrent des teneurs inférieures aux normes de potabilité de 250 mg/l. Le tableau 19 montre que les valeurs des teneurs en chlorures varient entre 27,63 mg/l et 42,38 mg/l. Les teneurs en Ammonium trouvées dans les eaux du barrage sont très variables. Elles fluctuent entre 0,06 et 0,11 mg/l, présentant par la une pollution modérée. Entre autres, les teneurs en nitrate sont comprises entre 0,08 et 1,1 mg/l; elles ne dépassent pas les normes. L'intervalle de fluctuation des nitrites au barrage de Mexa est de 0,01 à 0,06 mg/l, présentant des concentrations supérieures à la norme (> 0,01 mg/l).

## Conclusion

Les différentes analyses effectuées sur les échantillons de l'eau du bassin versant de l'Oued Kébir Est ont permis de dégager le comportement de certains paramètres descriptifs de la qualité physico-chimiques des eaux.

La variation temporelle de la pollution minérale au niveau des trois stations montre des concentrations faibles en calcium, magnésium, sulfate, et chlorure pendant les deux périodes sèches et humides, avec une pollution organique importante au niveau des trois stations et au barrage de Mexa. Ces constatations montrent que le milieu devient réducteur (chute de taux d'oxygène) due à un apport important de phosphate, nitrites, ammoniums lessivé par les eaux d'irrigation de la parcelle agricole (engrais chimique et pesticides) et les rejets urbains.

La comparaison des teneurs des principaux éléments mesurés dans les eaux superficielles du bassin versant de l'Oued Kébir Est au niveau des sites d'échantillonnage et du barrage indiquent une eutrophisation d'origine agricole.



**Chapitre 5 :**

**Modélisation des transports solides en  
suspension.**

## Introduction

L'activité essentielle des cours d'eau consiste à éroder et à transporter des matériaux. Ces matériaux englobent la charge en suspension et la charge de fond. Le transport solide en suspension apporte son constat de la phase érosive du milieu par les eaux courantes qui constituent le principal agent de l'enlèvement de cette matière solide (Boumaza *et al*, 2007).

Dans le cas des rivières algériennes, la pression démographique généralisée depuis longtemps fait que toutes les rivières de taille conséquente présentent des enjeux forts pour des riverains, et qu'aucune n'est épargnée par les aménagements. A l'heure actuelle, il n'y a plus vraiment de place en Algérie pour de grands aménagements et la tendance est même plutôt inversée à la suite de la constatation que ces aménagements ont souvent eu des effets pervers non prévus. En effet, les aménagements peuvent provoquer un changement d'équilibre du système fluvial tout entier, qui va alors développer de nouvelles caractéristiques (hauteur d'inondation, cote du lit, propriétés biologiques du milieu) aux quelles les sociétés riveraines doivent s'adapter, ce qui génère des coûts parfois plus importants que le gain attendu de l'aménagement.

Pour pouvoir aménager, il est impératif de quantifier d'une façon plus précise la dégradation des sols. Pour cela, il est absolument indispensable de commencer par la modélisation dès que l'on cherche à comprendre et prévoir, même de manière qualitative, le comportement d'un système : modèle conceptuel. Les équations sont aussi des modèles, et les calculs à la main de la modélisation. Ce n'est finalement que quand les calculs deviennent trop complexes et trop longs pour être menés à la main, et que l'on fait appel aux ordinateurs, que cela devient de la modélisation numérique. Souvent, et ce sera le cas ici, on entendra par modélisation numérique quelque chose de plus précis encore : des calculs distribués des processus physiques (généralement sous forme d'équations différentielles) ou des modèles stochastiques. Ce type de modélisation permet d'obtenir des résultats extrêmement spectaculaires.

### **1. Matériels et méthodes de mesure des matières en suspension (période 1975/76-1998/99)**

La technique utilisée par ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) pour mesurer la matière en suspension débute par le prélèvement en un point unique soit sur le bord, soit au milieu au moyen d'un flacon de 1 litre en matière plastique. L'échantillonnage

s'effectue lors d'une crue suivant des intervalles de temps variables en fonction du régime de l'oued. Ainsi, en étiage ou lorsque le débit est constant au cours de la journée, il est possible d'effectuer un à deux prélèvements au cours de la journée. En période de crue, le nombre des prélèvements sera augmenté de deux façons:

- un prélèvement est effectué durant la montée des eaux lorsque la montée est lente et toutes les quarts d'heures et demis heures lorsque la montée est rapide,
- en décrue, on prélève un échantillon toutes les heures durant les six premières heures et toutes les deux heures ensuite (Demmak, 1982). L'espacement dans le temps des prélèvements des concentrations accroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du pic de la crue.

Le traitement des matières en suspension prélevées se fait au laboratoire par la décantation, filtrage avec un filtre de type Laurent ( $\varnothing = 32$  cm), séchage à l'étuve à  $110^{\circ}\text{C}$  durant 30 minutes et la pesée.

## **2. Quantification des transports solides (période 1975/76-1998/99)**

### **2.1. Utilisation de la méthode de régression**

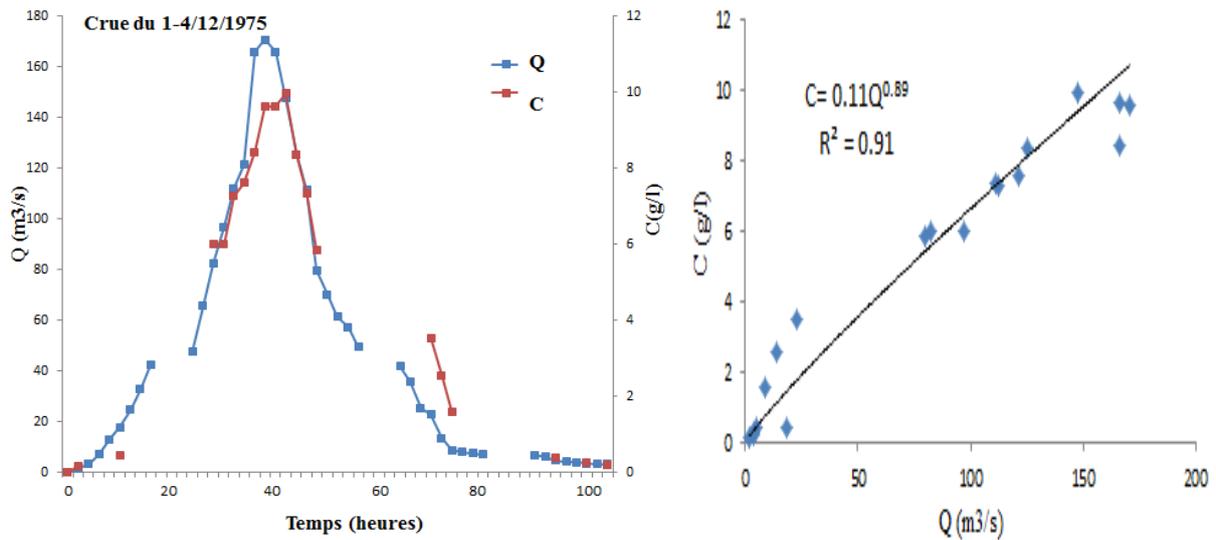
Les résultats des analyses des MES ont été traités en vue de comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire de chaque cours d'eau et de quantifier les flux de la matière fine. Pour chaque crue considérée, nous avons étudié les relations entre les concentrations mesurées et les débits liquides instantanés et ce afin de combler les lacunes d'observation et par la suite l'évaluation des apports solides à différent pas de temps (Fiandino, 2004). Nous avons recherché la meilleure parmi les solutions suivantes:

- linéaire de la forme  $y = ax + b$ ,
- logarithmique de la forme  $\text{Ln}(y) = a \cdot \text{Ln}(x) + b$ ,
- puissance de la forme  $y = ax^b$ ,
- exponentielle de la forme  $y = ae^{bx}$ ,
- polynomiale de la forme  $y = ax^2 + bx + c$ .

Cette méthode a ainsi permis de reconstituer, quand nécessaire, des valeurs manquantes; mais surtout, cela a permis d'augmenter le nombre des données pour les utiliser au moment de l'application des courbes de transport solide (sediment rating curve). Par ailleurs, il faut signaler que la reconstitution ne permet pas une interpolation sûre entre deux

points de mesure car les turbidi-grammes résultant des ruissellements localisés sur un bassin donné présenteront des formes et des intensités très variables suivant le secteur concerné par le ruissellement (Demmak, 1982).

Ainsi, les données recueillies sur l'oued étudié, qui montrent le plus souvent la difficulté d'obtenir des informations exploitables à partir de prélèvements manuels courts dans le temps, peuvent être illustrées dans la figure 65 qui montrent un espacement assez éloigné entre les points prélevés des MES.



**Figure 65.** Représentation graphique des débits et des concentrations sous forme de courbes (à gauche) et de relations non linéaires (à droite).

Après reconstitution des lacunes des concentrations, les crues avec les données des concentrations mesurées et calculées sont converties en crues journalières de 24 heures dont les débits moyens et les concentrations moyennes sont calculés. La distribution des écoulements, ayant été prélevés pour les sédiments en suspension, en relation avec la distribution des débits journaliers continus mérite d'être considérée. Ceci est particulièrement important car quelques forts écoulements sont capables de transporter une quantité considérable de sédiments (Krishnaswany *et al.*, 2001).

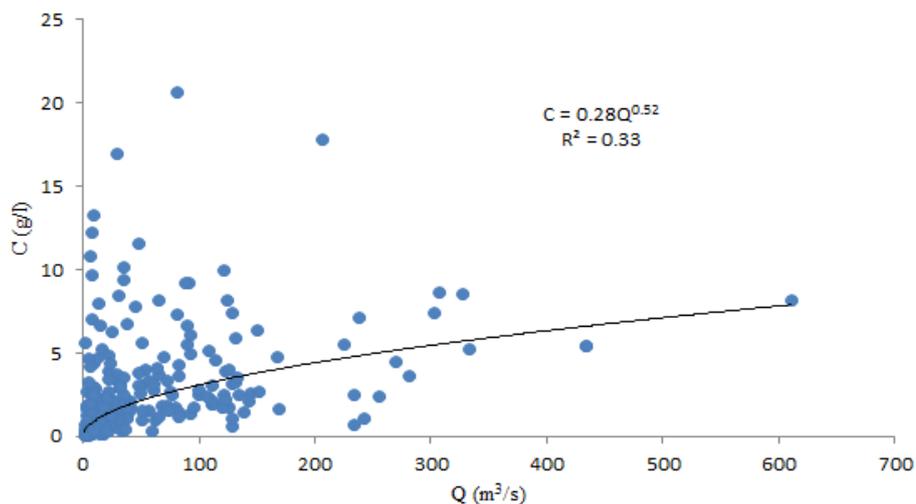
### 2.1.1. Relation concentration (C) – débit (Q)

En l'absence d'appareils pour faire des prélèvements fréquents, nous étions contraints d'utiliser la technique des courbes de transport solide afin d'estimer la charge solide transportée en suspension à partir des séries d'écoulement (Khanchoul *et al.*, 2009). La courbe

de transport solide est sous forme de graphe ou équation reliant le débit solide ( $Q_s$ ) ou la concentration ( $C$ ) et le débit liquide ( $Q$ ). L'étude par Campbell et Bauder (1940) sur la rivière rouge du Texas est considérée le premier exemple de l'utilisation de la courbe aux Etats Unis d'Amérique. Le rapport de Miller (1951) a décrit l'analyse des charges solides de la rivière San Juan et a donné une évaluation plus détaillée de la technique, en introduisant la nécessité d'utiliser les saisons pour élaborer la courbe de relation  $C - Q$ , qui servirait à estimer le débit solide sur une longue période d'écoulement.

Depuis 1970, un grand intérêt est apporté à l'estimation du transport solide en suspension en appliquant la relation de  $C - Q$ . Les raisons sont nombreuses et diverses parmi lesquelles nous citons le transport des contaminants, cheminement de la qualité des eaux, envasement des barrages, érosion et pertes des sols (Walling, 1977; Ferguson, 1986; Horowitz *et al.*, 2001).

Lorsqu'on reporte sur un graphe les concentrations mesurées en fonction du débit écoulé à l'instant du prélèvement (Figure 66), on observe une absence de relation nette entre concentration et débit. On note cependant une grande concentration du nuage de points à l'extrémité inférieure des deux coordonnées (abscisse et ordonnée) qui montre que tous les débits inférieurs à  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  ont une concentration inférieure à  $5 \text{ g/l}$ .



**Figure 66.** Relation concentration-débit des données journalières.

La concentration des sédiments en suspension et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance  $Y = aX^b$  (Etchanchu *et al.*, 1986; Benkhaled et Remini, 2003;

Khanchoul *et al.*, 2008). Ce modèle peut sous-estimer le débit solide et c'est pour cette raison qu'il est possible d'utiliser un facteur correctif basé sur des considérations statistiques.

La méthode utilisée dans ce travail pour quantifier le transport solide est celle des classes des débits décrite par (Verhoff *et al.*, 1980; Walling et Webb, 1981). Ils ont démontré que cette méthode basée sur le calcul des concentrations moyennes et des débits moyens donne un ordre d'amplitude plus correcte de la charge solide. Par la suite, la méthode a été développée par (Jansson 1985, 1997) et ( Khanchoul *et al.*, 2007) pour aboutir à des courbes de transport solide plus fiables. Les individus des concentrations journalières et des débits liquides journaliers utilisés pour établir la courbe de transport solide sont au nombre de 290 mesures.

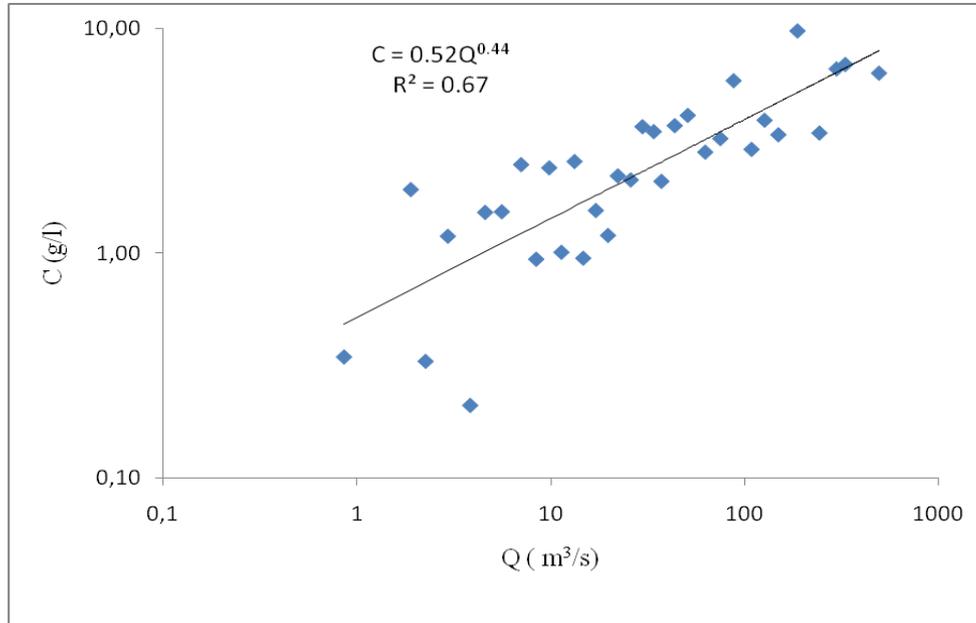
La procédure débute par classer les individus mesurés et par les regrouper ensuite en classes distinctes des débits liquides (suivant un tri croissant). La définition de l'intervalle de classe dépend de la base des données. Pour les débits faibles, l'intervalle de classe peut être étroit et devient progressivement large à fur et à mesure que la base des données contient moins de débits liquides aux valeurs élevées. Les concentrations en suspension et les débits liquides moyens correspondants à chaque classe sont calculés et introduits dans une régression (Figure 67).

Suivant la construction des classes, deux options ont été adoptées afin de choisir la meilleure régression qui pourrait donner la meilleure prédiction. Par définition, une ligne de régression devrait traverser toutes les valeurs moyennes (Yevjevich, 1972), pour cela, il est impératif de représenter toutes les concentrations moyennes et les débits moyens dans un même graphe et de représenter la ligne de régression afin de déterminer le changement de direction possible de cette ligne à travers le nuage de points et de choisir le meilleur ajustement possible.

Après élaboration de la régression appartenant aux données confondues, cette association des concentrations moyennes et des débits moyens peut être corrigée afin de réduire la sous-estimation du débit solide (Ferguson, 1986; Jansson, 1985, 1997). Miller (1984) avait proposé un facteur correctif défini par la formule suivante:

$$FC = \exp(0,5 * \sigma^2); \quad \sigma^2 = 1 / N-1 * \sum [\text{Ln}(C_i) - \text{Ln}(C_i')]^2$$

$\sigma^2$ ,  $C_i$ ,  $C_i'$  sont la variance, la concentration moyenne respectivement mesurée et estimée. Le facteur de correction (FC) calculé par la formule est égal à 0,1900, et donc l'équation corrigée devient égale à  $C = 0,1900 * 0,52Q^{0,44}$ .



**Figure 67.** Relation entre les concentrations moyennes des MES et les débits moyens en utilisant la méthode des classes des débits.

Finalement, les résultats des débits solides mesurés de l'ensemble des crues enregistrées seront comparés à ceux calculés. Les différences entre les valeurs mesurées et celles calculées peuvent être exprimée en pourcentage d'erreur de la forme suivante (Walling, 1977; Horowitz, 2001):

$$\text{Erreur (\%)} = \left( \frac{\text{valeur estimée du débit solide}}{\text{valeur mesurée du débit solide}} - 1 \right) \times 100$$

Une valeur négative indique une sous-estimation, alors que la valeur positive indique une surestimation relative à la valeur mesurée.

### 2.1.2. Relation débit solide ( $Q_s$ ) - débit liquide ( $Q$ )

L'utilisation de la courbe de transport solide débit solide ( $Q_s$ ) – débit liquide ( $Q$ ) est une méthode utilisée depuis 1940 par les différents auteurs. L'application de cette méthode dans notre cas est élaborée à l'échelle des débits moyens journaliers (série 1975/76-1998/99) (Figure 68). Néanmoins, l'utilisation de cette méthode a été critiquée car le débit liquide est

inclus d'une part dans la variable dépendante et d'autre part dans la variable indépendante de la relation  $Q_s = f(Q)$ ; et ainsi, il donne un coefficient de corrélation élevé (Mc Bean *et al.*, et Nasri, 1988). Cette interprétation a été contredite par un nombre d'auteurs (Nordin, 1990; Gilroy *et al.*, 1990; Jansson, 1997).

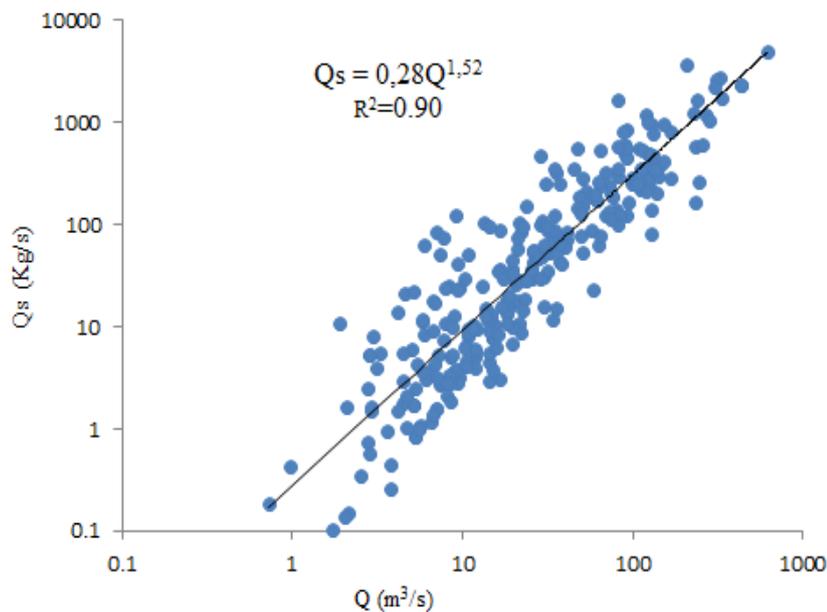
En se basant sur le facteur correctif, ces auteurs ont démontré que les deux relations aboutissent à la même évaluation des débits solides où les variances des régressions sur les logarithmes des débits solides et celles des concentrations sont équivalentes (Khanchoul *et al.*, 2009).

On note que le débit solide se calcule de la manière suivante :

$$Q_s \text{ (kg/s)} = Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times C \text{ (g/l)}$$

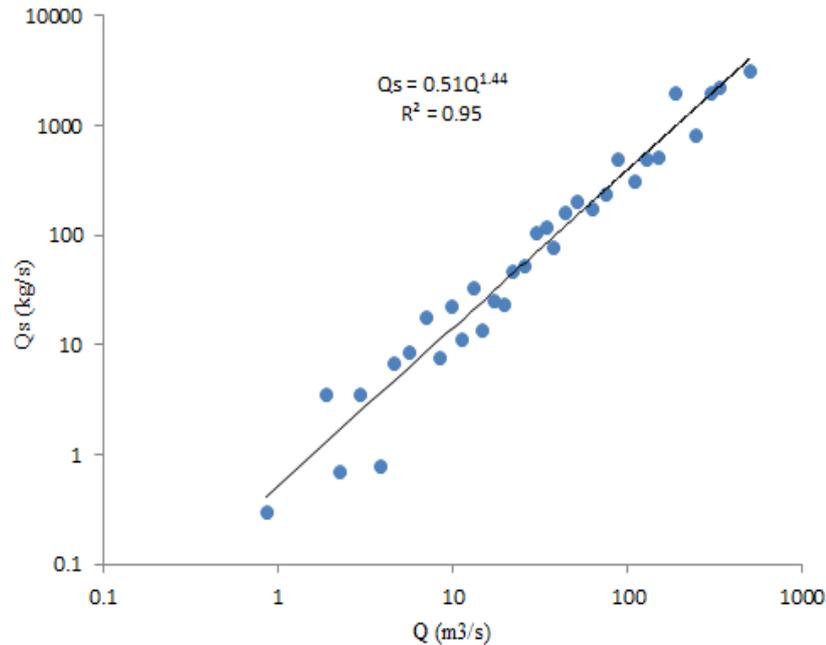
Ou encore : 
$$A_s \text{ (tonnes)} = \Sigma \frac{Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times C \text{ (g/l)} \times T \text{ (secondes)}}{1000}$$

$A_s$  étant l'apport solide et  $T$  est le temps entre les valeurs de la concentration, mesurée et estimée.



**Figure 68.** Courbe de transport solide  $Q$  versus  $Q_s$ .

Le calcul de la charge solide à partir de l'équation de la régression illustrée dans la figure 67 a donné une valeur estimée de  $5.67 \times 10^6$  tonnes. Cette valeur est inférieure à celle mesurée, qui est égale à  $5.47 \times 10^6$  tonnes. Ce qui implique qu'on a une surestimation de cet apport solide. Face à cette situation, il est impératif d'utiliser la méthode des classes des débits avec les débits liquides journaliers (Figure 69).



**Figure 69.** Relation entre les débits solide et les débits liquides journaliers en utilisant la méthode des classes des débits.

### 2.1.3. Discussion

Les erreurs mentionnées dans le tableau 21 montrent que l'apport solide (tonne) calculé suivant la méthode des classes implique une surestimation de 5,7% pour la relation C-Q. L'utilisation de cette méthode pour la relation  $Q_s$ - $Q$  a présenté une amélioration significative de l'estimation. Le calcul de l'erreur a donné une surestimation de 3,47 % (Tableau 21).

Il ressort des relations obtenues que la méthode des classes des débits a fourni de bons résultats où les valeurs des apports solides estimées sont proches des valeurs mesurées.

**Tableau 21.** Comparaison des courbes de transports solide des apports estimés avec les apports calculés issus des concentrations mesurées.

## A- Relation concentration – débit liquide

Apports solides	As (x10 <sup>6</sup> tonnes)	Erreur (%)	Correction As (x10 <sup>6</sup> tonnes)	FC	Erreur (%)
Apport mesuré	5,47		-	-	-
Apport estimé	5,78	+ 5,7	-	-	-

## B- Relation débit solide – débit liquide

Apports solides	As (x10 <sup>6</sup> tonne)s	Erreur (%)	Correction As (x10 <sup>6</sup> tonnes)	FC	Erreur (%)
Apport mesuré	5,47		-	-	-
Apport estimé	5,67	+ 3,47	-	-	-

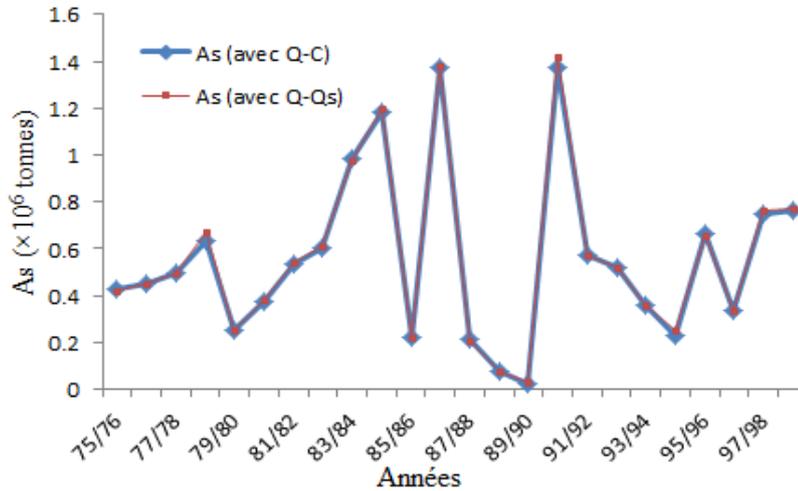
**2.1.3.1. Variation annuelle des débits solides**

A partir de l'analyse faite des variations annuelles des apports solide dans le bassin de l'Oued Kébir Est, nous sommes arrivés à évaluer sa production, le bassin étudié présente une dégradation spécifique moyenne annuelle estimée à 821,01 T/km<sup>2</sup>/an (en utilisant la relation C-Q), avec une précipitation moyenne annuelle de 801,71mm et un écoulement moyen de 6,15 m<sup>3</sup>/s ou une lame d'eau annuelle écoulée de 281,34 mm. La dégradation spécifique moyenne annuelle estimée à partir de la relation Qs-Q est égale à 798 T/km<sup>2</sup>/an, on constate que la différence entre l'apport solide calculé de la relation C-Q et celui calculé de la relation Qs-Q est très négligeable, avec un écart de 23 T/km<sup>2</sup>/an. Ainsi, ce résultat confirme que les deux relations aboutissent à la même évaluation des charges solides.

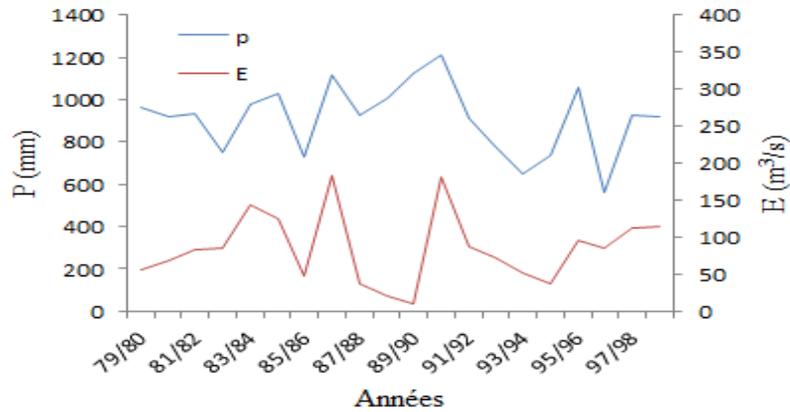
En utilisant la relation Q-C, on constate que les charges solides les plus élevées qui transitent à la station d'Ain Assel représentent 42% des valeurs supérieures à la moyenne annuelle. Les charges solides de 1983/84, 1984/85, 1986/87 et 1990/91 ont pu fournir 36% de l'apport solide total de la période de 24 années (Figure 70). Ces années présentent des

coefficients d'écoulement élevés qui varient entre 52% (1984/85) et 69% (1986/87). Les apports solides les plus élevés correspondent aux deux années hydrologiques 1986/87 et 1990/91 avec un total de  $2,75 \times 10^6$  tonnes ( $4036,41 \text{ T/km}^2$ ).

A- Evolution annuelle des apports solides en utilisant les relations C-Q et Qs-Q.



B- Evolution annuelle des ruissellements et des précipitations.



**Figure 70.** Evolution annuelle des transports solides (As), des ruissellements (E) et des précipitations (P).

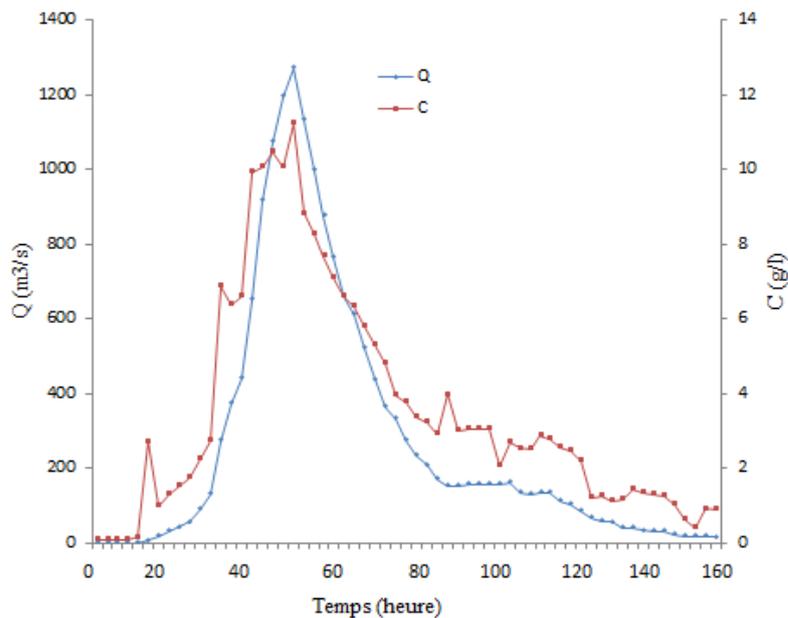
Les années 1986/1987 et 1990/1991 ont fourni des charges solides de  $1,38 \times 10^6$  tonnes et  $1,37 \times 10^6$  tonnes pour des écoulements de  $163,57 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $160,92 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 2.1.3.2. Variation mensuelles des charges solides

Les valeurs des dégradations spécifiques moyennes mensuelles des crues analysées dans le bassin de l'Oued Kébir Est sont généralement élevées en hiver et printemps. En effet,

la somme des apports solides mensuels de décembre à mai dans le bassin représente 90% de valeur annuelle.

La saison automnale se caractérise par des pluies de type orageux, généralement de courte durée avec fortes intensités. Ces averses sont dans la plupart du temps localisées dans l'espace et se produisent sur des sols secs. Les débits de pointe de ce type de crue peuvent être importants comme c'est le cas de la crue du 17-22/11/1976 (Figure 71), avec des valeurs maximales des débits de 1272 m<sup>3</sup>/s. Les précipitations étaient égales à 182 mm, ce qui donne des coefficients de ruissellement élevés de 77% (E = 141 mm) et 90,50% (E = 76 mm). La crue du 17-22/11/1976 a pu fournir 0,58x10<sup>6</sup> tonnes et a contribué avec 43% de l'apport solide de cette saison automnale.



**Figure 71.** Crue du 17-22 Novembre 1976.

Les transports solides les plus élevés se rencontrent en novembre avec une valeur de 1,24x10<sup>6</sup> tonnes. Les averses de type orageux de cette saison produisent des concentrations en sédiments assez considérables atteignant en pointe des valeurs de 12 g/l. La concentration moyenne de ce mois est trouvée égale à 3,55 g/l. Dépourvus de végétation permanente sur de grandes étendues, les versants marneux et argileux réagissent brutalement à ces premières précipitations provoquant l'érosion par le phénomène de battance (rain splash).

En ce qui concerne la saison hivernale, les pluies de cette saison couvrent souvent des régions plus larges et sont régulières avec des intensités modérées à fortes (supérieures à 29 mm/24 heures). Elles produisent plus d'écoulement que les pluies de la saison automnale. En effet, la période de l'hiver est caractérisée par des coefficients d'écoulement moyens mensuels supérieurs à 41% et peuvent atteindre 69% en février (Tableau 22).

**Tableau 22.** Variations mensuelles des précipitations, coefficients d'écoulement, concentrations et des apports solides dans le bassin versant étudié.

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
1	31,93	71,42	114,61	114,59	108,29	89,86	78,67	75,27	39,82	15,79	4,22	5,44
2	1,24	4,82	21,16	41,64	53,33	68,90	50,48	41,20	33,81	6,50	5,22	0,64
3	1,16	1,94	3,14	3,67	3,23	2,92	2,89	3,01	2,73	0,67	0,43	0,23
4	0,008	0,11	1,24	2,86	3,05	2,95	1,88	1,53	0,60	0,01	0,002	0,0001

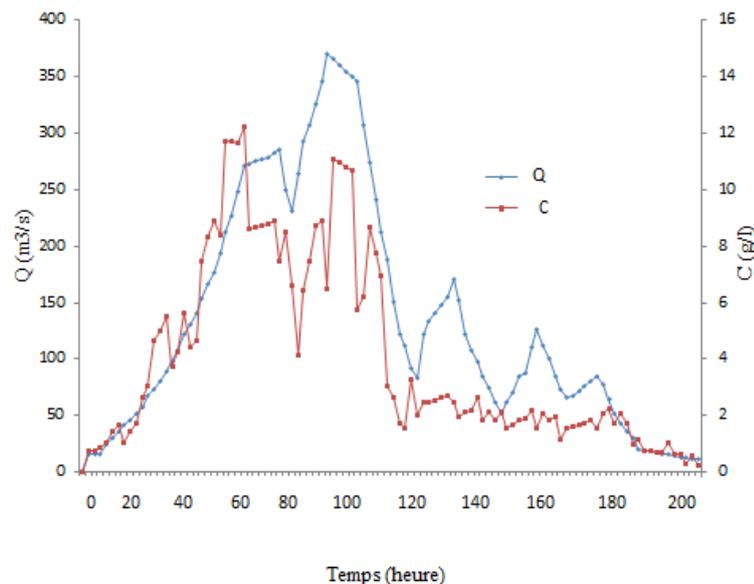
1- précipitations moyennes mensuelles; 2- coefficients d'écoulement; 3- concentrations moyennes mensuelles; 4- apports solides ( $\times 10^6$  tonnes).

Ces écoulements qui commencent à devenir progressivement importants à partir de décembre se produisent sur des sols saturés et souvent imperméables. En effet, dans ces conditions, le ruissellement se fait simultanément sur les deux branches de la crue et se traduit par des crues violentes et dangereuses présentant des hydro-grammes à très fort débit de pointe.

L'analyse des charges solides a révélé que cette saison a fourni les plus forts flux en sédiments en suspension dont ils représentent 62% de l'apport solide annuel. L'apport solide de cette saison hivernale a atteint  $8,86 \times 10^6$  tonnes ( $13010,28 \text{ T/km}^2$ ).

En se basant sur les crues enregistrées, nous constatons que les mois de janvier et février fournissent les plus forts débits solides dont les concentrations en suspension moyennes mensuelles dépassent 2,90 g/l. Bien que le mois de décembre a fourni une charge solide légèrement inférieure à celle de janvier et février, sa concentration en suspension était supérieure à celles des deux autres mois. Ceci témoigne de l'agressivité de l'érosion et de la mobilité de la matière fine en décembre. La crue du 29/12/84 au 5/01/1985 est un meilleur exemple de la production hydro-sédimentaire du mois de décembre (Figure 72). Cette crue a fourni  $0,58 \times 10^6$  tonnes de charge solide pour un débit moyen de  $140,39 \text{ m}^3/\text{s}$ , une pluie de 205 mm et une concentration moyenne de 6 g/l, où le pic de la concentration en suspension (C) égal à 12,24 g/l, arrive à la station hydrométrique avant le pic du débit liquide (Q), estimé à  $370,45 \text{ m}^3/\text{s}$  (Williams, 1989).

Cette crue a donné une hystérésis positive, représentée par une boucle dans le sens des aiguilles d'une montre, a tendance à se produire plus au début de la saison des pluies de type torrentiel. Ceci est dû à la disponibilité des sédiments produits sur des sols nus sans protection végétale permanente. C'est la mobilisation des sédiments proche de l'exutoire qui expliquerait la relation d'hystérésis de type horaire. Une autre hypothèse est la présence d'une couche de pavage formée sur le lit de l'oued antérieurement à la crue. La formation d'une telle couche peut être due à une fixation partielle du lit par une sélection de plus gros éléments des alluvions qui ne sont plus repris que par les crues exceptionnelles. Elle peut aussi être obtenue lorsqu'il y a une réduction des matériaux en suspension juste avant l'obtention du débit maximal. Ces sources de sédiments, fortement mobilisés en montée de crues, vont à leur tour alimenter en sédiments le cours d'eau provenant probablement des versants les plus éloignés de l'exutoire fortement pointu.



**Figure 72.** Crue du 29/12/1984 au 5/01/1985.

Dans l'ensemble, ce sont les crues de décembre, janvier et février qui ont transporté les plus forts apports solides et liquides. Nous pouvons déduire que les transports solides élevés pourrait s'expliquer par la conjugaison de diverses conditions favorables telles que :

- la présence d'une couverture végétale protectrice non suffisante,
- la puissance de l'écoulement a engendré un  $CE > 41\%$ , et ce malgré la saturation du sol, un décapage des surfaces érodables et des sapements de berge. Cette situation tend à accélérer le développement des mouvements de masse en bordure des cours d'eau.

Enfin, la saison printanière se distingue par des écoulements encore assez forts, surtout en mars et avril dont les valeurs du coefficient d'écoulement dépassent 40%. Cependant, nous remarquons une baisse de plus de 50% des apports solides en suspension par rapport à l'hiver. L'Oued Kébir Est a fourni dans cette saison  $4,00 \times 10^6$  tonnes (5873,71 T/km<sup>2</sup>) de sédiments en suspension. La charge solide a atteint son maximum en mars dont elle a contribué avec 47% de l'apport solide de la saison alors que le minimum est observé en mai (Tableau 23).

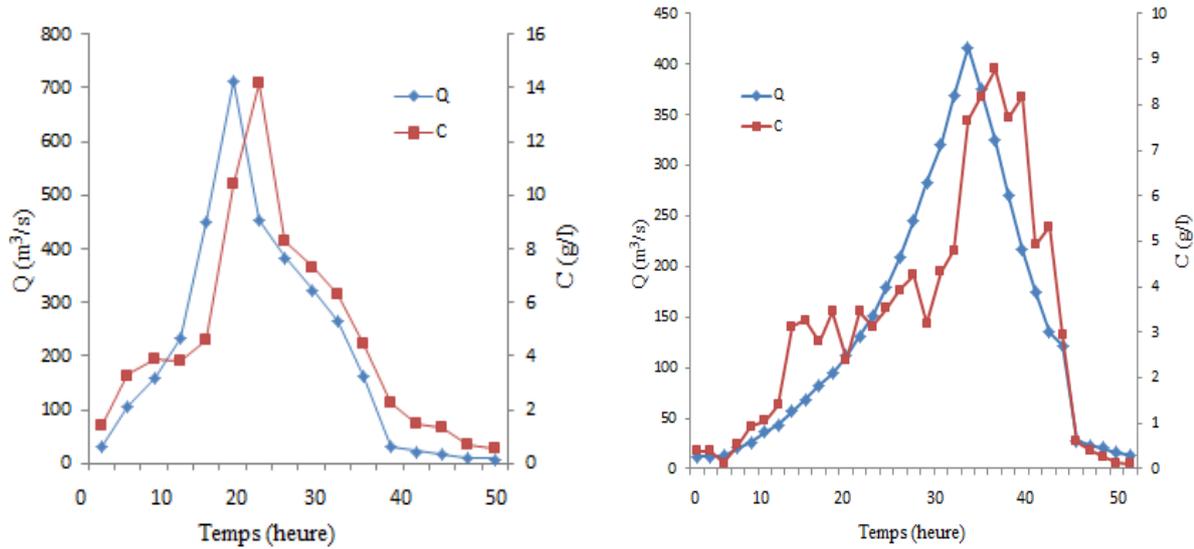
Bien que la concentration en suspension reste relativement élevée, nous assistons dans l'ensemble à une diminution de cette matière fine à partir du mois de février. Cette réduction des transports solides est essentiellement liée à la couverture herbacée et les cultures qui réduisent considérablement la mobilisation des matériaux fins sur les versants. Nous pouvons ajouter aussi la réduction des pluies à forte intensité comparée à la saison hivernale.

Nous illustrons dans le tableau 26 les plus importantes crues de la saison printanière dont nous disposons de prélèvements de la concentration en suspension. Les crues du 21-22/04/1977 et 31/03/-02/04/1983 ont donné une hystérésis négative où le pic de la concentration en suspension (C) se redresse après celui du débit liquide (Q) (Figure 73). Ceci s'explique par l'existence d'une certaine quantité de sédiments qui restait mobilisable due à une dynamique érosive tardive (Williams, 1989).

**Tableau 23.** Représentation de quelques crues importantes dans les oueds étudiés.

Date de la crue	Q (m <sup>3</sup> /s)	Qp (m <sup>3</sup> /s)	C (g/l)	Cp (g/l)	E (mm)	P (mm)	As (x10 <sup>6</sup> tonnes)
21-22/04/1977	187	713	8,01	14,20	48	67	0,26
31/03/-2/04/1983	60	416	4,67	8,78	21	31	0,07

Q : débit moyen ; Qp : débit de pointe ; C : concentration moyenne ; Cp : concentration de pointe ; E : lame d'eau écoulée ; P : pluie ; As : apport solide.



**Figure 73.** Représentation des crues du 21-22/04/1977 (à gauche) et 31/03/-2/04/1983 (à droite).

### 3. Estimation de la dégradation spécifique (période 1999/00-2013/14)

Comme il n'y a pas eu de mesures ou d'études de la charge de fond dans ce bassin, seuls les sédiments en suspension sont traités dans cette section. Les données de l'automne 1999 à août 2014 contiennent des informations sur les volumes mensuels du barrage de Mexa obtenus auprès de l'Agence Nationale des Barrages (ANBT), mais aucune information n'est disponible pour cette période sur le transport des sédiments.

#### 3.1. Utilisation de la méthode de régression multiple

Les données disponibles sur les sédiments en suspension transportés par les rivières au Maghreb, qui ont été résumées par Sogreah (1983), ont été examinées pour 130 bassins versants (Probst et Amiotte Suchet, 1992). Les influences de plusieurs facteurs environnementaux (précipitation, ruissellement, superficie du bassin et lithologie) sur l'érosion mécanique et le transport fluvial des sédiments ont été analysées. Un modèle de régression multiple a été proposé pour estimer les dégradations spécifiques au Maghreb. Pour chaque bassin hydrographique, les auteurs ont fourni les informations suivantes: superficie du bassin versant (S) en  $\text{km}^2$ , précipitations annuelles moyennes (P) en  $\text{mm année}^{-1}$ , ruissellement annuel moyen (R) en  $\text{mm année}^{-1}$ , dégradation spécifique moyenne annuelle de sédiments en suspension ( $D_s$ ) en  $\text{T km}^{-2} \text{année}^{-1}$  et le type de roche.

Le type de roche est une variable qualitative, et chaque formation lithologique a été attribuée à un coefficient ( $K_{ER}$ ) qui représente l'érodabilité des roches (Tableau 24).

L'estimation de l'érodabilité de chaque type de roche est basée sur les taux de dénudation des différents types de roches donnés par (Chorley *et al.*, 1984) pour les bassins versants monolithologiques aux Etats-Unis. Le  $K_{ER}$  est le rapport entre le taux de dénudation mécanique d'une roche donnée et le taux de dénudation du granite considéré comme le plus résistant à l'érosion mécanique (Probst et Amiotte Suchet, 1992).

**Tableau 24.** Coefficient d'érodabilité des roches ( $K_{ER}$ ) pour les différentes formations lithologiques.

Lithologie	$K_{ER}$
Granits	1
Grès, calcaires	4
Schistes/micaschistes	10
Schiste argileux (shales), pélites, marno-grès, marno-calcaires	27
Marnes	50

En utilisant la carte lithologique, les observations sur terrain et la cartographie de la susceptibilité des roches et des sols à l'érosion mécanique (ruissellement concentré et mouvements de masse), trois groupes sont choisis pour le bassin étudié: roches fortement cohésives à faible concentration sédimentaire (calcaires et grès ), roches à érodabilité modérée avec un stade avancé d'érosion qui devrait obtenir un  $K_{ER}$  subjectif égal à 27 (grès et argile, marno-calcaire, conglomérat et argile, roches triasiques, formations quaternaires); et des roches peu cohésives avec des formes de badlands (marnes) observées en aval de la station de jaugeage. Pour l'utilisation précise de ces groupes, des ouvrages consacrés à ce sujet dans les bassins versants de l'étang de Berre, Seybouse et les bassins côtiers du Nord-Est algérien (Khanchoul, 2006) et dans le Haut Atlas marocain de Beni Mellal (Bachaoui *et al.*, 2007) ont été utilisés.

Selon Probst et Amiotte Suchet (1992), la procédure commence par des sous-ensembles de variables indépendantes ( $S$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $K_{ER}$ ) qui prédisent le mieux la variable dépendante ( $D_s$ ) en utilisant les observations, à l'exception des bassins sous granit et silts (Khanchoul *et al.*, 2012). La sélection des variables est basée sur le coefficient statistique  $C(p)$  de Mallows (1973). La statistique  $C(p)$  est une mesure de l'erreur quadratique totale pour un modèle de sous-ensemble contenant  $p$  variables indépendantes. Sur la base de la

méthode statistique, seules trois variables significatives sont retenues: l'érodabilité des roches, le ruissellement annuel moyen et la superficie du bassin. L'équation de la régression multiple pour l'estimation de la dégradation spécifique ( $D_s$ ), en  $T \text{ km}^{-2} \text{ an}^{-1}$  est la suivante:

$$\ln D_s = 4,79 + (54 \times 10^{-3} K_{ER}) + (4 \times 10^{-3} R) - (5,6 \times 10^{-5} S)$$

Où le coefficient de corrélation est égal à 0,71 et le seuil de signification est de 0,01%. Les transports solides en suspension spécifiques observés pour les 130 bassins sont comparés aux valeurs prédites obtenues en utilisant l'équation. Les auteurs précédents ont souligné que le groupe de nuage de points est relativement bien centré autour de la ligne de régression, même si elle est dispersée. Le modèle fournit donc une explication raisonnable des valeurs observées.

Afin d'indiquer la performance de cette équation dans la prédiction de la dégradation spécifique de l'Oued Kébir Est, cette équation est utilisée pour la période (1999-2014) après la construction du barrage de Mexa. Sachant que la validation du modèle de régression, par cette équation, dans l'estimation de la dégradation spécifique du même bassin a été utilisée pour la période 197/76-1998/99 par (Khanchoul *et al.*, 2012).

Le calcul de l'érodabilité du type de roche ( $K_{ER}$ ) et du ruissellement annuel moyen (période 1999 à 2014) correspondant au bassin du réservoir de Mexa ( $650 \text{ km}^2$ ) est effectué. Dans le tableau 25, la formation lithologique et le  $K_{ER}$  de chaque type de roche pour le bassin étudié sont représentés. La valeur du  $K_{ER}$  pour le bassin versant au réservoir de Mexa est calculée comme une moyenne pondérée de la somme du produit de la zone de type de roche et du  $K_{ER}$  divisé par la superficie du bassin. Avec des valeurs de  $K_{ER}$  et de ruissellement de 15 et 441,76 mm, le débit solide spécifique annuel moyen, pour la période de 15 années (1999/00-2013/14), qui a pu entrer dans le réservoir est estimé à  $1525 T \text{ km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ; tandis que la charge totale de sédiments en suspension montre  $14,87 \times 10^6$  tonnes.

**Tableau 25.** Coefficient d'érodabilité des roches ( $K_{ER}$ ) du bassin versant au barrage de Mexa.

Lithologie	Superficie (km <sup>2</sup> )	$K_{ER}$
Calcaire	24,00	4
Grès	302,00	4
Grès et argile	220,85	27
Marno-calcaire	18,40	27
Conglomérat et argile	29,26	27
Roches triasiques	18,35	27
Formations quaternaires	36,74	27
Total	650,00	-
$K_{ER}$ du bassin		15

Il n'y a pas de mesures directes de la charge de fond, mais les informations existantes limitées concernant la distribution granulométrique dans la cuvette et le régime hydrologique de la rivière indiquent que la charge de fond représente environ 10% de la charge totale de sédiments. Avec ce taux, la charge de fond est évaluée à  $1,00 \times 10^6$  tonnes et la charge sédimentaire annuelle qui passe par l'Oued Kébir Est dans le barrage de Mexa peut ainsi être estimée à  $10,98 \times 10^6$  tonnes.

Sur la base de quelques études menées dans des réservoirs algériens, (Remini, 2005) a estimé que 15% du flux de sédiments traversait le barrage de Mexa. Au même rythme, les sédiments globaux déposés dans le réservoir au cours de la période de quinze années seraient de  $13,91 \times 10^6$  tonnes. Cette valeur est convertie en masse à l'aide de mesures de la densité des sédiments et selon l'Agence des Barrages Algériens (ANBT), la densité apparente sèche est égale à  $0,81 \text{ g/cm}^3$  de l'accumulation (Khanchoul *et al.*, 2012). Le taux annuel de sédimentation dans la cuvette est donc égal à  $10,47 \text{ Mm}^3$  et selon la capacité de stockage initiale du réservoir de  $51,50 \text{ Mm}^3$  et la quantité totale de sédiments accumulés dans le réservoir, 20,33% de la capacité totale prévue est perdue. La perte annuelle moyenne de capacité de stockage a atteint 1,35% par an.

En ce qui concerne, le barrage de Barbara dont les eaux de l'Oued Ballauta (Tunisie) sont déversées dans la cuvette de ce barrage, une évaluation grossière de l'envasement annuel de ce barrage a pu être fixée à  $1,25 \times 10^6$  tonnes de sédiments, soit  $1,04 \text{ mm}^3$  (Souadi, 2011). Avec ce rythme de transport et en sachant que la capacité de stockage du barrage est de 74 millions de  $\text{m}^3$ , ce dernier perd alors, annuellement 1,41 % de sa capacité.

Sur la base de l'observation sur le terrain et de la prédiction du transport des sédiments, la cause de l'érosion et de la sédimentation importante dans les barrages de Mexa et Barbara pourraient être identifiées comme un milieu physique critique, une mauvaise utilisation des terres de culture et une augmentation de la densité de population. Les gens ont endommagé l'environnement par la déforestation pour maintenir leur mode de vie et brûler la forêt. En outre, les terres forestières constituées de forêts ont eu tendance à changer de fonction. En conséquence, l'érosion du sol a augmenté ainsi que la sédimentation dans les barrages. Une autre explication possible de cette dégradation des sols, considérablement élevée dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est, est que les facteurs géomorphologiques (intensité des précipitations et occupation des sols) couplés aux formations lithologiques érodables dominantes (par exemple argile et marne), y compris les sols nus ont contribué à faire augmenter la disponibilité des sédiments dans le bassin versant. À l'échelle mondiale, les effets des perturbations anthropiques telles que les pratiques de conservation des sols doivent également être pris en compte dans l'augmentation ou la diminution de la quantité de sédiments mobilisés.

Sur les tronçons moyen et inférieur des oueds Bougous et Ballauta sur 35 km et 42 km de long, on constate que les berges ont subi une forte érosion (bank erosion), notamment des effondrements et des glissements de terrain (Figure 74).



**Figure 74.** Sapement de berge et glissement de terrain au niveau de l'Oued Bougous.

Enfin, dans cette région où la quantité de sédiments produite par le bassin est fonction des facteurs physiques, l'impact de la sédimentation augmentera progressivement dans un avenir relativement proche et par conséquent, le taux de perte de capacité de stockage des deux réservoirs augmentera. Le manque d'études appropriées ou de données adéquates sur la sédimentation des réservoirs dans la région est un problème pour une meilleure estimation du taux d'envasement et de la durée de vie économique des deux barrages, surtout celui de Mexa. Le nouveau barrage de Bougous, situé en amont de celui de Mexa pose également le même problème d'envasement; mais malheureusement à ce jour les données bathymétriques ne sont disponibles.

#### **4. Modélisation par la méthode des réseaux de neurones artificiels**

L'estimation des sédiments en suspension est une tâche extrêmement difficile parce qu'il est étroitement lié à l'écoulement et le mécanisme de leur relation non linéaire et la complexité de leurs interactions les uns avec les autres (Kisi, 2012). Pour estimer les concentrations de sédiments et comprendre les mécanismes de transport des sédiments dans les bassins naturels en utilisant différentes techniques de l'informatique, de nombreuses études ont été réalisées (Mustafa, 2011), (Kakaei et Lafdani, 2013), (Liu, 2013), (Mustafa et Isa, 2014).

La technique des réseaux de neurones artificiels (RNA) a été appliquée avec succès dans divers domaines de la technologie tels que les sciences hydrologiques, en particulier dans le contexte des prévisions hydrologiques (Rai, 2008), (Holgar, 2010), (Melese, 2011), (Rajai, 2011), (Mustafa, 2012). Dans cette sous-section, on va appliquer le modèle RNA pour estimer le transport solide dans le bassin de l'Oued Kébir Est.

#### **4.1. Méthodologie**

##### **4.1.1. Disponibilité des bases de données**

Les données du débit liquide ( $Q$ ) et des concentrations en suspension (MES) utilisées dans cette étude sont basées sur des mesures instantanées obtenues à la station hydrométrique d'Ain Assel, exploitée par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). A cet effet, 2500 données instantanées des débits liquides et des concentrations en suspension ont été converties en valeurs journalières à l'aide du logiciel Hydraccess (Vauchel, 2005), et donc, on a obtenu 129 données journalières sur 24 ans (1975/76 à 1998/99).

### 4.1.2. Les réseaux de neurones

Les RNA sont des systèmes massivement parallèles composés de nombreux éléments de traitement reliés par des liens de poids variables. Le réseau de rediffusion est de loin le plus populaire parmi les nombreux modèles RNA (Kisi, 2008; Bilgehan, 2010; Bilgehan et Turgut, 2010). Ces réseaux sont similaires au système nerveux biologique en ce sens que les fonctions sont exécutées collectivement et parallèlement aux unités; plutôt que d'avoir une description claire des sous-tâches auxquelles diverses unités sont assignées. Le réseau neural est créé pour deux phases différentes dans le sens le plus général. La première est la phase de formation et la seconde est la phase de test (simulation) (Tapkin *et al.*, 2006). Le RNA apprentissage (Training) consiste à exposer le réseau neuronal à un ensemble de modèles d'entrées - sorties connus au réseau et à ajuster les poids d'interconnexion entre les différents noeuds jusqu'à ce que le résultat désiré est obtenu.

Les réseaux neuronaux de base employés dans cette étude sont l'algorithme MLP (Perceptron multicouche) et LM (Levenberg-Marquardt). Ces réseaux sont basés sur le FFBP feed-forward backpropagation ou en français un algorithme de rétropropagation non récurrent à l'aide des programmes statistique MATLAB et STATISTICA. Les réseaux MLP et LM sont les modèles de simulation les plus performants et les plus utilisés dans les prédictions hydrologiques (Govindaraju and Rao, 2000). Pour l'algorithme de rétropropagation, le neurone artificiel reçoit un ensemble d'entrées ou de signaux ( $x$ ); calcule une moyenne pondérée d'entre elles ( $z$ ) à l'aide de la fonction de sommation et des poids ( $w$ ); puis utilise une fonction d'activation ( $f$ ) pour produire une sortie, d'où:

$$z = \sum_{i=1}^N x_i w_i$$

La phase descendante est basée sur les différences entre les signaux d'information calculés et observés aux unités de sortie. La différence ou l'erreur des signaux ultérieurs d'information est minimisée en ajustant les poids et les biais par un certain algorithme de formation, où l'erreur ( $E$ ) calculée à la sortie est propagée de nouveau à la couche cachée et finalement à la couche d'entrée en mettant à jour le poids de l'interconnexion. L'erreur ( $E$ ) est définie comme:

$$E = 1/2 \sum_k (t_k - O_k)^2$$

Où  $k$  est une unité de sortie de réseau,  $t_k$  est la valeur désirée de l'unité de sortie  $k$  du réseau et  $O_k$  est la valeur effective de l'unité de sortie  $k$  réseau. De cette façon, la phase de recul (backware) ou le back-prop est un apprentissage de descente de gradient pour la fonction  $E$ . On devrait étudier d'une part comment  $E$  varie avec  $W_{jk}$ , un poids d'une connexion arrivant à la couche de sortie, et d'autre part comment  $E$  varie avec  $W_{ij}$ , un poids d'une connexion arrivant à la couche cachée (Kuo *et al.*, 2007).

#### 4.1.3. Architecture du réseau de neurones

L'approche d'essai et d'erreur a été employée dans la présente analyse pour choisir l'architecture du réseau neural optimal. Dans la conception de MLP et LM, nous avons dû déterminer les variables suivantes: le nombre de nœuds d'entrée, le nombre de couches cachées et les nœuds cachés, et le nombre des nœuds de sortie. Les combinaisons d'intrants qui ont été testées pour estimer les valeurs du débit solide couvrent les paramètres géomorphologiques du bassin versant et la couche cible est constituée des données uniques sur les débits solides et l'expression peut être écrite sous la forme mathématique du modèle RNA donnée par la fonction suivante:

$$Q_s = \text{fonction}(Q^{\sqrt{Dd}}, Q^{\sqrt{Sf}}, Q^{\sqrt{S}}, Q^{\sqrt{Li}}, Q^{\sqrt{Fi}})$$

où  $Q_s$  (kg/s) est le débit solide moyen journalier,  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) est le débit d'eau moyen journalier, qui a été associé aux cinq paramètres géomorphologiques du bassin versant,  $Dd$  est la densité de drainage ( $Dd = 2,82 \text{ km}^{-1}$ ),  $Sf$  est le facteur de forme du bassin ( $Sf = 1,31$ ),  $S$  est la pente moyenne du bassin ( $S = 0,16$ ),  $Li$  est l'indice lithologique ( $Li = 0,17$ ), et  $Fi$  est l'indice de couverture forestière ( $Fi = 0,43$ ). Le  $Li$  et le  $Fi$  sont définis comme étant la superficie des roches érodables (marne et argile) et la superficie plus boisée, respectivement, divisée par la superficie totale du bassin.

Les caractéristiques du bassin versant comme le drainage, le climat, la lithologie, la végétation, la pente, le couvert végétal et les sols affectent le taux de ruissellement, les taux d'infiltration, l'érosion et la production de sédiments (de vente *et al.*, 2011; Ahmed et Blaise Rao, 2015). Cette étude vise, par conséquent, à utiliser les paramètres morfo-métriques conventionnels du bassin versant pour leur capacité à évaluer la vulnérabilité du bassin en fonction des facteurs topographiques, morfo-métriques et lithologiques.

Le caractère de la topographie d'un bassin versant influe de façon significative sur la quantité et le type de ruissellement et le transport solide. Plus la pente est abrupte, plus la force gravitationnelle agissant pour enlever les matériaux du sol ou roche est grande. L'importance de la couverture végétal pour prévenir l'érosion du sol est bien connue (Rey et Burylo, 2014). La couverture végétale est considérée comme un facteur majeur qui réduit l'érosion du sol parce que la couverture peut améliorer la structure du sol, augmenter la rugosité de la surface et le taux d'infiltration, piéger et retenir les sédiments et rompre la connectivité du paysage (Zhang et coll., 2015). L'indice lithologique relatif a été utilisé comme indice pour caractériser la résistance des matériaux de surface à l'érosion hydrique. De nombreux chercheurs ont attiré l'attention sur l'importance de la lithologie dans la détermination des taux d'érosion et ont décrit l'importance de la lithologie dans la production des transports solides (Probst et Amiotte Suchet, 1992; Fox et coll., 1997; De vente et coll., 2011).

En tant que paramètre dans les études des bassins versants, la densité de drainage semble être un paramètre important pour estimer le transport solide. Il peut synthétiser les liens entre le climat, la végétation, le réseau fluvial et les conditions géologiques dont la combinaison résulte en un potentiel de l'érodabilité du bassin versant (Grauso et coll, 2008). La forme du bassin versant influe sur la dynamique des affluents de la rivière, sur la formation de la morphologie de la surface et détermine le volume des charges solides au niveau des bassins versants (Zhang et coll., 2015).

Dans tous les neurones du réseau neuronal, nous avons besoin d'une fonction de transfert. Il s'agit d'une fonction utilisée pour transformer le niveau d'activation d'une unité (Neuron) en un signal de sortie. Les réseaux neuronaux supportent un large éventail de fonctions d'activation. L'approche la plus simple est de tester plusieurs réseaux avec différentes fonctions de transfert et de sélectionner la meilleure fonction. Les fonctions de transfert appliquées pour la couche cachée et la couche de sortie dans MLP sont:

- Fonction linéaire (Identité  $x$ ) où le niveau d'activation est transmis directement vers la sortie.
- Logistique (sigmoïde) avec une courbe en forme de S et une sortie dans la gamme (0,1).
- Fonction tangente hyperbolique (conçue par Tanh), qui est une courbe sigmoïde avec une sortie qui se trouve dans la plage (- 1, + 1).

Entre-temps, les fonctions d'activation utilisées dans la formation d'algorithme LM étaient principalement des fonctions tangentes sigmoïde (TANSIG) et linéaires (PURELINE) pour la couche cachée et la couche de sortie, respectivement. Compte tenu du nombre de données journalières sur les débits et les débits solides, il y avait 170 ensembles de données d'entrée et de sortie. Les paramètres géomorphologiques des bassins hydrographiques ont été utilisés comme données d'entrée et les débits solides journaliers ont été employés comme résultats de sortie pour les différentes phases d'apprentissage. Afin d'avoir un bon apprentissage du RNA, l'ensemble des données a été réparti en trois parties: 70% pour l'apprentissage, 20% pour test et 10% pour la validation.

Les données d'entrée et de cible ont été normalisées avant leur utilisation dans l'apprentissage et les tests, pour correspondre aux limites supérieures et inférieures des fonctions d'activation utilisées dans les neurones cachés. Cela a permis un traitement rapide et une convergence pendant l'entraînement et a minimisé l'erreur de prédiction (Rojas, 1996).

Dans cette étude, les données d'entrée et de cible ont été prétraitées pour l'échelle des données entre la plage 0 et 1 en utilisant l'équation suivante:

$$Z_p = (X_p - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

Où  $Z_p$  est la série de données normalisées ou transformées,  $X_p$  est la série de données d'origine,  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  sont la valeur minimale et la valeur maximale de la série de données originales, respectivement.

Avant qu'un RNA puisse être utilisé pour accomplir n'importe quelle tâche désirée, le nombre optimal de neurones cachés dans la couche cachée a dû être déterminé. On sait que les performances et l'efficacité du réseau dépendent beaucoup du nombre de neurones cachés dans la couche cachée (Tang et Floch, 1993; Kocur et coll, 1994). Pour sélectionner le nombre de neurones cachés, nous avons commencé avec deux neurones cachés et progressivement, il y eu une augmentation du nombre jusqu'à ce qu'un réseau de 11 neurones cachés avec moins d'erreur de la moyenne quadratique (MSE) qui a été atteinte. L'augmentation des neurones cachés pourrait donner une erreur élevée et produire une mauvaise performance du réseau.

Le processus de l'apprentissage a été répété plusieurs fois. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été notée pour chaque analyse dans l'équation de RMSE (équation 1) et la

validation croisée a également été effectuée pour estimer les valeurs de  $R^2$  (coefficient de détermination), équation (3). Le facteur d'efficacité du modèle ( $EF$ ) des valeurs observées et estimées a également été calculé pour les différentes simulations sur l'ensemble des données de validation. Le meilleur modèle a été sélectionné en fonction de la valeur  $EF$  approchant un. Le modèle  $EF$  a été estimé pour tous les ensembles de validation utilisant la relation dans l'équation (2). Les mesures de performance de RMSE,  $EF$  et  $R^2$  ont été calculées à l'aide des équations (1), (2) et (3), respectivement.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - \hat{Q}_{si})^2}{N}} \quad (1) \quad EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - \hat{Q}_{si})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - \bar{Q}_s)^2} \quad (2) \quad R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (Q_{si} - \bar{Q}_s)(Q_{si} - \hat{Q}_{sm}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - \bar{Q}_s)^2 \sum_{i=1}^N (Q_{si} - \hat{Q}_{sm})^2} \quad (3)$$

$Q_{si}$  est la valeur observée du débit solide;  $\hat{Q}_{si}$  est la valeur estimée du débit solide;  $\bar{Q}_s$  est la moyenne des valeurs observées du débit solide,  $\hat{Q}_{sm}$  est la moyenne des valeurs estimées du débit solide,  $N$  est le nombre de données. RMSE a donné une indication quantitative pour l'erreur du modèle; Il a mesuré la déviation de la valeur prévue et/ou simulée à partir de la valeur réelle observée. Plus la valeur RMSE est faible, plus la performance n'est bonne. La valeur idéale pour RMSE doit être égale à zéro.

Le  $R^2$  est la fraction de la variance expliquée par un modèle de régression (Helsel et Hirsch, 1992). Il fournit une indication de la qualité de l'ajustement d'un modèle (c'est-à-dire sa capacité à modéliser avec précision un ensemble de données). Plus le  $R^2$  est grand (jusqu'à une valeur maximale possible de 1,0), plus fiable est le modèle. L' $EF$  proposé par Nash et Sutcliffe (1970) est largement utilisé pour évaluer l'ajustement adéquat des modèles hydrologiques. La valeur est comprise entre  $[-\infty, 1]$ . Une efficacité de 1 ( $EF = 1$ ) correspond à un parfait rapprochement entre les débits solides modélisés et ceux observés. Une efficacité de 0 ( $EF = 0$ ) indique que les prédictions du modèle sont aussi précises que la moyenne des données observées, alors que la valeur inférieure à zéro signifie que le modèle est moins performant que la valeur moyenne observée.

## 4.2. Résultats et discussion

On a étudié les réseaux neuronaux MLP et LM avec la méthode de rétropropagation pour la prévision du débit solide de l'Oued Kébir Est, mesuré à la station hydrométrique de Ain assel.

Le réseau de trois couches a été développé à l'aide des outils MATLAB et STATISTICA. D'après les paramètres géomorphologiques des bassins versants, les combinaisons des entrées ont été introduites pour prédire les valeurs du débit solide en suspension dans le bassin étudié. Dans tous les cas, la couche de sortie n'avait qu'un seul neurone, c'est-à-dire le débit solide ( $Q_s$ ). Les cinq paramètres géomorphologiques du bassin versant (densité de drainage, facteur de forme, pente du bassin, l'indice lithologique et le taux de couverture forestière) ont été associés aux valeurs du débit liquide. La seule couche cachée se distingue par deux à onze neurones cachés et la couche de sortie est représentée par une couche qui donne les valeurs du débit solide.

Une fois que les réseaux ont été étalonnés et validés à l'aide des deux outils mentionnés précédemment, leurs performances ont été évaluées avec trois statistiques RMSE,  $EF$  et  $R$  (coefficient de corrélation). Le nombre de neurones dans la couche cachée a été étudié par apprentissage pour chaque combinaison pour obtenir la meilleure structure de réseau possible. Pour évaluer les performances du réseau neuronal, l'initialisation des poids de connexion, l'apprentissage et les tests ont été effectués avec les meilleurs apprentissages sous forme d'aléatoires indépendants pour l'initialisation du poids comme indiqué dans le tableau 26. Le tableau a montré les paramètres statistiques de RMSE et  $R$  du réseau neuronal pour les différentes règles d'apprentissage et les fonctions de transfert avec le rapport 70:20:10, et qui a conduit aux plus hauts coefficients de corrélation et aux plus faibles RMSE pour la plupart des processus d'apprentissage et test.

Les méthodes MLP et LM ont fourni de meilleures performances dans l'estimation des sédiments par rapport à la SRC (courbe de transport solide). Selon les réseaux neuronaux, les valeurs de  $R$  dans les phases d'entraînement sont plus élevées avec des coefficients de corrélation de 0,96 et 0,97, et RMSE qui varie de 0,040 à 0,054 (Tableau 26). Ceci est une indication de la performance du modèle.  $EF$  varie entre 0,90 et 0,94, ce qui donne des performances supérieures à la valeur calculée par rapport au SRC ( $EF = 0,88$ ). Dans ce cas, la plupart des modèles RNA ont présenté un modèle satisfaisant en performance durant la phase d'apprentissage (Tableau 22). On peut voir à partir du tableau que la méthode LM a donné de meilleurs résultats de test que les méthodes MLP et SRC. Les erreurs d'estimation sont inférieures aux deux méthodes où elles n'ont pas, généralement, surestimé ou sous-estimé le débit solide en suspension ( $Q_s$  dans la colonne 7 du tableau 22) de plus ou moins 5,50%.

**Tableau 26.** Performance statistique des modèles RNA pour la prédiction des débits solides.

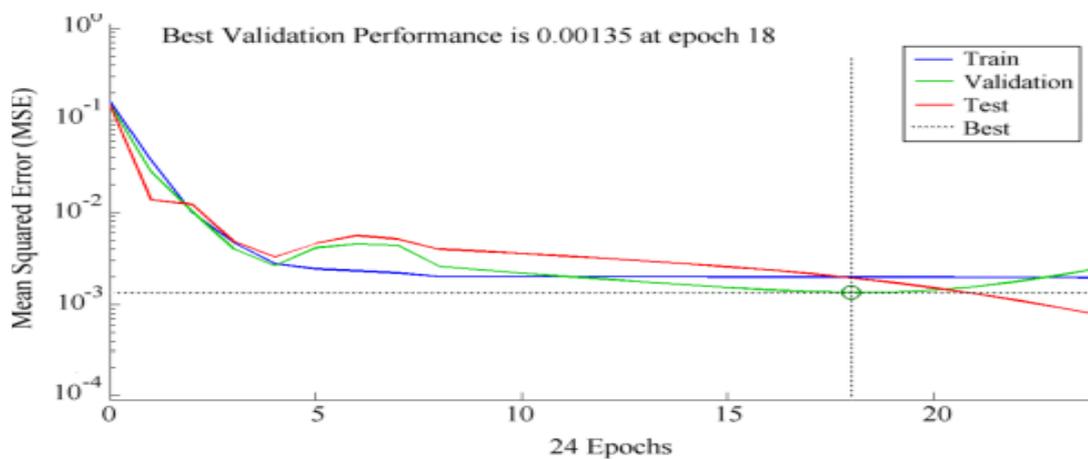
Neurones	Fonctions de transfert		RMSE	R	EF	Prediction $Q_s$ ( $\times 10^3$ kg/s)	Erreur (%)
	Couche cachée	Couche de sortie					
<i>MLP</i>							
5	Tanh	Logistic	0.049		0.92	23.64	+6.63
6	Exponential	Tanh	0.051		0.91	24.76	+11.71
7	Tanh	Logistic	0.052		0.91	18.73	-15.50
8	Exponential	Tanh	0.049	0.96	0.92	21.42	-3.39
9	Tanh	Logistic	0.050		0.92	24.26	+9.43
10	Exponential	Tanh	0.049		0.92	23.64	+6.66
11	Tanh	Logistic	0.054		0.90	24.76	+11.72
<i>LM</i>							
3	Sigmoid	Pureline	0.049	0.96	0.92	21.75	-1.86
4			0.049	0.96	0.92	20.95	-5.47
5			0.048	0.96	0.92	22.51	+1.53
6			0.047	0.96	0.92	22.99	+3.72
7			0.048	0.96	0.92	22.46	+1.33
8			0.048	0.96	0.92	22.65	+2.19
9			0.048	0.97	0.94	22.06	-0.48
10			0.051	0.96	0.91	22.48	+1.40
11			0.040	0.97	0.94	21.32	-3.84

Note: débit solide en suspension mesuré ( $Q_s$ ) =  $22,17 \times 10^3$  kg/s).

Le meilleur réseau LM de la phase d'entraînement a été fourni par le modèle de neuf neurones dans la couche cachée, qui a performé mieux que ceux avec d'autres nombres de neurones ( $R = 0,97$ ,  $RMSE = 0,048$  et  $EF = 0,94$ ). En outre, ce modèle RNA a donné une relation acceptable, avec une légère sous-estimation de seulement -0,48% (Tableau 26). À partir de l'étude de simulation réalisée sur trois proportions des rapports, on a constaté que le modèle de neuf neurones a donné un coefficient de corrélation plus élevé, mais un RMSE légèrement plus élevé pendant le test; pendant ce temps, la validation dans l'algorithme LM a fourni un coefficient de corrélation plus élevé et un RMSE inférieur. Les résultats, bien que produisant quelques différents modèles, souvent ne diffèrent pas largement par un ordre de grandeur entre les sorties et les cibles.

Une fois que le réseau a été créé et testé à l'aide de l'algorithme LM, nous avons obtenu un résultat montrant la précision de notre système à l'aide de MSE. Il est obtenu à travers les

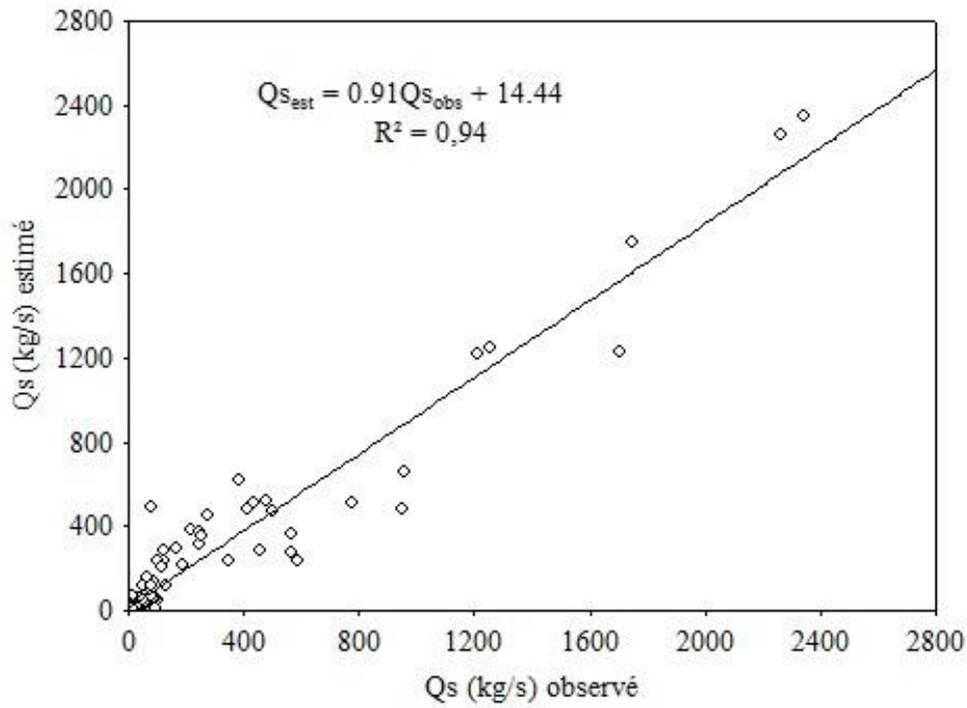
courbes de performance illustrée à la figure 74. Le tracé des performances affiche la valeur de la fonction de performance par rapport au nombre d'itérations. Il englobe les erreurs d'apprentissage, les erreurs de validation et les erreurs de test. Les meilleures performances de validation se sont produites à l'itération 18 avec une meilleure performance de validation égale à 0,00135, et le réseau à cette itération est retourné. Avant l'arrêt de l'apprentissage, il a continué pour six autres itérations même en atteignant 18 (Figure 75). Ce chiffre n'indique en fait aucun problème majeur avec l'apprentissage, car les courbes de test et de validation sont très similaires. Cependant, il aurait pu y avoir des chances de sur-ajustement si la courbe du test aurait augmenté de façon significative avant l'augmentation de la courbe de validation.



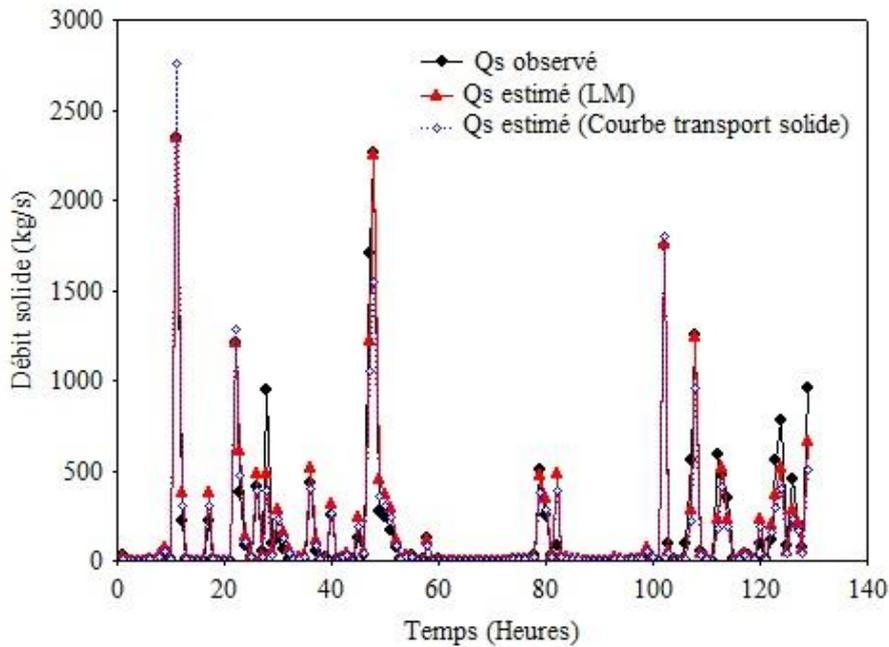
**Figure 75.** Meilleures courbes de performance de la méthode LM.

L'hydrographe et le nuage de points pour la période d'apprentissage sont représentés dans les figures 76 et 77. Pour un ajustement parfait, la cible (observée) versus la sortie (prédite) des données journalières du débit solide doivent se trouver le long d'une ligne de 45 degrés, où les sorties de réseau sont égales aux cibles. Pour le modèle LM à neuf neurones illustré à la figure 75, l'ajustement est exceptionnellement bon pour tous les ensembles de données. Cela est confirmé par la représentation graphique où la sortie suit la cible très bien pour les phases d'apprentissage, test et validation après plusieurs d'époques (epochs). La comparaison de la performance de l'hydrographe des débits solides observés et estimés pour les méthodes LM et SRC a été représentée à la figure 76. En comparant avec les données observées, les résultats de la prévision des débits solides à la figure 76 ont été mieux pris en compte par le fait que la tendance des débits solides estimés à l'aide du modèle LM à neuf neurones suit bien les données observées. À cet égard, il est suggéré que le RNA avec

l'algorithme LM offre un outil prédictif plus approprié pour l'estimation des débits solides en suspension que la méthode conventionnelle.

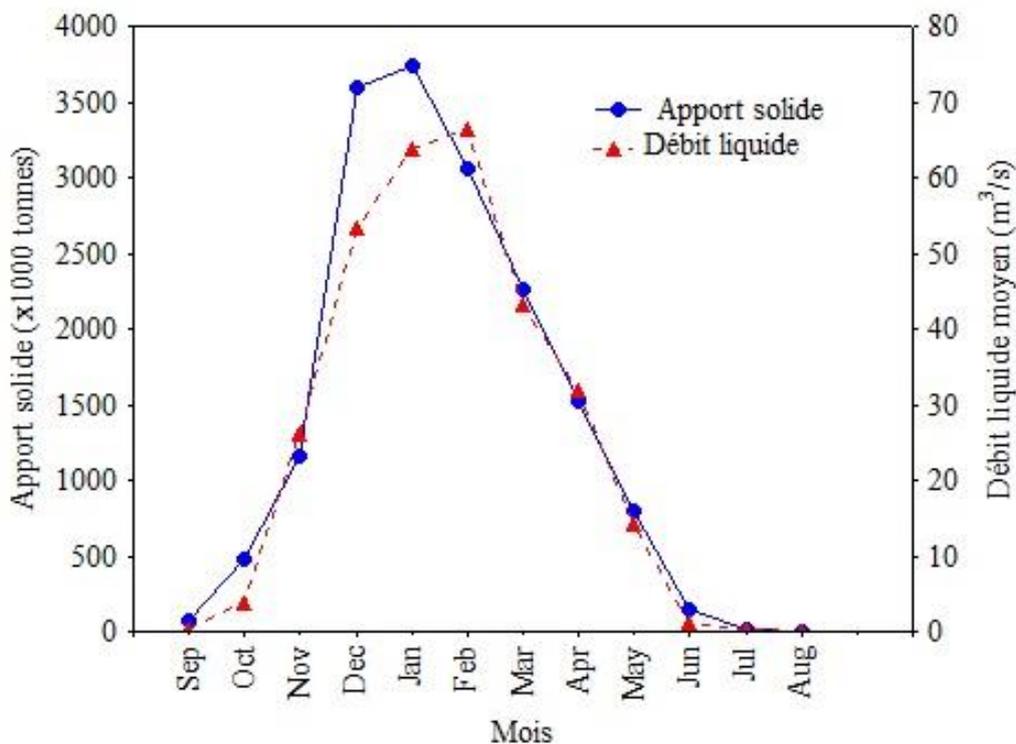


**Figure 76.** Représentation du nuage de points des débits solides observés et estimés dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est.



**Figure 77.** Variation des débits solides observés et estimés dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est.

En utilisant les résultats du modèle RNA, on a observé que la charge solide estimé (SLs) à l'aide de LM est égal à  $16,85 \times 10^6$  tonnes, ce qui correspond à une dégradation spécifique annuel de  $1\,237,10 \text{ T km}^{-2} \text{ an}^{-1}$  au cours de la période de 24 ans. Cette valeur est considérée comme la plus élevée par rapport aux dégradations spécifiques estimées des bassins versants algériens du nord-est. Il est intéressant de noter qu'environ 40% du SL total est généré au cours d'une série de grandes tempêtes sur quatre ans en 1983/1984, 1984/1985, 1986/1987 et 1990/1991. L'approvisionnement en transport de sédiments en suspension dans la rivière du Kébir Est, selon le modèle RNA, s'est déroulé principalement durant les mois d'hiver (Figure 78). Les débits et les SLs suspendus sont les plus élevés durant la saison hivernale (de décembre à février), comme le représente la station en aval de l'Ain assel. En fait, ces mois d'hiver ont représenté 62% du total annuel des valeurs des sédiments, avec un tonnage de  $10,39 \times 10^6$  tonnes. Néanmoins, il est apparu à partir de la figure 78 que les SLs élevés ont atteint leurs sommets lors des événements de crues ayant des débits de pointe. Ceci est principalement dû à l'approvisionnement et au transport plus efficace de sédiments pendant les mois de décembre et de janvier. Le transport des sédiments a été le plus bas au cours de la période allant de juin à août et septembre.



**Figure 78.** Variation saisonnière de la charge solide en suspension dans le bassin versant étudié.

Des précipitations fortes et excessives ont pu déclencher des écoulements et des matières en suspension élevés. Ceci montre l'effet de quelques jours pour produire un transport de sédiments en suspension extrêmement élevé, une tendance semblable au débit liquide dans le bassin (Gupta et charb, 2007). Une éventuelle explication de la dégradation spécifique, aussi considérable, dans l'Oued Kébir Est peut être affirmée sur le fait que les facteurs morphologiques (exemple : l'intensité des précipitations et l'occupation de sol clairsemée) couplés avec les formations lithologiques érodables dominantes (exemple : argile et marne) et la topographie ont agi comme forces additionnelles à la disponibilité des sédiments dans le bassin (Boukhrissa *et al.*, 2013). Par conséquent, nous pourrions nous attendre à ce que les barrages de Mexa et de Barbara emprisonnent plus de sédiments et souffrent graduellement de sédimentation dans un avenir proche et, par conséquent, le taux de perte de capacité de stockage augmenterait.

## Conclusion

Les transports solides en suspension reflètent dans une certaine mesure, l'importance de la dégradation dans un bassin donné. Les mesures effectuées dans le bassin versant étudié sont très discontinues, ceci nous a mené à utiliser des relations entre la concentration et le débit liquide pour chaque crue afin de combler le manque de données des matières en suspension. L'estimation des débits solides a été élaborée en utilisant la méthode des classes des débits pour en déduire la moyenne de la concentration et du débit correspondant à chaque classe et d'en faire une analyse de régression (courbe de transport solide).

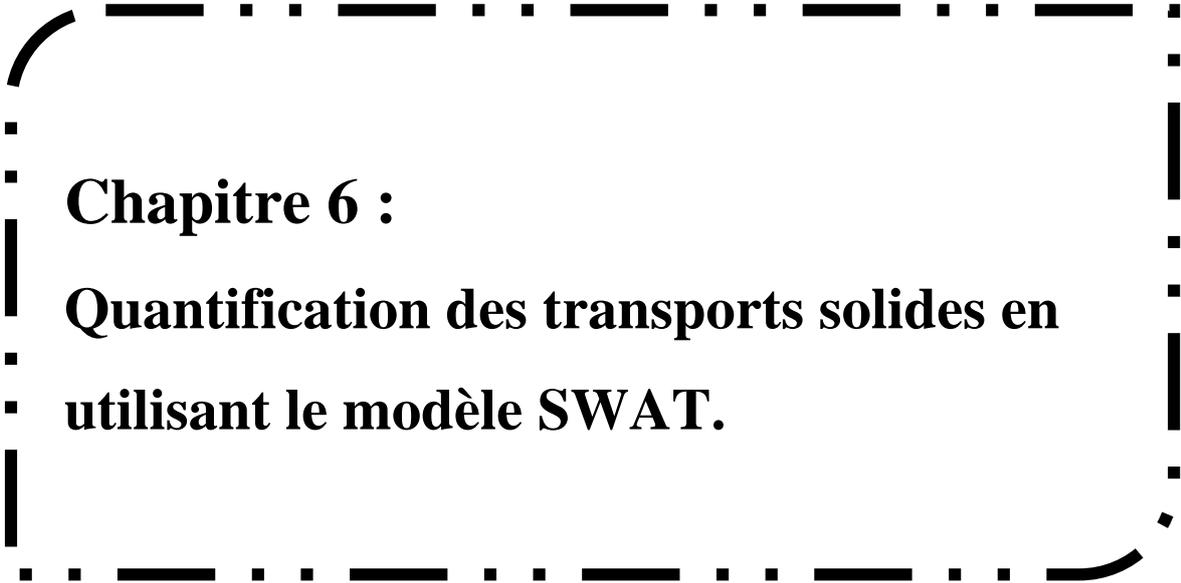
Dans la présente étude, on s'est efforcé d'utiliser la régression et les RNA pour prédire les débits solides à partir de l'écoulement et de cinq paramètres géomorphologiques du bassin versant. Les données recueillies au cours de la période de 24 ans ont été utilisées pour établir un SRC et ont également servi entrées aux RNA (MLP et LM). Les modèles RNA sont développés grâce à la combinaison de logiciels et de méthodes statistiques pour modéliser les réponses des bassins versants.

Les résultats ont montré que la structure optimale de RNA utilisée dans cette étude contient trois couches de construction en Perceptron avec un neurone dans la couche d'entrée, 11 neurones dans la couche cachée, et un neurone dans la couche de sortie de sorte que l'apprentissage pourrait s'exercer et d'avoir une erreur moyenne du réseau acceptable en utilisant l'erreur de la rétro-propagation après un certain nombre d'itérations.

L'utilisation de la structure RNA à trois couches avec le nombre de neurones dans la couche cachée par l'intermédiaire des algorithmes de multicouche de Perceptron et de LM a amélioré les résultats de simulation et la performance des modèles développés pour la prévision du débit solide a été trouvée très satisfaisante sur la base d'indices statistiques. Les travaux élaborés sur RNA ont montré que la performance du modèle LM est meilleure comparée au modèle classique SRC correspondant, où les valeurs de RMSE, R et *EF* pour le modèle à neuf neurones LM est de 0,048, 0,97 et 0,94 respectivement, avec une erreur d'estimation très faible comparée à celle du modèle conventionnel (SRC) qui est de +3,47%.

Étant donné que les critères de sélection pour une méthode appropriée dans l'estimation des sédiments en suspension ont donné un RMSE faible,  $R^2$  et *EF* élevés, on pourrait donc conclure que les RNA comparés à la SRC ont une plus grande exactitude et une erreur plus faible ; ils peuvent estimer par là les changements de la charge solide dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est mieux que la méthode SRC. Par conséquent, les résultats ont montré que le modèle RNA en utilisant des paramètres géomorphologiques de bassins versants pourrait être un outil utile pour l'estimation des paramètres hydrologiques, conçus pour aider le comportement hydro-système, comme le débit solide journalier pour une précision plus élevée.

Les débits liquides et les apports solides élevés dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est ont montré un approvisionnement en sédiments en suspension. L'augmentation la plus importante des débits liquides et des charges solides saisonniers a été détectée en hiver et au printemps avec une charge solide estimée à  $10,39 \times 10^6$  tonnes et  $4,58 \times 10^6$  tonnes respectivement. Cette constatation est une étape clé qui fournit des informations utiles sur la rétention des sédiments par les barrages de Mexa et de Barbara qui seraient liés à de grands effets de piégeage de sédiments depuis leur opération en 1999, entraînant une réduction évidente de leurs volumes totaux.



**Chapitre 6 :**

**Quantification des transports solides en  
utilisant le modèle SWAT.**

## Introduction

SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) est un outil d'évaluation du sol et de l'eau. C'est un modèle à l'échelle du bassin versant agro-hydrologique qui est développé par les services de recherche agricole du Département Américain de l'Agriculture; USDA (United States Department of Agriculture). C'est un modèle continu, basé sur la physique distribuée qui fonctionne sur un pas de temps quotidien (Arnold *et al.*, 1998). Il est conçu pour des bassins versants de quelques centaines à plusieurs milliers de km<sup>2</sup>. Le SWAT permet de simuler les principaux processus hydrologiques des bassins versants tels que la sédimentation, le transfert des nutriments, la croissance des cultures, de l'environnement et du changement climatique.

Le modèle est semi-distribué : certains paramètres sont spatialisés tandis que d'autres sont globaux. Il est utilisé pour analyser les impacts du climat, du sol, de la végétation et des activités agricoles sur les écoulements (Laurent et Ruelland, 2010). L'unité spatiale élémentaire est l'Hydrologic Response Unit (HRU) qui représente une combinaison spatiale de sol, de couvert végétal et de sous-bassin versant. Toute combinaison identique de ces trois éléments est supposée produire une réponse hydrologique similaire.

Le modèle est surtout utilisé en Amérique du Nord et en Europe dans la production de flux diffus de sédiments, de nutriments et de pesticides (Beaudin, 2006). En Indiana par exemple il a été utilisé pour modéliser les déplacements de pesticides dans un bassin de 250 km<sup>2</sup>. Il est utilisé en Allemagne sur le bassin de Dietzhöle et en France par le Cemagref pour évaluer les risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole dans deux bassins versants des pays de la Loire (INRA, 2004). Il a été également essayé en Afrique de l'Ouest dans la modélisation de la dégradation du sol, surtout en faisant des scénarios sur l'influence de changement de climat et de l'occupation du sol (2000-2025).

Dans ce chapitre, nous évaluons la capacité du modèle SWAT à contribuer à la compréhension des flux sédimentaire dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est. Il constitue donc un espace d'analyse intéressant pour mieux comprendre les effets de la variabilité spatio-temporelle des pluies ainsi que des caractéristiques propres du bassin versant sur les écoulements.

## 1. Données nécessaires pour le modèle SWAT

Les modèle nécessite une banque de donnés telles que la morphologie, hydrographie, climatologie et la pédologie. Chaque bassin versant est divisé en sous-bassins versants eux même divisés en HRU (Hydrologic Reponse Unit). Les données spatiales d'entrée du modèle sont :

- MNT.
- Données météorologiques.
- Données géographiques.

### 1.1. Le DEM (model numérique du terrain)

Le MNT de l'Oued Kébir Est a été réalisé à l'aide du logiciel Arcgis, sous une échelle de 30 mètre de résolution (Figure 79).

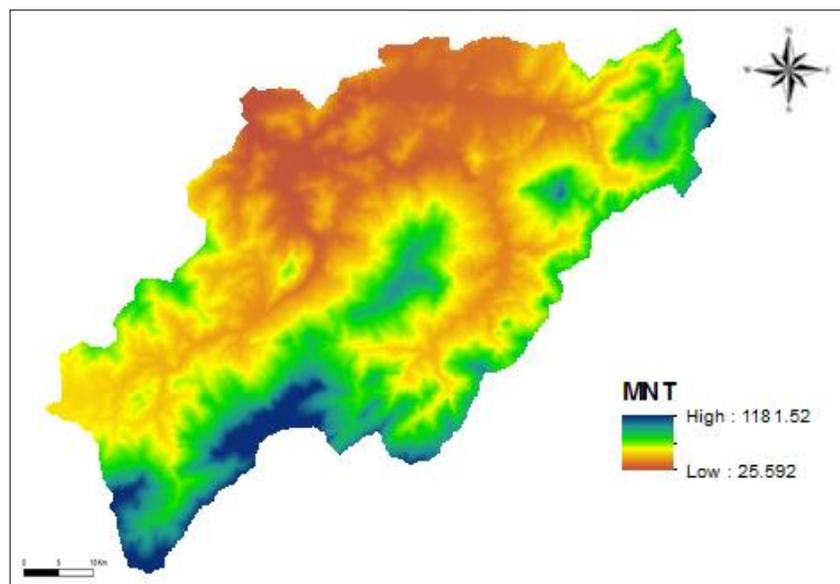


Figure 79. Modèle numérique de terrain.

### 1.2. Données météorologiques

Cinq types d'inputs de paramètres météorologiques ont été utilisées dans la conception du modèle et qui sont les suivants: précipitations journalières, températures (min, max, moyenne journalières), humidité relative, vitesse du vent et la radiation solaire. Les données météorologiques utilisées par SWAT ont des structures spécifiques. Ces données après les

avoir collectées ont été transformées en fichier d BASE dont la représentation des formats, pour ces différents types d'inputs (données météorologiques), se trouve dans les tableaux ci-dessous (Tableaux 27, 28, 29, 30).

**Tableau 27.** Format des données d'entrée pour les précipitations.

Nom	Format	Définition
DATE	(mm/dd/yyyy)	Date où la mesure a été prise
Précipitation	Point flottant (f5.1)	Précipitation journalière

**Tableau 28.** Format des données d'entrée pour les températures (3 champs).

Nom	Format	Définition
DATE	(mm/dd/yyyy)	Date où la mesure a été prise
MAX	Point flottant (f5.1)	Température maximale journalière (°C)
MIN	Point flottant (f5.1)	Température minimale journalière (°C)

**Tableau 29.** Format des données d'entrée pour la radiation solaire (2 champs).

Nom	Format	Définition
DATE	(mm/dd/yyyy)	Date où la mesure a été prise
SLR	Point flottant (f5.3)	Radiation solaire journalier

Il est à remarquer que ce même format est utilisé pour la vitesse du vent (m/s) et l'humidité relative (%).

**Tableau 30.** Table de localisation spatiale de la station des précipitations.

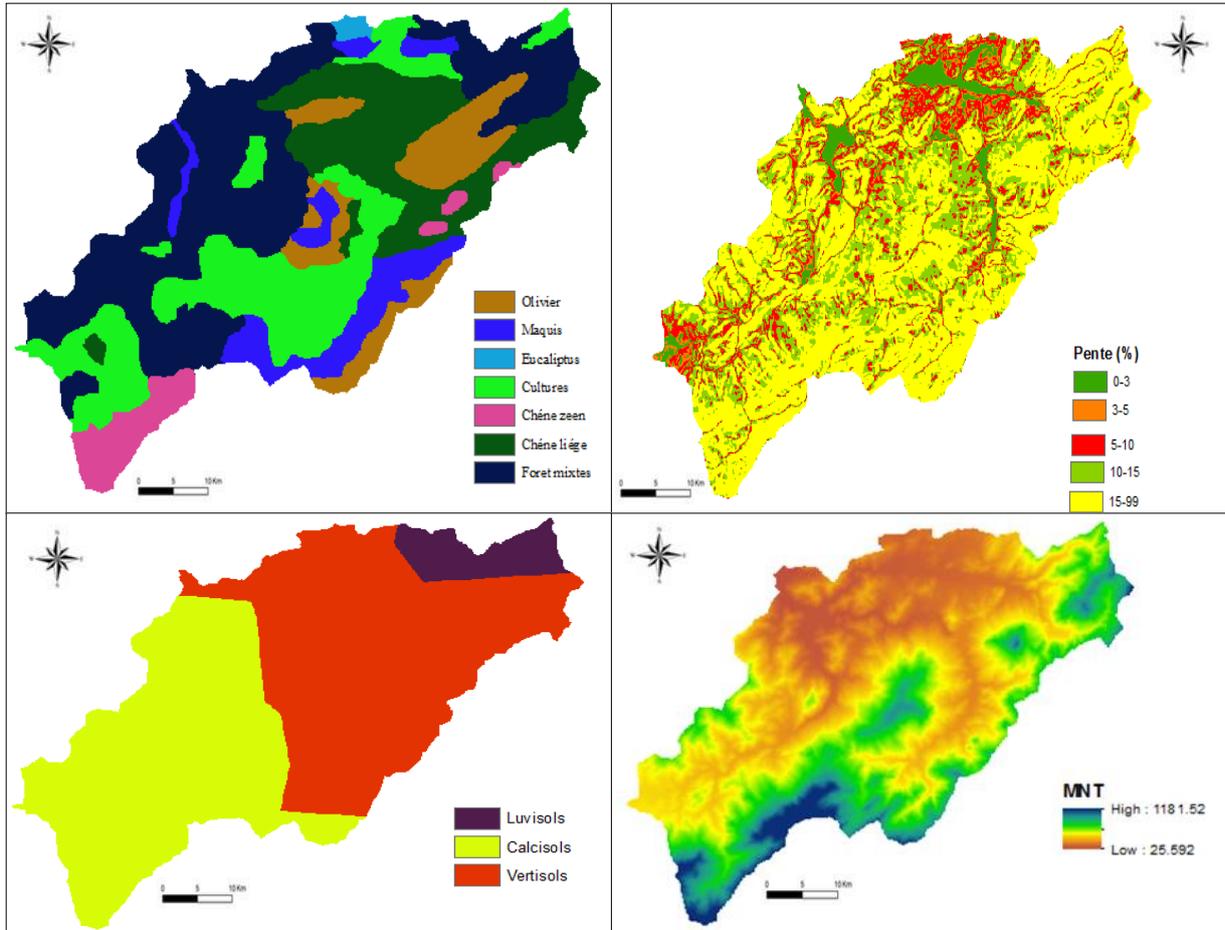
Nom	Format	Définition
ID	Nombre entier	identification number
Name	String max 8 chars	Nom de la station
LAT	Point flottant	Latitude en degré décimal
LONG	Point flottant	Longitude en degré décimal
ELEVATION	Nombre entier	Elévation des stations correspond aux données des précipitations (m)

L'utilisation du tableau 30 reste la même pour la localisation de la station des températures de l'air. Cependant, pour les tables de localisation des stations des données du

vent, de la radiation solaire et de l'humidité relative, il faut tout simplement enlever l'élévation (Yvio, 2008).

### 1.3. Données cartographiques

La pente, l'occupation du sol, la pédologie sont recalifiées suivant la nomenclature de SWAT 2009.



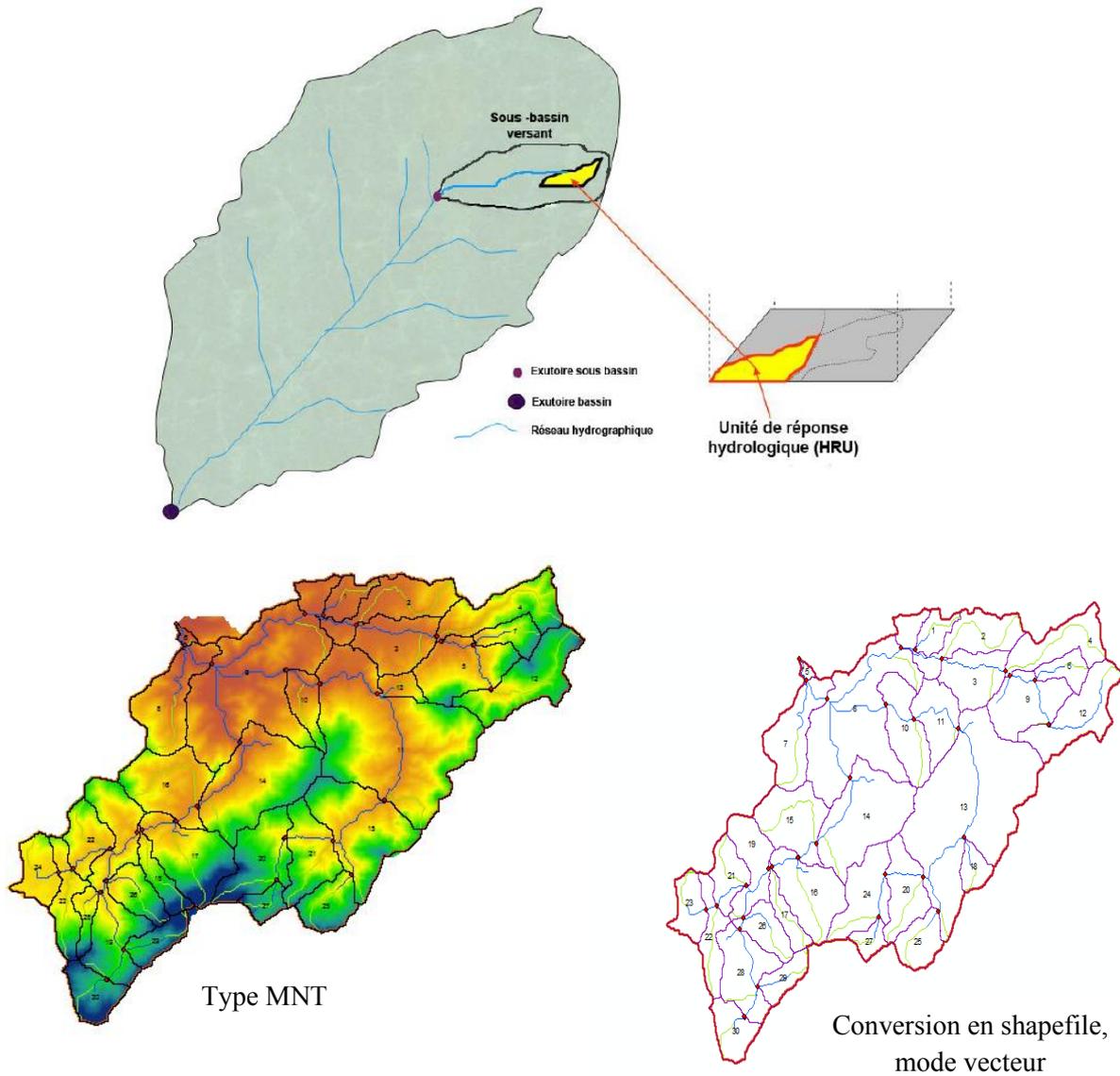
**Figure 80.** Cartes des pentes, occupation du sol, Altitude, pédologie recalifiées suivant la nomenclature de SWAT 2009.

## 2. Processus modélisés

### 2.1. Subdivision en sous-bassins

La première unité de discrétisation spatiale est le sous-bassin versant, obtenu par le découpage du bassin à partir du modèle numérique de terrain (MNT) et du positionnement des exutoires de chaque sous-bassin. En réglant l'aire de drainage minimum à la formation d'un cours d'eau à partir du MNT, on définit la précision du réseau hydrographique que l'on

souhaite modéliser. Le découpage en sous-bassins est dépendant du réseau hydrographique puisqu'à chaque confluence sont placés deux exutoires et à chaque exutoire correspond un sous-bassin versant (Figure 81). Les sous-bassins sont bien des bassins au sens hydrologique et ont un seul exutoire. Cette étape permet de définir la résolution globale de la mise en œuvre du modèle.



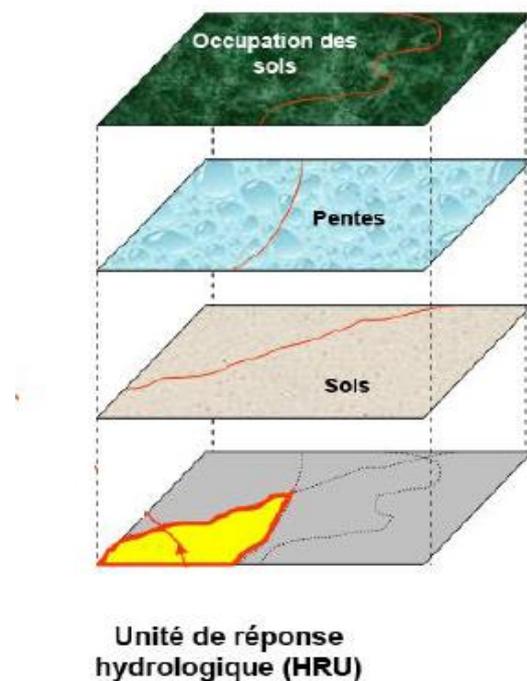
**Figure 81.** Délimitation et subdivision du bassin versant de l'Oued Kébir Est en sous-bassins versants.

Ainsi, le logiciel SWAT peut analyser le bassin versant dans toute sa globalité ou en le subdivisant en sous-bassins versants contenant des portions homogènes appelées Unités de Réponse Hydrologiques (HRU).

## 2.2. Unité de réponse hydrologique

La seconde spatialisaiton des données est réalisée au sein des sous-bassins par la création d'unités de réponse hydrologique (HRU). Ces dernières sont des zones homogènes en termes de caractéristiques physiques du milieu telles que la pente, la pédologie et l'occupation du sol (Figure 82). Elles sont obtenues par superposition de chacune de ces données puis par regroupement des zones ayant des caractéristiques similaires.

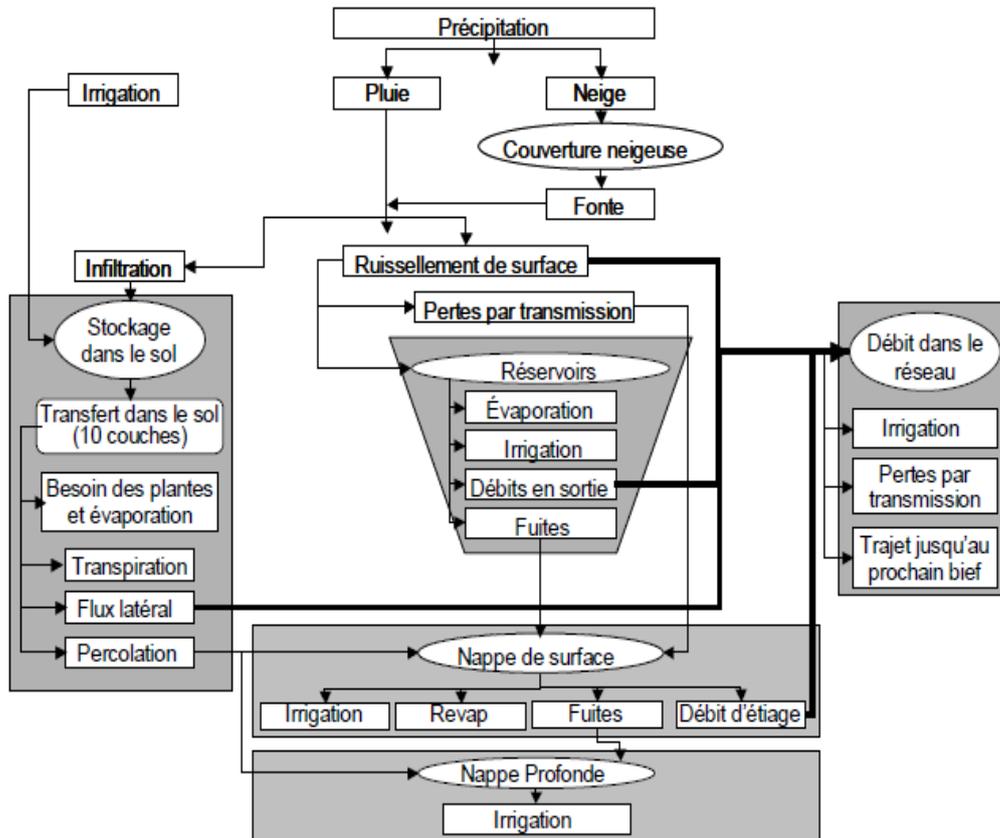
La construction du modèle SWAT repose sur la notion de HRU, c'est-à-dire une zone géographique ayant un même sol, une même occupation, et une même classe des pentes.



**Figure 82.** Principe de délimitation des Unités des Réponse Hydrologique (URH) (Grusson, 2016).

### 3. Module hydrologique

Le module hydrologique de SWAT est illustré à la figure 83. La réponse hydrologique simulée au cours de la modélisation est basée sur l'équation du bilan hydrique terrestre ci-dessous :



**Figure 83.** Composante hydrologique de modèle SWAT (Eckhardt et Arnold, 2001).

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - Qr_i)$$

Où :  $SW_t$  est le contenu final en eau disponible pour les plantes dans le sol (mm) ;

$SW$  est le contenu en eau disponible pour les plantes (mm) ;

$R_i$  est la pluviométrie (mm) ;

$Q_i$  est le ruissellement (mm) ;

$ET_i$  est l'évapotranspiration (mm) ;

$P_i$  est la percolation (mm) ;

$Qr_i$  est l'écoulement restitué du sol ou de l'aquifère peu profond (mm) ;

$t$  est la durée en jours.

Les résultats obtenus visent à estimer la charge solide transportée par les cours d'eau.

#### 4. Configuration du modèle

Pour la création du projet, le modèle SWAT a été utilisé de manière couplée à un Système d'Information Géographique (SIG). ARCSWAT est le module permettant l'interaction entre le modèle Open Source et le logiciel de SIG. Il a été utilisé dans sa version la plus récente ARCSWAT 2012 (SWAT 2012). La modélisation hydrologique du bassin versant a été réalisée en utilisant l'interface du logiciel ARCSWAT 2012. Le modèle a divisé le bassin versant en 30 sous-bassins et par la suite 1526 HRUs (les unités de réponse hydrologiques). Elles sont générées par la combinaison de l'utilisation des couvertures végétales, des types de sols et de la pente.

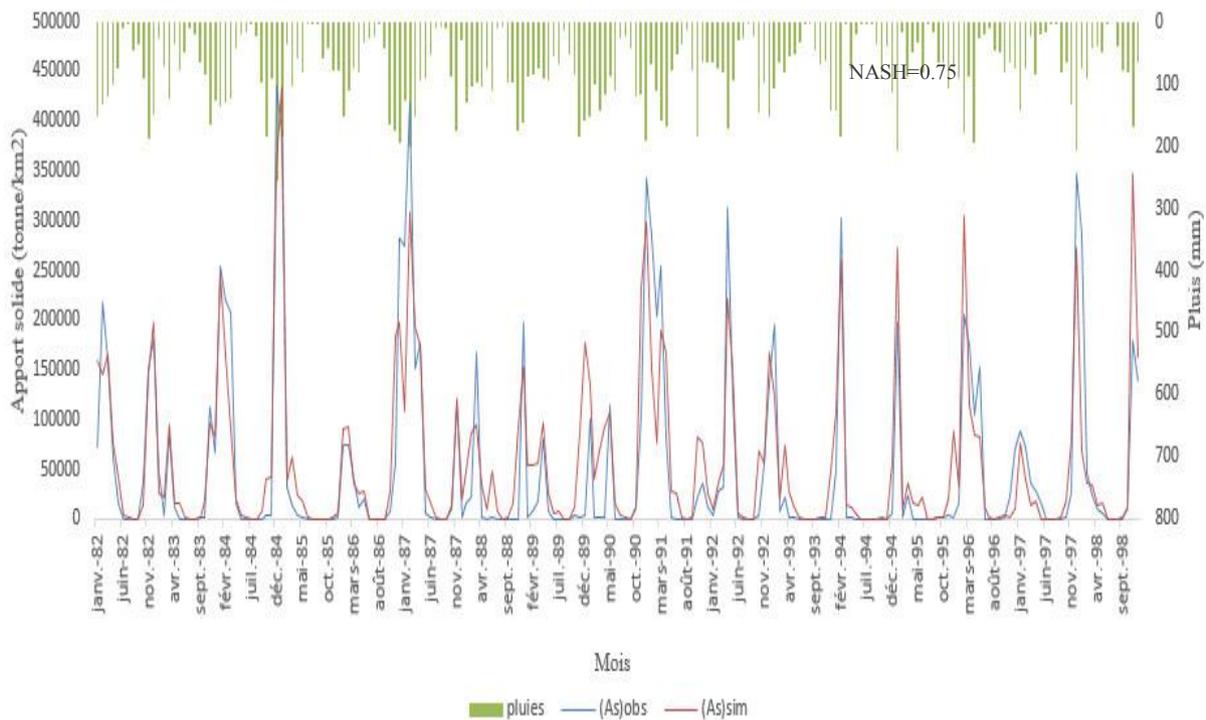
Les données étant intégrées au modèle donc prêt pour la simulation. Plusieurs options s'offrent alors à l'utilisateur. La première étape consiste à définir la période de temps sur laquelle la simulation va être effectuée en relation avec les mesures de transport solide mensuelle dans le bassin de Kébir Est de 1979 à 1998 au niveau de l'exutoire du bassin, et ce pour pouvoir établir la validation du modèle simulé. Ensuite, l'utilisateur peut choisir le pas de temps de sortie des données (journalier, hebdomadaire ou mensuel). Il a été choisi dans un premier temps un pas mensuel.

Des fichiers de sorties sont générés à chaque nouvelle simulation de SWAT. Le fichier résumant les processus sur le bassin "output.std" permet de voir à chaque pas de temps les valeurs de précipitation, du ruissellement, de l'infiltration, de l'évaporation et l'évapotranspiration, de la recharge de l'aquifère. Un autre fichier "output.sbs" présente les mêmes paramètres précédemment cités mais en les détaillant au niveau des HRU. Un troisième détail concerne le "output.bsb", les valeurs des processus à l'échelle du sous-bassin versant. Enfin, le dernier "output.rch" montre les valeurs des paramètres concernant l'eau dans le cours d'eau. Ces fichiers sortent sous forme de fichiers texte délimités et sous forme de base de données « Access ».

#### 4.1. Simulation et calage du modèle

La première simulation se fait avec les valeurs par défaut pour l'ensemble des paramètres non connus; autrement dit, les données qui ont été entrées dans le modèle (outre les données de climat et les cartes nécessaires à la création des HRUs).

Un nombre important de simulations ainsi que d'essai de calibration ont été réalisées afin de corréliser au mieux l'apport solide simulés et observés. La figure 84 présente la variation mensuelle des apports solides observés et simulés au niveau du bassin.



**Figure 84.** Apports solides observés et simulés dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est, période août 1999 à juillet 2014.

Les simulations présentent un taux d'apport solide plus élevé en période humide qu'en période sèche. Il est important de préciser que cette comparaison de l'apport solide observé et simulé a été effectuée à l'exutoire du bassin pour la période de (janvier 1979 à juillet 1999).

Une amélioration de la simulation est observée durant la phase de calibration. Pour permettre une meilleure concordance entre les valeurs simulées et observées, il est nécessaire d'adapter certains paramètres du modèle. Cette phase s'appelle la calibration. Le calage du modèle est effectué sur 5 paramètres elle a porté sur les paramètres de sol et de la pente qui ont une incidence essentielle sur les simulations (Tableau 30).

**Tableau 31.** Valeurs des paramètres calés dans SWAT (SWAT calibration technique).

	Paramètres	Description des paramètres valeurs (min-max)	Paramètre calibré
1	SPCON	Paramètre linéaire d'acheminement des sédiments 0,0001 – 0,01	0,001
2	SPEXP	Paramètre de ré-entraînement exponentiel 1 – 1,5	1
3	USLE_K	USLE facteur d'érodabilité du sol 0 – 0,65	0,35
4	USLE_P	Facteur de pratique 0 – 1	0,5
10	SLSUBBSN	Longueur moyenne des pentes 10 – 150	90

Visuellement les apports solides simulé et observé ont une allure générale assez proche au pas de temps mensuelle. Après simulation, le calcul des apports solides a montré que la quantité de la charge solide annuelle observée et très proche de celle simulée par le modèle SWAT (Figure 84). Le calage du modèle a donné un coefficient de Nash-Sutcliffe (model efficiency coefficient) de 0,75, indiquant une bonne calibration du modèle. Par ailleurs, avec un apport solide annuel observé de  $12,20 \times 10^6$  tonnes et celui simulé de  $13,20 \times 10^6$  tonnes, on constate que l'erreur d'estimation est de +8,19% ; on a donc une surestimation très faible.

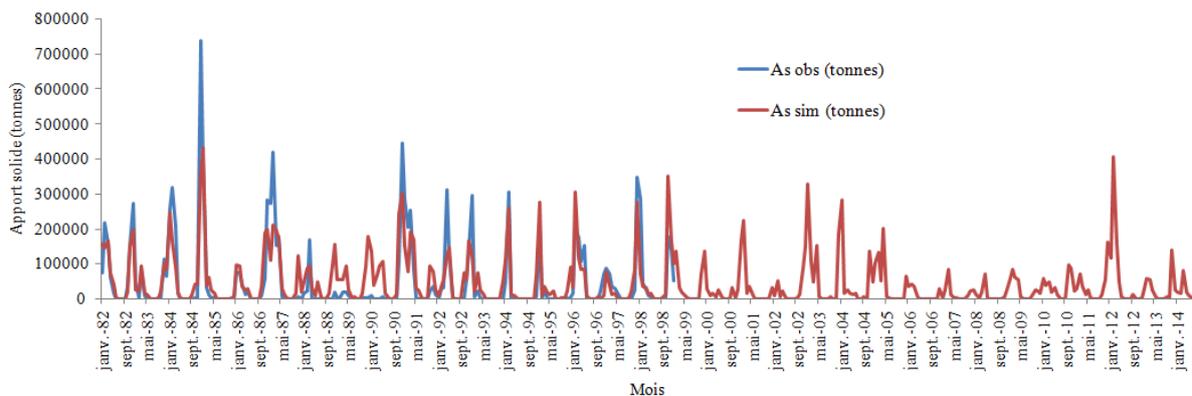
Le bassin versant de Kébir Est montre une variation entre 0 à 433100 tonnes/km<sup>2</sup> (Figure 84). Les simulations présentent un taux d'apport solide plus élevé en période humide qu'en période sèche et les plus grandes quantités enregistrées sont observées en janvier 1985 avec 433100 tonnes, novembre 1998 avec 346300 tonnes, février 1987 avec 308500 tonnes, décembre 1990 (299100 tonnes), février 1996 (304000 tonnes).

Entre autres, la dégradation spécifique annuelle observée durant toute la période est de 920,62 T/km<sup>2</sup>/an avec une dégradation spécifique annuelle simulée de 996,01 T/km<sup>2</sup>/an. Les bons résultats de la simulation du transport solide montrent que le modèle SWAT peut être utilisé pour une projection future, sauf que notre bassin versant comporte trois barrages qui peuvent entraver la prédiction. Néanmoins, le modèle de SWAT accepté pour la simulation et la projection future de l'estimation du transport solide de la période d'août 1999 à juillet 2014 a donné une charge solide en suspension de  $6,04 \times 10^6$  tonnes, soit une dégradation spécifique de 608,08 T/km<sup>2</sup>/an.

En comparant, les résultats des deux modèles, ceux de la méthode de régression multiple (RM) et du modèle SWAT, on constate qu'il y a une assez grande différence dans la valeur de la dégradation spécifique dont on distingue une valeur de 1047 T/km<sup>2</sup>/an (RM) contre uniquement 608,08 T/km<sup>2</sup>/an ; Il y a un écart de 917 T/km<sup>2</sup>/an. S'agit-il du modèle statistique qui surestime la valeur de l'apport solide en suspension ou du modèle SWAT qui manque de

paramètres physiques de validation pour obtenir un meilleur calage et un meilleur coefficient de Nash ?

Ceci démontre que pour avoir une meilleure validation, on a besoin de données bathymétriques des trois barrages de la zone d'étude. Néanmoins, cette estimation via la modélisation est une première tentative qui demande dans l'avenir l'acquisition d'autres données sur l'envasement des barrages et l'introduction d'autres paramètres physiques pour pouvoir mener à bien l'estimation de la perte en sol dans le bassin.



**Figure 85.** Apports solides observés et simulés dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est, période août 1999 à juillet 2014.

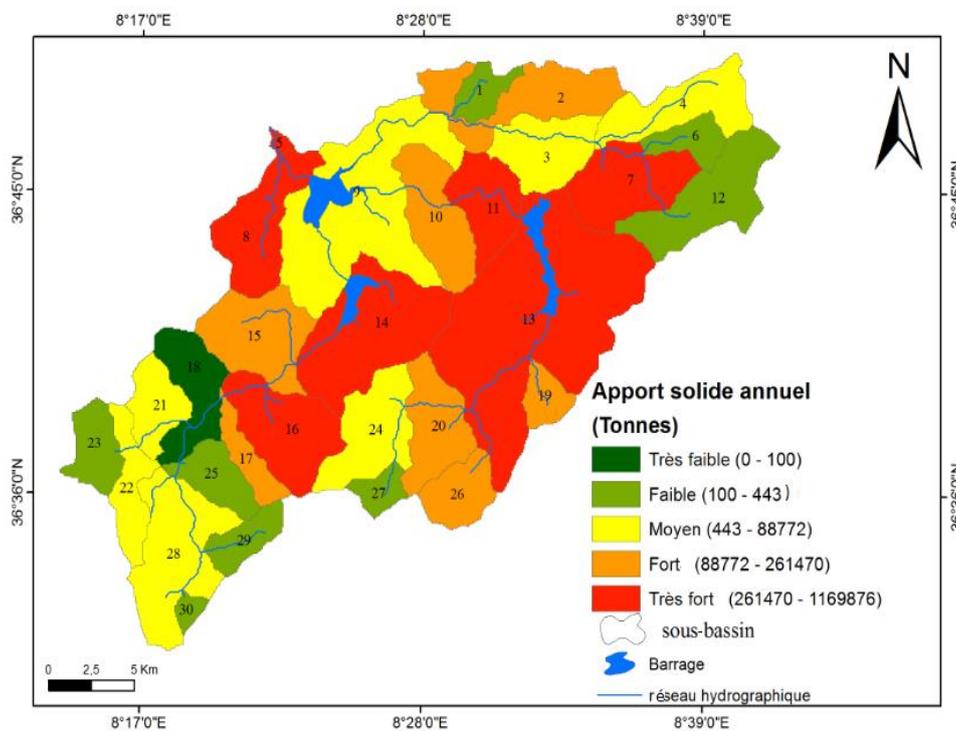
Les résultats obtenus de la simulation mensuelle de 1979 à 1999 montre qu'il est possible d'identifier les zones d'érosion importantes du bassin versant de Kébir Est. En se basant sur le taux de l'apport solide annuel dans chaque sous-bassin, nous constatons que parmi les 30 sous-bassins, il y a les bassins : 16, 14, 13, 11, 8 et 5 qui sont identifiés comme des zones les plus touchées par l'érosion hydrique (classes forte et très forte). Ils occupent 50% de la superficie du bassin, soit 330 km<sup>2</sup> (Figure 86). Ils s'étalent du Sud-Est et Nord-Est. Ces milieux sont représentés par des pentes fortes à très fortes, généralement > 25%. On trouve aussi une série sablo-argileuse avec des sols cultivés, forêt mixte dégradée; maquis sans sous bois ; ce qui favorise la dynamique érosive.

Les zones d'apport solide moyen sont bien développée dans la partie Nord-est et Sud-Est du versant (bassins 9, 4, 3, 28, 24, 22, 21). Ces sous-bassins se caractérisent par une prédominance des argiles et des calcaires marneux supportant en majorité des forêts de chêne liège, chêne zen et de l'oléo-lentisque. Les pentes de ces milieux varient entre 5 à 10 %. La surface occupée par cette classe est égale à 15% (90 km<sup>2</sup>).

L'apport solide faible concerne les sous-bassins 30, 29, 25, 21, 12, 6. Ils sont situés principalement dans la partie nord du bassin. Ces milieux sont développés sur des pentes douces < 5%. Ces milieux concernent surtout les sous-bassins situés au Nord-Est et Sud-Ouest avec une surface de 35% (245 km<sup>2</sup>).

#### 4.2. Variation saisonnière des apports solides

La variation saisonnière dans le bassin versant montre un apport solide important touchant 50% de la surface du bassin pendant les saisons d'hiver et d'automne. On rencontre les mêmes sous-bassins 7, 8, 11, 13 qui présentent les apports solides les plus élevés ; cela dépend essentiellement des caractéristiques climatiques (exemple pluies) (Figures 87 et 88). La saison du printemps se distingue par une baisse d'apport solide où les sous-bassins 13, 11, 10 qui avaient une production élevée en sédiments en hiver et en automne, ont reçu moins d'apports solides en printemps ; donc un changement de la classe très fort à fort (Figure 89). L'apport solide en été n'est pas significatif mais il présente une répartition spatiale en grande partie analogue à la saison printanière (Figure 90).



**Figure 86.** Répartition spatiale des transports solides en suspension annuels selon les sous-bassins.

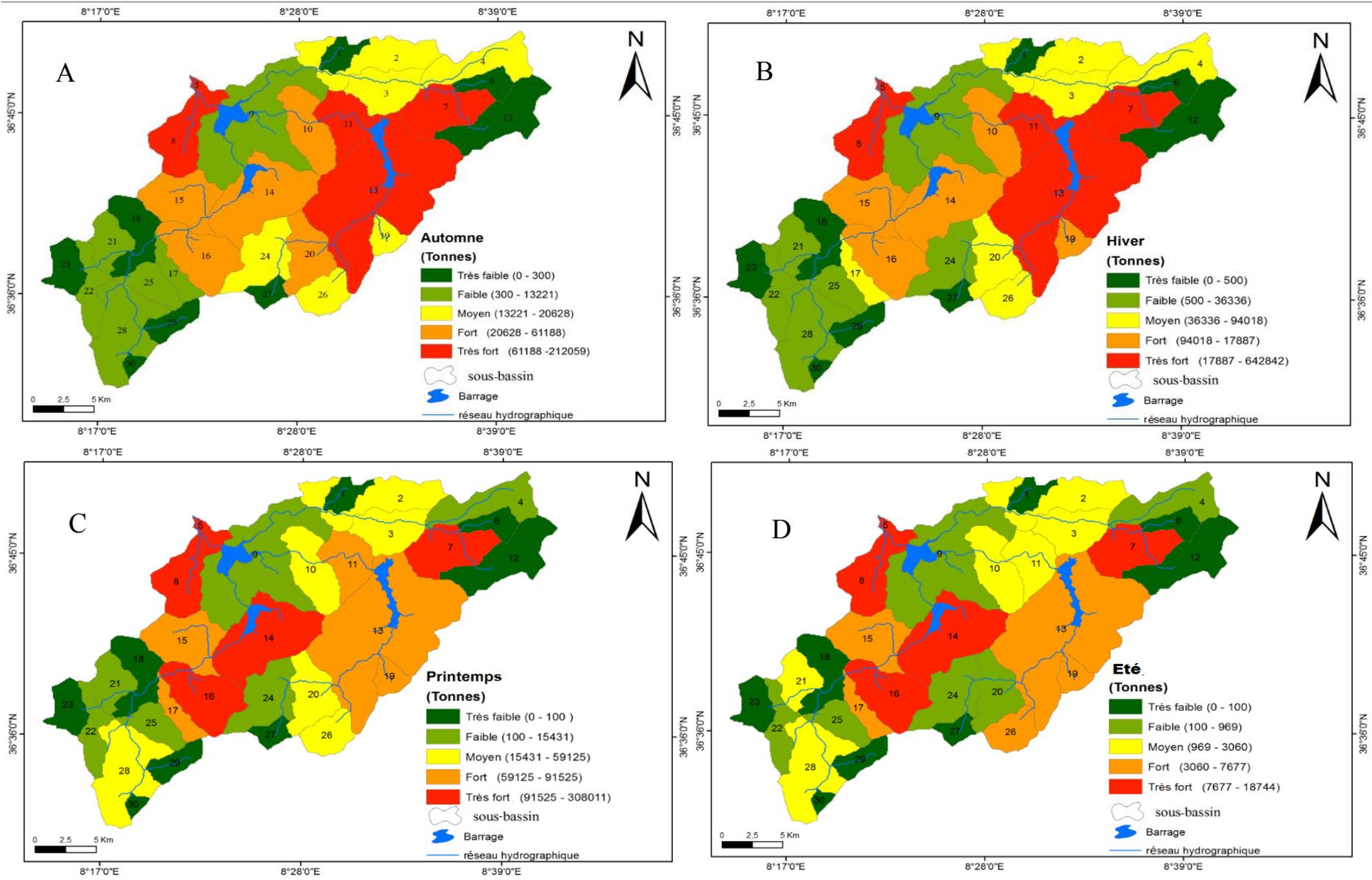


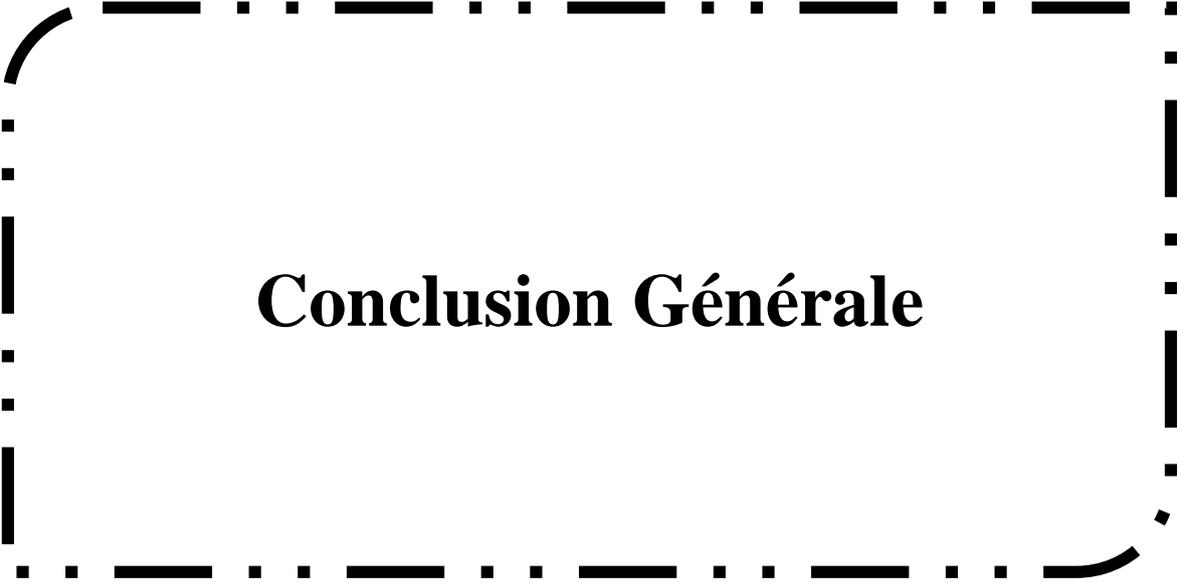
Figure 87. Répartition spatiale saisonnière des transports solides en suspension des sous-bassins selon : A: Automne, B: Hiver, C: Printemps, D: Été.

## Conclusion

L'application du modèle SWAT dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est révèle une répartition variable de production des sédiments au niveau des sous-bassins et en se basant sur la méthode de calage spécifique. Les résultats présentent une bonne robustesse qui a reproduit à un degré acceptable des apports solides sur une longue période (de 1979-1999 et de 1999-2014).

Le transport de matière en suspension varie fortement en fonction des facteurs hydro-climatique, topographique, topographie, occupation du sol, etc..... Les pertes en sol estimées à l'exutoire à partir du modèle sont égales à 996,01 T/km<sup>2</sup>/an pour la période 1979-1999 et à 608,08 T/km<sup>2</sup>/an. La classe des taux faibles à très faible (moins de 500 tonnes) constitue moins de 40 % de la superficie du bassin, sachant que ces surfaces sont localisées principalement dans la partie avale du bassin où dominent les faibles reliefs et les plaines. Ce sont les terrains en relief qui produisent les plus grandes quantités de sédiments (plus de 90000 tonnes). Ce qui met en évidence le risque que présentent ces pertes en sol dans l'envasement des deux barrages de Bougous et Mexa.

Les résultats obtenus dans cette étude ne présentent que des valeurs relatives pouvant aider dans la planification des activités de conservation des sols et une réduction de l'envasement des barrages.



## **Conclusion Générale**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'estimation des flux de la matière particulaire en suspension et dissoute à soulever notre grand intérêt car ils présentent un inconvénient à la conservation du milieu écologique par la dégradation de la qualité de l'eau, pertes en sol et l'envasement des barrages. Peu de chercheurs ont effectué des travaux sur le transport de matière en suspension et la qualité de l'eau dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est.

L'étude des paramètres physio-géographiques du bassin sont marquées par une grande hétérogénéité où les pentes assez fortes à fortes sont considérablement réparties, une couverture végétale forestière assez importante souvent avec un sous-bois clairsemé qui favorise le ruissellement. A l'issue de l'analyse lithologique, nous marquons des affleurements rocheux vulnérables qui sont aptes à fournir une érosion hydrique importante.

D'un point de vue climatique, il est à noter que la précipitation moyenne annuelle au niveau du bassin de l'Oued Kébir Est est évaluée à 801,71 mm, sous un climat caractérisé par d'importantes irrégularités interannuelles. Les caractéristiques climatiques du bassin versant indiquent qu'il appartient au climat méditerranéen subhumide de l'Afrique du Nord.

L'interprétation statistique des données des débits d'une série de 20 années d'observation (période allant de 1979/1980-1998/1999) ont montré que le bassin versant de l'Oued El Kébir Est possède un débit moyen annuel de 13,10 m<sup>3</sup>/s. Ce débit correspond à une lame d'eau moyenne annuelle estimée à 291,28 mm. Le bassin versant de Kébir Est est drainé principalement par deux oueds importants, l'Oued Bougous et l'Oued Ballauta, qui sont les principales sources d'eau de la zone d'étude. Les barrages actuellement en exploitation, qui sont Mexa, Bougous et Barbara, subissent d'énormes envasements de leurs cuvettes. Une campagne bathymétrique devient nécessaire pour évaluer les volumes de sédiments retenus. Il est à noter que les facteurs physico-géographiques spécifiques du bassin influencent énormément le comportement hydrologique du milieu physique.

L'étude de la qualité chimique des eaux de surface de l'oued Kébir Est nous a permis d'apprécier leur qualité chimique, qui constitue un volet essentiel pour notre étude. La qualité des eaux de surface de l'Oued Kébir Est dépend essentiellement des facteurs externes sachant qu'il n'existe pas une station d'épuration dans cette région, principalement les déversements des eaux urbaines, il y a aussi l'utilisation intensive des engrais chimique dans l'activité

agricole. La comparaison des teneurs des principaux éléments mesurés dans les eaux superficielles du bassin versant au niveau des sites d'échantillonnage et du barrage indiquent une eutrophisation d'origine agricole.

L'application de la méthode stochastique (RNA) pour prédire le transport des sédiments et du ruissellement se sont développés grâce à la combinaison de techniques de calcul (logiciel) et d'association mathématique des paramètres géomorphologiques relatifs à la production des transports solides en suspension, qui ont été normalisés pour modéliser les réponses du bassin versant vis-à-vis de la perte en sol. Les résultats ont montré que la structure optimale de RNA utilisée dans cette étude contient trois couches avec un neurone dans la couche d'entrée, 11 neurones dans la couche cachée, et un neurone dans la couche de sortie de sorte qu'il pourrait passer l'information et d'établir une erreur moyenne acceptable en suivant la phase d'apprentissage par le biais de l'erreur de propagation après un certain nombre d'itérations.

L'utilisation de la structure de RNA avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) a donné de bons résultats de simulation et une meilleure performance du modèle développé pour la prévision du débit solide à la base des indices statistiques utilisés. Les débits liquides et les apports solides élevés dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est ont démontré l'influence des facteurs physiographiques dans la production de sédiments. L'augmentation la plus significative du débit liquide saisonnier et de l'apport solide a été décelée en hiver et au printemps avec une charge solide estimée à  $10,39 \times 10^6$  tonnes et à  $4,58 \times 10^6$  tonnes respectivement. Cette constatation est une étape clé fournissant des informations utiles sur la rétention des sédiments par les réservoirs de Mexa et Barbara qui seraient liés à de grands effets de piégeage en sédiments depuis leur opération en 1999, menant à une réduction évidente de leurs volumes initiaux.

L'utilisation du modèle SWAT dans la cartographie a permis de cartographier la variation spatio-temporelle des taux d'apports solides transportés au niveau du bassin et sous-bassins pour la période de 35 ans. Les simulations présentent un taux d'apport solide plus élevé en période humide qu'en période sèche, avec une dégradation spécifique annuelle simulée annuelle de  $996,01 \text{ T/km}^2/\text{an}$  (1979-1999). Pour la simulation et la projection future de l'estimation du transport solide de la période d'août 1999 à juillet 2014, ceci a donné une dégradation spécifique de  $608,08 \text{ T/km}^2/\text{an}$ ; un taux qui reste fortement lié à d'autres paramètres physiques qu'il faut introduire et/ou manipuler pour se rapprocher de la réalité.

## RECOMMANDATIONS

La mise en place d'un plan de protection contre la dégradation du milieu naturel vis-à-vis de la qualité de l'eau et l'érosion auquel s'oppose le bassin versant de l'Oued Kébir Est présente une nécessité fondamentale. Entre autre, des solutions doivent être apportées dans le but de réduire l'envasement des deux barrages de la zone d'étude, et ce pour contribuer au renforcement de la capacité d'emmagasinement des apports liquides et au prolongement de leurs durées de vie.

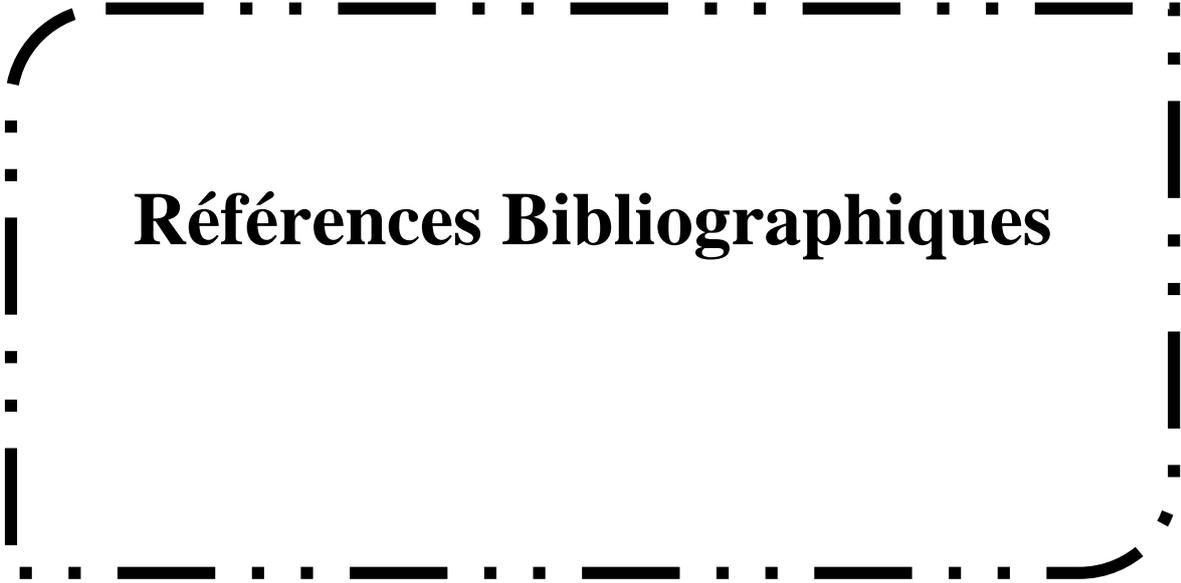
En fonction de la répartition de l'ampleur de l'érosion hydrique, des suggestions à moyen et court termes sont proposées pour lutter contre la dégradation du sol du bassin.

- Les zones qui présentent un apport solide fort à très fort avec des pentes qui dépassent les 25% doivent faire l'objet de traitement en correction torrentielles au niveau des ravins qui arrachent les sédiments des berges par l'installation de cordons en pierre ou gabions et la plantation d'arbres arboricoles afin de diminuer le transport excessive des sédiments.

- La mise en défens et la création de parcours collectifs au niveau des ravins où l'apport solide est moyen. En outre, il est impératif de labourer les terres en courbes de niveau et d'appliquer les pratiques de bicultures au lieu des monocultures. Le reboisement est également primordial dans ces zones comme celles de forte érosion.

- Les zones qui présentent un apport solide faible à très faible présente moins de risque et donc demandent des aménagements moins intenses.

Aussi, pour de raisons de contrôle de l'évolution future des transports solides nous proposons de densifier le réseau de mesure des pluies et des transports solides en amont des barrages de Bougous et Mexa afin de pouvoir suivre l'évolution de leur envasement, et de contrôler la qualité de l'eau avec l'installation d'une station d'épuration dans la région.



## **Références Bibliographiques**

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADAM J.W., 1980. Health aspects of nitrate in drinking-water and possible means of denitrification (literature review), *Water SA*, 6, p 79.

AFNOR ., 2005. Qualité de l'eau, Volumes 1 et 2.

Ahmed F., Srinivasa Rao K., 2015. Geomorphometric analysis for estimation of sediment production rate and run-off in Tuirini Watershed, Mizoram, India , *International Journal of Remote Sensing Applications*, Vol 5 : p67–77.

Amoros C., Petts GE., 1993. Hydrosystèmes fluviaux. Volume 24, collection d'écologie. Masson, Paris, 300p.

ANRH., 2009. Présentation de l'Agence Nationale des ressources hydrauliques. Secteur Alger.

Arnold J.G., R. Srinivasan R.S. Muttiah J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1: Model development. *J. Am. Water Resources Association* 34(1) : p 73-89.

Bachaoui B., Bachaoui M., El Harti A., Bannari A., El Ghmari A., 2007. Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique: exemple du Haut plateau Atlas Marocain. *Revue Télédétection* 7 : p 393- 404.

Bahroun S., Bousnoubra H., Drouiche N., Kherici N., 2016. Analysis of wastewater discharges to the Wadi Kebir East River by the environmental discharge objectives (EDO) method. *Desalination and Water Treatment*. Vol. 57. Iss. 52 : p 24750 - 24754.

Beaudin I., Deslandes J., Michaud A.R., Bonn F., Madramooto C.A., 2006. Variabilité spatio-temporelle des exportations de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets au sud-ouest du Québec. Partie I -Paramétrage, calibrage et validation du modèle SWAT. *Agrosolutions* 17(1): p 4-20.

Benkhadra H., 1997. Battance, ruissellement et érosion diffuse sur les sols limoneux cultivés- Déterminisme et transfert d'échelle de la parcelle au petit bassin versant. Thèse de Doctorat de l'université d'Orléans (France).

Baechler L., 2017. L'accès à l'eau : Enjeu majeur du développement durable. 1<sup>ère</sup> édition, Royale de Belgique, Bruxelles, 195 p.

Benkhaled A., Remini B., 2003. Variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'Oued Wahrane (Algérie). *Revue des sciences de l'eau*, 16(3) : p.333-356.

Bilgehan M., 2010. A comparative study for the concrete compressive strength estimation using neural network and neuro-fuzzy modeling approaches, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 26, No. 1 : p 35–55.

- Bilgehan M., Turgut P., 2010. Artificial neural network approach to predict compressive strength of concrete through ultrasonic pulse velocity, *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 21, No. 1 : p 1–17.
- Brahimi A., Chafi A., J. Mater J., 2014. Etude éco-toxicologique de l'Oued Za et de son affluent oued Tizeghrane (basse mouloya, Maroc oriental), *Environ. Sci 5* : p 1671-1682.
- Borges AL., Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud. Thèse de doctorat en Hydrologie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 205p.
- Bouanani A., 2004. Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous - bassins de la Tafna , Thèse de doctorat, Université Tlemcen, Algérie, p 250.
- Boukhrissa Z.A., Khanchoul K., Le Bissonnais Y., Tourki M., 2013 Prediction of sediment load by sediment rating curve and neural network (ANN) in El Kebir catchment, Algeria, *Journal of Earth System Science*, Vol. 122, No. 5, p 1303–1312.
- Boumaza M., Boukhrissa H., 2007. Estimation des transport solides en suspension dans le bassin versant de l'Oued Kebir Est ( Wilaya d'el Taref).mémoire d'ingénieur d'état en géologie. Université Badji Mokhtar Annaba, 72 p.
- Bourouba M., 2003. Etude comparative de la teneur de sédiment en suspension de deux oueds méditerranéens interamontagneux du Tell Oriental (Algérie).*Z Geomorphologia*, 47 :p. 51-81.
- Campbell F.B., Bauder H., 1940. A rating curve method for determining silt-discharge of streams, *EOS. Trans. Am. Geophys. Union* 21: p 603-607.
- Chebbani R., Djilli K., Roose E., 1999. Étude des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. Algérie. *Bulletin Réseau Erosion*, 19, p85-95.
- Chapman D., Kimstach V., 1996. Selection of water quality variables. *Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring*, , 2nd ed. E & FN Spon, London, p 59-126.
- Cheggour A., 2008. Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des S.I.G. : Application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc. Thèse Doctorat en Hydrologie, sciences du sol et environnement, 208 p.
- Chorley R.J., Schumm S.A., Sugden D.E., 1984. *Geomorphology*. Methuen, New York, USA.
- Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME), 1995. Protection de l'approvisionnement des communautés en eau potable (Révision décembre 1995), Préparé par le Sous-comité fédéral-provincial sur l'eau potable, 10 p.
- Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME), 2002. Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, mise à jour 2, novembre 2002, Winnipeg, le Conseil.

Dahmani A., 2012. Contribution à l'étude de l'érosion et du ruissellement des sols rouges dans les monts de Tlemcen : Utilisation de simulation de pluies. Mémoire de magistère en foresterie. Université Abou Baker Belkaid-Telemcen, 130p.

Demmak A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie Septentrionale. Thèse de doctorat .Ing. Paris, 323p.

Derwich E., Benaabidate L., Zian A., Sadki O., Belghity D., 2010. Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec Oued Fes. Larhyss Journal 8: p 101-112.

De Vente J., Verduyn R., Verstraeten G., Vanmaercke M., 2011. Factors controlling sediment yield at the catchment scale in NW Mediterranean geocosystems, Journal of Soils and Sediments, Vol. 11, No. 4: p 690–707.

Egboka B.C.E., 1984. Nitrate contamination of shallow groundwaters in Ontario, Canada. Sci.Total Environ., 35, p 53.

Elahcen O., 2013. Etude du transport solide par charriage et en suspension dans le bassin versant de l'Oued Bellah (tipaza).thèse de doctorat. Ecole nationale supérieur agronomique El-Harrach (Alger), 125p.

Etchanchu D., Bropst J.L., 1986. Erosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure de ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau. C.R. Académie des Sciences., Paris, 302, série II, 17: p 1063-1067.

Ferguson R I., 1986. River loads underestimated by rating curves. Water Resources Research, 22 (1): p 74 – 76.

Fiandino M., 2004, Apports de matières en suspension par les fleuves côtiers à l'Étang de Berre (Bouches-du-Rhône, France), Études de géographie physique, supplément au n° 31 « Travaux du Belvédère du Mont Lozère », p 325.

Foucault A., Raoult jf., 1995.Dictionnaire de géologie,4ème Edition,Paris, France, 324p.

Fox H.R., Moore H.M., Newell Price J.P., 1997. Soil Erosion and Reservoir Sedimentation in the High Atlas Mountains, southern Morocco, IAHS Publications, No. 245: p 233–240.

Ghachi A., 1982. Hydrologie et utilisation des ressources en eau de la seybouse. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Toulouse, 499 p.

Ghenim A., 2001. Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la tefna : cas d'oued Isser, Oued Mouilah et de la haute Tafna. Thèse de Magister en hydraulique, Université de Telemcen Algérie.

Gilroy E.J., Kirkby W.H., Cohn T.A., Glysson, G.D. 1990. Uncertainty in suspended sediment transport curves, discussion. Journal of Hydraulic Engineering, 116(1): p 143-145.

- Gomella C., Guerree H., 1978. Le traitement des eaux publiques, industrielles et privées. Edition Eyrolles. Paris, 262p.
- Govindaraju R.S., Rao A.R., 2000. Neural Networks in Hydrology, Kluwer Academic Publishers, in Netherlands.
- Grauso S., Fattoruso G., Crocetti C., Montanari A., 2008. Estimating the suspended sediment yield in a river network by means of geomorphic parameters and regression relationships', *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 12, No. 1, p 177–191.
- GRUSSON Y., 2016. Modélisation de l'évolution hydro-climatique des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue du bassin versant de la Garonne. Thèse de doctorat. Université de toulouse. Institut National Polytechnique de Toulouse, p 358.
- Gupta H., Chakrapani G.J., 2007. Temporal and spatial variations in water flow and sediment load in the Narmada River, *Current Science*, Vol. 92, No. 5, p 679–684.
- Helsel D.R., Hirsch R.M., 1992. *Statistical Methods in Water Resources*, Elsevier Publishers, New York. p529.
- Horowitz A.J., Elrick K.A., Smith J.J., 2001. Estimating suspended sediment and trace element fluxes in large river basins: methodological considerations as applied to the nasqan programme. *Hydrological Processes*, 15: p 1107-1132.
- Jansson M.B., 1985. Sediment rating curves of the Ljusnan at Funäsdalen. *Beitr. Hydrol. Sonderheft*, 5(1): p 219-233.
- Jansson M.B., 1997. Comparison of sediment rating curves developed on load and on Concentration. *Nordic Hydrology*, 28 (3): p 189 - 200.
- Khanchoul K., 2006. Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassin versants de l'extrême Nord -Est Algérien. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Badji Mokhtar Annaba, 274p.
- Khanchoul K., Jansson M.B., Lange Y., 2007. Comparison of suspended sediment yield in two catchments, northeast Algeria. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51(1): p 63–94.
- Khanchoul K., Jansson M.B., 2008. Sediment rating curves developed on stage and seasonal means in discharge classes for the Mellah wadi, Algeria. *Geografiska. Annaler*, 90 A (3): p 227-236.
- Khanchoul K., Altschul R., Assassi F., 2009. Estimating suspended sediment yield, sedimentation controls and impacts in the Mellah catchment of Northern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 2(3): p. 157–171.
- Khanchoul K., Boukhrissa Z.A., Acidi A. and Altschul, R. 2012. Estimation of suspended sediment transport in the Kebir drainage basin, Algeria. *Quaternary International*, 262: p 25-31.

- Kisi O., 2008. Constructing neural network sediment estimation models using a data-driven algorithm', *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 79, No. 1. p 94–103.
- Kisi O., Ozkan C., Akay B., 2012. Modeling discharge-sediment relationship using neural networks with artificial bee colony algorithm', *Journal of Hydrology*, Vol. p 94–103.
- Krishnaswany J., Richter D.D., Halpin P.N., Hofmockel M.S., 2001. Spatial patterns of suspended sediment yields in a humid tropical watershed in Costa Rica. *Hydrological Processes* 15: p 2237–2257.
- Kuo J.T., Hsieh M.H., Lung W.S., She N., 2007 'Using artificial neural network for reservoir eutrophication prediction', *Ecological Modelling*, Vol. 200, No 1, p 171–177.
- Lafdani E.K., Nia A.M., Ahmadi A., 2013. Daily suspended sediment load prediction using artificial neural networks and support vector machines, *Journal of Hydrology*, Vol. 478, p 50-62.
- Langbein WB., 1947. Topographic Characteristics of Drainage Basins. US Geological Survey, Water-Supply Paper, No. 956-C, 1947: p 125-157.
- LE BISSONNAIS, Y., RENAUX, B., DELOUCHE, H., 1995. Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena*, n° 25, p. 33-46.
- Leguédois S., 2003. Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodent. Thèse de doctorat en sciences Agronomiques. Université d'Orléans, 156p.
- Liu Q.J., Shi Z.H., Fang N.F., Zhu H.D., 2013. Modeling the daily suspended sediment concentration in a hyperconcentrated river on the Loess Plateau, China, using the Wavelet-ANN approach, *Geomorphology*, Vol. 186 : p 181–190.
- Madigou E., 2005. Influence du statut trophique de cours d'eau sur les fonctionnalités microbiennes des biofilms (Epipsammonet Epilithon). Thèse de l'université Claude-Bernard-Lyon 1, France, 235p.
- Makhoukh M., Sbaa M., Berrahou A., Clooster VM., 2011. Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc Oriental), *Larhyss Journal* 9 : p 149-169.
- Mallows C.P., 1973. Some comments on C(p). *Technometrics* 15, p 661- 675.
- Mc Bean E.A., Al-Nasri S., 1988. Uncertainty in suspended sediment transport curves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(1): p 63-74.
- Marre A., 1992. le tell oriental algérien : de Collo à la frontière tunisienne. Etude géomorphologique. Office des publications universitaires, Alger. 62 p.

- McBean E.A., Al-Nassri S., 1988. Uncertainty in suspended sediment transport curves. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 1 : p 63–74.
- Meddi M., 1999. Etude du transport solide dans le bassin versant de l'oued Ebda (Algérie). *Z. Geomorphol*, 43 : p.167-183.
- Meddi M., 2004. Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued haddad (Nord-Ouest Algérien). *Sécheresse*, 15 : p. 367-373.
- Melesse A.M., Ahmad S., McClain M.E., Wang X., 2011. Suspended sediment load prediction of river systems: an artificial neural network approach', *Agricultural Water Management*, Vol. 98, No. 5 : p 855–866.
- Metcalf ., Eddy., 1991. *Wasrewater t:ngineering: Treatment, Disposal and Reuse*, 3d ed., McGraw-Hill, New York.
- Meybeck M., 1988. How to establish and use world budgets of river material in physical and Chemical Weathering in geochemical cycles, *Kluwer Dordrecht*, p. 247-272.
- Nag SK., 1998. Morphometric analysis using remote sensing techniques in the Chaka Sub-basin, Purulia District, West Bengal. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 26(1 and 2): p 69-76.
- National Research Council, 1993. *Committee on Animal Nutrition Board on Agriculture*. National academy press washington, D.C.
- Nisbet M., Verneaux J., 1970. Composantes chimiques des eaux courantes. discussion et proposition de classes en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques annls *limnol.*,(6)2 : p 161-190.
- Oeurng C., 2010. *Transport des matières en suspension et du carbone organique à l'échelle d'un bassin versant agricole : analyse de la dynamique et modélisation agro-hydrologique (SWAT)*, Thèse de doctorat Université Paul Sabatier - Toulouse 3, 191p.
- Organisation Mondiale de la Santé (OMS). 2003. *L'eau pour les hommes, l'eau pour la vie* paris.
- Probst J.L., Amiotte Suchet P., 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa), *Hydrological Science Journal*, Vol. 37, No 6: p 621–637.
- Remini B., 2005. *La problématique de l'eau en Algérie*. Collection hydraulique et transport solide. Imprimerie, Madani, Blida, p 101.
- Rey F., Burylo M., 2014. Can bioengineering structures made of willow cuttings trap sediment in eroded marly gullies in a Mediterranean mountainous climate, *Geomorphology*, Vol. 204, p 564–572.

Ritter F.E., Major N.P. 1995. Useful mechanisms for developing simulations for cognitive models. *AISB Quarterly*, Spring 91 : p 7-18.

Rodier J., 1978. L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 6ème édition.

Rodier J., Legube B., Merlet N., & Coll., 2009. L'analyse de l'eau. 9<sup>ème</sup> édition. Dunod, Paris, France. 1579 p.

Rodier J., 2006. L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, Ed. Dunod, 8<sup>ème</sup> Edition, Paris.

Rojas R., 1996. *Neural Networks: A Systematic Introduction*, Springer Verlag, Berlin .p 151–184.

Roos E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. FAO, organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome ,Italie .Bulltin pédologique 70, 502 p.

Santé Canada (SC), 2008. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada - Tableau sommaire et documents techniques, Santé Canada, Santé de l'environnement et du milieu de travail, Rapports et publications, Qualité de l'eau.

Sevrin-Reyssac J., De La Noüe J., Proulx D., 1995. Le recyclage du lisier de porc par lagunage, Edition Technique et Documentation Lavoisier, p118.

Smiri A., Cours de conservation des eaux et du sol ([www.alismiri.com/uploads/cours/CES2.pdf](http://www.alismiri.com/uploads/cours/CES2.pdf).)

Sogreah ., 1983. Erosion et transport solide au Maghreb. Analyse bibliographique. Rapport de projet RAB/80/011, PNUD.

Souadi Y., 2011. L'érosion hydrique au Maghreb, étude d'un cas : le bassin versant de l'Oued Barbara (Tunisie Septentrionale). Mémoire de licence, Université du Québec à Montréal, p 130.

Strahler A N., 1964. Quantitative geomorphology of basins and channel networks, *Handbook of Applied Hydrology* (Ed. Ven Te Chow). McGraw Hill Book Company, New York.

Sundborg A., 1986. Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants. Projet 5.3 du Programme hydrologique international, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture 7, place de Fontenoy, 75700 Paris, France Imprimerie Louis Jean, Gap, France ISBN: 92-3-202014-g Version anglaise: ISBN 92-3-102014-5.

Tang, Z. and Fishwick, P.A. (1993) 'Feedforward neural nets as models for time series forecasting', *ORSA Journal on Computing*, Vol. 5, No. 4, pp.374–385.

Tapkın S., Tuncan M., Ariöz Ö., Tuncan A., Ramyar K., 2006. Estimation of concrete compressive strength by using ultrasonic pulse velocities and artificial neural networks, *Proceedings of the 11th FIGES User's Conference for Computer Aided Engineering and System Modeling*, Bolu, Turkey, p 13–15.

- Temple PH., Rapp A., 1972. Landslides in the Mgeta area, western Uluguru Mountains, Tanzania. *Geografiska Annaler* 54: p. 157-93.
- Terfous A., Meghnounif A., Bouanani A., 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). *Rev.Sci.Eau*, 14 : p.173-185.
- Terfous A., Meghnounif A., Bouanani A., 2003. Détermination des dégradations spécifiques dans trois bassins versants des régions méditerranéennes. *IAHS Pub*, 278 : p. 366-372.
- Thurman EM., 1985. *Organic Geochemistry of Natural Waters*. Nijhoff/Junk Po, Netherlands, 497 p.
- Torki M., 2010. Etude de l'érosion et du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est Nord-Est algérien. Université Badji Mokhtar Annaba , 137p.
- Verhoff F.H., Yaksich S.M., Melfi D.A. 1980. River nutrient and chemical transport estimation. *Journal of the Environmental Engineering Division ASCE*, 10(6): p 591-608.
- Vanoni V.A., 1977. *Sedimentation engineering*. ASCE, Hydraulic Division.
- Walling D.E., 1977. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Water Resources Research*, 13(3): p 531-538.
- Walling D.E., Webb B.M. 1981. The reliability of suspended sediment load data. *IAHS AISH Publications*, 133: p 177-194.
- Williams G.P., 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 111: p 89-106.
- World Health Organization W.H.O., 1987. Global pollution and health results of related environmental monitoring. *Global Environment Monitoring system*, WHO, UNEP. *Water Treatment Solutions* .
- Yevjevich V., 1972. *Probability and Statistics in Hydrology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, U.S.A.
- Yvio G., 2008. Contribution à l'évaluation de l'érosion dans le bassin versant de la rivière Grise pour un meilleur plan d'aménagement. Université de Liège. Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique - Master en gestion des Risques Naturels.
- Zaher H., 2010. Cours de conservation des sols et de l'eau. Erosion hydrique chapitre 1. Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs. Département Sol Eau Biodiversité. B.P. 511, Tabriquet, Salé, Maroc.
- Zhan H.Y., Shi Z.H., Fang N.F. Guo M.H., 2015. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China', *Geomorphology*, Vol. 234, p 19–27.