

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abdelhafid Boussof -Mila-  
Institut des Sciences et de Technologie  
Département des Sciences et Techniques



N° Ref :.....

Projet de fin de cycle préparé en vue de l'obtention du diplôme de  
**MASTER ACADEMIQUE**  
En Hydraulique urbaine  
Spécialité : Hydraulique Urbaine

*Étude de quantification du transport solide en suspension dans  
le sous-bassin de l'Oued Ressoul; grand bassin de la Seybouse  
maritime.*

Présenté par : Chennib Lotfi Seif

Boutadjine Mohammed yasser

Directeur de mémoire : Dr. TOURKI Mahmoud U.A.B.MILA

Devant le jury :

Dr. BERHAIL Sabri	président	U.A.B.MILA
Dr. KEBLOUTI Mehdi	Examineur	U.A.B.MILA

Année Universitaire: 2019/2020

## ملخص

النقل الصلب ظاهرة معقدة. وكميات المواد المنقولة كبيرة جدا ورواسب في خزانات المياه. مدى هذه الظاهرة غير شائع في المناطق شبه الرطبة والجزائر هي أحد أكثر البلدان تأثرا بهذه الظاهرة. وقد تم وضع طريقة سهلة التنفيذ تستند إلى متوسط التدفقات لتقدير المدخلات الصلبة ويستند إلى بيانات الهيدرومترات (التدفقات السائلة، والتركيز والتدفقات الصلبة) والتحليلات الموسمية والسنوية.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحديد السمات الرئيسية لتآكل المياه في واحدة من أكثر النظم المائية تميزا في شرق الجزائر. وهذا هو مستجمعات المياه الواد ريسول. وقد أدت النهج الإحصائية والتحليلية التي تم الاضطلاع بها في هذا العمل، وكذلك النمذجة المكانية - الزمنية للتدفقات الرسوبية المائية، إلى تحديد كمي للنقل الثابت المعلق لمدة 17 سنة، من عام 1979 إلى عام 1997.

وتؤخذ في الاعتبار الأوضاع الطبوغرافية واللائية واستخدام الأراضي والمناخ والهيدرولوجية التي أسهمت في تآكل كل بيئة مادية، كما يجري تحديد وتفسير المناطق التي يحتمل أن تكون منتجة للمواد (تآكل المنحدرات والمصارف) على أساس تحليل شبه كمي.

وقدرت المدخلات الصلبة من الواد، في جداول زمنية مختلفة، من منحنيات النقل الصلبة، وضعت على أساس عينات الخصم الفوري وتركيزات من الحمولة الصلبة المعلقة. وقد تحسن أداء الانتكاسات الإحصائية الثابتة باستخدام تقنية فئة التدفق وبمحاولة تقسيم البيانات على المستوى الموسمي.

ويبلغ متوسط التدفق الصلب المحدد السنوي خلال الفيضانات التي دامت 17 عاماً خلال فترة الدراسة 370.38 ت/كم<sup>2</sup>/سنة. وينساب في مستجمعات المياه الشرقية الواد ريسول تدفقات سطحية قوية وهي مرتفعة جدا في التآكل. ويمكن تفسير الإنتاجية الصلبة العالية بمعدل مرتفع بنفس القدر.

واستند تحديد العلاقات العامة في مجال التشغيل الرسوبي المائي (العلاقات بين التدفقات الرسوبية والمعايير الفيزيائية - المناخية والهيدرولوجية) أساسا إلى جانبين: العلاقة بين التدفق الصلب، معلمات التدفق، وهطول الأمطار، والعلاقة بين التدفق السائل والتركيز الترسيبات .

وقد أظهرت الأساليب الإحصائية والخرائط المستخدمة في هذه الدراسة أن حوض الواد ريسول هو بيئة متأثرة بالتآكل. ويستند القياس الكمي شبه الكمي لتآكل المياه إلى ثلاثة عوامل رئيسية: قابلية التفتت الوطيد، ودرجة المنحدر وكثافة الغطاء النباتي.

ومن أجل حماية البيئة المادية المعرضة لتآكل المياه، أكدنا على ضرورة التدخل في المناطق ذات الحساسية العالية، وأجرينا دراسة عامة لتأثير الظاهرة على السدود الواقعة في منطقة دراستنا.

الكلمات الرئيسية: النقل الصلب؛ الجزائر؛ واد ريسول؛ الظروف الطبوغرافية؛ تآكل.

## **Abstract**

Solid transportation is a complex phenomenon. The quantities of material transported are very large and sediment in the water reservoirs. The magnitude of the phenomenon is unparalleled in subhumid zones. Algeria is one of the countries most affected by this phenomenon. An easy-to-implement method based on average flows has been developed to estimate solid inputs. It is based on hydrometric data (liquid flows, concentration and solid flows) and seasonal and annual analyses.

The main objective of this work is to identify the main features of water erosion in one of the most characteristic hydro-systems of eastern Algeria: this is the Oued Ressoul watershed. The statistical and analytical approaches undertaken in this work, as well as the spatial-temporal modelling of hydro-sedimentary flows, resulted in the quantification of solid suspended transport for a period of 17 years, from 1979 to 1997.

Topographical, lithological, land use, climatic and hydrological situations that have contributed to the erosion of each physical environment are taken into account and potentially productive areas of materials (erosion of slopes and banks) are identified and interpreted on the basis of semi-quantitative analysis.

Solid inputs of oued were estimated, at different time scales, from solid transport curves, developed on the basis of instantaneous debit samples and concentrations of the suspended solid load. The performance of established statistical regressions has been improved by the use of the flow class technique and by an attempt to subdivide the data, at the seasonal level.

The average annual specific solid flow during the 17-year floods of the study period is 370.38 T/km<sup>2</sup>/year. The Oued Ressoul East watershed has strong surface flows and is very high in erosion. The high solid throughput could be explained by an equally high rate.

The determination of general hydro sedimentary functioning relationships (relationships between sedimentary flows and physical-climatic and hydrological parameters) was based mainly on two aspects: Relationships between solid flow, flow parameters, rainfall and the relationship between liquid flow and concentration (hysteresis).

The statistical and mapping methods used in this study showed that the Oued Ressoul Basin is an environment affected by erosion. Semi-quantitative quantification of water erosion is based on three main factors: bedrock friability, slope degree, and vegetation cover density.

In order to protect the physical environment exposed to water erosion, we stressed the need to intervene in areas of high sensitivity and conducted a general study of the impact of the phenomenon on dams located in our study area.

**Keywords:** solid transport; Algeria; Oued Ressoul; topographical conditions; Erosion.

## Résumé

Le transport solide est un phénomène complexe. Les quantités de matières transportées sont très importantes et sédimentent dans les retenues d'eau. L'ampleur du phénomène est sans commune mesure en zones subhumide. L'Algérie est un des pays les plus touchés par ce phénomène. Une méthode basée sur les débits moyens, facile à mettre en œuvre, a été mise au point pour l'estimation des apports solides. Elle est basée sur les données hydrométriques (débits liquides, concentration et débits solides) et les analyses saisonnières et annuelles.

L'objectif majeur de ce travail est de cerner les grands traits de l'érosion hydrique dans l'un des hydro-systèmes les plus caractéristiques de l'Est algérien : il s'agit du bassin-versant de l'Oued Ressoul. Les approches statistiques et analytiques entamées dans ce travail, ainsi que la modélisation spatio-temporelle des flux hydro-sédimentaires, ont abouti à la quantification des transports solides en suspension, pour une période de 17 années, allant de 1979 à 1997.

Les conditions topographiques, lithologiques, l'occupation des sols, les situations climatiques et hydrologiques ayant favorisé l'érosion de chaque milieu physique sont prises en compte et les zones potentiellement productives de matériaux (érosion des versants et des berges) sont identifiées et interprétées en s'appuyant sur l'analyse semi-quantitative.

Les apports solides d'oued ont été estimés, à différentes échelles temporelles, à partir des courbes de transport solide, développées sur la base des prélèvements instantanés des débits et des concentrations de la charge solide en suspension. La performance des régressions statistiques établies a été améliorée par l'usage de la technique des classes de débits et par une tentative de subdivision des données, à l'échelle des saisons.

Le débit solide spécifique moyen annuel pendant les crues des 17 ans de la période étudiée est de 370,38 T/km<sup>2</sup>/an. Le bassin versant de l'Oued Ressoul Est présente des écoulements de surface forts et l'érosion y est très élevée. Le débit solide élevé pourrait être expliqué par un taux également élevé.

La détermination de relations générales de fonctionnement hydro sédimentaire (relations entre les flux sédimentaires et les paramètres physico-climatiques et hydrologiques) s'est basée principalement sur deux aspects: Relations entre le débit solide, les paramètres de l'écoulement, la pluviométrie et relations entre le débit liquide et la concentration (hystérésis).

Les méthodes statistiques et cartographiques utilisées dans cette étude ont montré que le bassin de l'Oued Ressoul est un milieu touché par l'érosion. La quantification semi quantitative de l'érosion hydrique est basée sur trois facteurs principaux : la friabilité du substratum rocheux, le degré de pente et la densité du couvert végétal.

Dans le but de protéger le milieu physique exposé à l'érosion hydrique, nous avons souligné la nécessité d'intervenir sur les zones à forte sensibilité et procédé à l'étude générale de l'impact du phénomène sur les barrages situés dans notre zone d'étude.

Mots clés : transport solide ; Algérie ; l'Oued Ressoul ; conditions topographiques ; Erosion.

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire*

*Ames chers parents ma mère et mon père*

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs*

*Encouragements.*

*Ames frères.*

*Ames amies et mes camarades.*

*Sans oublier tout les professeurs que ce soit du*

*Primaire, du moyen, du secondaire ou de*

*L'enseignement supérieur.*

*CHENNIB LOTFI-SEIF*

# *Dédicace*

*Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail, en  
signe de respect et de reconnaissance envers :*

*Mon cher grandpère Moussa.*

*Mon cher père LHacene.*

*Ma chère mère Habiba.*

*Pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour je réussisse.*

*Je le dédie également à :*

*Mes sœurs et frères.*

*Mes oncles et tantes.*

*Mes amis de l'université AbdelHafid Boussouf Mila.*

*Mes amis nail,wail,ricos,oussama et lokman.*

*En un mot à tous les gens qui contribué ma réussite de près ou  
de loin.*

*BOUTADJINE Med YASSER*

## **Remerciements**

*Avant tous, nous remercions Allah tout puissant qui nous a guidés tout au long de notre vie, qui nous a permis de nous instruire et d'arriver aussi loin dans nos études, qui nous a donné courage et patience afin de dépasser tous les moments difficiles, et qui nous a permis d'achever ce travail.*

*Ecrire un avant-propos est toujours un moment de grande émotion. Il s'agit, en effet, au terme d'une ultime étape, de remercier ceux qui nous ont aidés et de leur dédier le fruit de nos efforts.*

*Exprimer ses sentiments à sa famille est déjà difficile, bien que naturel et, quant à exprimer son estime à ses Maîtres, cela semble bien plus difficile encore.*

*Ce n'est donc pas sans émotion que nous le faisons, à l'égard de tous les nôtres pour leur soutien matériel et moral, et que nous le faisons, également, à l'endroit de tout le corps professoral du Département d'Hydraulique pour avoir largement contribué à notre formation.*

*Nous tenons à exprimer notre vive et profonde reconnaissance à notre encadreur le Dr Tourki Mahmoud pour avoir accepté de diriger ce mémoire. Il a orienté nos travaux de recherche avec patience, bel humanisme et grande sagesse ; nous tenons également à le remercier pour le soutien qu'il a fourni dans le but de nous guider et nous encourager, ce qui nous a permis de terminer ce modeste travail dans les meilleures conditions.*

*Nos vifs remerciements s'adressent à tous les membres du jury. Nous remercions à ce titre le président Dr Berhail Sabri et l'examineur Dr Keblouti Mehdi pour avoir accepté de rapporter ce manuscrit.*

*Enfin, un grand merci à tous nos chers amis qui nous ont encouragés tout le long de la réalisation de ce mémoire.*

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Valeur du coefficient $\alpha$ selon le niveau perméabilité.....	16
Tableau 2. Données de calcul de la courbe hypsométrique .....	22
Tableau 3. Proportions de surface des classes de pentes .....	24
Tableau 4. Classification du relief selon la valeur les données de la FAO, 1996...	26
Tableau 5. Caractéristiques topographiques et morphométriques du bassin de l'Oued Ressoul .....	28
Tableau 6. Portion de surface des types d'occupation du sol à l'Oued Ressoul...	30
Tableau 7. Portion de surface des formations lithologiques à l'Oued Ressoul...	32
Tableau 8. Caractéristiques des stations pluviométriques et hydrométriques...	34
Tableau 9. Classification des années sèches et humides de la période d'observation .....	37
Tableau 10. Fréquences des tranches de pluies journalières ; période (1979/80-1996/97) .....	40
Tableau 11. Valeurs mensuelles de L'ETP pour une longitude égale à $36^\circ$ .....	43
Tableau 12. Apports hydrologiques Annuels et mensuels ; période (1979/80-1996/97) .....	53
Tableau 13. Dégradation spécifique des bassins étudiés selon les formules empiriques .....	54
Tableau 14. Caractéristiques des CTS développées pour les relations (Q-C) et (Q-Q <sub>s</sub> ) .....	63
Tableau 15. Apports solides et concentrations annuelles, période (1979/80-1996/97) .....	64
Tableau 16. Valeurs des apports solides, concentrations et de quelques paramètres hydro-climatiques à l'échelle saisonnière, période (1979/80-1996/97).....	67



## LISTES DES FIGURES

Figure 1. Régions dégradées par l'érosion hydrique au Maghreb selon Arabi and Roose (1989) .....	4
Figure 2. Dégradation des sols dans 77 bassins de l'Algérie selon Vanmaercke et al. (2014) .....	4
Figure 3. Parcelles agricoles affectées par une érosion en nappe .....	5
Figure 4. Mouvement en masse sous Solufixion .....	6
Figure 5. Types de glissement de terrain .....	6
Figure 6. Coulée boueuse .....	7
Figure 7. Erosion en rigole .....	8
Figure 8. Ravinement . .....	8
Figure 9. Les différents types du transport solide dans les cours d'eau .....	12
Figure 10. Processus de transport solide en suspension .....	13
Figure 11. Processus du transport solide par charriage .....	13
Figure 12. Situation géographique du sous-bassin de l'oued Ressoul .....	19
Figure 13. MNT du bassin de l'Oued Ressoul (SRTM -30×30m) .....	20
Figure 14. Classes d'altitudes au niveau du sous-bassin de l'Oued Ressoul .....	21
Figure 15. Courbe hypsométrique du sous bassin de l'Oued Ressoul .....	22
Figure 16. Carte des pentes du sous-bassin de l'Oued Ressoul .....	24
Figure 17. Classification de Strahler (1952) .....	27
Figure 18. Carte d'occupation des sols du sous-bassin de l'Oued Ressoul .....	29
Figure 19. Carte lithologiques du sous-bassin de l'Oued Ressoul .....	31
Figure 20. Localisation des stations de mesure pluviométriques et hydrométriques .....	35
Figure 21. Variabilité interannuelle des précipitations-Période (1979/80-1996/97) .....	36
Figure 22. Variabilité mensuelles des précipitations- Période 1979/80-1996/97...37	
Figure 23. Variabilité mensuelles des précipitations -Période 1979/80-1996/97...38	
Figure 24. Variabilité mensuelles des températures -Période 1979/80-1996/97...41	
Figure 25. Diagramme ombro-thermique de la station d'Ain berda -Période	

(1979/80-1996/97) .....	42
<b>Figure 26. Variabilité de l'ETP et des précipitations mensuelles- Période</b>	
(1979/80-1996/97) .....	44
<b>Figure 27. Climagramme pluviothermique d'Emberger 1955 .....</b>	<b>45</b>
<b>Figure 28. Localisation de la station hydrométrique d'Ain Berda .....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 29. Variabilité des précipitations et des débits et annuels- Période</b>	
(1979/80-1996/97) .....	49
<b>Figure 30. Variabilité du coefficient mensuelle des débits, période</b>	
(1979/80-1996/97) .....	50
<b>Figure 31. Variabilité des précipitation et des débits saisoniers, période</b>	
(1979/80-1996/97) .....	51
<b>Figure 32. Nuage de point des données instantanées brutes (Q-C) .....</b>	<b>56</b>
<b>Figure 33. Ajustement du nuage de point des données (Q-C) selon un</b>	
<b>modèle de puissance et avec transformation logarithmique .....</b>	<b>56</b>
<b>Figure 34. Ajustement du nuage de point des données (Q<sub>s</sub>-Q) brutes</b>	
<b>sous une échelle logarithmique et selon un modèle de puissance.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure 35. CTS pour la relation Q-C .....</b>	<b>62</b>
<b>Figure 36. CTS pour la relation Q-Q<sub>s</sub> .....</b>	<b>62</b>
<b>Figure 37. Variabilité annuelle des apports solides, concentrations,</b>	
<b>précipitations et des débits liquides à l'Oued Ressoul ; période</b>	
<b>(1979/80-1996/97).....</b>	<b>65</b>
<b>Figure 38. Variabilité mensuelle des apports solides, concentrations,</b>	
<b>précipitations et des débits liquides à l'Oued Ressoul ;</b>	
<b>période (1979/80-1996/97) .....</b>	<b>66</b>

## TABLE DES MATIÈRES

ملخص .....	I
Abstract.....	II
Résumé .....	II
Dédicaces.....	IV
Remerciements.....	VI
Liste des tableaux .....	VII
Liste des figures.....	VIII
Table des matières .....	X
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EROSION HYDRIQUE</b>	
<b>Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1. APERCU DE LA SITUATION DE L'EROSION HYDRIQUE DANS LE MONDE ET EN ALGERIE .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. FORMES DE L'EROSION HYDRIQUE.....</b>	<b>4</b>
1.2.1. L'érosion en nappe (érosion de surface) .....	5
1.2.2. L'érosion en masse .....	5
a. la solifluxion.....	6
b. les glissements.....	6
c. les coulées boueuses.....	7
1.2.3. L'érosion linéaire (Griffes, rigoles et ravinement).....	7
<b>I.3. PROCESSUS DE L'EROSION HYDRIQUE.....</b>	<b>8</b>
<b>I.4. LES PRINCIPAUX FACTEURS EROSIFS.....</b>	<b>9</b>
I.4. 1. Agressivité des pluies.....	9
I.4. 2. Vulnérabilité des roches et crédibilité des sols.....	10
I.4. 3. La topographie.....	10
I.4. 4. Occupation du sol.....	11
I.4.5. l'activité humaine (Facteur anthropique).....	11
<b>I.5. LE TRANSPORT SOLIDE.....</b>	<b>12</b>
I.5.1. Le transport solide en suspension.....	12

I.5.2. Le transport solide par saltation.....	13
I.5.3. Le transport solide par charriage.....	13
<b>I.6. TECHNIQUES DE QUANTIFICATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE</b>	<b>14</b>
I.6.1. Techniques de l'ANRH pour la mesure directe sur terrain.....	14
I.6.2. Estimation de l'érosion par modélisation statistique (courbes de transport solide).....	14
I.6.3. Estimation de l'érosion par des formules empiriques.....	15
a. <i>Formule de Demmak (1982)</i> .....	15
b. <i>Formule de la SOGREAH (1969)</i> .....	15
c. <i>Formule de Tixeront (1960)</i> .....	16
d. <i>Formule de Fournier (1960)</i> .....	16
I.6.4. Estimations de l'érosion hydrique par modélisation spatiotemporelle.....	16
Conclusion .....	17
 <b>CHAPITRE II : CONTEXTE PHYSIQUE ET GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE</b>	
Introduction.....	19
<b>II.1. APERÇU GEOGRAPHIQUE</b> .....	<b>19</b>
<b>II.2. CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE</b> .....	<b>20</b>
II.2.1. Altimétrie.....	20
II.2.2. Courbe hypsométrique .....	22
II.2.3. Analyse de la répartition spatiale des pentes .....	23
<b>II.3. CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES</b> .....	<b>25</b>
II.3.1. Indice de compacité de Gravelius ( $K_c$ ) .....	25

II.3.2. Longueur du rectangle équivalent (L) .....	25
II.3.3. Indice global de pente.....	26
II.3.4. Dénivelée spécifique (Ds) .....	26
II.3.5. Densité de drainage .....	26
II.3.6. Coefficient de torrentialité (C <sub>t</sub> ) .....	27
II.3.7. Temps de concentration (T <sub>c</sub> ) .....	28
II.4. OCCUPATION DU SOL ET COUVERT VEGETAL.....	29
II.5. LES ENSEMBLES LITHOLOGIQUES .....	30
Conclusion.....	32
 <b>CHAPITRE III : ASPECTS CLIMATIQUES</b>	
Introduction .....	34
 <b>III.1 DONNEES PLUVIOMETRIQUES ET HYDROMETRIQUES</b>	
RECEUILLIS .....	34
 <b>III.2. VARIABILITE TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS.....</b>	
III.2.1. A L'échelle annuelle.....	35
III.2.2. A L'échelle mensuelle et saisonnière.....	37
III.2.3. Pluies journalières extrêmes et averses génératrices de crues.....	39
 <b>III.3. FACTEURS EVAPO-THERMIQUES.....</b>	
III.3.1. Régime et variabilité pluvio-thermique.....	40
III.3.2. Evapotranspiration potentielle.....	42
 <b>III.4. ETAGE BIOCLIMATIQUE DE L'OUED RESSOUL.....</b>	
Conclusion .....	46
 <b>CHAPITRE IV : HYDROLOGIE ET CONTIFICATION DU</b>	
<b>TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION</b>	
Introduction.....	47
 <b>VI.1. LES DONNEES HYDROMETRIQUES RECEUILLIES.....</b>	
<b>VI.2. CARACTERE HYDROLOGIQUE DE L'OUED RESSOUL.....</b>	

VI.2.1. Variabilité annuel des débits liquides.....	48
VI.2.2. Ecoulement moyen annuel et coefficient de ruissellement du bassin.....	49
VI.2.3. Régime fluvial mensuel et saisonnier de l'Oued Ressoul.....	50
VI.3. APPORTS HYDROLOGIQUES DU BASSIN.....	52
VI.4. CALCUL DU TRANSPORT SOLIDE PAR SUSPENSION A L'OUED RESSOUL.....	53
VI.4.1. Estimation de la dégradation spécifique par des formules Empiriques.....	53
VII.4.2. Estimation de l'érosion et du transport solide en suspension par modélisation statistique des flux hydrologiques liquides et solides...54	
VII.4.2.1. Méthodologie de travail.....	54
a. Relation débits liquides (Q)- Concentrations (C) en (MES).....	55
b. Relation débits solides (Q <sub>s</sub> )- Débits liquides (Q) .....	57
c. Calcul de l'erreur et correction de la sous-estimation des modèles régressifs.....	58
d. Evaluation des performances des CTS.....	59
e. Amélioration des CTS par la technique des classes des débits .....	60
f. Evaluation des apports solides (A <sub>s</sub> ).....	61
VII.4.2.2. Résultats et discussions.....	61
VII.4.2.2.1 Variabilité interannuelle des apports solides et des concentrations.....	63
VII.4.2.2.2 Variabilité mensuelle et saisonnière des apports solides et des concentrations .....	66
a. L'érosion en Automne .....	67
b. L'érosion en Hiver.....	68
c. L'érosion en printemps.....	68
d. L'érosion en été.....	69
Conclusion.....	69
CONCLUSION GENERALE .....	71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	74

# Introduction générale

---

## INTRODUCTION GENERALE

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en Algérie et qui menace les potentialités en eau et en sol. La protection insuffisante des sols due à une déforestation galopante et des systèmes de culture inadaptés fait que chaque année, plus de 100.000 m<sup>3</sup> de terres sont entraînées sous l'effet de l'érosion (Khanchoul 2006). Les derniers levés bathymétriques, réalisés par l'agence nationale des barrages et transferts (ANBT) entre 2004 et 2005, indiquent un taux d'envasement annuel inquiétant. Les flux sédimentaires générés par le processus d'érosion en amont des bassins versants et leur accumulation au fond des réservoirs réduit chaque année leur capacité de stockage d'environ 2 à 5% (Kassoul, Abdelgader, & Belorgey, 1997).

Les bassins versants et les barrages du nord-est algérien, n'échappent pas à ce phénomène. Cependant ces derniers ont moins souvent fait l'objet d'évaluation des matières solides en suspension transportées par les oueds. Toutefois, plusieurs travaux sur la dégradation des sols des bassins Algériens ont été effectuée à partir de méthodes empiriques (Demmak, 1982; Fournier, 1960; Tixeront, 1960). Les résultats de ces méthodes, s'avèrent en réalité surestimées ou sous-estimées, aspect que nous nous emploierons à montrer entre autres dans le cadre de ce mémoire. Ces formules impliquent des paramètres explicatifs sous forme de relations sans tenir compte des processus et des récurrences spatiales et temporelles qui régissent le fonctionnement hydro-sédimentaire.

Le manque de données constitue un handicap majeur pour l'estimation et la prévision des transports solides. Cet état de fait a conduit de nombreux chercheurs à proposer des modèles spatio-temporelles, statistiques ou bien stochastiques. Par conséquent, il est judicieux d'entreprendre dans ce travail, une quantification de l'érosion qui permettrait l'évaluation des flux de sédiments en utilisant des mesures des transports de matières en suspension à l'échelle des crues et des séries.

Justement, ce travail qui traite la problématique de l'érosion hydrique à l'Oued Ressoul, sous-bassin de la Seybouse maritime, s'appuie sur une approche globale qui intègre une prise en compte des caractéristiques physiques, morphométriques, climatiques et hydrologiques qui favorisent le déclenchement des processus érosifs.

D'une autre manière, notre problématique de départ, se résume dans les questions suivantes :

- Qu'en est-il de l'état de la dégradation des sols du bassin-versant de l'Oued Chabro ?
- Quelles sont les facteurs à l'origine de l'érosion hydrique dans la zone d'étude ?

## Introduction générale

---

- Quel est la méthodologie de quantification de l'érosion qui s'adapte le mieux aux données à disposition?

Les questionnements soulevés plus haut, seront traités selon un plan constitué d'un ensemble de quatre chapitres, organisés, comme suite:

- Le premier chapitre présentera à travers une synthèse bibliographique, un aperçu sur le phénomène de dégradation des sols par l'érosion, ses facteurs et ses formes. Aussi, il dresse un état des données et des méthodes permettant d'estimer l'érosion hydrique et le transport solide en suspension.
- Le deuxième chapitre évoquera, un aperçu sur le contexte géographique de la zone d'étude, en mettant en lumière ses caractéristiques topographiques, morphométriques, lithologiques, et celle de l'occupation du sol.
- Le troisième chapitre traitera le contexte climatologique du bassin, en l'occurrence son caractère pluviométrique. Cette partie intégrera aussi une analyse statistique, des paramètres climatiques influençant directement le comportement hydrologique et érosifs du bassin.
- Le quatrième chapitre, présentera une caractérisation du régime hydrologique du bassin ainsi qu'une étude de quantification du transport solide. Ce chapitre sera subdivisé en deux parties : Une première partie contenant une analyse des écoulements et des apports hydrologiques de l'Oued Ressoul et une deuxième, qui comprendra une modélisation statistique des flux hysro-sédimentaires.



# **Chapitre I**

## **Synthèse bibliographique**

### **sur l'érosion hydrique**

## INTRODUCTION

Le terme « érosion » provient du verbe latin « erodere » qui signifie « ronger ». Il exprime l'usure de la surface du sol, sous l'effet imprévisible des facteurs météorologiques (Fournier, 1969). En dépit des différents types d'érosion qui existent, nous nous intéresserons, dans ce présent travail, à l'érosion hydrique, phénomène qui existe dans notre planète depuis que les roches ont émergé et se sont trouvées en contact avec l'atmosphère [72].

En revanche, l'érosion hydrique ou fluviale est le détachement de la matière sous l'effet de l'énergie d'écoulement (ruissellement) qui est supérieure à la résistance des particules solides de la terre.

Il existe dans la littérature plusieurs études intéressantes au sujet du phénomène des pertes des sols et de l'érosion hydrique. Nous nous référons justement aux études les plus populaires pour affiner notre recherche bibliographique et à enrichir nos connaissances concernant la situation de la dégradation des sols en régions méditerranéennes et en particulier en Algérie.

Par ailleurs, les conclusions qui vont être tirées de cette recherche bibliographique serviront surtout à l'orientation de notre travail, vers une méthodologie adéquate visant à estimer de la dégradation spécifique de l'Oued Ressoul.

### I.1. APERÇU DE LA SITUATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE MONDE ET EN ALGERIE

La dégradation des sols sous l'effet de l'érosion hydrique est un phénomène naturel largement répandu dans le monde. D'ailleurs, depuis plus d'un siècle, ce phénomène est considéré comme l'un des problèmes environnementaux les plus menaçants au monde [6], [72].

Durant la dernière décennie, l'érosion hydrique était le premier type de dégradation des terres au monde. Environ 45,15% des terres de la planète sont affecté par une érosion hydrique importante [65].

Par ailleurs, l'évolution des paysages méditerranéens est fortement liée à une érosion intensive, d'ordre naturel et/ou anthropique, constamment présente [27], en relation avec les conditions, morphologiques, lithologiques, les activités d'agriculture, les travaux d'aménagements, l'élevage et les activités forestières qui caractérisent ces régions. A cela s'ajoute le fort contraste climatique inter-saisonnier [27].

Probst and Suchet (1992) évaluent une dégradation spécifique, allant de 400 à 610 Tkm<sup>-2</sup> entre les bassins qui se jettent dans la Méditerranée et ceux qui se jettent en Océan Atlantique.

# Chapitre I : Synthèse bibliographique sur l'érosion hydrique

D'autre part, (Arabi and Roose (1989); Benkadja, Benhadouga, & Benkadja, 2013) estiment que 45% du paysage des régions centrales du Nord de l'Afrique sont dégradés, par l'action de l'érosion hydrique (Figure 1).

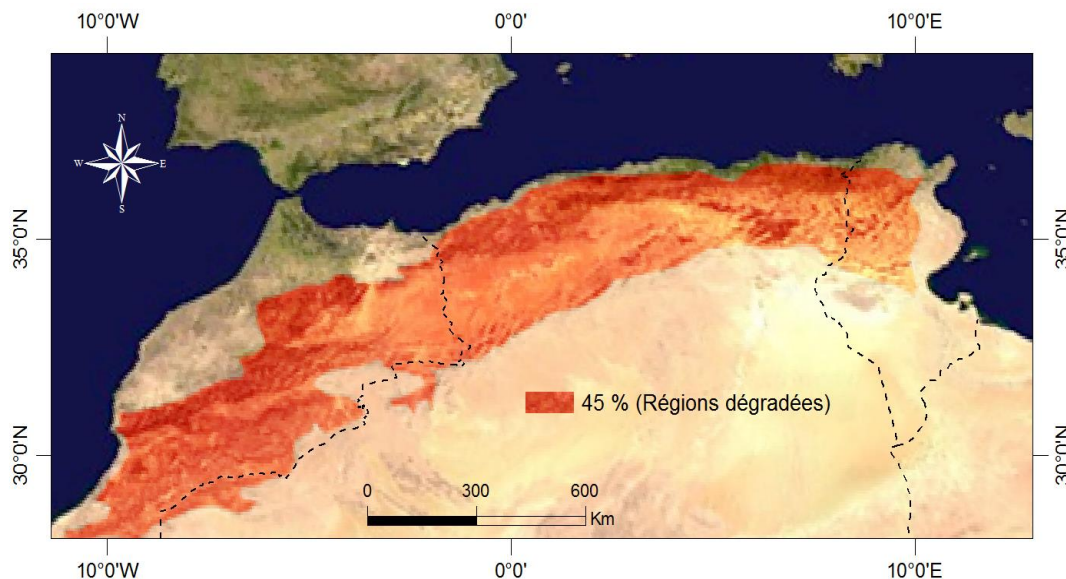


Figure 1. Régions dégradées par l'érosion hydrique au Maghreb selon Arabi and Roose (1989).

En Algérie, le transfert de sédiments dans les bassins fluviaux s'avère, par certaines études, relativement important [14], [47], [76]. L'inventaire, réalisé récemment par Vanmaercke, Poesen, Broeckx, and Nyssen (2014), sur un ensemble de 77 bassins-versants algériens, a montré que la fourchette de la perte des sols se situe entre 93 et 44 000  $\text{Tkm}^{-2} \text{an}^{-1}$  (figure 2).

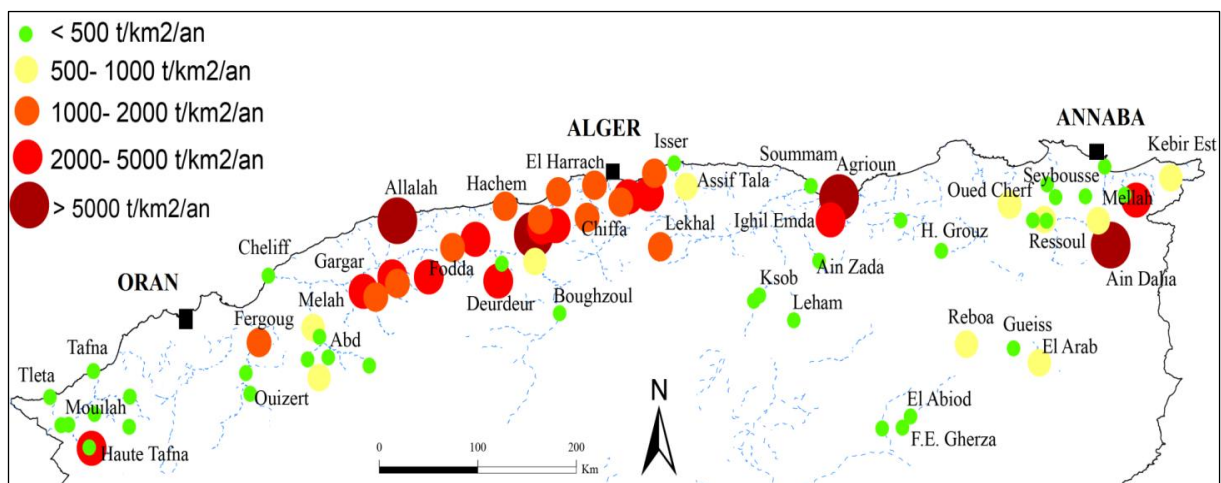


Figure 2. Dégradation des sols dans 77 bassins de l'Algérie selon Vanmaercke et al. (2014).

## I.2. FORMES DE L'ÉROSION HYDRIQUE

On distingue trois principales formes d'érosion: L'érosion en nappe, linéaire et en masse. Chaque forme d'érosion laisse son identité et sa trace dans le paysage. En effet, l'érosion en

nappe, dite aussi l'érosion de surface, est observée dans les zones cultivées. En revanche, l'érosion linéaire ou en ravine, est observée dans les versants, elle déplace localement la partie profonde du sol. Le dernier type d'érosion concerne la mobilisation et l'arrachement de grandes quantités de terre. En conséquence, des glissements et/ou des coulées boueuses peuvent se déclencher et provoquer une modification irréversible du paysage.

### 1.2.1. L'érosion en nappe (érosion de surface)

L'érosion en nappe ou de surface est caractérisée par une eau de ruissellement sans griffes ou rigoles visibles [65]. Ce phénomène est observé sur les pentes faibles, en sommet des versants où l'eau ne peut pas se concentrer. Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies (effet Splash), les particules solides sont arrachées et transportées. Au niveau des parcelles cultivées, l'érosion en nappe décape la partie superficielle, la plus fertile du sol (figure 3).



**Figure 3.** Parcelles agricoles affectées par une érosion en nappe.

Source : <https://www.futura-sciences.com/>.

Dans un premier temps, c'est l'impact des gouttes qui va arracher les particules. La battance des gouttes de pluie répartie des gouttelettes dans toutes les directions. Seulement, sous l'effet de la gravité les gouttelettes auront une vitesse plus importante en aval qu'en amont. La vitesse résultante des gouttelettes sera dirigée depuis l'amont vers l'aval. A partir de là, il y aura formation de flaques d'eau et justement une flaque non infiltrée entraînera un ruissellement en nappe. L'érosion en nappe dépend de:

- L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement,
- L'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules,
- La durée des pluies et/ou l'humidité des sols avant l'arrivée de l'averse.

### 1.2.2. L'érosion en masse

L'érosion en masse ou bien les mouvements de masse sont des accidents de tailles variées, de quelques mètres à quelques kilomètres parfois. Ils se produisent soit par solifluxion soit par glissement de terrain ou par des coulées boueuses.

### a) La solifluxion

Est une lente descente d'une pellicule superficielle du versant (solifluxion pelliculaire) ou de loupes de solifluxion souvent de taille métrique et quelque fois décamétrique [64]. Ce phénomène affecte, en général, les versants constitués de marnes et d'argiles qui sont très plastiques surtout ceux ayant des pentes moyennes et abruptes (figure 4).

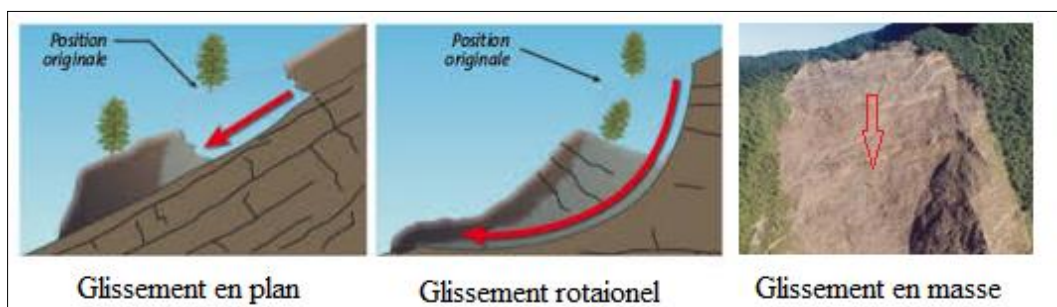


**Figure 4.** Mouvement en masse sous Solufixion  
. Source : [www.WilidWorld.com](http://www.WilidWorld.com)

Les versants ayant subits une solifluxion présentent en général un paysage chaotique. Il s'agit d'une succession de replats et de contre-pentes abruptes isolant des dépressions fermées (figure 4).

### b) Les glissements

Les glissements des terrains sont souvent liés à un sapement de l'Oued aux pieds des versants consitutés de roches tendres [34]. Même sur des formations dures, des glissements peuvent intervenir, surtout quand le soubassement du versant est constitué d'un matériaux meuble (figure 5). On distingue d'après la trajectoire de la masse déplacée plusieurs types de glissements : en plan, en masse ou bien des glissements rotaionels [34].



**Figure 5.** Types de glissement de terrain. Source : [www.Anco.pro.com](http://www.Anco.pro.com)

### c) Les coulées boueuses

Les coulées boueuses sont des écoulements de matériel solide ayant franchi la limite de liquidité et dont la vitesse dépend de la viscosité. Elles sont constituées de mélange d'eau et de terre. Les matériaux mobilisés par les coulées de boue sont généralement très hétérogènes (argile, sable, rochers) [34]. Cette charge très importante en matériaux solides (environ 1/4 d'eau et 3/4 de matériau solide), leur confère une grande capacité érosive et destructive notamment, du fait de la présence de blocs charriés au sein même de la coulée. Elles peuvent s'écouler dans le lit des torrents et éventuellement s'étaler sur les cônes de déjection torrentiels générant ainsi une menace importante pour les vies ou les installations humaines. Toutefois, elle peuvent s'arrêter « en masse », laissant des dépôts d'épaisseur importante de l'ordre du mètre (figure 6).



**Figure 6.** Coulée boueuse.

Source : [www.observatoire-regional-risques-paca.fr](http://www.observatoire-regional-risques-paca.fr)

Les coulées apparaissent dans des matériaux meubles et lorsque la teneur en eau augmente de manière importante. La mise en mouvement de ces matériaux a pour origine une perte brutale de cohésion. Ces coulées peuvent se produire depuis le corps ou le pied d'un glissement.

dans un contexte morphologique, les zones de colluvions, de glissements actifs ou anciens et de dépôts anthropiques favorisant d'importantes concentrations d'eau (talwegs, lit de rivière) et constituent des sites potentiels d'apparition des coulées de boue.

### 1.2.3. L'érosion linéaire (Griffes, rigoles et ravinement)

L'érosion linéaire se produit généralement sous l'effet d'un écoulement concentré [34], [65]. Ce dernier se développe sur des sols ayant perdues leur capacité d'infiltration ou de stockage de l'eau. Le ruissellement concentré entraîne en aval un tassement du sol (notamment en surpâturage) et provoquent une dégradation linéaire de la structure superficielle du sol [34],

[65]. L'érosion linéaire peut apparaître en 3 formes distinctes : en Griffes, rigoles ou ravinement.

Lorsque l'écoulement creuse des formes d'incision en petits canaux de quelques centimètres de profondeur on parle donc de « griffes » [37]. En revanche, lorsque ces canaux dépassent les 10 cm de profondeur cela correspond à des « rigoles » (figure7).

D'autre part, on distingue une forme d'érosion intermédiaire appelée « nappe ravinante », quand les creux d'incision restent entre 10 à 20 cm de profondeur mais que leur largeur atteint plusieurs mètres [34].

Les creux dépassant les 50 cm de profondeur, et en particulier lorsqu'ils ne sont plus effaçables par les techniques culturales, ceci représente des « ravines » (figure 8).

Le ruissellement concentré provoque également le sapement des berges des oueds et leur surcreusement en cas de fortes crues. Le ravinement dépend de l'énergie du ruissellement, laquelle est proportionnelle au volume ruisselé et au carré de sa vitesse [34], [65].

Les principaux paramètres contrôlant le développement des ravines sont l'intensité de la pluie, la superficie drainée en amont, la pente, la lithologie et le couvert végétal.



**Figure 7.** Erosion en rigole.

Source : [www.alamyimages.fr](http://www.alamyimages.fr)



**Figure 8.** Ravinement.

<http://djerrab-geologie-guelma.e-monsite.com/>

### I.3. PROCESSUS DE L'EROSION HYDRIQUE

L'érosion des sols se produit lorsque les eaux de pluie, ne pouvant pas s'infiltrer dans le sol. Un ruissellement se développe donc sur les versants en entraînant les particules de terre nappe [34]. Le refus du sol d'absorber l'excédent en eau apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration de du sol, soit lorsque la pluie touche une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe [34].

Ces deux cas apparaissent généralement dans des milieux différents et provoquent ainsi, deux types de ruissellements : Un ruissellement diffus correspondant à une érosion aréolaire, ou bien un ruissellement concentré donnant une érosion linéaire. Il est donc évident que la pluie et le ruissellement superficiel sont les deux principaux facteurs qui génèrent l'érosion hydrique.

De l'amont vers l'aval d'un versant, les processus érosifs sont différents selon le type d'érosion et les facteurs déclencheurs. Cependant, l'ensemble des processus érosifs peuvent être résumés en trois étapes : (1) Le détachement ou bien l'arrachement de la particule solide par la pluie (effet de splash) ; (2) le transport des sédiments par ruissellement et (3) la sédimentation (dépôt) des particules arrachées le long des rivières et des cours d'eau.

### I.4. LES PRINCIPAUX FACTEURS EROSIFS

L'identification et la connaissance des facteurs générateurs des processus érosifs en amont des cours d'eau est une démarche indispensable pour la bonne estimation de la dégradation spécifique. Ces facteurs sont nombreux selon la littérature mais sont souvent d'ordre climatique et physique :

#### I.4. 1. Agressivité des pluies

Les averses intenses jouent manifestement un rôle important dans le déclenchement des processus géomorphologiques relevant de l'érosion hydrique et ce en deux façons:

- Au point de contact avec le sol, les gouttes de pluie contribuent au rejaillissement de particules de terre, surtout lorsque l'intensité de pluie est plus forte [34]. En revanche, l'impact des gouttes de pluie modifie l'état de surface du sol, entraînant la formation du phénomène de battance qui réduit la perméabilité de la surface du sol.
- L'intensité des pluies conditionne le déclenchement du ruissellement superficiel par la saturation momentanée des pores du sol [34]. Toutefois, l'intensité n'est pas tout s'il se produit un épisode pluvieux à la suite de précipitations prolongées et/ou répétées, ceci se transforme fréquemment vers un facteur d'agressivité potentielle du milieu et confère une rythmicité saisonnière à certaines manifestations de la dynamique érosive [34].

Dans la littérature, il existe plusieurs indices d'érosivité du climat mais celui de Wischmeier (1959) est le plus fréquent dans les études hydrologiques:

$$R = E_g \times I_{30} = \sum (E_u \cdot h_i) \times I_{30} \quad (\text{m.t.m/ha.h}); \quad E_u = 210 + 0,89 \log_{10}$$



Où : **E<sub>g</sub>** est l'énergie cinétique globale en (m.Tonnes/ha) qui peut être représentée par l'énergie unitaires (**E<sub>u</sub>**) et des hauteurs d'eau précipitées (**h**) ; **I<sub>30</sub>**: intensité maximale en 30 min (mm/h).

### I.4. 2. Vulnérabilité des roches et érodibilité des sols

L'érodibilité signifie la sensibilité d'un sol nu à l'érosion pluviale. Ceci dépend de ses qualités intrinsèques: texture, structure, teneur en matière organique et la perméabilité [34], [40].

Par ailleurs, l'expérience des chercheurs ainsi que plusieurs études hydrogéologiques et lithologiques ont montrées que les formations meubles et les roches cohérentes sont directement érodables, dès lors que les conditions favorables seront réunies (couvert végétal absent ou clairsemé, entrée en action d'un agent d'érosion, topographie,...etc.). C'est le cas par exemple des marnes et les argiles qui sont très érodables [34]. En revanche, les roches compactes et dures tel que les calcaires ou les affleurements de grès ne pourront être érodés que si le matériel est préparé par altération et à travers les fissures et les diaclases [34].

Ont proposés un indice d'érodibilité du sol (**K**), qui est de la forme:

$$K = \frac{E}{R \times 2,24}$$

Avec :

**E** : Erosion en t/ha/an,

**R** : Indice annuel d'agressivité climatique.

### I.4. 3. La topographie

L'inclinaison et la longueur de la pente sont les principaux éléments topographiques qui interviennent dans les phénomènes de l'érosion [34]. Le degré d'inclinaison d'une pente favorise le déplacement des particules détachées vers l'aval par effet de splash. Il en est de même pour le ruissellement et le transport des particules, surtout sur un sol nu [34]. Sur des versants fortement inclinés, le ruissellement se concentre et peut devenir la cause principale de l'érosion, surtout en zone méditerranéenne [29].

Une étude estime que les pertes en terre croient de façon exponentielle avec le degré de la pente [43]. La relation est de la forme:

$$E = k \times S^b$$

Avec : **E**: Erosion en t/ha/an,

**k**: Constante correspondant aux conditions locales (type de sol, couvert végétal, dimensions de la parcelle, conditions climatiques particulières),

**S** : Pente en % ; **b**: Exposant qui varie entre 1,2 et 2,2.

En ce qui concerne la longueur des versants, plus le versant est long, plus le ruissellement superficiel s'accumule et se concentre pour atteindre une vitesse d'écoulement suffisante pour le transporter des matériaux solides.

Wischmeier and Smith (1960) ont proposés un abaque qui traduit les influences de la longueur et de la pente selon la formule suivante:

$$SL = \frac{\sqrt{L}}{100} \times (0,76 + 0,93 S + 0,076 S^2)$$

Où :

**L** : longueur de la pente exprimée en pieds (1 pied = 0,3048 m) ,

**S** : pente en %.

### I.4. 4. Occupation du sol

Le couvert végétal est efficace contre l'érosion puisqu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie, diminue l'effet de battance et contribue à réduire la vitesse du ruissellement à la surface du sol [34]. La végétation peut intervenir contre l'érosion hydrique de surface de deux manières: d'une part, elle peut empêcher l'ablation du substrat, d'autre part, elle peut favoriser la sédimentation, en retenant les sédiments érodés plus à l'amont [60].

Les zones forestières sont capables de réduire considérablement la pointe de crue et aussi de diviser en deux la quantité du volume ruisselé et ce d'une manière très rapide [14]. Cependant, des études ont montrées que l'érosion augmente avec le pâturage, responsable de la disparition partielle de la couverture végétale protectrice du sol, [63].

Les régions de cultures réagissent donc différemment à l'érosion en dépend de la typologie de la végétation, sa durabilité en longueur de l'année et de sa densité [34].

Il est à noter que la pratique de bonnes techniques culturales peut contribuer, à l'amélioration de la stabilité structurale du sol et à l'accroissement de sa perméabilité.

En résumé, la densité de la couverture végétale permet de déterminer l'existence ou non d'un éventuel ruissellement [34]. Certaines études supposent que pour une densité végétale inférieur ou égale à 70%, l'eau ruisselle en grande partie (ruissellement diffus ou concentré); au delà, l'eau percole et ne ruisselle plus, sauf s'il y a saturation des sols [60].

### I.4.5. l'activité humaine (Facteur anthropique)

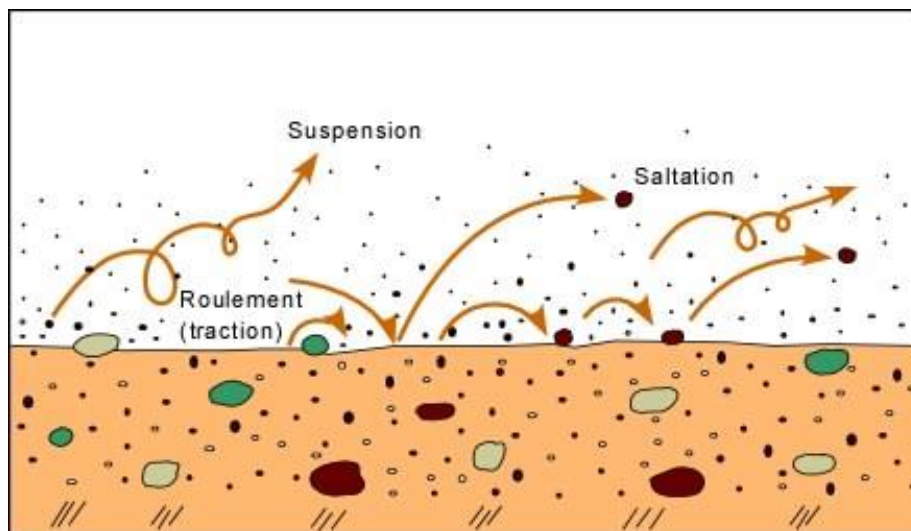
Certaines activités humaines peuvent facilement engendrer ou amplifier les processus d'érosion. Il s'agit principalement des opérations de déforestation qui diminuent la densité du couvert végétale et augmentent les ruissellements et donc le risque de dégradation des sols.

Nous mettons en lumière aussi le surpâturage qui provoque le tassement des sols, qui diminue la perméabilité, et accroît donc le ruissellement superficiel de l'eau. D'autres parts, l'élevage pastoral dégrade la végétation et favorise ainsi, la désertification.

### I.5. LE TRANSPORT SOLIDE

Les matières solides détachées sous l'effet de la précipitation et/ou le ruissellement, sont transportées par les cours d'eau jusqu'à la rivière principale. C'est la seconde phase du processus de l'érosion hydrique. L'énergie nécessaire pour acheminer le matériau précédemment désagrégé, est fournie principalement par la déclivité des versants et la pente des cours d'eau [65].

Le transport des éléments arrachés se fait de différentes façons: suspension, saltation ou bien par charriage (figure 9). Ce sont notamment les conditions bioclimatiques et le régime hydrologique des cours d'eau qui conditionnent les modalités du transport solide [65]. A cela s'ajoute la taille et la densité des particules [42].

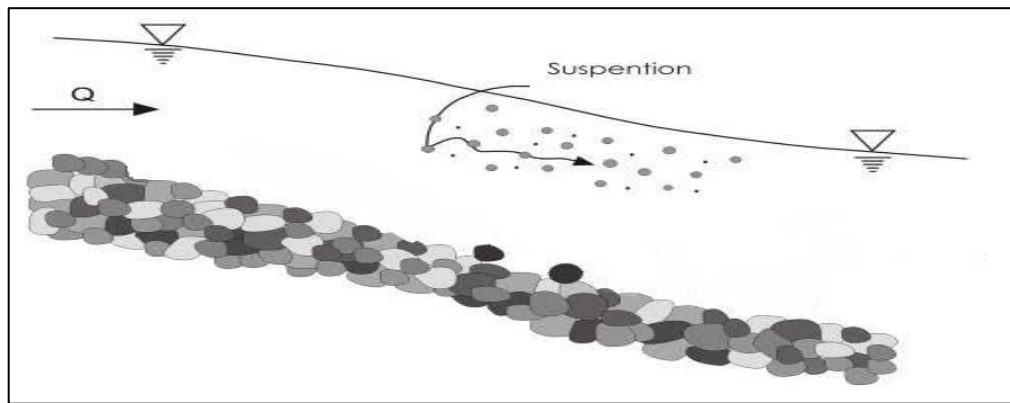


*Figure 9. Les différents types du transport solide dans les cours d'eau*

Source : <http://www2.ggl.ulaval.ca/>

#### I.5.1. Le transport solide en suspension

Le transport solide par suspension représente essentiellement le transport des sédiments fins (argiles, limons, sables fins) par les cours d'eau et les rivières. Ce phénomène est généré par la dynamique des écoulements de telle manière que les particules solides restent toujours en suspension le long de leur trajectoire. Les particules peuvent donc se déplacer sur de grandes distances à l'échelle du réseau hydrographique et leur vitesse de déplacement est du même ordre que celle du fluide (Figure 10).



**Figure 10.** *Processus de transport solide en suspension*

Source : <http://theses.univ-lyon2.fr>

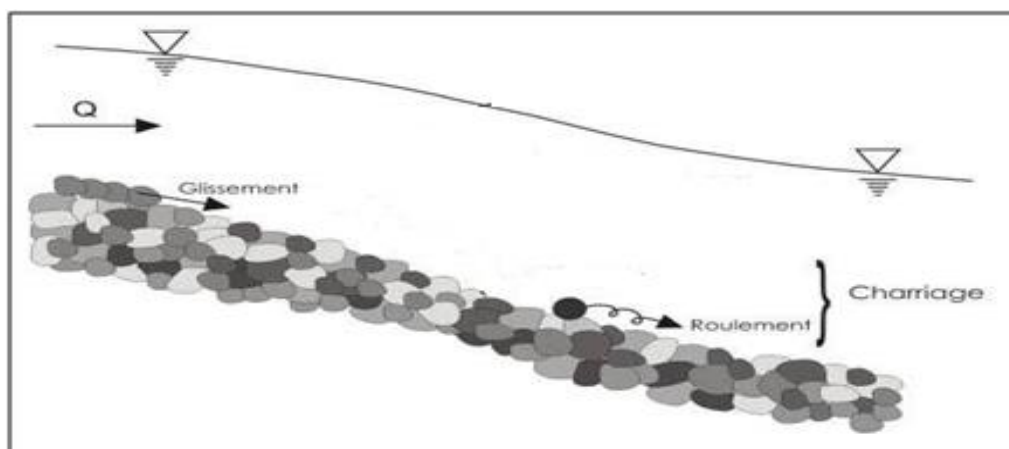
### **I.5.2. Le transport solide par saltation**

La saltation désigne les mouvements irréguliers de sauts d'un point à un autre. Ce mouvement semblable à un bond, désigne le mode transport des sédiments qui se trouvent au fond des cours d'eau. L'énergie de l'écoulement entraîne les particules solides (de la taille du sable ou du gravier) qui possèdent une masse volumique supérieure à celle de l'eau (figure 9).

### **I.5.3. Le transport solide par charriage**

Le transport solide par charriage concerne les sédiments grossiers (sables, graviers, galets et blocs de roche ....etc (figure 11). Ces derniers restent toujours en contact avec le fond des cours d'eau tout en se déplaçant par traction, glissement ou roulement.

Les matériaux charriés, parcourent des distances relativement courtes et discontinues dans le temps et dans l'espace [9], [68].



**Figure 11.** *Processus du transport solide par charriage*

Source : <http://theses.univ-lyon2.fr>

### I.6. TECHNIQUES DE QUANTIFICATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE

La quantification de l'érosion hydrique et du transport solide peut s'effectuer par plusieurs méthodes : Mesure directe dans les oueds; par l'utilisation de formules empiriques, par modélisation statistiques et/ou spatiotemporelle.

#### I.6.1. Techniques de l'ANRH pour la mesure directe sur terrain

La technique utilisée par ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques) pour mesurer la concentration de la matière en suspension débute par le prélèvement en un point unique soit sur le bord, soit au milieu de l'Oued au moyen d'un flacon de 1 litre [36]. 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 [36]. En période de crue, le nombre des prélèvements dépend des deux phases de l'événement:

- 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 période de décrue, on prélève un échantillon toutes les heures durant les six premières heures et toutes les deux heures ensuite [19]. 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 décantation, filtrage avec un filtre de type Laurent ( $\varnothing = 32$  cm) et séchage à l'étuve à  $110^{\circ}\text{C}$  durant 30 minutes et enfin la pesée. Les débits solides ( $Q_s$ ) en  $\text{Kg s}^{-1}$  sont déduits du produit des deux paramètres : débit et concentration.

#### I.6.2. Estimation de l'érosion par modélisation statistique (courbes de transport solide)

Depuis les années quarante, les chercheurs ont eu recours à développer des modèles statistiques reliant les débits solides ( $Q_s$ ) ou bien les concentrations ( $C$ ) aux débits liquides ( $Q$ ). Les travaux de Campbell and Bauder (1940) ainsi que ceux de Miller (1951) constituent les premiers exemples d'utilisation des courbes de transport solide sur les rivières des Etats-Unis d'Amérique. Ces études ont élaboré au début des relations Q-C pour estimer les débits solides sur une longue période d'écoulement.

D'après la littérature, la relation entre les concentrations des MES (C) et des débits liquides (Q) est souvent exprimée selon un modèle d'évolution en puissance et avec une transformation logarithmique [8], [21], [34], [36], [37], [73]. Ce modèle est de la forme :

$$C = a Q^b$$

Où : **a** et **b** sont les paramètres d'ajustement.

Par ailleurs, les modèles utilisant la relation débit solide ( $Q_s$ ) – débit liquide (Q), sont apparus pour l'estimation des apports solides. Ces derniers sont sous la même forme mathématique ( $Q_s = aQ^b$ ) soit une relation de puissance et [1], [16], [23], [33], [34], [59].

### I.6.3. Estimation de l'érosion par des formules empiriques

En absence de données de mesures de concentration, il est possible d'estimer, d'une manière approximative, la dégradation spécifique à l'échelle d'un bassin versant en utilisant des formules empiriques, mises en place par certains auteurs et qui sont valables, à la limite des conditions fixées.

#### a) *Formule de Demmak (1982):*

Demmak (1982) exprime la dégradation spécifique des bassins Algériens en fonction, des indices de précipitations, la lithologie et la torrencialité des cours d'eaux.

$$T_{ss} = 26,62 I_e + 5,071 IP + 9,77 C_t - 593,59 \text{ (T/km}^2\text{/an)}$$

Avec :

$I_e$ : indice lithologique (%),

$IP$  : indice des précipitations (%),

$C_t$ : coefficient de torrencialité ( voir chapitre II).

#### b) *Formule de la SOGREAH (1969)*

Cette formule est basée sur des données de 30 bassins algériens, de superficie comprise entre 100 et 300 km<sup>2</sup>, elle est représentée par l'équation ci-dessous :

$$A_{ss} = \alpha . E^{0.15} \text{ (A/km}^2\text{/an)},$$

Avec :

$E$  : Ecoulement moyen annuel (mm) ;

$\alpha$  : Coefficient dépendant de la perméabilité du sol.

Tableau 1. Valeur du coefficient  $\alpha$  selon le niveau perméabilité

Classe de perméabilité	Valeur de $\alpha$
Imperméable	3200
Perméabilité faible	1400
Moyenne à faible	350
Moyenne	75
Forte	8,5

### c) Formule de Tixeront (1960)

Cette formule est basée sur les données de 32 bassins Algériens et 9 bassins Tunisiens. Comme pour le modèle de SOGREAH (1969), le modèle de Tixeront (1960) relie l'érosion spécifique d'un bassin en (T/ km<sup>2</sup>/an) à l'écoulement moyen annuel (E en mm), en prenant, aussi en compte, la position géographique. Pour l'est de l'Algérie, la formule est définie comme suite :  $ASS = 92 E^{0,21}$  (T/km<sup>2</sup> /an ).

### d) Formule de Fournier (1960)

Fournier (1960) a développé un modèle pour estimer la dégradation spécifique d'un bassin versant en (T/km<sup>2</sup>/an), quel que soit son emplacement géographique, en utilisant les données de 104 bassins versants, situés dans différentes régions du monde. Le modèle de Fournier (1960) est défini par l'équation suivante :

$$AF = \frac{1}{36} \times \left( \frac{P_m}{P_{an}} \right)^{2,65} \times \left( \frac{D^2}{S} \right)^{0,46} \quad (\text{T/km}^2/\text{an})$$

Avec :

$P_m$  : Précipitation mensuelle du mois le plus arrosé (mm),

$P_{an}$  : Précipitation moyenne annuelle (mm),

D : Dénivelée moyenne (m),

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

### I.6.4. Estimations de l'érosion hydrique par modélisation spatiotemporelle

Avec le développement du SIG (Système d'Information Géographique) plusieurs modèles spatiaux pour l'estimation de l'érosion et de l'alea érosif ont apparus ces dernières

décennies. L'utilisation d'une interface graphique a révolutionné la modélisation hydrologique et les études menées sur les différents risques environnementaux.

Les modèles spatiaux de l'érosion qui existent en ce jour, peuvent prédire de façon qualitative et/ou quantitative, la dégradation des sols aussi bien à l'échelle spatiale que temporelle [18]. Les modèles les plus répandus sont : AGNPS (AGricultural Non-Point Source Pollution Model) [82], SWAT (Soil and Water Assessment Tool) [5] ; MMF (Morgan–Morgan–Finney) [52]; EUROSEM (The European Soil Erosion Model) [53], WEPP (Water Erosion Prediction Project) [24]; MESALES (Model d'Estimation et de Spatialisation d'Aléa Erosif) [41] ; CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) [39]...etc.

Il est à noter que la plupart de ces modèles sont inspirés du célèbre modèle USLE (Universal Soil Loss Equation) [81], initialement conçu aux Etats-Unis d'Amérique, à partir de données recueillies en 1950, à l'échelle parcellaire. Ce modèle a été par la suite adapté à l'échelle régionale [13].

Selon le mode de conception des modèles spatiaux, leurs objectifs, leurs estimations restent limitées dans le temps et/ou dans l'espace. De plus, selon les cas, la validation de certains modèles exige souvent de longues séries de mesures réelles sur terrain, ce qui rend leur application gênante, en cas de d'insuffisance de données.

D'après, De Vente & Posen (2005), les modèles d'érosion développés à une échelle donnée ne sont pas forcément applicables à une autre échelle. Il apparaît que les modèles à base physique (ceux qui utilisent des équations mathématiques déjà validée) sont plus adéquats pour décrire et prévoir la réponse d'un système à échelle d'un temps et à une région donnée.

### CONCLUSION

La recherche bibliographique entamée a démontré la difficulté qui peut y avoir pour le choix des méthodes de quantification et de modélisation de l'érosion. Cette difficulté est liée avec l'insuffisance des données hydrométriques notamment les mesures des concentrations en matière en suspension qui est très fréquent dans le réseau de l'ANRH.

La plupart des techniques de calcul du transport solide par suspension, exigent des séries de données continues et qui s'étendent sur des périodes assez longues. Il est donc impératif de s'adapter à cette situation et de posséder des données fiables et des séries d'observations continues à l'échelle temporelle.



## **Chapitre I : Synthèse bibliographique sur l'érosion hydrique**

---

Il en découle aussi de cette brève synthèse que le phénomène de la dégradation des sols dans l'est d'Algérie, est bien rependu. Les formes et les processus d'érosion sont diverses et assez complexes et dépendent des caractéristiques physico-géographiques et climatiques du milieu en question. Ceci nous ramène a évoquer d'une manière primordiale une analyse bien définie du terrain d'étude et de son climat pour permettre l'interprétation des formes et des processus d'érosion qui peuvent exister.

# **Chapitre II**

## **Contexte physique et géographique de la zone d'étude**

### INTRODUCTION

L'analyse du milieu physique permet d'expliquer l'ampleur et l'évolution du processus d'érosion sur ce dernier. L'influence de la topographie, la morphométrie et de la lithologie du terrain se fait sentir, d'une part, sur le façonnement du paysage et du réseau hydrographique et donc sur le régime hydrologique des cours d'eau, et d'autre part, sur l'érosion ainsi que sur le transport solide.

Par ailleurs, la sensibilité du milieu à l'érosion peut être réduite par la potentialité de la couverture végétale. C'est pourquoi, nous avons consacré ce chapitre à l'étude de certaines caractéristiques physiques et morphométriques du bassin de l'Oued Ressoul en relation avec l'érosion hydrique.

### II.1 APERÇU GEOGRAPHIQUE

Situé au Nord-est Algérien, l'Oued Ressoul fait parti du grand bassin de la Seybouse maritime (Figure 12). La zone d'étude se trouve précisément entre les longitudes 7°27'51" et 7°36'51" Est et entre les latitudes 36°33' et 36°41' Nord. L'Oued Ressoul est né de la confluence des Oueds Guis et Mouya, cette dernière coule dans une direction sud-ouest nord-est pour se jeter à la Seybouse aux environs de la ville d'El Hadjar (Wilaya d' Annaba). Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés à la partie amont de l'Oued Ressoul, celle contrôlée par la station d'Ain Barda drainant ainsi une superficie de 105 km<sup>2</sup> (Figure 12).

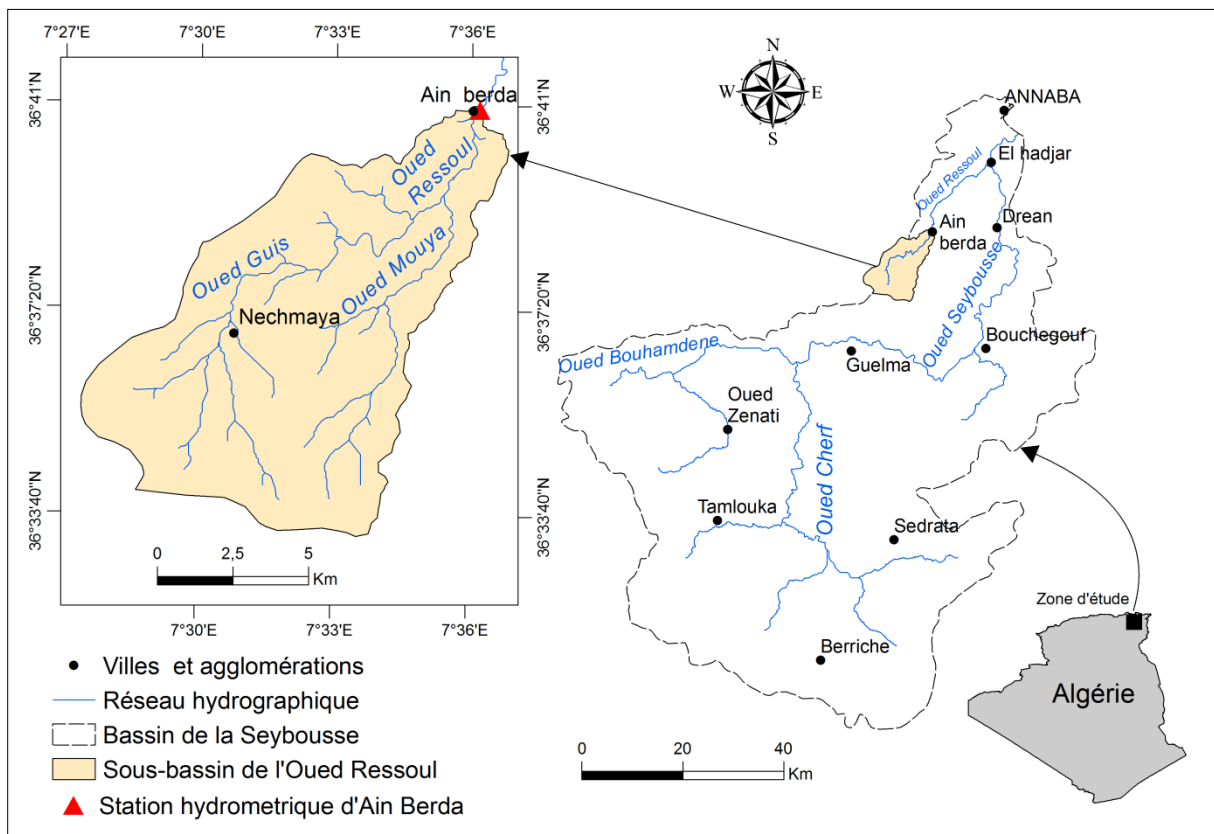


Figure 12. Situation géographique du sous-bassin de l'oued Ressoul

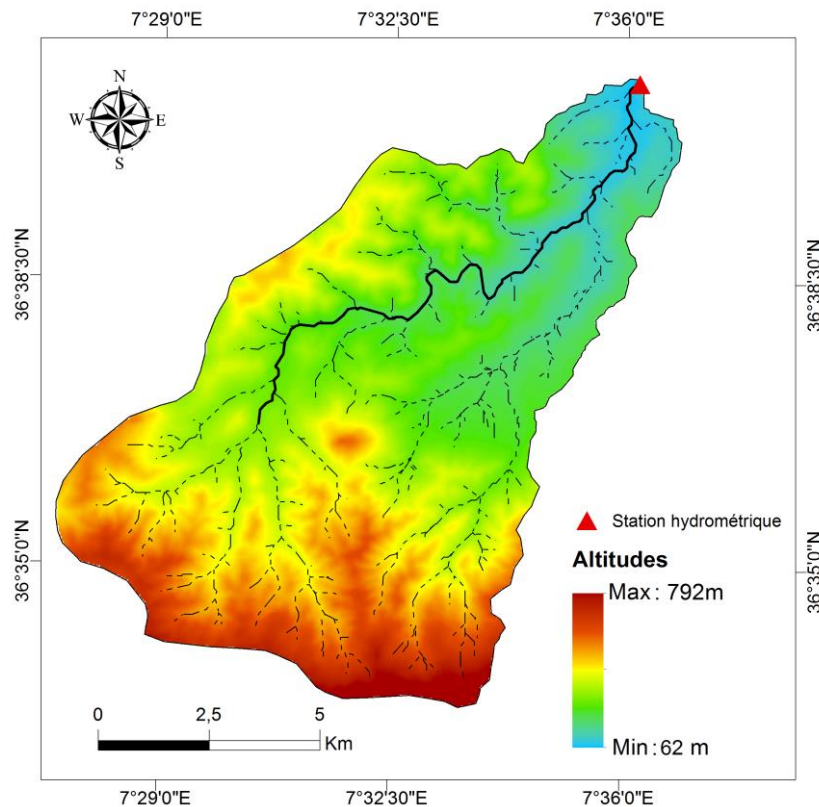
### II.2. CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES DE LA ZONE D'ETUDE :

L'utilisation d'un système d'Information Géographique (SIG) avec des données de la télédétection ont permis d'identifier le profil topographique du sous-bassin étudié. Un Modèle Numérique du Terrain (MNT) de type SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) avec une précision de 30m a été téléchargé et intégré dans l'interface de l'outil « ArcGis ».

Après différentes manipulations sur l'outil SIG, il a été possible de calculer plusieurs paramètres topographiques et morphométriques intéressants que nous citons ci-après :

#### II.2.1. Altimétrie

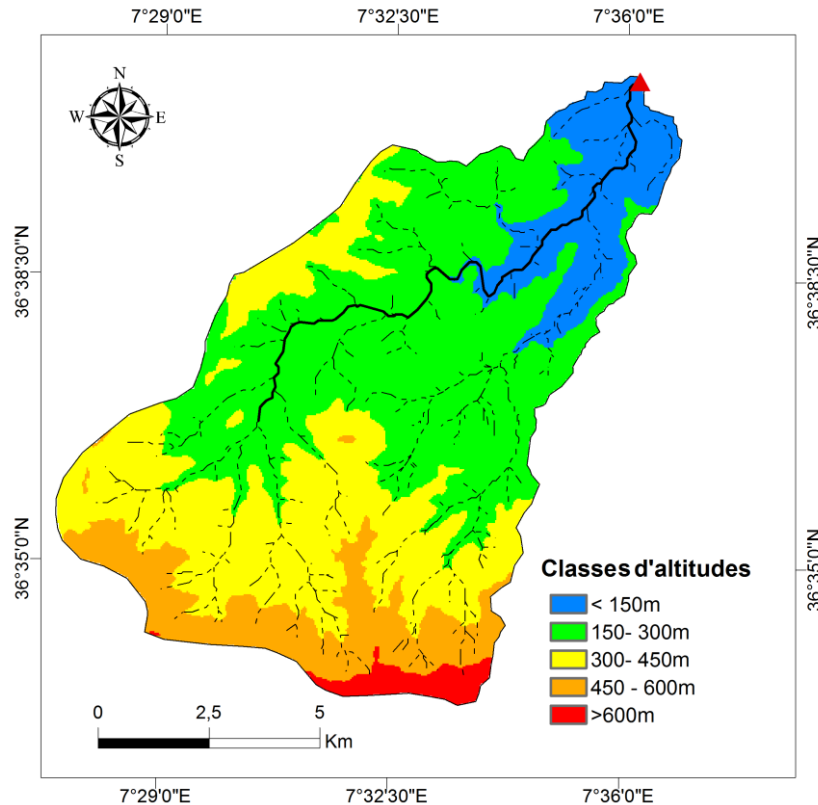
Le MNT téléchargé, montre un gradient altimétrique décroissant du sud vers le nord avec des valeurs d'altitudes variant entre 62 et 792 m mais l'altitude moyenne est estimée à 300m (Figure 13). Ces valeurs reflètent une altimétrie basse en générale sur l'ensemble du bassin mis à part les parties méridionales qui regroupent en majorité, les altitudes supérieures à la moyenne. Ce profil altimétrique est typique aux régions des basses plaines du nord-Est Algérien et en particulier celle des plaines d'Annaba.



**Figure.13** MNT du bassin de l'Oued Ressoul (SRTM -30×30m).

## Chapitre II : Contexte physique et géographique de la zone d'étude

Afin d'avoir une meilleure analyse de l'aspect altimétrique du bassin de l'Oued Ressoul, nous avons classifié les valeurs d'altitudes avec un pas moyen de 150m. De plus, les superficies de chaque classe ont été déduites à partir du SIG, ceci à permis une meilleure interprétation de la répartition spatiale des altitudes sur le domaine de l'Oued Ressoul (Figure 14).



**Figure 14.** Classes d'altitudes au niveau du sous-bassin de l'Oued Ressoul.

La carte ci-dessous montre une dominance flagrante des classes d'altitudes entre 150 et 450m (Figure 14). En effet cette tranche d'altitude occupe les trois quarts (75%) du bassin et se développe dans la partie centrale d'est en ouest. Les basses altitudes représentées par la classe (<150m) coïncident notamment sur la partie aval du bassin, cette dernière occupe une portion de 11% de la superficie totale du bassin.

Les altitudes extrêmes (> 600m) sont les moins ré pondues à l'Oued Ressoul, cette classe représente seulement 2 % de la superficie totale de ce dernier. Il s'agit des sommets qui culminent à l'extrême sud du bassin (Figure 14). Ces régions sont bordées au nord par une altimétrie plus au moins élevée correspondant à des altitudes variant entre 450 et 600m. Cette classe d'altitude représente 12% de la superficie totale.

### II.2.2. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique donne une approche globale sur le profil altimétrique du bassin, elle peut donc donner une première approche sur la situation générale du relief soumis aux différentes formes d'érosion (hydrique, éolienne....etc). Les pourcentages cumulés des surfaces comprises entre deux courbes de niveau successives sont portés sur l'axe des abscisses, tandis qu'en ordonnées, sont représentés les altitudes moyennes des classes d'altitudes correspondantes.

Nous avons utilisé un nombre de 8 classes d'altitudes pour densifier l'ensemble de points entre lesquels la ligne de la courbe sera tracée. Les données nécessaires au tracé de la courbe sont représentées dans le tableau 2 et la courbe correspondante est illustrée dans la figure 15.

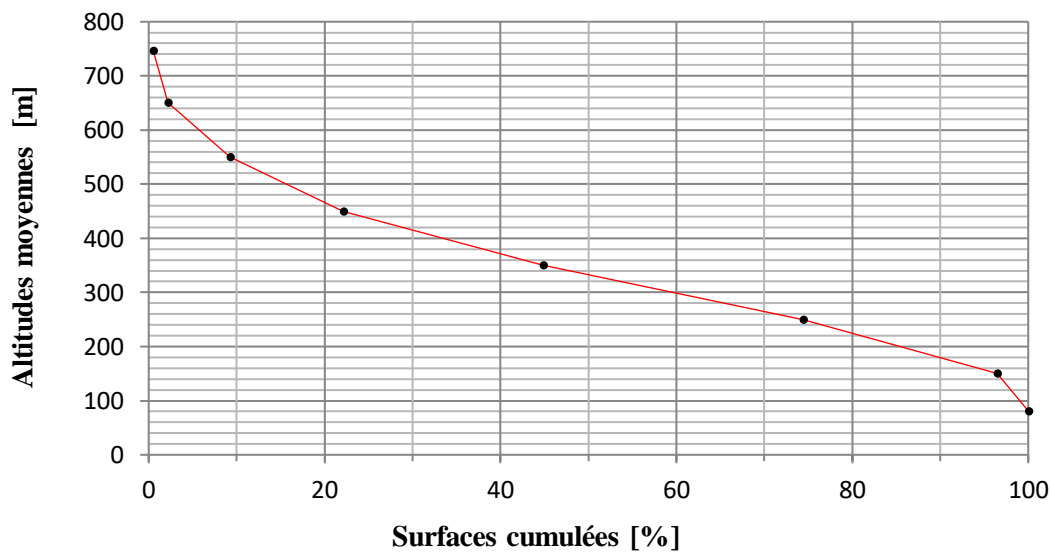
*Tableau 2. Données de calcul de la courbe hypsométrique*

Classes d'altitudes	Z (m)	Si (Km <sup>2</sup> )	Pi(%)	S (Km <sup>2</sup> )	P(%)
700-792	746	0,55	0,52	0,55	0,52
600-700	650	1,73	1,64	2,28	2,16
500-600	550	7,45	7,10	9,73	9,27
400-500	450	13,55	12,88	23,28	22,14
300-400	350	23,90	22,74	47,18	44,88
200-300	250	31,00	29,50	78,18	74,38
100-200	150	23,12	22,10	101,30	96,48
62-100	81	3,70	3,52	<b>105</b>	<b>100</b>

*Z*: Altitude moyenne de chaque classe; *Si*: Surface partielle occupée par chaque classe ;

*Pi* : Pourcentage des surfaces par rapport à la superficie totale du bassin ;

*S* et *P* sont respectivement les surfaces et les pourcentages cumulés des classes d'altitudes.



*Figure 15. Courbe hypsométrique du sous bassin de l'Oued Ressoul*

---

## Chapitre II : Contexte physique et géographique de la zone d'étude

---

La courbe hypsométrique (Figure 15) montre en général une forme convexe, cependant une légère concavité est observée à la fin de cette dernière indiquant la présence de pentes brusques ou des vallées encaissées à aval.

On note aussi que le début de la courbe est marqué par une très forte pente correspondant aux altitudes dépassant les 550m (Figure 15). Ce sont les régions montagneuses installées en amont du bassin. Avec la diminution des altitudes, la pente de la courbe s'adoucit progressivement sur une large partie de la superficie, ceci reflète la présence d'une succession de large vallées et de plaines basses à l'approche de l'exutoire.

Afin d'estimer la masse du relief qui n'est pas encore consommée par l'érosion, nous avons calculé l'intégrale hypsométrique (HI) à partir de la formule de **Pike and Wilson (1971)** :

$$HI = \frac{(H_{moy} - H_{min})}{(H_{max} - H_{min})} (\%)$$

$H_{moy}$ ,  $H_{max}$ ,  $H_{min}$  sont respectivement l'altitude moyenne, maximale et minimale du bassin exprimées en mètres.

Pour le cas du bassin de l'Oued Ressoul, la valeur d'intégrale hypsométrique est estimée à 32,60 % donc inférieure à 35% ce qui indique que ce dernier est dans un stade avancé de fin-maturité [10], [35], [65], [71].

C'est donc la phase Monadnock définie par **Strahler (1952)**, le paysage de l'Oued Ressoul semble donc dominé essentiellement par des plaines et des replats et de relief résiduel en installée dans notamment en amont du bassin [65], [71].

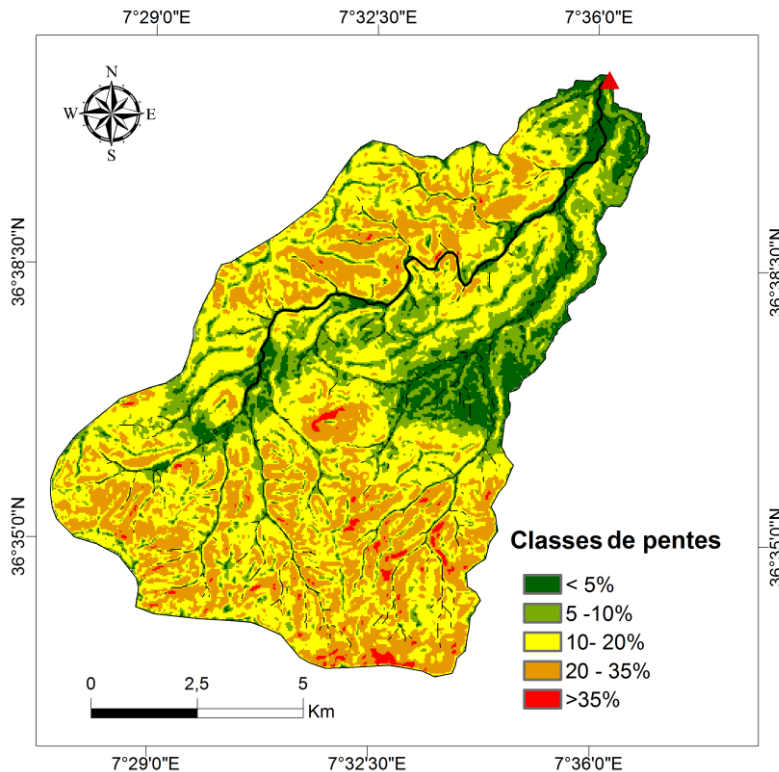
### II.2.3. Analyse de la répartition spatiale des pentes

Le calcul des pentes et l'analyse de la répartition spatiales des déclivités est fondamental pour la connaissance du potentiel morphogénique des bassins versants [34], [72]. C'est notamment l'ordre de grandeur des pentes et leur endroits dans le bassin qui va conditionner la dynamique érosive [34].

En dérivant le MNT précédemment utilisé (Figure 13) en fonction des distances planimétriques, il a été possible d'établir une carte des pentes aux limites du bassin de l'Oued Ressoul (Figure 16). Les pentes calculées à l'aide du SIG sont exprimées en pourcentages (Figure 16) ce qui a donné des valeurs variant entre 0 et 55%. Toutefois la pente moyenne du bassin est évaluée à 15%.

## Chapitre II : Contexte physique et géographique de la zone d'étude

Afin de faciliter l'interprétation des résultats et d'avoir une bonne représentation de la répartition spatiales des pentes au niveau du bassin étudié, il a été judicieux de regrouper l'ensemble des valeurs en 5 classes : < 5% ; 5-10% ; 10-20% ; 20-35% et > 35% (Figure 16).



**Figure.16** Carte des pentes du sous-bassin de l'Oued Ressoul.

Selon la carte des pentes (Figure 16) et le calcul des superficies (Tableau 3), on peut dire que les pentes entre 10 et 20 % occupent une proportion de 43% de la superficie totale du bassin. En deuxième ordre, ce sont les déclivités entre 20 et 35% qui s'imposent avec une proportion de 26 %.

Les classes de pentes les moins représentées dans le bassin, sont celles des valeurs extrêmes (< 5%) et (>35%). Ces dernières occupent respectivement 11% et 1% de la superficie totale du bassin (Tableau 3).

Les déclivités modérées (entre 5 et 10%) représentent quant à elle une portion non négligeable de 19%.

**Tableau 3.** Proportions de surface des classes de pentes

Classe de pente	Pentes [%]	Pourcentages [%]
Très faible	0 à 5	11
Faible	5 à 10	19
Modérée	10 à 20	43
Forte	20 à 35	26
Très forte	> 35	1



### II.3. CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES

Il existe dans la littérature plusieurs paramètres morphométriques pouvant contribuer à la compréhension des processus hydrologique et ceux du détachement, transfert des matières solides depuis l'amont vers l'aval des cours d'eau [28], [57], [61], [62], [66].

Dans ce qui suit, nous avons choisit de définir un certain nombre d'indices morphométriques intéressants, permettant d'appuyer, par la suite notre analyse de l'état de la dégradation des sols dans le bassin étudié.

#### II.3.1. Indice de compacité de Gravelius ( $K_c$ )

Cet indice morphologique permet d'identifier la forme générale du bassin, ce qui donne une idée globale sur l'influence de la forme de ce dernier sur la concentration et l'accroissement des flux hydrologiques. L'indice de Gravelus ( $K_c$ ) compare donc le périmètre du bassin par rapport à une surface de référence circulaire :

$$K_c = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Avec :

**P** : Périmètre du bassin versant (Km),

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

Pour des valeurs d'indice proches de 1, la forme est supposée quasiment circulaire, cependant pour des valeurs supérieures à 1, comme ce qui est le cas pour le bassin de l'Oued Ressoul ( $K_c = 1,31$ ), la forme du bassin est supposée allongée [65].

#### II.3.2. Longueur du rectangle équivalent ( $L$ )

La notion du rectangle équivalent permet elle aussi permet de différencier les bassins versants par rapport à leurs distances planimétriques. Cet indice peut être estimé par la formule de **Roche (1963)** qui donne l'équivalence de la forme du bassin par rapport à celle d'un rectangle ayant le même périmètre.

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \text{ (Km)}$$

Avec : **S** : Superficie du bassin versant (km<sup>2</sup>) ; **K<sub>c</sub>** : Indice de compacité de Gravelius.

La longueur du rectangle équivalent estimée pour le bassin de l'Oued Ressoul est estimée à 19,95 Km.

### II.3.3. Indice global de pente

Cet indice permet de caractériser d'une manière générale le relief du bassin étudié en rapportant la dénivelée altimétrique entre les courbes  $H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$  sur la longueur du rectangle équivalent précédemment calculé :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (\text{m/Km})$$

Avec :

**D** : Dénivelée entre  $H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$ , exprimée en mètres,

**L** : Longueur du rectangle équivalent (Km).

Depuis la courbe hypsométrique on obtient une dénivelée  $D = 455$  m, ce qui donne un indice globale de pente  $I_g = 22,80$  m/km.

### II.3.4. Dénivelée spécifique (Ds):

La dénivelée spécifique est un paramètre permettant de classer directement le relief du bassin selon des données empiriques (Tableau 4). Ce paramètre n'est autre que le produit de l'indice de pente global ( $I_g$ ) et la racine carrée de la superficie du bassin ( $S$ ) :

$$D_s = I_g \times \sqrt{S}$$

**Tableau 4.** Classification du relief selon la valeur des données de la FAO, 1996.

$D_s < 50$ m	Relief faible
$50 \text{ m} < D_s < 100$ m	Relief modéré
$D_s > 100$ m	Relief fort

La dénivelée spécifique estimée pour l'Oued Ressoul est de 234 m, ce qui implique donc un relief fort selon l'expérience de la FAO (Tableau 4).

### II.3.5. Densité de drainage

Ce paramètre donne une approche généralisée du mode d'interaction entre le milieu physique et le climat [61] [71]. Les surfaces à substrat résistant ou celles caractérisées par des capacités d'infiltration élevées possèdent des cours d'eau espacés et courts, et donc des densités de drainage faibles [71].

En revanche, quand la résistance ou la perméabilité de la surface décroît, le ruissellement devient plus important donnant des cours d'eau plus serrés et plus longs, et donc la densité de drainage tend à devenir plus élevée [71].

La densité de drainage ( $D_d$ ) est donnée par la formule suivante:

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad (\text{Km}^{-1})$$

Avec :  $\sum L_i$ : La somme des longueurs des cours d'eau (Km) ;  $S$  : Superficie du bassin (Km<sup>2</sup>).

Pour une longueur totale d'Oueds estimée à 141,37 km et une superficie de 105 Km<sup>2</sup>, la densité de drainage pour le sous-bassin de l'Oued Ressoul est évaluée à 1,35 km<sup>-1</sup>.

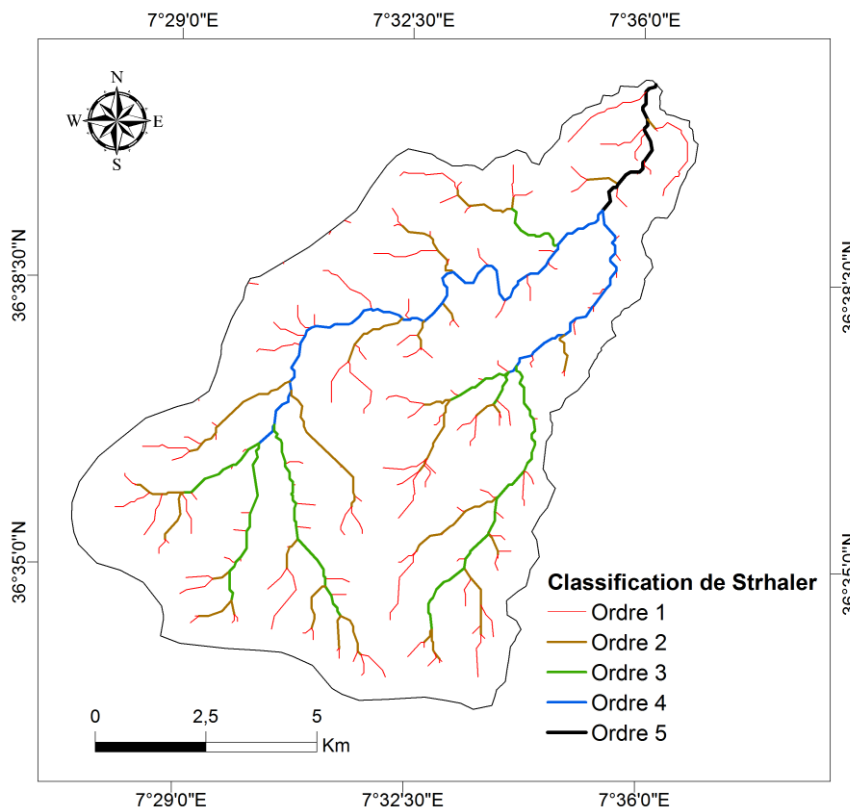
### II.3.6. Coefficient de torrentialité ( $C_t$ )

Le coefficient de torrentialité ( $C_t$ ) exprime l'effet de la fréquence des torrents ( $F_t$ ) par rapport à la superficie du bassin et à sa densité de drainage ( $D_d$ ). C'est le produit du nombre de cours d'eau d'ordre 1 par la surface du bassin ce qui explique au mieux l'intensité de l'érosion linéaire :

$$C_t = F_t \times D_d$$

D'où :  $F_t$  : Fréquence des talwegs,  $F_t = N_i/S$  (Km<sup>-2</sup>) ;  $N_i$  : nombre de talweg d'ordre 1 et  $S$  la surface du bassin (km<sup>2</sup>) ;  $D_d$  : Densité de drainage en km/km<sup>2</sup>.

En utilisant le SIG et en appliquant la classification de **Strahler (1952)**, on a pu classer et quantifier le nombre des cours d'eau selon leur numéro ordre (Figure 17).



**Figure 17.** Classification de Strahler (1952).

## Chapitre II : Contexte physique et géographique de la zone d'étude

Le nombre de cours d'ordre 1 est estimé à 142, ce qui donne une fréquence  $F_1 = 1,35 \text{ Km}^{-2}$  et donc un coefficient de torrentialité égal à 1,82 Km.

### II.3.7. Temps de concentration ( $T_c$ ) :

Le temps de concentration ( $T_c$ ) reflète le temps de parcours d'une goutte d'eau depuis le point le plus éloigné en amont du bassin versant vers l'exutoire. Plusieurs formules empiriques ont été développées pour le calcul de ce paramètre en fonction de la topographie et les distances planimétriques du réseau hydrographique, cependant pour des raisons de simplicité nous avons choisi d'utiliser la formule de Giandotti donnée par l'expression suivante :

$$T_c = \frac{4 \times \sqrt{S} + 1,5 \times L}{0,8 \times \sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \text{ (Heures)}$$

Avec :

- S** : Superficie du bassin versant ( $\text{Km}^2$ ),
- L** : Longueur du talweg principal (Km),
- $H_{min}$**  : Altitude minimale du bassin (m),
- $H_{moy}$**  : Altitude moyenne du bassin (m).

Selon la formule de Giandotti, le temps de concentration du bassin de l'Oued Ressoul est estimé à 6 heures.

Le tableau suivant donne un récapitulatif des paramètres topographiques et morphométriques calculés précédemment:

**Tableau 5.** Caractéristiques topographiques et morphométriques du bassin de l'Oued Ressoul.

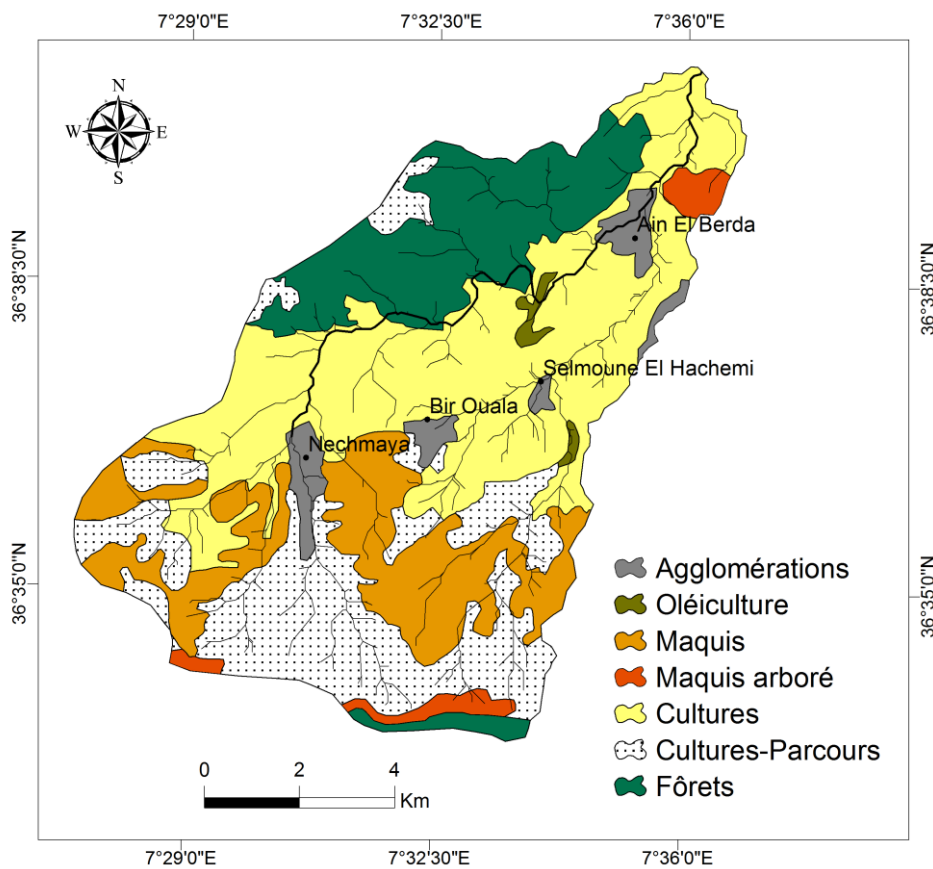
Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
S ( $\text{Km}^2$ )	105	L (Km)	19,95
P (Km)	48	$K_c$	1,31
$H_{min}$ (m)	62	$I_g$ (m/Km)	22,80
$H_{max}$ (m)	792	$D_s$ (m)	234
$H_{moy}$ (m)	300	$D_d$ ( $\text{Km}^{-1}$ )	1,35
$H_{5\%} - H_{95\%}$	455	$F_t$ ( $\text{Km}^{-2}$ )	1,35
HI (%)	32,60	$C_t$ ( $\text{Km}^{-3}$ )	1,82
$P_{moy}$ (%)	15	$T_c$ (heures)	6

### II.4. OCCUPATION DU SOL ET COUVERT VEGETAL

Plus la couverture végétale est dense, plus elle diminue l'action érosive relative au ruissellement agressif. Ce facteur joue donc un rôle important dans la protection du sol mais, en dehors de la densité de la végétation, sa typologie, d'autres facteurs peuvent interagir sur l'action protectrice du couvert végétal tel que les conditions topographiques et climatiques.

A partir des données cartographiques relatives aux travaux de Bouguerra (2018) et de Khanchoul (2006b), nous avons pu dresser une carte d'occupation du sol aux limites du bassin de l'Oued Ressoul.

La carte réalisée, résulte de la digitalisation de plusieurs cartes scannées (Figure 18).



**Figure 18.** Carte d'occupation des sols du sous-bassin de l'Oued Ressoul

Sources : Bouguerra (2018) et Khanchoul (2006b).

La carte ci-dessus fait ressortir sept différents types d'occupation du sol avec une dominance visible des espaces de cultures et de parcours. Cette typologie occupe 60 % de la superficie totale du bassin (Tableau 6). Les cultures sont pratiquées sur des plaines, le long des cours d'eau principaux et même sur des versants pentus (>10%). Il s'agit surtout de l'Oléiculture et des cultures donnant une couverture végétale peu dense laissant à l'eau la possibilité de décaper le sol et d'initier des formes de ravinement [35].

## Chapitre II : Contexte physique et géographique de la zone d'étude

Au sud du bassin, la carte indique que les régions cultivées sont traversées par des parcours utilisés surtout pour le pâturage (Figure 18).

Les maquis sont présent avec une portion de 19% de la superficie du bassin (Figure 18). Ce type d'occupation se présente le plus fréquemment sous forme de cistes et de lentisques. Les maquis les plus denses ou arborés, occupent les sommets boisés du sud et s'observent parfois sur les affleurements au nord recouvrent les basses collines du bassin. Au sud-est et ouest de la ville de Nechmaya, les maquis sont plutôt dégradés et couvrent surtout les vallées cultivées.

La carte (Figure 18) montre aussi la présence de forêts qui s'observent surtout à l'Ouest de la ville d'Ain Berda et sur quelques régions escarpées au sud du bassin (Figure 18). Ces dernières restent éparées, souvent sans sous-bois mais elle occupent quand même 17% de la superficie totale du bassin. Les zones forêts de l'Oued Ressoul regroupent essentiellement des pins d'Alep et des genévriers rouges [10], [35].

Le reste du paysages est correspond à des zones artificialisés regroupant un certain nombre d'agglomérations et de villes tel que : Ain berda, Nechmaya, Bir iouala et Selmoun el Hachmi (Figure 18).

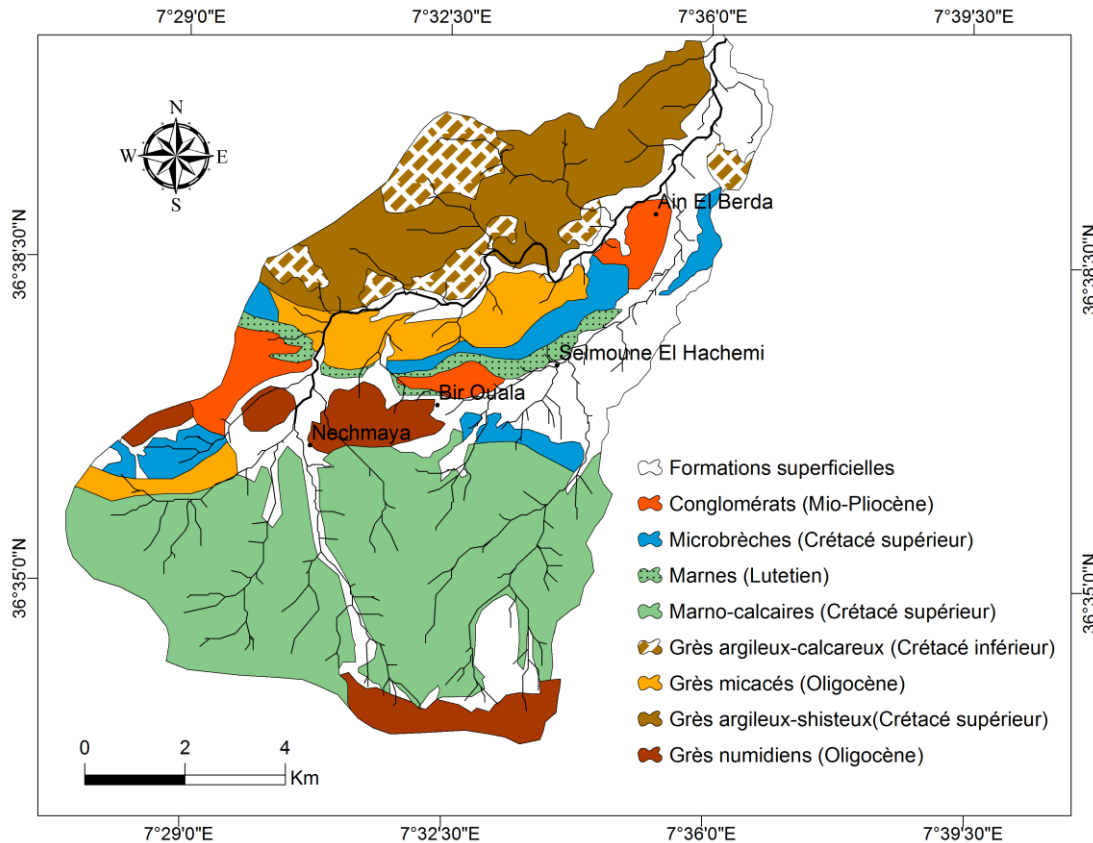
**Tableau 6.** Portion de surface des types d'occupation du sol à l'Oued Ressoul.

Type d'occupation de sol	Surfaces (Km <sup>2</sup> )	Pourcentages (%)
Cultures	38,85	37,00
Cultures-Parcours	24,15	23,00
Fôrets	17,85	17,00
Maquis	16,8	16,00
Agglomérations	4,2	4,00
Maquis arboré	3,15	3,00
<b>Total</b>	<b>105</b>	<b>100,00</b>

### II.6. LES ENSEMBLES LITHOLOGIQUES

L'analyse de la lithologie du bassin s'est référée à la carte géologique 1/50.000e ( Feuille 33) de l'Office National de Recherche Géologiques et Minières (ORGM). La digitalisation de cette dernière aux limites du bassin de l'Oued Ressoul à fait ressortir une carte des formations lithologiques de ce dernier (Figure 19). Cette dernière que le domaine de l'Oued Ressoul regroupe une lithologie assez variée.

Les ensembles tendres et facilement érodables tel que les marnes et des marno-calcaires d'âge Lutétien et Crétacé supérieur sont les plus rependues dans le bassin (Figure 19).



Ces formations occupent une portion de 38% et sont localisées au sud de Nechmaya et au nord de Bir Boualla (Figure 19).

Le long des cours d'eau principaux, nous remarquons plusieurs étendues de formations superficielles correspondant à des dépôts alluvionnaires (Figure 19). Ces alluvions représentent 21% de la superficie totale du bassin et forment des sols épais constitués essentiellement de sables, limons, cailloux roulés et de galets.

A l'Ouest d'Ain Berda et de part et d'autres de l'Oued Guis on observe une série de Grès très variée allant du crétacé inférieur à l'Oligocène. Il s'agit de grès argileux-calcaireux et parfois argileux-Shisteux ou micacés (Figure 19). En revanche, aux limites méridionales du bassin et aux environs de Nechmaya on remarque exceptionnellement des grès Numidiens (Figure 19).

La série de Grès s'imposent sur 32% de la superficie du bassin, ces roches sont considérées moyennement tendres donc peu vulnérables à l'érosion [10].

Le reste des ensembles lithologiques de l'Oued Ressoul (9%) reflètent des flyshs microbrèchiques (Priabonien-Oligocène et Sénonien) et conglomératiques (Sénonien).

## Chapitre II : Contexte physique et géographique de la zone d'étude

Les microbrèches au nord de Bir Bouali et de Semoune El Hachemi présentent des disharmonies importantes et apparaissent soit en surfaces érodées souvent en creux, soit en plis dissymétriques avec des monts éventrés [35].

Le flysch observés à l'Oued Ressoul comprend des conglomérats argileux de l'Eocène, et d'autres calcaireux plus épais d'âge Sénonien [35]. Les conglomérats argileux sont discontinus dans l'espace et forment le substratum des reliefs imposants comme ceux observés à Ain Berda (Figure 19). En revanche, les conglomérats calcaireux par leur dureté et leur disharmonie se présentent souvent en lanières.

**Tableau 7.** Portion de surface des formations lithologiques à l'Oued Ressoul.

Formations lithologiques	Surfaces (Km <sup>2</sup> )	Pourcentages (%)
Marno-calcaires (Crétacé supérieur)	37,8	36,00
Formations superficielles	22,05	21,00
Grès argileux-shisteux(Crétacé supérieur)	14,7	14,00
Grès micacés (Oligocène)	6,3	6,00
Grès numidiens (Oligocène)	6,3	6,00
Grès argileux-calcaireux (Crétacé inférieur)	6,3	6,00
Microbrèches (Crétacé supérieur)	5,25	5,00
Conglomérats (Mio-Pliocène)	4,2	4,00
Marnes (Lutetien)	2,1	2,00
<b>Total</b>	<b>105</b>	<b>100,00</b>

### CONCLUSION

Malgré une étendue réduite de seulement 105 Km<sup>2</sup>, le bassin de l'Oued Ressoul possède des caractéristiques physiographiques intéressantes et très variables dans l'espace.

L'analyse topographique dévoile une altimétrie basse avec une moyenne de 300 m. cependant les déclivités sont très élevées et implique un fort relief. En effet la pente moyenne est évaluée à 15% et en même temps, les pentes supérieures à 10% s'imposent sur environ 70% du paysage de l'Oued Ressoul. A cela s'ajoute un temps de concentration assez court (6 heures) ce qui implique éventuellement des écoulements très rapides et violents à l'exutoire.

La cartographie des formations lithologiques indique une grande hétérogénéité de faciès. Toutefois, les ensembles tendres et érodables tel que les marnes et les marno-calcaires sont malheureusement les plus ré pondues dans le bassin (38%).

Au regard de l'occupation du sol, on note que plus que la moitié du domaine de l'Oued Ressoul (60%) correspond à espaces de cultures. Ces régions impliquent un couvert végétal



## **Chapitre II : Contexte physique et géographique de la zone d'étude**

---

peu dense à longueur de l'année et insuffisant donc pour protéger le sol et ralentir les débits de pointes des violentes crues hivernales. De plus, les cultures se pratiquent sur des versants raides ce qui présente un danger pour la stabilité du milieu.

Ces interprétations nous ramènent à déduire que le bassin de l'Oued Ressoul est susceptible de fournir une érosion hydrique importante sur certaines régions. Toutefois l'analyse de l'interaction du milieu physique avec le climat et notamment les précipitations est une étape décisive pour en tirer des conclusions définitives.

# **CHAPITRE III**

## **Aspects climatiques**

### INTRODUCTION

En dehors des facteurs topographiques, morphologiques et lithologiques, la vulnérabilité du milieu physique à l'érosion est liée particulièrement aux variations climatiques, notamment ceux des précipitations. En effet, les précipitations constituent un facteur essentiel pour le déclenchement directe et/ou indirecte des processus d'érosion.

Les averses torrentielles qui peuvent se manifester d'une manière très brusques durant certaines périodes de l'année, génèrent, le plus souvent, des crues très violentes ayant des conséquences dramatiques sur les sols. La mesure des hauteurs précipitées durant ces événements extrêmes permet de prévenir contre les différents risques qui en découlent.

D'autres facteurs climatiques tels que la température et l'évapotranspiration peuvent aussi influencer la dégradation des sols. Ces paramètres interviennent sur la perméabilité des sols, le déficit ou l'excédent hydrologique et le développement de la couverture végétale.

L'insuffisance et parfois l'indisponibilité des séries d'observations thermiques et pluviométriques au sein du réseau d'observation de l'est Algérien est très fréquente. Ceci, nous impose malheureusement de réduire l'étendue de l'analyse en retenant seulement les observations fiables.

Nous discuterons donc à travers ce chapitre, le climat de l'Oued Ressoul, notamment son régime pluvieux. Nous essayerons également d'identifier le type du climat et d'identifier les périodes de l'année auxquelles se manifestent les événements climatiques les plus menaçants pour les sols.

### III.1. DONNEES PLUVIOMETRIQUES ET HYDROMETRIQUES RECEUILLIS

Le données pluviométriques et thermométriques disponibles aux limites du bassin-versant de l'Oued Ressoul, appartiennent à l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, (ANRH).

Etant donnée la faible densité du réseau de l'ANRH à travers le territoire national et vu la superficie réduite du bassin de l'Oued Ressoul (105 Km<sup>2</sup>), on dénombre à l'intérieur du périmètre du bassin étudié, qu'une seule station pour les observations pluvio-thermiques.

Il s'agit de la station d'Ain Berda située au nord du bassin plus précisément dans la localité qui porte le même nom (Figure 20).

*Tableau 8. Caractéristiques des stations pluviométriques et hydrométriques.*

Type de station	Nom	Longitude (DMS)	Latitudes (DMS)	Altitudes (m)
Pluviothermique	Ain Berda	7°34'51,063"E	36°39'26,14"N	85



**Figure 20.** Localisation des stations de mesure pluviométriques et hydrométriques

La collaborant avec l'ANRH de Constantine, à rendue possible la collecte d'un ensemble de données de mesure des précipitations et de températures journalières et aussi mensuelles.

Après dépouillement des données, nous avons retenue uniquement les série de mesure continues allant de 1979/80 à 1996/97 et ce pour l'ensemble des paramètres. Cet intervalle de 18 années successives, représente une période commune pour les mesures des précipitations, températures et des écoulements. Ceci permettra aussi de réaliser par la suite, des comparaisons et des corrélations entre les différents paramètres étudiés.

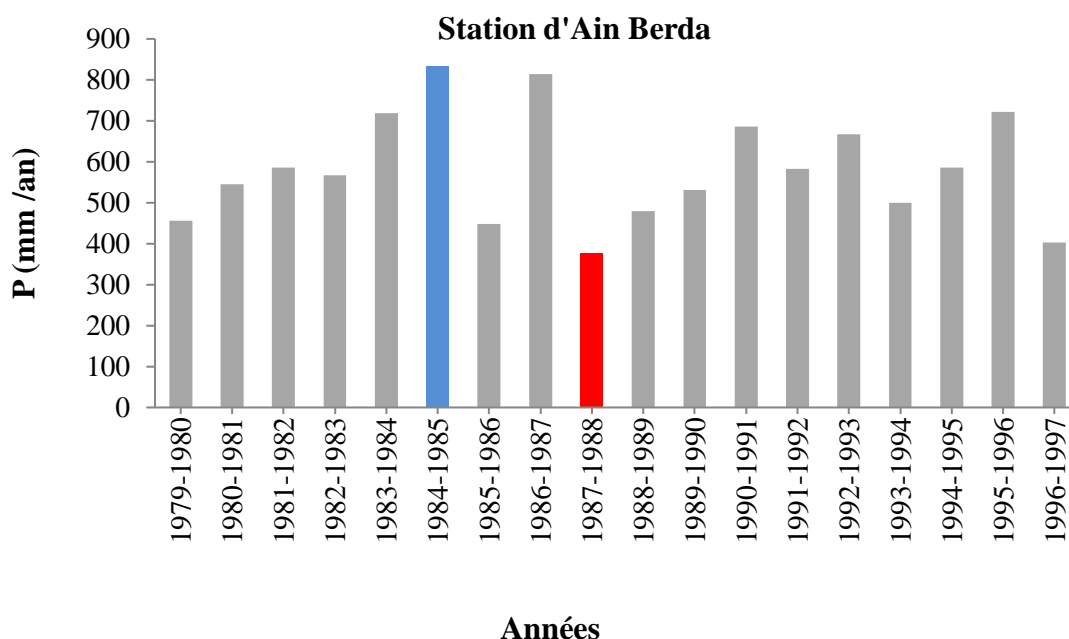
### III.2. VARIABILITE TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS

#### III.2.1. A L'échelle annuelle

A partir des observations journalières, nous avons calculé les cumuls annuels des précipitations sous Hydraccess V4.6. Les valeurs des modules interannuels de la période d'observation varient entre 378 et 833 mm/an, cependant la précipitation moyenne annuelle des 18 années est estimée à 583 mm (Figure 21).

La variabilité interannuelle des précipitations est peu signifiante, elle est marquée par un coefficient de variation assez faible  $CV = 23\%$  ( c-à-d le rapport de l'écart type et de la moyenne).

Comme le montre la figure 21, le module pluviométrique le plus élevé est celui de l'année 1984/1985. Cette année extrême humide a généré une tranche de pluie correspondant à un dépassement d'environ 43% de la pluviométrie moyenne annuelle de la période d'observation.



**Figure 21.** Variabilité interannuelle des précipitations-Période 1979/80-1996/97.

L'année hydrologique 1984/1985 est caractéristique pour les bassins de l'est de l'Algérie ; elle a été déjà identifiée comme une année extrême humide dans la plupart des bassins de l'Est algérien [35]; [46]; [72]; [73].

A l'opposé, la période 1987/88 correspond à l'année extrême sèche de toute la période d'observation (Figure 21). Le module annuel, estimé pour cette année déficitaire, correspond à -35% de la précipitation moyenne annuelle.

Pour affiner l'analyse des cumuls annuels des précipitations, nous avons procédé à l'identification des années sèches et humides de la période 1979/80-1996/97 en calculant le coefficient de pluviosité ( $C_p$ ). Ce dernier n'est autre que le quotient des cumuls de chaque année sur le module annuel de toute la période.

Les années hydrologiques ayant des valeurs de  $C_p > 1$  correspondront ainsi à des années humides. En revanche les années sèches auront des valeurs de  $C_p < 1$  comme le montre le Tableau 9.

L'analyse des valeurs calculées du coefficient de pluviosité indique que le nombre des années sèches dépasse celui des années humides. En effet, on dénombre 10 années sèches et 8 années humides. Ces résultats impliquent aussi une tendance décroissante du régime pluviométrique du bassin de l'Oued Ressoul durant les 18 années d'observation.

**Tableau 9.** Classification des années sèches et humides de la période d'observation.

	Années	$C_p = P_i/\bar{P}$	Nombre		Années	$C_p = P_i/\bar{P}$	Nombre
Années sèches	1979-1980	0,78	10	Années humides	1981-1982	13	8
	1980-1981	0,93			1983-1984	1,23	
	1982-1983	0,97			1984-1985	<b>1,43</b>	
	1985-1986	0,76			1986-1987	1,39	
	1987-1988	<b>0,65</b>			1990-1991	1,17	
	1988-1989	0,82			1992-1993	1,14	
	1989-1990	0,91			1994-1995	13	
	1991-1992	0,99			1995-1996	1,24	
	1993-1994	0,86					
	1996-1997	0,69					

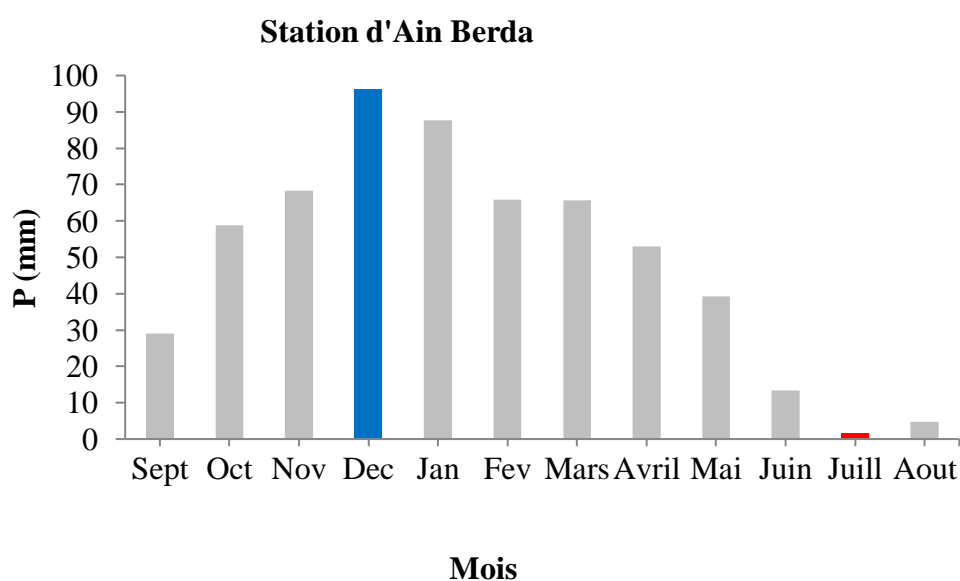
$P_i$  : Cumul annuel de précipitation (mm),

$\bar{P}$  : Précipitation moyenne annuelle de la période d'observation (mm).

### III.2.2. A L'échelle mensuelle et saisonnière

L'irrégularité des pluies et celle d'autres facteurs thermiques (Température, ETP etc.) à l'échelle mensuelle, influence le régime mensuel et saisonnier des cours d'eau et, en conséquence, le comportement hydrologique annuel de ce dernier [72].

Contrairement à ce qu'on l'on a constaté à l'échelle annuelle, la variabilité des précipitations moyennes mensuelles et saisonnières est plus significative. En effet, les valeurs du coefficient de variation sont égales à 107 et 65 % respectivement.



**Figure 22.** Variabilité mensuelles des précipitations- Période 1979/80-1996/97.

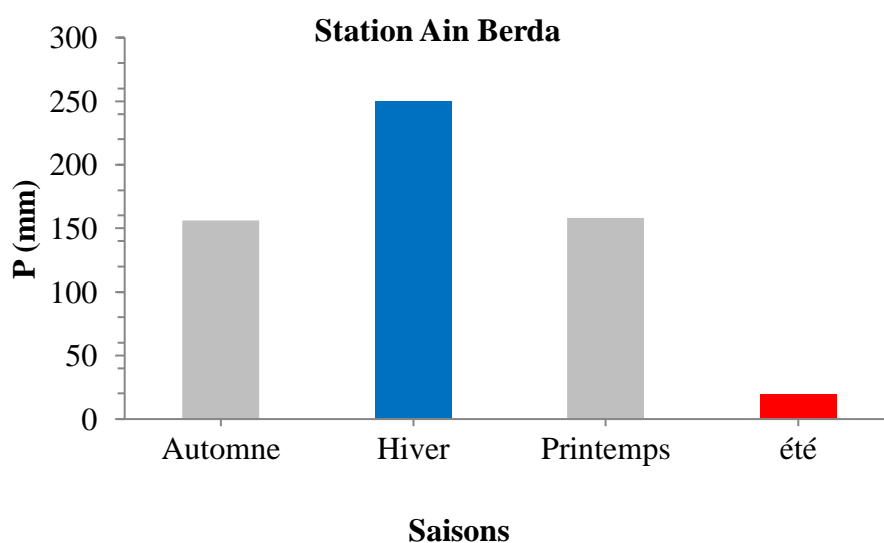
### Chapitre III : Aspects climatiques

La figure 22, montre que le mois de décembre est visiblement le mois le plus humide de l'année. La pluie moyenne durant ce mois a atteint 96mm, soit le double de la moyenne mensuelle du bassin. A l'opposé, le mois de juillet représente le mois le plus sec de l'année, sa pluviométrie moyenne est assez faible (1,42 mm).

Dans l'ensemble, on peut dire que le régime pluvieux mensuel du bassin de l'Oued Ressoul est caractérisé par une augmentation brusque de la précipitation, depuis le mois de septembre, pour atteindre un seuil maximal entre les mois de décembre et de janvier. Après cette apogée, les pluies marquent une diminution progressive jusqu'en été où elles deviennent très faibles (Figure 22).

Avec une telle abondance pluviale durant le mois de décembre, il est évident que la période d'hiver est celle la plus humide de l'année (Figure 23). La précipitation moyenne de cette saison est estimée à 250mm ce qui correspond à 43 % de la précipitation moyenne annuelle du bassin.

Durant la saison du printemps, la précipitation moyenne diminue d'environ -37% par rapport à celle de l'Hiver pour atteindre 158mm. Cette hauteur moyenne est comparable à celle de la période automnale qui est égale à 156 mm. A partir de la fin du printemps, le gradient pluviométrique saisonnier diminue brusquement entre la saison du printemps et de l'été, avec un écart important de -87%. Avec une telle diminution, l'été marque une nette individualisation caractérisant la période la plus sèche de l'année. La hauteur moyenne de pluie estimée pour la saison estivale est de seulement 20 mm ( Figure 23).



**Figure 23.** Variabilité saisonniers des précipitations -Période 1979/80-1996/97.

### III.2.3. Pluies journalières extrêmes et averses génératrices de crues

Ce sont les pluies journalières extrêmes qui déclenchent les crues génératrices de transport solide [34]. Les hydrologues supposent, d'une façon arbitraire, que des hauteurs d'eau précipitées, supérieures ou égales à 30 mm pendant 24 heures, correspondent à des pluies torrentielles [34]; [45].

Par ailleurs, certains événements pluvieux peuvent enregistrer des hauteurs d'eau nettement plus importantes que 30 mm en 24heurs. De ce fait, nous avons, également, pris en considération les fréquences des hauteurs supérieures ou égales a 50mm en 24 heures, pour identifier les pluies les plus extrêmes dans le bassin.

Le tableau ci-après donne le nombre des jours pluvieux ; le nombre des observations des hauteurs journalières inférieures à 30 mm et celles dépassant les 30mm et même les 50 mm.

Les valeurs du tableau 10 confirment que les mois de décembre et de Janvier sont les mois le plus humides de la période 1979/80-1996/97. En effet, on dénombre 217 jours pluvieux durant le mois de décembre et 216 jours pluvieux durant le mois de Janvier (Tableau 10).

Toutefois, le mois de décembre se démarque par rapport à celui de Janvier et des autres mois de l'année par rapport au nombre d'averses génératrices de crues ( $\geq 30$  mm) qui est égal à 12.

Il est à noter que les hauteurs de pluies journalières maximales ne coïncident pas forcément avec la saison humide d'Hiver. Les maximas sont observés durant la période d'automne d'où 93 mm en Novembre de l'année 1992 et 87 mm en Octobre de l'année 1982 ( Tableau 10).

De plus, le nombre des événements extrêmes ( $\geq 50$  mm) le plus élevé (2) est observé durant la période d'automne notamment durant les mois d'Octobre et de Novembre. En hiver, seul le mois de Janvier enregistre deux événements extrêmes avec un pic de 54 mm (Tableau 10). Cette valeur est nettement inférieure aux maximas observés durant les mois Octobre et Novembre (87 et 93 mm successivement).

Durant la saison du printemps les hauteurs de pluies journalières n'ont jamais excédées les 40 mm à l'exception d'un seul événement excédentaire enregistrant 72 mm observé le 24 mai de l'année 1992 (Tableau 10). En mêmes temps, on a observé une récurrence non négligeable d'événements pluvieux ( $< 30$  mm) qui se manifeste régulièrement entre mars et mai.

Les périodes estivales de la période d'observation ont enregistré seulement 111 jours pluvieux.



## Chapitre III : Aspects climatiques

L'ensemble de ces événements correspondent à des hauteurs < 30 mm. Comme il a été déduit précédemment, le mois de juillet est le plus sec de l'année, ceci se confirme par un faible nombre de jours pluvieux en ce mois correspondant à seulement 13 (Tableau 10).

*Tableau 10. Fréquences des tranches de pluies journalières- période 1979/80-1996/97.*

Mois	N <sub>br</sub> JP	N <sub>br</sub> < 30mm	N <sub>br</sub> ≥ 30mm	N <sub>br</sub> ≥ 50mm	PJ <sub>max</sub> (mm)	Date d'observation
Sep	97	97	0	0	28	24/09/1995
Oct	149	142	5	2	<b>87</b>	28/10/1982
Nov	184	176	6	2	<b>93</b>	03/11/1992
<b>Dec</b>	<b>217</b>	204	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>78</b>	21/12/1988
Jan	<b>216</b>	209	5	2	54	26/01/1991
Fev	192	185	7	0	41	12/02/1987
Mars	186	183	3	0	34	15/03/1991
Avril	164	162	2	0	38	29/04/1996
Mai	117	113	3	1	<b>72</b>	24/05/1992
Juin	62	62	0	0	22	25/06/1981
<b>Juill</b>	<b>13</b>	13	0	0	11	01/07/1992
Aout	36	36	0	0	11	04/08/1990
Total	1633	1582	43	8	/	/

*N<sub>br</sub> JP* : Nombre de jours pluvieux pour un mois donné durant la période d'observation,

*N<sub>br</sub>< 30mm* : Nombre d'événements ayant une hauteur inférieure à 30 mm en 24h,

*N<sub>br</sub> ≥ 30mm* : Nombre d'événements avec une hauteur supérieure ou égale à 30 mm en 24h,

*N<sub>br</sub> ≥ 50mm* : Nombre d'événements avec une hauteur supérieure ou égale à 50 mm en 24h,

*PJ<sub>max</sub> (mm)* : Pluie journalière maximale observé pour le mois considéré.

### III.3. FACTEURS EVAPO-THERMIQUES

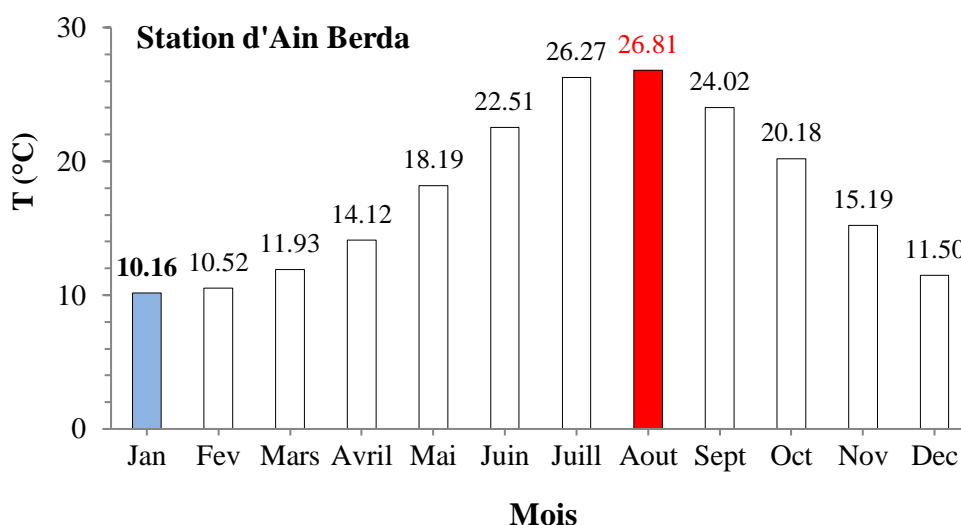
#### III.3.1. Régime et variabilité pluvio-thermique

Rappelons que les mesures de températures journalières ont été récoltées au sein de la même station d'Ain Berda. Les moyennes annuelles calculées pour la période 1979/80-1996/97 varient entre 17 et 19 °C. En revanche, la valeur moyenne annuelle est égale à 17,62 °C pour la période des 18 années.

### Chapitre III : Aspects climatiques

L'analyse de la variabilité annuelle des températures moyennes indique une valeur très faible du coefficient de variation égale à 3,2%.

A l'échelle mensuelle, la variabilité des températures est plus significative ( $C_v = 35\%$ ). De plus, les valeurs des températures mensuelles montrent une croissance progressive à partir du mois de janvier pour atteindre un pic de 26,81°C durant le mois d'Aout (figure 24). Cette distribution reflète un écart d'environ 17°C entre mois le plus chaud (Aout) et le mois le plus frais (Janvier).



**Figure 24.** Variabilité mensuelles des températures -Période 1979/80-1996/97.

A l'échelle saisonnière, il est évident que l'Hiver est la saison la plus froide de l'année, la température moyenne de cette période est estimée à 10,73°C.

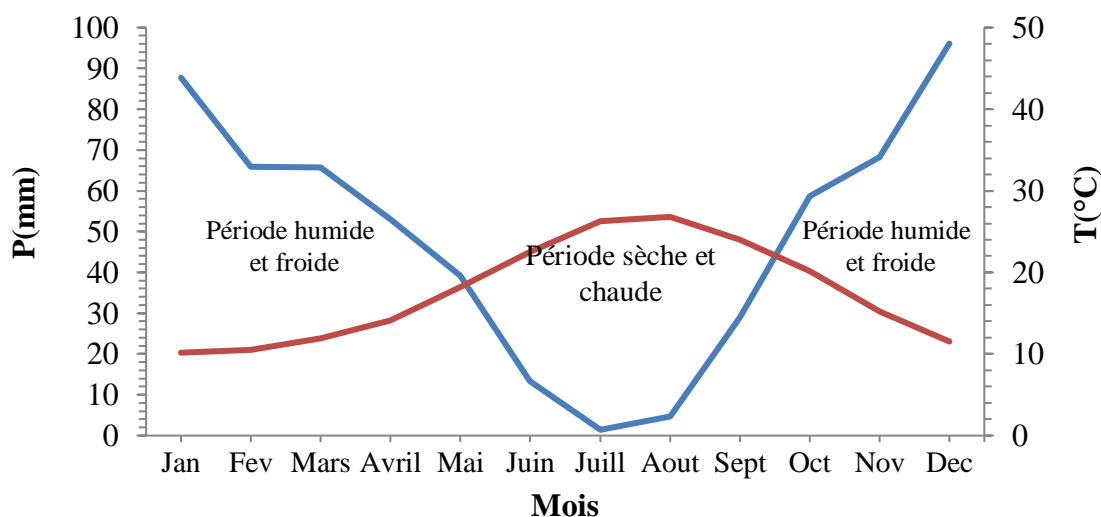
Par contre, durant le printemps les températures s'adoucies légèrement mais la température moyenne de cette saison reste légèrement en dessous de celle de l'année 14,75°C.

Contrairement à l'Hiver, la saison estivale marque la période la plus chaude de l'année avec une température moyenne de 25,19 °C. Les fortes températures de l'été diminuent peu à peu à partir de l'automne mais restent tout de même au dessus de la moyenne annuelle, notamment durant les mois de septembre et octobre. Ce n'est qu'à partir de la fin du mois de novembre que les températures chutent brusquement (figure 24).

Afin d'affiner notre synthèse climatique et de mieux caractériser le climat de l'Oued Ressoul, nous avons confronté les précipitations et les températures mensuelles dans un diagramme ombro-thermique (figure 25).

## Chapitre III : Aspects climatiques

Le diagramme ombro-thermique met en évidence une période sèche et chaude qui débute à partir du mois de mai et qui se termine en mi-septembre. Durant cette période, les averses torrentielles se font de plus en plus rare au fur à mesure qu'on s'approche du mois de Juillet. Sous l'effet de la chaleur et de l'évapotranspiration, les sols se retrouvent asséchés durant cette période, ce qui facilite le détachement de la matière solide en cas d'apparition d'averses brusques à la fin de l'été.



*Figure 25. Diagramme ombro-thermique de la station d'Ain berda -Période 1979/80-1996/97.*

A partir de la fin du mois de septembre débute une période humide et froide. Cette période est caractérisée par une chute brusque des températures et par la manifestation de plusieurs épisodes pluvieux qui provoquent la saturation progressive des sols ce qui accroît les ruissellements superficiels et donc l'érosion hydrique sur les sols éroda blés.

Il est à noter que la couverture végétale qui se développe durant la période du printemps peut réduire plus au moins l'action érosive des crues provoquées par ces averses torrentielles.

### III.3.2. Evapotranspiration potentielle

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) permet d'estimer la tranche d'eau susceptible d'être évaporée par le couvert végétal et donc sur le potentiel absorbant du sol.

Un taux annuel d'ETP élevé implique un déficit hydrique important d'autant plus que la hauteur d'eau annuelle précipitée est inférieure à celle évaporée.

Selon la formule utilisée, la hauteur d'ETP exprimée généralement en millimètres, peut dépendre de plusieurs facteurs en plus des facteurs météorologiques et géographiques.

### Chapitre III : Aspects climatiques

Toutefois, la variabilité des facteurs évapo-thermiques et climatiques durant l'année agricole peut avoir des influences plus ou moins importantes sur les écoulements fluviaux et, donc, sur l'érosion hydrique des sols à court et à long terme. Ces facteurs peuvent interagir différemment sur les régions du bassin, selon leurs nuances géographiques

Pour des raisons de simplicité et compte-tenu des données qui sont à notre disposition, les valeurs de l'évapotranspiration potentielle ont été déduites à partir du bilan hydrique de Thornthwaite (1948) :

$$ETP = 16 \times \left[ \frac{10 \times \bar{T}}{I} \right]^a \times K \quad (\text{mm})$$

Avec:

ETP : Hauteur d'évapotranspiration moyenne du mois en millimètre,

$\bar{T}$  : Moyenne interannuelle des températures du mois, exprimée en degrés Celsius,

a : Exposant égale à :  $0,016 \times I + 0,5$

I : Indice thermique annuel :  $I = \sum_{m=1}^{12} i(m)$  ;  $i(m) = \left( \frac{T}{5} \right)^{1,514}$  ;

T : température moyenne du mois considéré

K : Correction dépendant de la latitude (durée maximale d'ensoleillement).

Pour le cas de l'Oued Ressoul nous avons pris les valeurs de « K » correspondant à 36° de longitude. Les hauteurs moyennes de l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculées selon Thornthwaite pour la station d'Ain Berda sont représentées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 11.** Valeurs mensuelles de L'ETP pour une longitude égale à 36°.

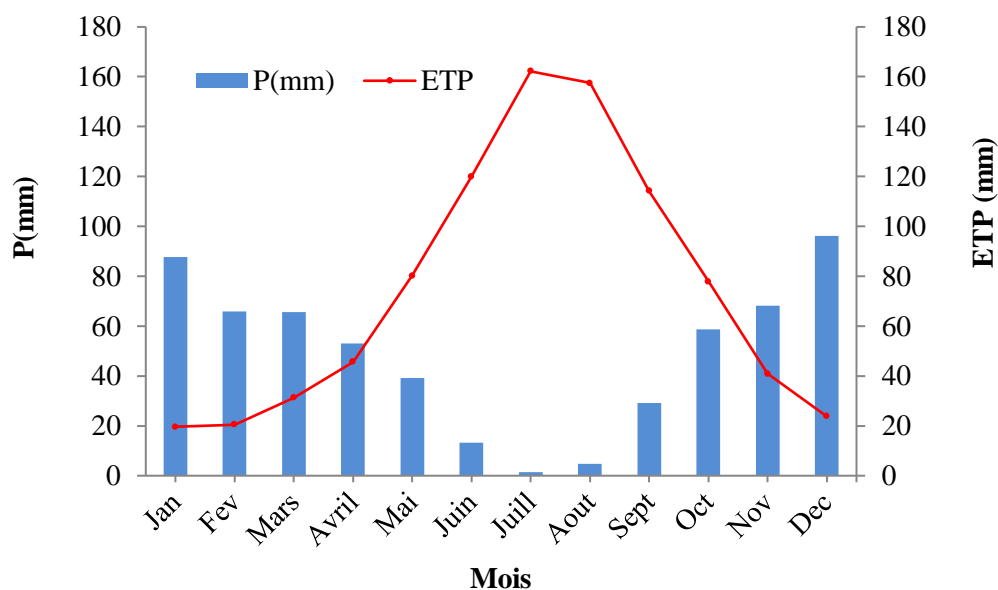
	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Année
T(°C)	10,16	10,52	11,93	14,12	18,19	22,51	26,27	<b>26,81</b>	24,02	20,18	15,19	11,50	17,62
k	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	1,03	0,97	0,86	0,84	/
i	2,93	3,08	3,73	4,82	7,06	9,76	12,32	12,71	10,76	8,27	5,38	3,53	/
ETP (mm)	19,64	20,45	31,28	45,66	80,20	119,95	<b>162,18</b>	157,52	114,20	77,90	40,84	23,85	<b>893,67</b>
P(mm)	87,68	65,90	65,69	53,03	39,26	13,31	<b>1,42</b>	4,76	29,08	58,74	68,28	<b>96,08</b>	<b>583,24</b>
ETP - P	<b>-68,04</b>	-45,45	-34,41	<b>-7,37</b>	40,94	106,64	<b>160,76</b>	152,77	85,12	19,16	-27,44	-72,24	<b>310,43</b>

La hauteur moyenne de l'ETP, estimée pour la période allant de 1979/80-1996/97 est relativement importante et est égale à 893,67 mm/an. Cette moyenne est nettement supérieure au module pluviométrique annuel du bassin qui est de 583,24 mm/an.

L'analyse de la variabilité des valeurs de l'ETP et celles des précipitations mensuelles fait ressortir deux périodes bien distinctes : un semestre durant lequel les hauteurs de

précipitations dépassent celles de l'ETP (entre Octobre et Mai) et un semestre déficitaire pendant lequel il se produit l'inverse (Figure 26).

Les valeurs de l'ETP deviennent plus faibles pendant les mois froids et pluvieux et augmentent progressivement avec le développement de la végétation au cours de la saison du printemps et sous l'effet de l'augmentation des températures. L'augmentation de l'ETP s'interrompt durant le mois d'Aout où elle atteint un pic de 162mm (Figure 26).



**Figure 26.** Variabilité de l'ETP et des précipitations mensuelles- Période 1979/80-1996/97.

Le rapprochement entre les hauteurs de l'ETP et des précipitations se produit durant le mois d'avril avec un écart absolu de seulement 7,37 mm (Tableau 11).

### III.4. ETAGE BIOCLIMATIQUE DE L'OUED RESSOUL

Afin de définir le climat de la zone étudié, nous nous somme référé au quotient pluviotermique (Q) d'Emberger (1955). Cet indice est largement utilisé pour identifier les climats des régions méditerranéennes. La formule utilisée par l'auteur tient compte de la pluviométrie moyenne annuelle, ainsi que de la température extrême du mois le plus froid et celle du mois le plus chaud.

$$Q = \frac{2000 * P}{(M + m + 546.3) * (M - m)}$$

Avec :

**P** : Précipitation moyenne annuelle [mm],

**M** : Température moyenne maximale du mois le plus chaud [°C],

**m**: Température moyenne minimale du mois le plus froid [°C],

### Chapitre III : Aspects climatiques

L'identification de l'étage bioclimatique se fait par représentation graphique du couple (Q, m) sur le climagramme pluviothermique dressé par le même auteur (Figure 27).

La valeur du quotient (Q) est représentée sur l'axe des ordonnées pour définir le type du climat. En revanche, la rudesse de la saison hivernale est définie par la valeur (m) représentée sur l'axe des abscisses (Figure 27).

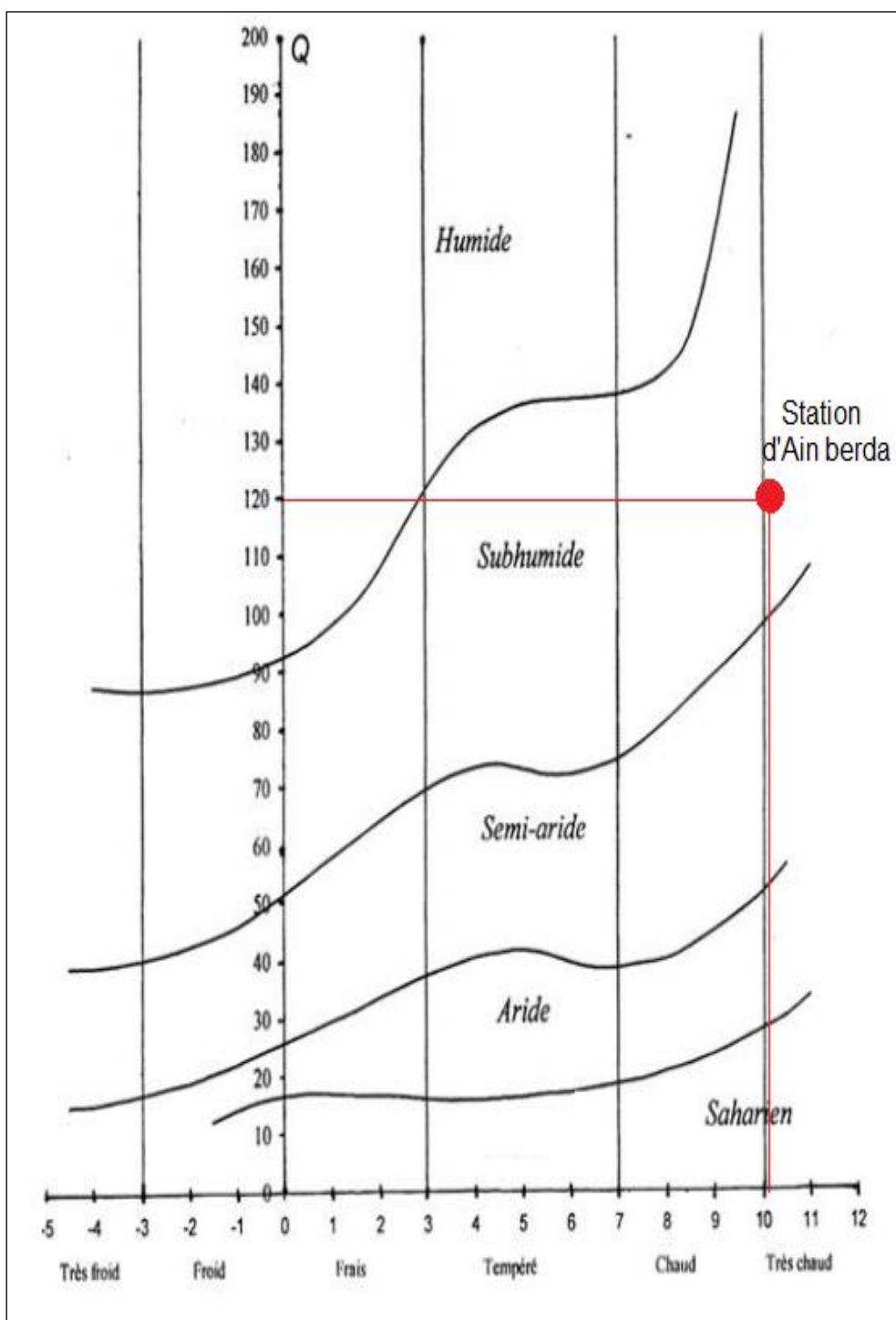


Figure 27. Climagramme pluviothermique d'Eemberger 1955.

### CONCLUSION

La synthèse climatique réalisée dans ce chapitre a permis d'identifier les grands traits du climat du bassin versant de l'Oued Ressoul en l'occurrence son caractère pluvieux. L'analyse du régime pluvio-thermique du bassin fait ressortir un caractère de l'étage sub-humide avec un module pluvieux de 583mm/an et une température moyenne de 18°C.

Comme pour la plupart du bassin de l'est Algérien, la variabilité des précipitations à l'échelle annuelle est marquée par la pluviosité de l'année extrêmement humide 1984/85. Le cumul pluvieux de cette période a atteint 833mm. Bien que la précipitation moyenne annuelle de la période d'observation soit importante, le climat de l'Oued Ressoul semble soumis à des températures élevées notamment durant la période estivale. En effet, durant le mois le plus chaud (Aout), la température moyenne avoisine les 27°C.

L'irrégularité des précipitations n'est significative qu'à l'échelle mensuelle et saisonnière. Le régime pluvieux annuel de l'Oued Ressoul semble être soutenu par l'abondance des pluies enregistrée durant la saison hivernale (250mm). Le mois le plus humide (Décembre) enregistre une hauteur moyenne de 96mm soit environ 16,5% du module annuel.

A la fin de l'Hiver, les valeurs des précipitations moyennes mensuelles diminuent progressivement pour enregistrer des minimas pendant de l'été, notamment durant le mois de juillet qui est considéré le plus sec (1,42mm).

A l'échelle journalière, on dénombre 1633 jours pluvieux durant la période des 18 années d'observation ce qui correspond à une moyenne de 90 jours pluvieux par an. Parmi ces événements, on note un taux de 97 % correspondant à des averses ayant des hauteurs < 30mm en 24h. Les averses torrentielles, susceptibles de générer des crues violentes ( $\geq 30$ mm en 24 h) représentent seulement 3 % des événements pluvieux.

Le nombre le plus important de jours pluvieux durant la période d'observation est celui du mois le plus humide (décembre) avec un total de 217 jours. Par contre, les valeurs extrêmes des précipitations journalières (> 50mm en 24h) ne concordent pas forcément avec la période la plus humide de l'année. Elles sont plutôt très fréquentes en période automnale et peuvent générer des hauteurs très importantes entre 87 et 93 mm en 24h (entre Octobre et Novembre).

En fin, Il en ressort de la confrontation des précipitations moyennes mensuelles et des modules thermiques une période humide et froide débutant à partir de la deuxième quinzaine de septembre jusqu'au moi de mai et une période sèche et chaude correspondant au reste des mois de l'année.

# **Chapitre IV**

**Hydrologie et**

**quantification du**

**transport solide en**

**suspension**



### **INTRODUCTION**

La réponse hydrologique d'un bassin-versant dépend des processus et du mode d'interaction entre les facteurs climatiques et physiologiques locaux, dont la plupart ont été discutés précédemment. Les écoulements sont le résultat de la transformation des pluies en débit. En revanche, les flux sédimentaire résultent des processus érosifs générés par l'énergie de l'écoulement ou bien de l'érosivité des précipitations. Les particules solides sont transportées par les cours d'eau vers l'aval du bassin.

La mesure des quantités liquides et solides transportées présente dans les rivières, représente donc, une étape cruciale pour la compréhension du comportement hydrologique et hydro-sédimentaire d'un bassin-versant. C'est justement le but recherché dans ce chapitre qui évoquera tout d'abord une analyse des flux hydrologiques du sous-bassin de l'Oued Ressoul puis une démarche de quantification des apports solides qui s'acheminant à l'exécutoire de ce dernier.

Plusieurs formules empiriques et des approches statistiques ont été évoquées pour rechercher les meilleures approximations possibles concernant l'estimation des apports solides véhiculé par l'Oued Ressoul.

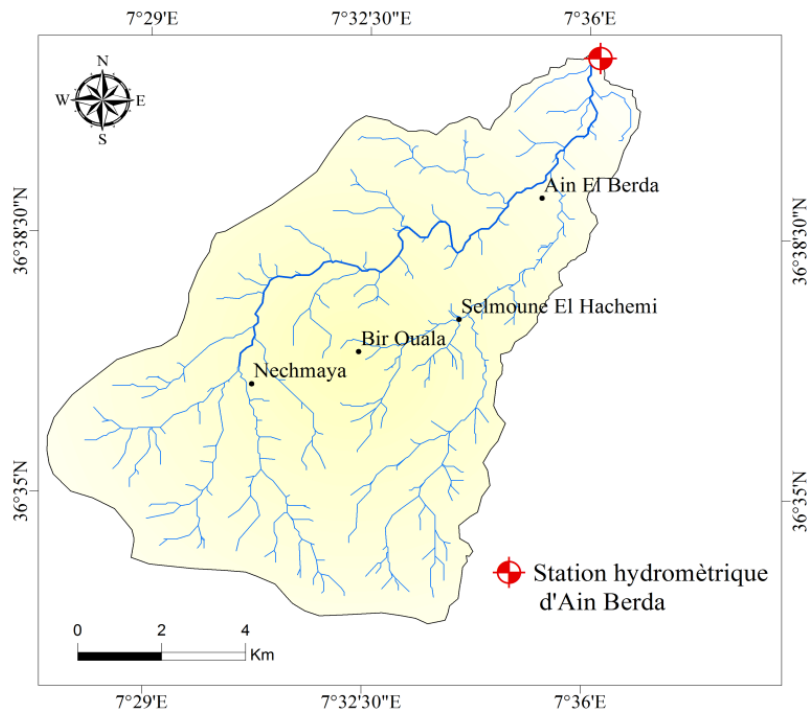
### **VI.1. LES DONNEES HYDROMETRIQUES RECEULLIES**

Après un entretien effectué avec les agents de l'ANRH, il s'avère que le sous-bassin de l'Oued Ressoul dispose d'une seule et unique station hydrométrique installée en son aval (figure 28). Il s'agit de la station d'Ain Berda, identifiée sous la codification « 140602 ».

La station hydrométrique en question, effectue des mesures des débits liquides et solides mais avec des protocoles relativement archaïques comme pour la plupart des stations hydrométriques exploité par les services de l'ANRH. Les débits sont relevés à l'aide de déversoirs, alors que les hauteurs d'eau sont prises au moyen d'une échelle limnigraphique.

Par ailleurs, le protocole de mesure des concentrations en MES et les débits solides, est semblable à celui cité dans le chapitre I (page 14). Les données hydrométriques récoltées auprès de l'ANRH de Constantine, relatives à la station d'Ain Berda concerne des :

- mesures des débits journaliers en ( $m^3/s$ ),
- des mesures instantanées des débits des crues en ( $m^3/s$ )
- des mesures instantanées des concentrations en matière en suspension en (g/l).



*Figure 28. Localisation de la station hydrométrique d'Ain Berda.*

Selon la fiabilité des données et d'après ce qui a été discuté dans le chapitre précédent, nous avons retenues seulement les séries d'observation qui s'étalent sur la même une période que celle des mesures pluvio-thermiques ; celles comprise entre 1979/80 et 1996/97.

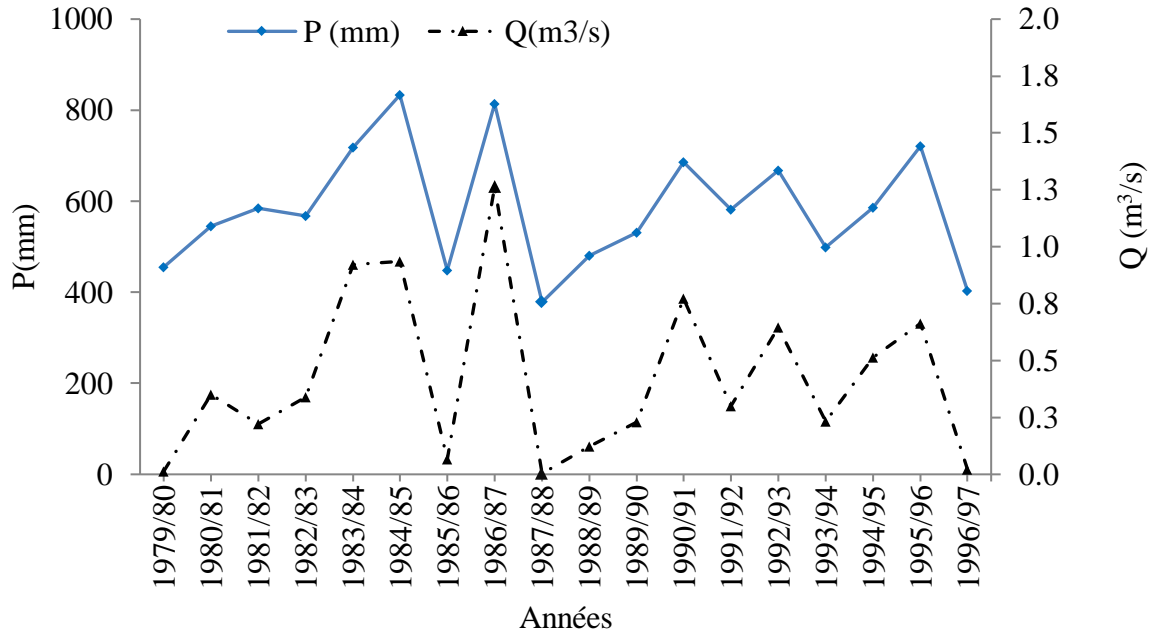
## VI.2. CARACTERE HYDROLOGIQUE DE L'OUED RESSOUL

### VI.2.1. Variabilité annuel des débits liquides

Le débit moyen annuel de l'Oued Ressoul à la station d'Ain Berda a été calculé sur la base la des débits journaliers et mensuels de la période considérée. Ce dernier est égal à  $0,42 \text{ m}^3/\text{s}$  ce qui correspond à un débit spécifique de  $4 \text{ l/s/km}^2$ .

L'analyse montre que les débits annuels varient d'une manière très irrégulière d'une année à autre ( $C_v = 0,87$ ), ces derniers oscillent entre  $3,8 \times 10^{-3}$  et  $1,26 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figure 29). Cette irrégularité du régime hydrologique annuel est fortement liée à celle des cumuls pluvieux, aux conditions d'alimentation des cours d'eau et aussi au temps de concentration du bassin.

Le graphique (figure 29) montre, dans l'ensemble une bonne corrélation entre les précipitations et les débits annuels. Cependant, la période excédentaire en écoulement (1986/87) ne coïncide pas avec l'année extrême humide (1984/85). Seule, l'année extrêmes sèche (1987/88) correspond exactement à l'année déficitaire en écoulement ( Figure 29).



**Figure 29.** Variabilité annuelle des précipitations et des débits Période (1979/80-1996/97).

Notons que l'année excédentaire en écoulement (1986/87) a générée un débit équivalent à 3 fois le module annuel du bassin. Cet excédent est lié a un cumul pluvieux important de 813 mm, cette hauteur est très proche de celle observée durant l'année extrême humide 1984/85.

### VI.2.2. Ecoulement moyen annuel et coefficient de ruissellement du bassin

Afin d'appuyer l'analyse du comportement hydrologique de l'Oued Ressoul, nous avons calculé certains paramètres intéressants tel que le coefficient de ruissellement ( $C_R$ ) et la hauteur ruisselée ( $L_e$ ). Le coefficient de ruissellement, n'est autre que le rapport de la lame d'eau écoulee à celle précipitée.

Les valeurs du coefficient de ruissellement reflètent au mieux l'influence des facteurs physico-géographiques sur les ruissellements superficiels. Ce paramètre peu être calculé a différentes échelles temporelle et il est souvent exprimé en pourcentage (Mebarki, 1982).

En premier lieu, nous avons calculé, la lame d'eau moyenne annuelle ruisselée ( $L_e$ ) en millimètres, à partir de la grandeur débit moyen annuel déjà connue :

$$L_e \text{ (mm)} = \frac{Q_{\text{moy}}}{S} \times T \times 10^{-3}$$

D'où:

$Q_{\text{moy}}$  : Débit moyen annuel en  $\text{m}^3/\text{s}$  ;  $S$  : Superficie du bassin en  $\text{Km}^2$ ,

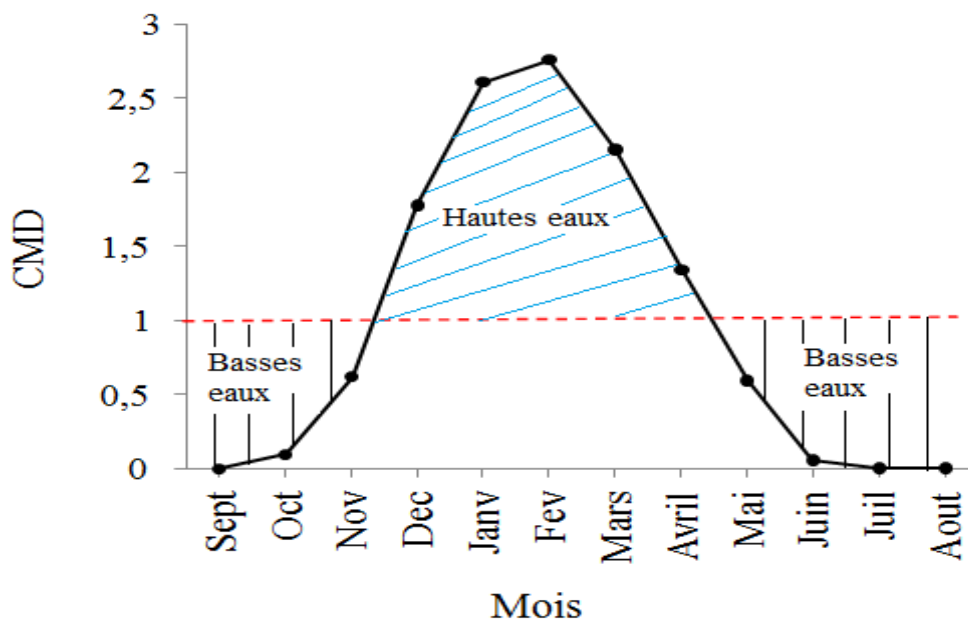
$T$  : Temps ou nombre de seconde dans l'année.

La lame moyenne annuelle ruisselée est estimée à 126 mm/an. Donc pour une pluviométrie moyenne annuelle de 583,24 mm/an, le coefficient de ruissellement  $C_R$  serait égal à 22 %.

### VI.2.3. Régime fluvial mensuel et saisonnier de l'Oued Ressoul

Afin d'avoir une meilleure caractérisation du régime fluvial de l'Oued Ressoul, nous avons entamer une analyse des débits et des écoulements, à l'échelle mensuelle et saisonnière. Il s'avère que les valeurs des débits mensuels oscillent entre  $3,6 \times 10^{-3}$  et  $1,16 \text{ m}^3/\text{s}$ , ces derniers montrent une forte irrégularité qui est plus marquée que celle observée à l'échelle annuelle ( $C_v = 0,98$ ).

Par ailleurs, pour mieux interpréter la variabilité mensuel du régime fluvial, nous avons calculer le coefficient mensuel de débit (CMD). Ce dernier exprime le rapport du débit moyen mensuel au module annuel de la période considérée. Les valeurs du CMD inférieures à l'unité correspondent à la période de basses eaux, tandis que celles supérieures à l'unité représentent la période de hautes eaux (Figure 30).



**Figure 30.** Variabilité du coefficient mensuelle des débits, période (1979/80-1996/97).

Les valeurs des CMD calculées, mettent en évidence une courte période des hautes qui ne dure que cinq mois. Cette période débute à partir du moi d'avril et se prolonge jusqu'à novembre. Le reste des mois de l'année correspondent à la période des basses eaux, ou les débits mensuels sont relativement inférieurs à la moyenne annuelle (Figure 30).

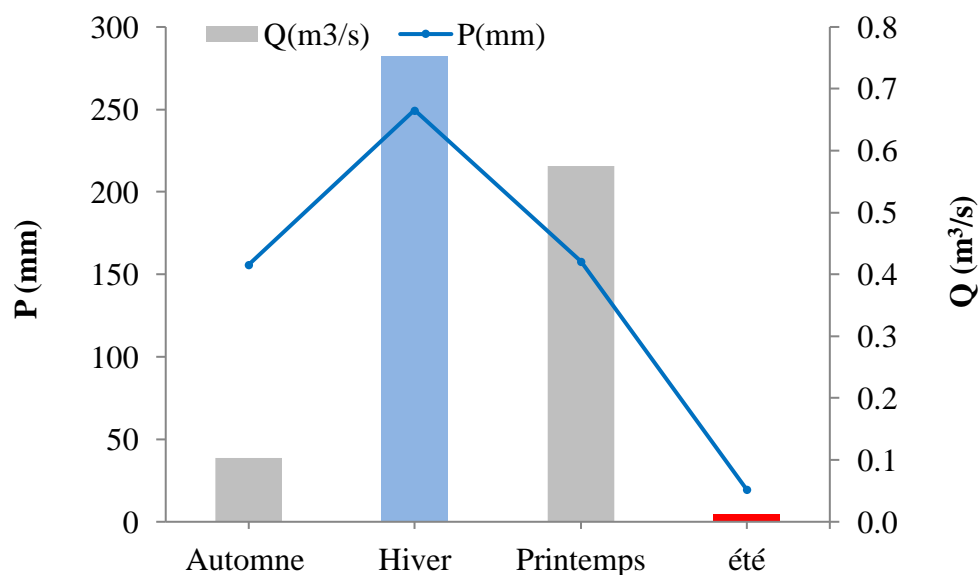
## Chapitre IV : Hydrologie et quantification du transport solide en suspension

La figure 3, montre aussi que les valeurs extrêmes du CMD correspondent aux mois de février et d'août. L'excédent en écoulement peut atteindre presque 3 fois le module annuel durant la période humide notamment en février (Figure 30). Cette valeur record estimée à  $1,16 \text{ m}^3/\text{s}$  est générée par une hauteur de pluie cumulée de 66 mm. Paradoxalement, cette apogée s'est manifesté 2 mois après la période extrême humide de décembre.

Il en est de même pour la valeur minimale du débit, enregistrée en mois d'Aout ( $8,6 \text{ l/s}$ ). Ce faible débit correspond à un cumul pluvieux de seulement 5 mm, alors que durant le mois précédent (juillet), la hauteur précipitée était encore nettement plus faible et égale à 1,42 mm.

Ce déphasage entre les valeurs extremes des precipitations et des écoulements s'explique par rapport au temps de concentration et à l'influence de la potentialité absorbante des sols. Le couvert végétal, ainsi que d'autres facteurs physiologiques, peuvent aussi à l'origine de se déphasage.

A l'échelle des saisons, la corrélation entre les precipitations et les écoulements est parfaite et l'évolution de ces derniers se fait d'une manière identique avec des valeurs extremes qui s'observent durant les même saisons (Figure 31).



**Figure 31.** Variabilité des précipitation et des débits saisonniers, période (1979/80-1996/97).

Comme le montre la figure ci-dessus, la saison d'hiver a générée un écoulement maximal égal à  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cette valeur représente plus que double du module annuel de l'Oued Ressoul et correspond a un cumul pluvieux d'environ 250mm.

## **Chapitre IV : Hydrologie et quantification du transport solide en suspension**

---

Il est à noter que l'écoulement important, observé durant l'hiver est soutenu essentiellement par celui des mois de janvier et de février. En effet, les débits moyens de ces deux mois sont les plus élevés de l'année et varient entre 1,1 et 1,16 m<sup>3</sup>/s.

Durant la saison du printemps, nous assistons à une diminution graduelle des précipitations qui engendre une réduction des écoulements. Le débit moyen estimé pour la saison de printemps est de 0,58 m<sup>3</sup>/s. Il est à noter que, le développement de la végétation, qui s'observe durant cette saison, peut être à l'origine de la diminution des écoulements. Les ruissellements superficiels sont donc ralentis par le couvert végétal qui s'intensifie à partir des mois d'Avril et mai.

Avec la rareté des pluies et l'augmentation des températures et de l'ETP durant l'été, les écoulements marquent une chute brusque durant cette saison. L'Oued Ressoul devient presque sec en cette période et son débit moyen se réduit à seulement 12 l/s.

Dès la reprise des précipitations à partir du mois de septembre, on assiste à une recrudescence des écoulements (Figure 31). Cependant, les premières pluies automnales ne soutiennent pas le ruissellement superficiel et contribuent plutôt à l'emmagasinement des eaux par infiltration. En conséquence, le débit moyen de la saison d'Automne reste relativement faible et égal à 0,1 m<sup>3</sup>/s. Ce faible module reste supérieur à celui de l'été et en même temps, inférieur à ceux des autres saisons de l'année.

### **VI.3. APPORTS HYDROLOGIQUES DU BASSIN**

L'apport hydrologique moyen annuel de l'Oued Ressoul estimé pour la période allant de 1979/80 à 1996/97 est de 13,16 millions de mètres cubes (Tableau 12). Cet apport est soutenu essentiellement, par les volumes d'eau écoulés durant les mois de janvier, février et de mars (Tableau 12).

À l'échelle annuelle, ce sont les périodes excédentaires 1984/85 et 1986/87 qui ont enregistré les volumes les plus importants (29,12 et 39,32 hm<sup>3</sup> respectivement). À l'opposé, l'année déficitaire 1987/88 a générée un apport extrêmement faible de l'ordre de 0,12 Hm<sup>3</sup> (Tableau 12).

Ces volumes sont importantes pour un sous-bassin qui s'étale sur seulement 105 km<sup>2</sup> et qui possède un coefficient relativement faible de 22%. L'abondance des précipitations constatée en période d'hiver et de printemps coïncide avec des sols déjà saturés ce qui diminue l'infiltration des sols. En conséquence, l'alimentation des cours d'eau se fait principalement par les ruissellements superficiels qui s'achèment jusqu'à la station d'Ain Berda.

## Chapitre IV : Hydrologie et quantification du transport solide en suspension

**Tableau 12.** Apports hydrologiques Annuels et mensuels ; période (1979/80-1996/97).

Années	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Apports (Hm <sup>3</sup> )
1979/80	0,00	0,00	0,05	0,01	0,01	0,02	0,22	0,07	0,04	0,01	0,00	0,00	0,43
1980/81	0,00	0,00	0,00	2,22	2,31	3,90	1,49	0,76	0,18	0,03	0,00	0,00	10,90
1981/82	0,00	0,00	0,00	0,06	0,45	1,53	2,79	1,48	0,47	0,06	0,01	0,00	6,85
1982/83	0,00	0,13	2,74	3,43	2,09	0,71	0,99	0,35	0,08	0,01	0,00	0,00	10,53
1983/84	0,00	0,00	1,34	0,86	6,47	15,06	3,67	1,02	0,17	0,02	0,00	0,07	28,67
1984/85	0,00	1,31	0,12	9,11	9,04	2,76	5,07	1,15	0,48	0,08	0,00	0,00	<u>29,12</u>
1985/86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,24	1,28	0,28	0,06	0,01	0,00	0,00	2,09
1986/87	0,00	0,25	1,98	6,05	3,65	10,99	8,50	6,96	0,76	0,17	0,00	0,00	<u>39,32</u>
1987/88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,07	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,12
1988/89	0,00	0,00	0,00	2,11	0,27	0,81	0,37	0,20	0,04	0,01	0,00	0,00	3,80
1989/90	0,00	0,02	0,01	0,37	2,90	0,46	0,16	0,09	3,10	0,00	0,00	0,00	7,12
1990/91	0,00	0,00	0,05	4,75	3,36	4,29	7,40	3,88	0,30	0,01	0,00	0,00	24,05
1991/92	0,08	0,04	0,06	0,05	0,07	0,52	0,73	4,97	2,18	0,42	0,15	0,06	9,31
1992/93	0,02	0,05	5,74	4,91	6,48	0,73	0,84	0,33	0,91	0,10	0,00	0,03	20,12
1993/94	0,03	0,03	0,04	0,54	1,48	3,94	0,66	0,36	0,11	0,00	0,00	0,00	7,20
1994/95	0,00	0,04	0,07	0,27	11,44	0,59	2,91	0,49	0,13	0,04	0,00	0,00	15,98
1995/96	0,04	0,11	0,07	0,20	0,67	7,37	4,92	4,01	2,82	0,30	0,05	0,04	20,58
1996/97	0,01	0,01	0,01	0,01	0,28	0,16	0,18	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69
Moyennes	0,009	0,11	0,68	1,94	<u>2,84</u>	<u>3,01</u>	<u>2,35</u>	1,47	0,66	0,07	0,012	0,011	<b>13,16</b>

### VI.4. CALCUL DU TRANSPORT SOLIDE PAR SUSPENSION A L'OUED RESSOUL.

#### VI.4.1. Estimation de la dégradation spécifique par des formules empiriques

L'utilisation des approches empiriques pour estimer la dégradation spécifique d'un bassin versant est possible par l'utilisation des formules empiriques discutées dans le chapitre I.

Pour des raisons de simplicité et selon la disponibilité des données, nous avons choisi d'utiliser les formules suivantes : SOGREA (1969), Tixeront (1960), Fournier (1960). Les paramètres qu'intègrent ces formules, ont été déjà citées et détaillées précédemment (Voir chapitre I page 15).

Il convient de souligner que ces formules ont été utilisées avec précaution car, souvent, elles ne reflètent pas la réalité, mais permettent, tout de même, d'élaborer une première esquisse des valeurs de la dégradation spécifique au sein du bassin étudié. Le tableau suivant (tableau 13) donne un récapitulatif des résultats des différentes formules utilisées.

Tableau 13. Dégradation spécifique des bassins étudiés selon les formules empiriques.

Formules	Equations	Dégradation spécifique
SOGREAH (1969)	$\alpha E^{0,15}$	154,92 T/km <sup>2</sup> /an
Tixeront (1960)	$92 E^{0,21}$	254 T/km <sup>2</sup> /an
Fournier (1960)	$0,28 \times \left(\frac{Pm^2}{P_{an}}\right)^{2,65} \times \left(\frac{D^2}{S}\right)^{0,46}$	21291,7 T/km <sup>2</sup> /an

Valeurs des paramètres utilisées :

$\alpha = 75$  (Coefficient dépendant de la perméabilité du sol voir tableau 1, chapitre I),

$E = 126$  mm/an,

$Pm = 96$  mm (Précipitation mensuelle du mois le plus arrosé),

$P_{an} = 583,24$  mm/an (Précipitation moyenne annuelle),

$D = 730$ m (Dénivelée du bassin  $H_{\max} - H_{\min}$ ) ;  $S = 105$  Km<sup>2</sup>.

Les valeurs de dégradation spécifique estimées, varient entre 154,92 et 21291,7 /Km<sup>2</sup>/an. Ces résultats montrent une forte variabilité des valeurs d'une formule à autre marquée par une éventuelle surestimation de la dégradation spécifique concernant la formule de Fournier.

Toutefois, l'ensemble de ses résultats empiriques restent intéressants puisque ils représentent une première approche concernant le degré de la dégradation des sols à l'Oued Ressoul.

Il est évident que ces premiers résultats nécessitent une éventuelle validation ou une comparaison avec des calculs plus précis qui tiennent compte des processus et des récurrences spatiales et temporelles qui régissent le fonctionnement hydro-sédimentaire.

### VII.4.2. Estimation de l'érosion et du transport solide en suspension par modélisation statistique des flux hydrologiques liquides et solides.

#### VII.4.2. 1. Méthodologie de travail

Le calcul direct des apports solides sur la base des données brutes de la station hydrométrique d'Ain Berda est impossible. Les prélèvements manuels réalisés à cette station sont insuffisants et peu fréquent notamment à l'échelle horaire et journalière. De plus, les séries d'observations, plus précisément, ceux des concentrations en matière en suspension (MES) comporte plusieurs discontinuité temporelle. De ce fait, nous nous sommes forcé à utiliser les courbes de transport solide (CTS), qui reste de nos jours, une bonne alternatives pour quantifier le transport solide en suspension dans les bassins Algériens [36]; [38]; [72]; [73].

Comme il a été expliqué dans le premier chapitre de ce travail, cette technique a déjà fait ses preuves depuis les années quarante sur la rivière rouge du Texas [11].



Il s'agit d'une représentation graphique suivie d'une modélisation statistique de la variation des débits liquides et des concentrations en MES dans une rivière donné. Ce concept mathématique permet par la suite, d'estimer la charge solide en suspension et l'apport en sédiment transportés à partir des séries des débits liquides [10]; [35]; [65]; [71]; [73].

Plusieurs études ce sont intéressées à l'amélioration des performances de ces techniques [22]; [30]; [77] ce qui a incité plusieurs chercheurs à utiliser ces techniques pour quantifier l'érosion sur les bassins Algériens peu jaugés.

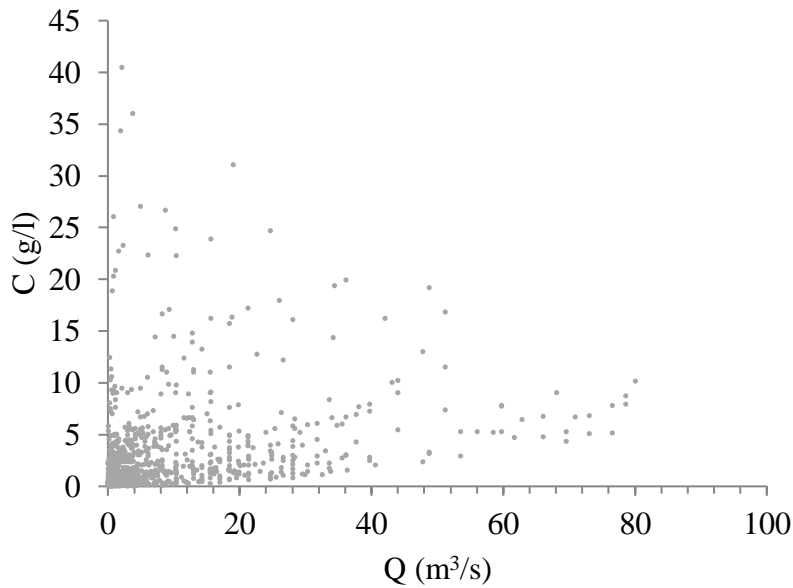
Les courbes de transport solide (CTS), développées dans le présent travail, ce sont basées sur un nombre de 1165 mesures instantanés du couple de données (Q-C) réalisées à la station d'Ain Berda.

Afin identifier les meilleurs modèles possibles, deux types de relations ont été étudiées:

### **a) Relation débits liquides (Q)- Concentrations (C) en (MES)**

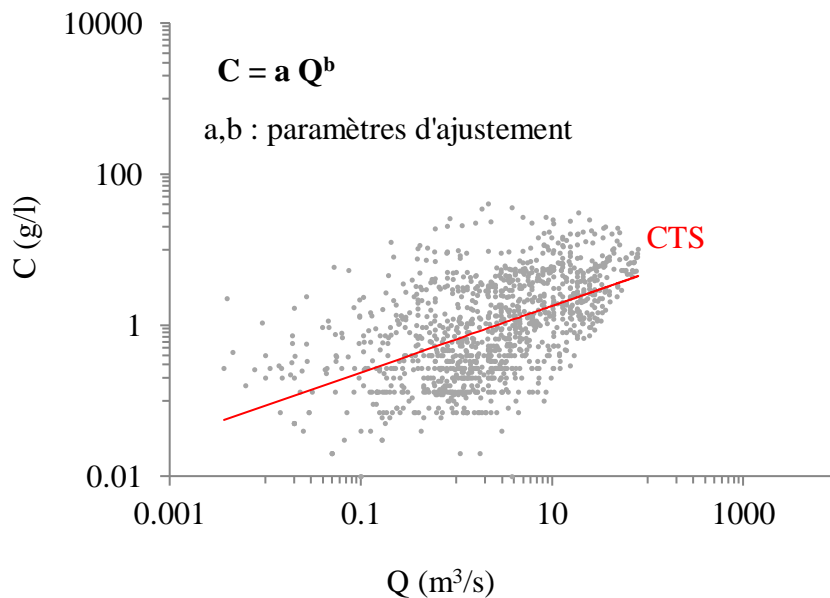
La projection des données brutes Q-C de la station d'Ain Berda, montre une relation complexe entre ces deux paramètres (Figure 32). Le nuage de point est plus dense à l'origine des axes et se disperse progressivement vers les valeurs extrêmes. Cette répartition s'explique par la différence des ordres de grandeur des débits et des concentrations, durant les événements extrêmes et au cours des différentes périodes de l'année [32]; [34].

D'autres parts, l'analyse des données a montré que certaines valeurs de débits identiques correspondent parfois à différentes valeurs de concentrations. Ceci est probablement dû aux mesures réalisées, après changement du profil de l'Oued et sans actualisation des courbes de tarage. La variation, assez rapide, des quantités des matières en suspension véhiculées par l'oued en raison des glissements en masse ou des sapements de berge, peut aussi être à l'origine de ces types d'enregistrements (Figure 32).



**Figure 32.** Nuage de point des données instantanées brutes (Q-C).

Si on exprime cette relation selon un modèle d'évolution en puissance et sur un système d'axe logarithmique comme ce qui est le cas dans la littérature, [8]; [21]; [34]; [36]; [37]; [73], nous aurons un meilleur ajustement du nuage de points précédent comme le montre la figure ci-dessous.



**Figure 33.** Ajustement du nuage de point des données (Q-C) selon un modèle de puissance et avec transformation logarithmique.

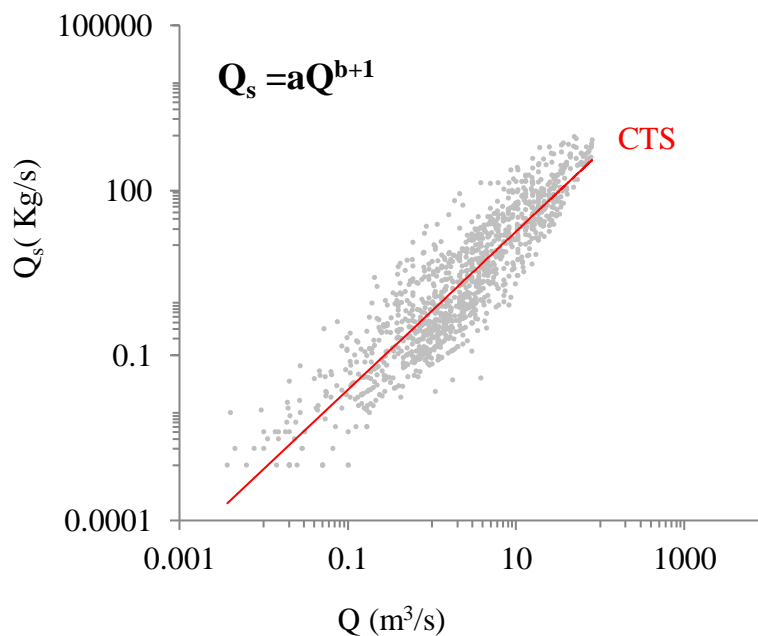
L'équation de la courbe de tendance permet de simuler la concentration (C) en MES à partir de la valeur connue du débit liquide(Q). Cependant l'efficacité ou la performance du modèle doit être vérifié avant d'utiliser ce dernier. A cet effet, nous avons intégré dans les parties suivantes de ce chapitre, un ensemble de paramètres statistiques permettant d'apprécier la qualité des modèles développés.

### b) Relation débits solides ( $Q_s$ )- Débits liquides (Q)

Les modèles  $Q_s$ -Q, comme pour ceux des relations Q-C, sont aussi utilisés dans la littérature [1]; [16]; [23]; [33]; [34]; [59]. Sur ces types de modèles, les concentrations en MES sont remplacées par les débits solides ( $Q_s$ ) en Kg/s, ces derniers sont obtenus en faisant le produit des débits liquides et des concentrations ( $Q_s = Q \times C$ ).

La formulation mathématique du modèle  $Q_s$ -Q est similaire à celle du modèle précédemment cité et se présente sous la forme  $Q_s = a Q^b$ . Cependant le paramètre d'ajustement « b » se voit systématiquement augmenté d'une unité (b+1) [1].

La figure 34, donne la variante graphique du modèle  $Q_s$ -Q pour les données brutes de la station d'Ain Berda.



**Figure 34.** Ajustement du nuage de point des données ( $Q_s$ -Q) brutes sous une échelle logarithmique et selon un modèle de puissance.

Les travaux de McBean and Al-Nassri (1988) estiment que la qualité de l'ajustement des courbes de transport solide, développées sur la base des variables Q et  $Q_s$ , est mauvaise, comparée à celle basée sur la relation Q-C. Cependant, cette idée a été contredite par d'autres études [3]; [48]; [55].

Quelques années plus tard, [33] a confirmé que l'utilisation des régressions à transformations logarithmiques  $Q_s = f(Q)$  ou  $C = f(Q)$  donnent les mêmes estimations des apports solides, après avoir effectué les corrections nécessaires.

### c) Calcul de l'erreur et correction de la sous-estimation des modèles régressifs

L'incertitude des modèles statistiques développés dans ce travail a été estimée par rapport à la valeur de l'erreur (E). Ce paramètre est exprimé en pourcentage et il est défini par l'expression suivante :

$$E(\%) = \pm \left( \frac{Q'_s}{Q_s} - 1 \right) \times 100$$

$Q'_s$  et  $Q_s$  sont, respectivement, les débits solides estimés et mesurés.

D'une autre manière, ce paramètre statistique reflète la grandeur d'écart entre les apports solides estimés et ceux observés. Ce dernier a été utilisé dans plusieurs travaux similaires [30]; [34]; [77]. Il est donc évident que les valeurs positives ( $> 0$ ) ou négatives ( $< 0$ ) de l'erreur (E), permettent d'identifier, respectivement, une éventuelle surestimation ou sous-estimation des apports solides.

Il convient de souligner aussi que les modèles régressifs des courbes de transport solides, réalisés avec des transformations logarithmiques, impliquent souvent une sous-estimation des apports solides dans les rivières [12]; [22]; [31]; [33]; [34].

De ce fait, l'emploi de ces modèles doit, donc, s'effectuer avec une grande précaution du fait que la moyenne des apports solides retransformés est différente de la moyenne normale le long de la courbe de régression et qu'une correction des équations de régression est nécessaire [34].

Justement, Miller (1984) a proposé un coefficient de correction (Cf) pour ce genre de modèles régressifs, montrant une tendance à la sous-estimation des valeurs simulées.

Ce coefficient correcteur est donné par l'équation suivante :

$$Cf = \text{Exp} \left( \frac{\sigma^2}{2} \right) \text{ Avec: } \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \times \sum_{i=1}^n (\text{Ln}C_m - \text{Ln}C'_{es})^2$$

Où :

$\sigma^2$  : La variance statistique,

N : Nombre d'individus dans de l'échantillon,

$C_m$  et  $C'_{obs}$  sont respectivement, la concentration moyenne mesurée et estimée.

### d) Evaluation des performances des CTS

L'efficacité des modèles régressifs doit être vérifiée pour apprécier la qualité de l'ajustement et l'incertitude des apports solides simulés. Dans cette partie de travail, plusieurs variantes de modèles seront développées et comparées afin de rechercher le meilleur modèle en termes de performances. Le choix du meilleur modèles s'est basé sur les indices statistiques suivants :

**\*Coefficient de corrélation de Pearson (1905)** : Le coefficient de corrélation de Pearson permet d'évaluer la qualité d'ajustement d'un nuage de point autour d'une droite de régression qui correspond à des séries d'observations connues. Autrement dis, ce paramètre évalue la qualité de la corrélation entre les paramètres utilisés, il est défini par :

$$R = \frac{\sum_i^n (Q_{obs} - \bar{Q})(C_{obs} - \bar{C})}{\sqrt{\sum_i^n (Q_{obs} - \bar{Q})^2 (C_{obs} - \bar{C})^2}}$$

Avec :

$Q_{obs}$  et  $C_{obs}$ : Sont le débit liquide et la concentration en MES observés,

$\bar{Q}$  et  $\bar{C}$ : Sont les moyennes du débit liquide et celle de la concentration en MES.

Pour des valeurs de « R » proches de 1, la corrélation est supposée forte. Cependant la corrélation est faible si  $0 < R \leq 0,5$  et inexistante pour  $R=0$  (Pearson, 1905). Il est à noter que pour la relation  $Q_s$ - $Q$ , la concentration ( $C_{obs}$ ) est tout simplement remplacée par le débit solide ( $Q_s$ ) dans la formule précédente.

**\*Coefficient d'efficacité de Nash and Sutcliffe (1970)** : Ce coefficient connue sous l'abréviation (NSE) est très utilisé en littérature pour décrire quantitativement la précision des sorties des modèles hydrologiques. La précision prédictive selon cet indice, est évaluée sur un intervalle de valeurs variant entre  $-\infty$  et 1.

L'expression mathématique de ce paramètre est la suivante :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i^n (Q_{s_{es}} - Q_{s_{obs}})^2}{\sum_i^n (Q_{s_{obs}} - \bar{Q}_{s_{obs}})^2}$$

Avec :

$Q_{s_{es}}$  et  $Q_{s_{obs}}$  : sont respectivement les débits solides estimés et observés,

$\overline{Q_{s_{obs}}}$  : est la moyenne des débits solides observés.

Selon la littérature, l'interprétation de la valeur de NSE est la suivante :

NSE	Efficacité du modèle
$0.75 < NSE < 1$	Parfaite
$0.65 < NSE < 0.75$	Bonne
$0.5 < NSE < 0.65$	signifiante
$NSE < 0.5$	Insignifiante

### e) Amélioration des CTS par la technique des classes des débits

Comme nous l'avant déjà constaté sur la figure 34, le nuage de points, des données instantanées brutes (Q-C) de la station d'Ain Berda, montre une forte dispersion qui réduit la qualité des ajustements des CTS. Pour cela, nous avons jugés utile d'intégrer la technique des classes moyennes des débits, développée par (Verhoff, Melfi, and Yaksich (1980); Walling and Webb (1981)), (M. Jansson (1985); M. B. Jansson (1997)).

Cette technique est intéressante dans la mesure où elle offre une amélioration des ajustements des courbes de transport solide, en réduisant la dispersion des séries d'observations [34]. De plus, cette dernière permet d'obtenir un ordre d'amplitude plus correct de la charge solide à estimer.

Le procédé de la méthode consiste à regrouper les débits observés en classes distinctes, triés par ordre croissant. Les classes sont définies selon un intervalle fixe, dépendant de la variabilité des débits, en chaque série de données. L'intervalle sera relativement réduit pour des valeurs faibles de débits. Toutefois, l'étendue de cet intervalle peut être augmentée, si le nombre d'individus contenu dans la classe devient réduit [34].

Par la suite, on calcule la moyenne des séries de concentrations des MES, correspondant à chaque moyenne de débits pour formuler des couples de valeurs moyennes ( $Q_m-C_m$ ) de débit et de concentrations des MES.

Enfin, des courbes de transports solides seront développées pour les valeurs ( $Q_m-C_m$ ) et, parallèlement, pour l'ensemble des données brutes (non classées).

### f) Evaluation des apports solides ( $A_s$ )

Les apports solides ( $A_s$ ) à différentes échelles temporelles, ont été calculés et exprimés en tonnes, selon la formule générale suivante :

$$A_s = Q \times C \times T \times 10^{-3} = Q_s \times T \times 10^{-3} \text{ (tonnes)}$$

Avec :

Q : Débits liquide en ( $m^3/s$ ) ; T : Temps de mesure en secondes,

C : Concentration en matières en suspension en ( $g/l$ ) ;  $Q_s$  : Débit solide en ( $kg/s$ ).

La moyenne des apports solides annuels, estimée pour la période (1979/80-1996/97), sera ramenée à l'unité de surface du bassin pour en déduire le taux de dégradation spécifique de ce dernier en ( $T/km^2/an$ ).

### VII.4.2. 2. Résultats et discussions

En appliquant la méthodologie de travail précédemment détaillée, nous avons pu développer deux variantes de CTS pour chaque relation Q-C et  $Q_s$ -Q : une variante avec des données brutes non classées et une autre avec des séries de classes de débit (Figures 35 et 36). Les deux courbes sont représentées sur le même graphique pour permettre une meilleure comparaison et appréciation de la qualité de l'ajustement.

Les figures ci-dessus, indiquent que les meilleurs ajustements sont ceux des relations Q- $Q_s$ . Les valeurs du coefficient de corrélation pour ces relations, sont les plus proches de l'unité ( $0,90 \leq R \leq 0,97$ ).

En revanche, la représentation graphique des relations Q-C montre toujours une dispersion très visible des nuages de points, autour des droites de tendances, ce qui a fait ressortir une corrélation modérée entre les paramètres en question ( $0,53 \leq R \leq 0,73$ ).

Notons que pour les deux types de relations (Q-C) et ( $Q_s$ -Q), ce sont toujours les modèles développés avec la méthode des classes de débit qui ont généré les meilleurs ajustements et corrélations (Figure 35 et 36). Ceci confirme l'efficacité de la méthode des classes des débits concernant l'amélioration de la qualité des ajustements et, donc, sur la correction de l'erreur lors de l'estimation des apports solides.

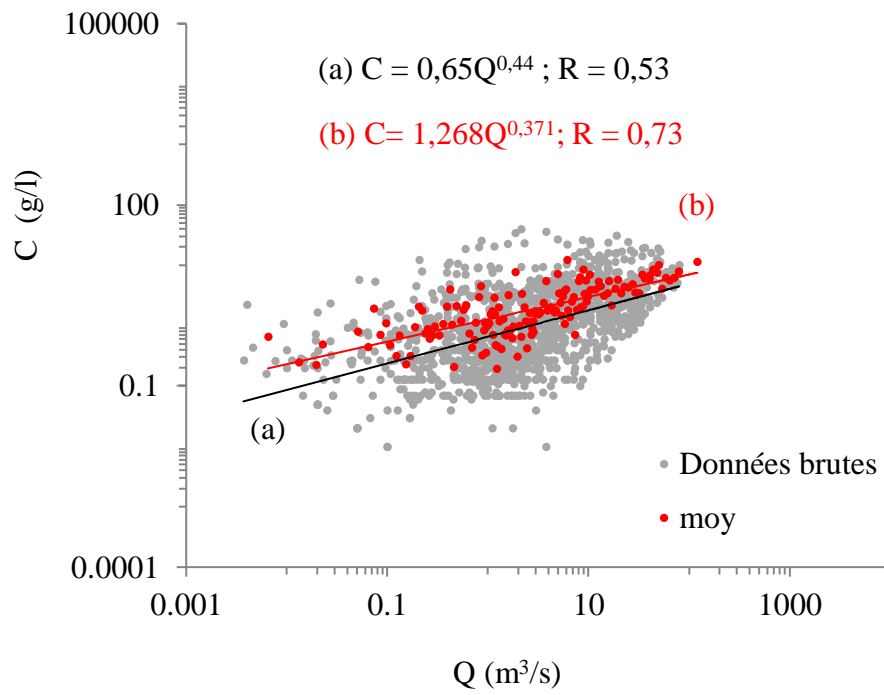


Figure 35. CTS pour la relation  $Q-C$

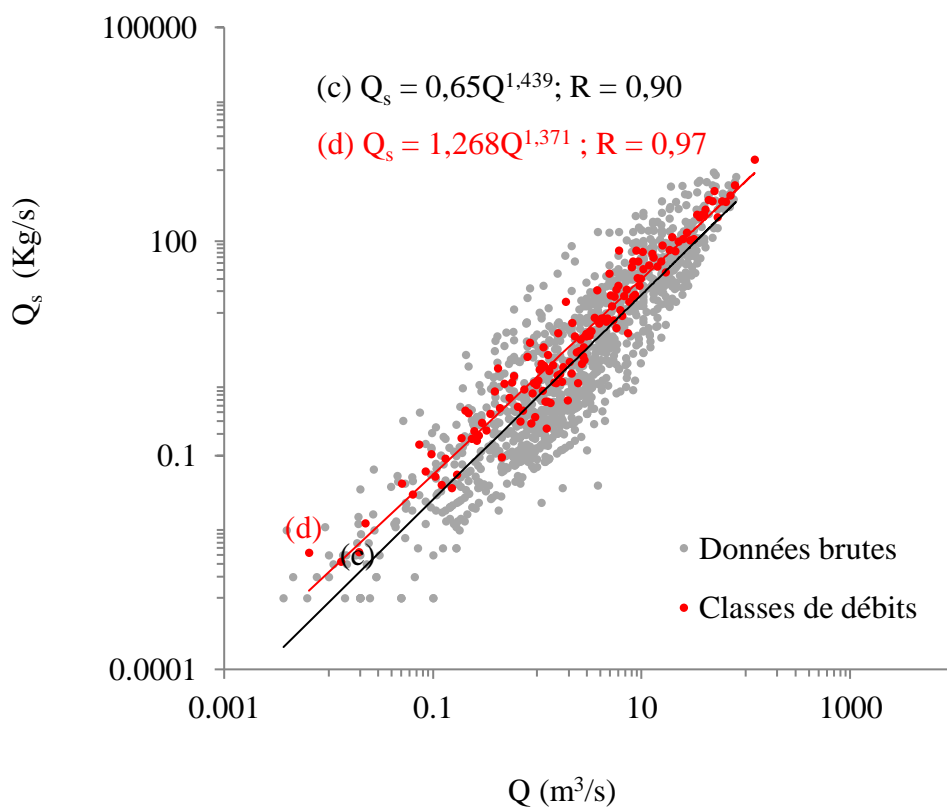


Figure 36. CTS pour la relation  $Q-Q_s$



## Chapitre IV : Hydrologie et quantification du transport solide en suspension

Les performances et les caractéristiques des modèles développés sont représentées dans le tableau suivant :

**Tableau 14.** Caractéristiques des CTS développées pour les relations (Q-C) et (Q-Q<sub>s</sub>).

Relations Q-C							
Equations des modèles	Type de données	R	E (%)	NSE	Cf	Après correction	
						E (%)	NSE
(a) $C = 0,65Q^{0,44}$	Brutes	0,53	-52,05	0,02	2,28	+9,33	0,13
(b) $C = 1,268Q^{0,37}$	Classes	0,73	- 18,26	0,12	1,25	+2,17	0,14
Relations Q-Q <sub>s</sub>							
(c) $Q_s = 0,65Q^{1,44}$	Brutes	0,90	-47,29	0,55	2,28	+20,17	0,68
(d) $Q_s = 1,268Q^{1,37}$	Classes	<u>0,97</u>	<u>-18,81</u>	<u>0,68</u>	1,28	<u>+1,49</u>	0,72

D'après les valeurs du tableau 14 , on remarque que les 4 modèles développés, ont générés des valeurs d'erreur négatives ( $E < 0$ ) impliquant une sous-estimation des apports solides. Ceci confirme bien les hypothèses soulevées précédemment, concernant les modèles régressifs développés avec transformation logarithmiques. Cependant, la valeur absolue de l'erreur est souvent réduite après correction des modèles par le coefficient de correction (Cf).

Par ailleurs, les valeurs de l'indice d'efficacité (NSE) varient d'un modèle à autre et selon le type de relation et oscillent entre 0,02 et 0,68 (Tableau 14). Ce sont les modèles développés pour la relation (Q-Q<sub>s</sub>) qui ont générés les meilleur performances ( $0,55 \leq NSE \leq 0,68$ ).

En tenant compte de l'erreur (E), du coefficient de corrélation (R) et de l'indice (NSE), notre choix du meilleur modèle pour l'estimation des apports solide de l'Oued Ressoul sera orienté forcément pour le modèle (d). Ce dernier donne le meilleur ajustement ( $R = 0,97$ ) ainsi qu'une bonne performance ( $NSE = 0,68$ ). Toutefois, en choisissant ce modèle, nous acceptons une sur-estimation négligeable des apports solide d'environ 1,49% ce qui est acceptable compte tenue des résultats.

### VII.4.2.2.1 Variabilité interannuelle des apports solides et des concentrations

Sur la base du modèle régressif choisi, nous estimons un apport solide total de 700 milles tonnes véhiculé par l'Oued Ressoul durant la période 1979/80-1996/97. Ceci correspond à une dégradation spécifique de 370,38 T/km<sup>2</sup>/an et une concentration moyenne annuelle égale à 2,37 g/l pour le sous-bassin de l'Oued Ressoul (Tableau 15).

Par ailleurs, la variabilité annuelle des apports solides est très signifiante et marquée par un coefficient de variation important égal à 0,97 (Tableau 15).

## Chapitre IV : Hydrologie et quantification du transport solide en suspension

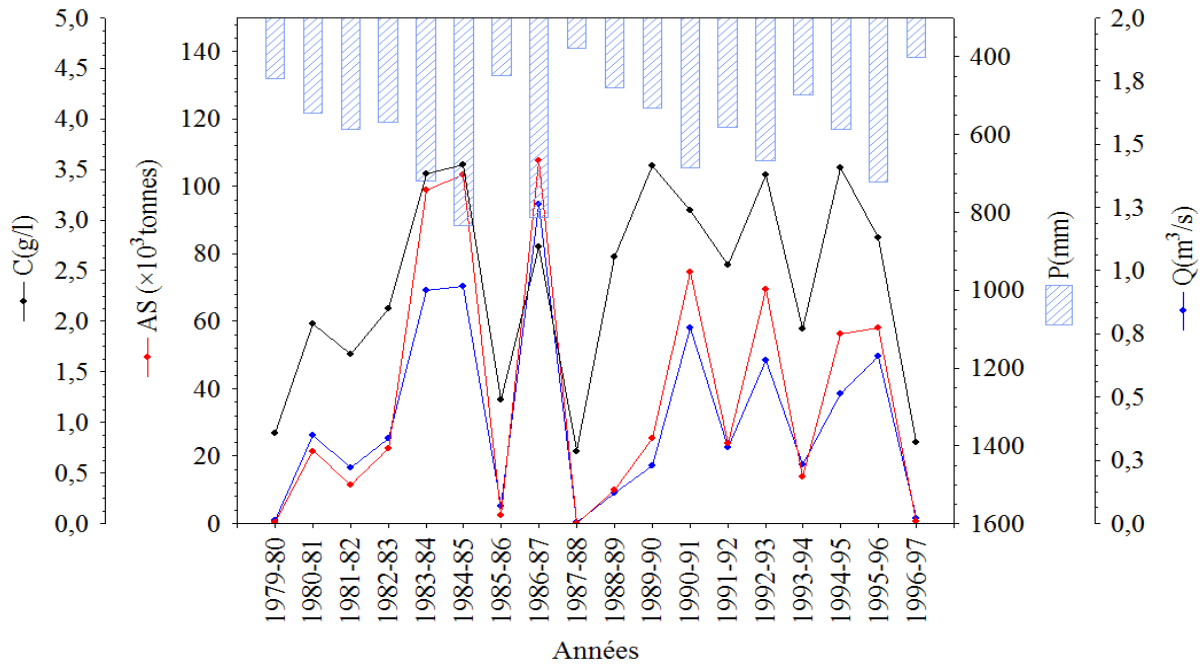
L'analyse des valeurs des apports solides montre que ces derniers fluctuent entre 86 tonnes et  $107,65 \times 10^3$  Tonnes le long de la période d'observation (Tableau 15). Par contre, la variabilité des concentrations moyennes annuelles est faible ( $C_v = 0,42$ ) et les valeurs estimées des concentrations, varient d'une manière très régulière entre 0,72 et 3,55 g/l.

**Tableau 15.** Apports solides et concentrations annuelles, période (1979/80-1996/97).

Années	$A_s$ ( $\times 10^3$ tonnes)	C (g/l)
1979-80	0,38	0,90
1980-81	21,52	1,98
1981-82	11,45	1,67
1982-83	22,35	2,12
1983-84	99,01	3,45
1984-85	103,31	<b>3,55</b>
1985-86	2,54	1,22
1986-87	<b>107,65</b>	2,74
1987-88	<b>0,086</b>	<b>0,72</b>
1988-89	10,02	2,64
1989-90	25,20	3,54
1990-91	74,44	3,10
1991-92	23,76	2,55
1992-93	69,45	3,45
1993-94	13,83	1,92
1994-95	56,31	3,52
1995-96	58,15	2,83
1996-97	0,56	0,81
<b>Moyenne</b>	38,89	2,37
<b>Ecart-type</b>	37,85	1,00
<b><math>C_v</math></b>	0,97	0,42

Les valeurs du tableau ci-dessous, montrent que les minimas des concentrations et des apports solides sont observés simultanément durant l'année déficitaire en écoulement 1987/88 (Tableau 15). Cependant, les valeurs maximales de ces mêmes paramètres, ce sont manifestées durant des périodes différentes. En effet, l'année excédentaire en écoulement 1986/87 à générée un apport solide record de  $107,65 \times 10^3$  Tonnes soit 15% de l'apport solide total du bassin alors que, le pic des concentrations (3,55 g/l) a été observé bien en avance durant l'année 1984/85 (Tableau 15).

Pour mieux comprendre la variabilité annuelle de la dynamique érosive à l'Oued Ressoul, nous avons représentés sur un même graphique, l'évolution des flux hydrologiques liquides et solides ainsi que l'évolution des précipitations (Figure 38).



**Figure 37.** Variabilité annuelle des apports solides, concentrations, précipitations et des débits liquides à l'Oued Ressoul ; période (1979/80-1996/97).

La figure ci-dessus montre dans l'ensemble, que l'évolution annuelle des flux hydro-sédimentaires corrèle parfaitement avec celle des précipitations. Cependant, les apports solides et les concentrations annuelles marquent deux pics importants durant la période des 18 années.

Le premier pic des apports solides indique une valeur importante de  $103,31 \times 10^3$  tonnes, cette apogée ne représente pas la valeur la plus élevée mais coïncide parfaitement avec la période la plus humide 1984/85. Au cours de la même période, la concentration a atteint une valeur extrême de 3,55 g/l pour un débit moyen de  $0,94 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Les apports solides marquent durant l'année excédentaire 1986/87, un deuxième pic plus important que le premier ( $107,65 \times 10^3$  Tonnes). Cette valeur extrême correspond à un cumul pluvieux important de 813 mm et une concentration de 2,74g/l. La concomitance des flux hydrologiques liquides et solides durant cette année est bien visible sur le graphique, mais le deuxième pic des concentrations est atteint deux années plus tard, en l'occurrence, durant l'année 1988/89 avec une valeur presque semblable à celle du premier pic (3,54 g/l).

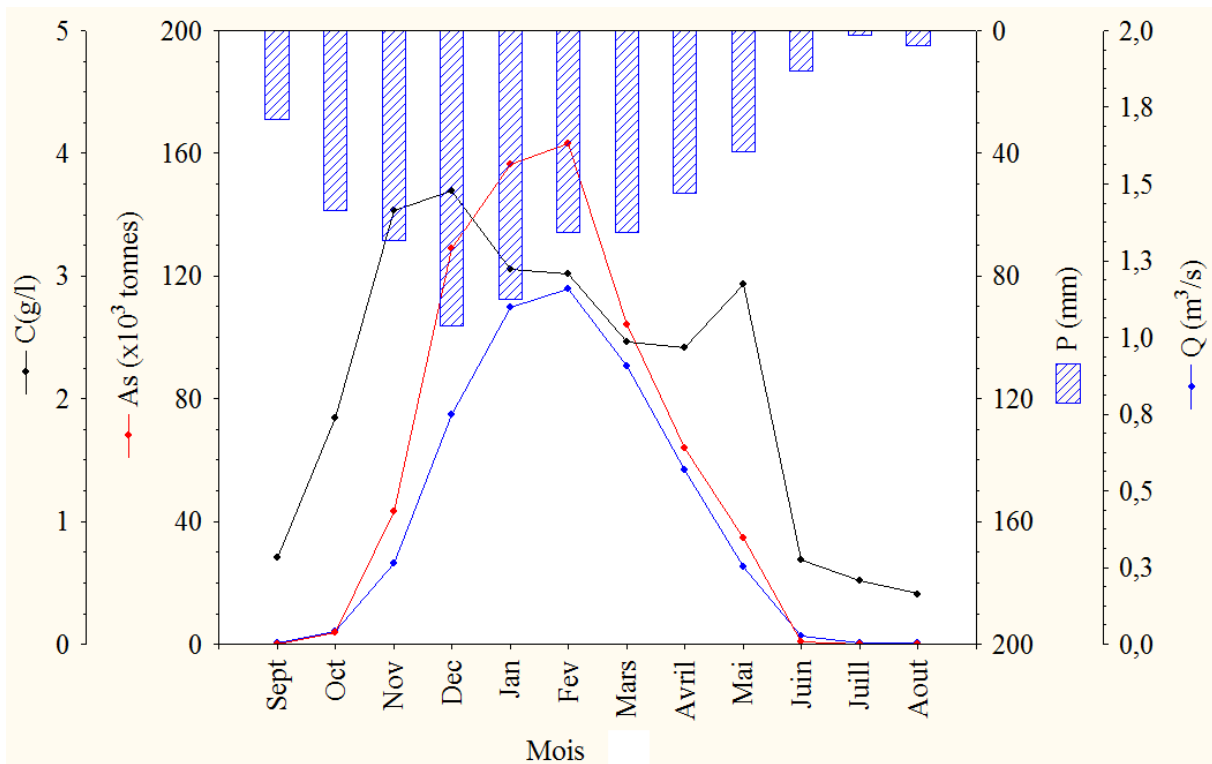
Au cours de l'année extrêmement sèche 1987/88, les flux hydrologiques solides et liquides ainsi que les concentrations enregistrent les valeurs les plus faibles de la période. Ces résultats reflètent l'influence directe des facteurs climatiques sur l'intensité de l'érosion dans le bassin de l'Oued Resoul.

### VII.4.2.2 Variabilité mensuelle et saisonnière des apports solides et des concentrations

A l'échelle mensuelle, la variabilité des apports solides est très forte marquée par une forte valeur du coefficient de variation ( $Cv = 1,1$ ). Les apports solides passent de 80,4 tonnes en mois d'Aout à  $163,3 \times 10^3$  Tonnes durant le mois de février et la moyenne mensuelle est de  $58,34 \times 10^3$  Tonnes (figure 38).

Comme le montre le graphique ( Figure 38), la courbe de l'évolution des concentrations montre un léger déphasage avec celle des écoulements et des apports solides. De plus, il semble que le pic de la concentration à l'Oued Ressoul coïncide toujours avec la période la plus humide. L'abondance pluviale du mois de décembre a générée une concentration extrême de 3,7 g/l soit une fois et demie la concentration moyenne annuelle.

L'évolution mensuel des flux hydrologiques liquides et solides reflète une parfaite corrélation entre ces deux paramètres durant les 12 mois de l'année. Les valeurs des débits liquides et des apports solides augmentent progressivement à partir du mois de septembre pour atteindre des pics simultanés durant la période excédentaire de février. L'apport solide du mois de février représente 23% de l'apport solide totale du bassin. Cette intensité en érosion correspond à un cumul pluvieux mensuel de 66 mm.



**Figure 38.** Variabilité mensuelle des apports solides, concentrations, précipitations et des débits liquides à l'Oued Ressoul ; période (1979/80-1996/97).

## Chapitre IV : Hydrologie et quantification du transport solide en suspension

A partir du mois de mars, les écoulements et des apports solides commencent à chuter graduellement avec la diminution des précipitations. Ces derniers atteignent leurs minimas durant la période estivale notamment en mois d'Aout (Figure 38).

Malgré une tendance décroissante des concentrations observée depuis le mois de janvier, un deuxième pic de concentrations réapparaît d'une manière exceptionnelle en mois de mai. Toutefois ce pic reste moins accentué que celui observé en décembre et correspond à 2,93 g/l.

Il est à noter que l'analyse de variabilité de l'intensité de l'érosion à l'échelle des saisons est très pertinente dans la mesure où les conditions physiologiques et climatiques varient d'une manière importante d'une saison à l'autre.

Le tableau ci-dessous, donne les quantités des flux hydro-sédimentaires à l'échelle des 4 saisons de l'année.

**Tableau 16.** Valeurs des apports solides, concentrations et de quelques paramètres hydro-climatiques à l'échelle saisonnière, période (1979/80-1996/97).

Saisons	Q (m <sup>3</sup> /s)	As (×10 <sup>3</sup> Tonnes)	C(g/l)	P(mm)	Le (mm)	Cr (%)
Automne	0,10	47,12	2,17	156,11	7,73	4,95
Hiver	<b>1,00</b>	<b>448,93</b>	<b>4,10</b>	<b>249,67</b>	<b>74,20</b>	<b>29,72</b>
Printemps	0,58	202,89	2,61	157,98	42,60	26,97
été	<b>0,01</b>	<b>1,10</b>	<b>0,55</b>	<b>19,48</b>	<b>0,90</b>	<b>4,60</b>
<b>Moyenne</b>	0,42	175	2,36			
<b>Ecart-type</b>	0,46	202	1,46			
<b>Cv</b>	1,08	1,15	0,62			

**Le (mm)** : lame écoulée en millimètres ; **Cr (%)** : Coefficient de ruissellement en (%).

L'analyse des résultats du tableau ci-dessous a permis de formuler un ensemble d'interprétation concernant la dynamique érosive à l'Oued Ressoul pour chaque saison :

### a) L'érosion en Automne

Malgré un cumul pluvieux de 156,11 mm, enregistré durant cette saison, l'intensité de l'érosion, en automne, reste faible représentée par un apport solide de  $47,1 \times 10^3$  tonnes. Cette valeur correspond à seulement 6,73% de l'apport solide total de l'Oued Ressoul. En revanche, la concentration moyenne de cette saison se rapproche de la valeur moyenne annuelle et égale à 2,17 g/l. Ces résultats montrent que les débits de pointes des crues automnales sont atténués rapidement par le pouvoir absorbant des sols en cette période.

Ceci se confirme par une lame écoulée de seulement 7,73 mm et un coefficient de ruissellement relativement faible de 4,95%. Ces valeurs impliquent aussi que les écoulements ne sont pas assez violents pour déclencher des processus érosifs importants. Une grande partie des matières solides détachées ne rejoignent pas les cours d'eau et la brièveté des événements pluvieux de l'automne. La forte concentration dans les cours d'eau est liée essentiellement à l'émotivité des averses et de quelques processus érosifs qui se manifeste à proximité de la station hydrométrique. Notons que l'érosion en automne est soutenue essentiellement par les apports solides véhiculés durant le mois de novembre qui représentent une portion de 92%.

### **b) L'érosion en Hiver**

D'après les valeurs du tableau 16, nous pouvons affirmer que la majorité des sédiments transportés par l'Oued Ressoul durant l'année, se fait durant la saison d'hiver. L'apport solide fournit en cette saison représente 64% de l'apport solide total de la période (1979/80-1996/97). De plus, la concentration en (MES) en cette période est presque le double de la moyenne annuelle. Ces valeurs reflètent une intensité d'érosion importante en liaison avec les crues violentes de l'hiver. Ces crues sont générées par un cumul pluvieux d'environ 250 mm réparti en grande portion entre décembre et janvier. Les averses torrentielles qui sont assez fréquente en hiver coïncident avec des sols bien saturés ce qui accentue les ruissellments.

Les caractéristiques climatiques et hydrologiques de la période hivernale génèrent un débit moyen record de 1 m<sup>3</sup>/s et aussi un coefficient de ruissellement supérieur à celui des 4 saisons (29,72%). La saison d'hiver est donc très favorable à l'apparition de plusieurs formes d'érosion : en masse, ravines, en surface...etc entraînant ainsi de grandes quantités de terre vers les cours d'eau.

Il est à souligner, que les matières détachées et les colluvions préparés durant la saison d'automne sont facilement mobilisés vers le réseau hydrographique en période d'hiver ce qui augmente encore plus la turbidité des oueds et la concentration en MES.

### **c) L'érosion en printemps**

Au cours de la saison du printemps, on assiste à une diminution brusque de l'intensité de l'érosion par rapport à celle observée en hiver. Cette diminution est estimée à 54% ce qui réduit l'apport solide du printemps à 202,89 × 10<sup>3</sup> tonne. Cette réduction est liée à une diminution de -36% du régime pluviale d'une part et d'autres parts à l'influence importante de l'occupation du sol qui s'impose en cette période. En effet, le couvert végétal devient très dense durant le printemps, ce qui ralentit une grande portion des écoulements et retient une

## **Chapitre IV : Hydrologie et quantification du transport solide en suspension**

---

importante quantité de matières fines sur les versants herbacés. Malgré que le taux d'érosion de la saison du printemps soit inférieur à celui de l'Hiver, il reste tout de même, supérieur à celui de la saison d'automne et de l'été (Tableau 16).

### **d) L'érosion en été**

La saison estivale est marquée par un très faible taux de précipitations qui ne dépasse pas les 20 mm (Tableau 16). Il en est de même pour les écoulements qui se font très rare voir totalement absents notamment durant le mois d'Aout. Ces conditions ne permettent pas le déclenchement des processus érosifs. Cependant, les faibles ruissellements observés durant le mois de juin et juillet, en provenance de l'amont du bassin, semble véhiculées quand même quelque particules en suspension mais avec une très faible concentration (0,55g/l).

Il est à souligner qu'au début et à la fin de l'été quelques averses orageuses de faible intensité (< 30 mm en 24heures) peuvent se manifestées d'une manière très brève sans autant alimenté les oueds en sédiments. Les faibles débits des crues qui en découlent, sont très vite atténuées par la sécheresse des sols.

## **CONCLUSION**

La premiere partie de ce chapitre, à permis d'identifier le régime hydrologique de l'Oued Ressoul. Ce dernier se caractérise par module annuel de 0,42 m<sup>3</sup>/s et un apport hydrologique moyen de 13,16 millions de m<sup>3</sup> par an.

Par rapport à sa superficie de seulement 105 km<sup>2</sup>, on peu dire que le sous-bassin de l'Oued Ressoul possède un régime hydrologique important. Ces caractéristiques hydrologiques s'accordent parfaitement avec le caractère du climat sub-humide auquel notre bassin est exposé.

La variabilité temporelle des écoulements et des apports hydrologiques est signifiante aussi bien à l'échelle annuelle qu'à l'echelle mensuelle et saisonière ( $0,87 \leq C_v \leq 0,98$ ). Cependant, l'apport hydrologique annuel de l'Oued Ressoul est soutenu essentiellement par l'abbandence des écoulements en période hivernale. Le débit moyen en cette saison atteint plus que le double du module annuel (1m<sup>3</sup>/s), et même le débit record à l'echelle mensuelle est également observé durant l'Hiver, en l'occurrence en mois de fevrier avec 1,16 m<sup>3</sup>/s.

L'Hiver et le printemps représentent les seules périodes excédentaires en écoulement, ces deux sasions soutiennent l'apport hydrologique annuel avec une portion de 88%.

## **Chapitre IV : Hydrologie et quantification du transport solide en suspension**

---

A l'opposé, la saison estivale représente la période la plus déficitaire en écoulement, notamment en mois d'Aout où le module mensuel de l'Oued Ressoul se réduit à seulement 4 l/s.

En recourant aux courbes de transport solide nous avons pu quantifier le transport solide. La méthodologie de travail suivie, a fait ressortir un taux d'érosion de 370,38 T/Km<sup>2</sup>/an pour le sous-bassin de l'Oued Ressoul. Cette dégradation correspond à un total de 700 milles tonnes de sédiments transportés par l'Oued en question durant la période (1979/80-1996/97) et une concentration moyenne en MES égale à 2,37 g/l.

Comme ce qui a été le cas pour les écoulements, les apports solides varient d'une manière très significative aux échelles temporelles étudiées ( $0,97 \leq C_v \leq 1,1$ ). Les valeurs annuelles passent d'un seuil de moins d'une centaine de tonne à 107milles tonnes. Cependant, l'apport solide maximal ne coïncide pas avec l'année extrême humide 1984/85 mais plutôt avec la l'année excédentaire en écoulement (1986/87).

Par ailleurs, l'analyse des flux hydro-sédimentaires à l'échelle mensuelle, dévoile que l'intensité de l'érosion concorde parfaitement avec le régime pluvieux et fluvial du bassin.

Les apports solides mensuels passent de 80,4 tonnes en mois d'Aout à  $163,3 \times 10^3$  Tonnes durant le mois de fevrier. Ces valeurs impliquent une érosion très intense durant la saison humide d'hiver. En effet, on estime que 64% de l'apport solide total, véhiculé durant la période (1979/80-1996/97) est fournit essentiellement durant la saison d'Hiver.

La saison de printemps fournit elle aussi une quantité de sédiments non négligeable estimée à environ 203 milles tonnes. Cette valeur correspond à la moitié de la quantité des sédiments fournie en saison d'hiver mais reste, quand même, supérieure aux apports solides estimés pour les saisons de l'automne et de l'été.

La période de l'automne contribue surtout à l'approvisionnement en matière solide sous forme de colluvions et de matière détachées et qui ne peuvent être transportés vers l'Oued. L'apport solide estimé pour cette saison est de 47 milles tonnes.



---

## Conclusion générale

---

### CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, mené sur le sous-bassin de l'Oued Ressoul, nous pouvons admettre à la limite des données climatiques et hydrométriques utilisées, que la situation de la dégradation des sols dans le bassin étudié a bien été cernée et traitée. L'estimation des transports solides a suscité notre grand intérêt dans ce mémoire, car ils représentent la principale question de notre problématique de départ. Cependant la démarche suivie le long de ce travail a nécessité l'utilisation d'un ensemble d'approches qualitatives, quantitatives et statistiques, nécessitant une base de données cartographique et des mesures hydro-climatiques fiables.

Les difficultés rencontrées le long de ce travail sont essentiellement liées à la qualité et à l'insuffisance des données de transport, solide notamment ceux des concentrations instantanées en MES. Il a fallu intégrer certaines techniques statistiques pour optimiser l'incertitude des résultats de calcul et ceux des modèles régressifs développés .

A partir de l'analyse du milieu physique, nous avons pu formuler les déductions suivantes :

- Le sous-bassin de l'Oued Ressoul possède un profil topographique assez contrasté du nord vers le sud, malgré une superficie de seulement 105 Km<sup>2</sup>. En effet, ses parties méridionales sont dominées par une succession de collines abruptes ainsi que des vallées très étroites, ayant des pentes entre 20 et 35%. Les chaînons montagneux qui forment sa ligne de partage des eaux, s'imposent avec des déclivités extrêmes dépassant facilement les 35%. Paradoxalement, ses parties septentrionales, regroupent de larges vallées et des basses plaines à pentes douces  $\leq 5\%$ . L'énergie du relief résiduel, impose donc, une pente moyenne de 15% malgré la présence des replats au nord.
- Le paysage du sous-bassin de l'Oued Ressoul est typique à celui des régions du Tell Algérien. On retrouve de belles forêts denses qui côtoient des maquis sur une portion totale de 33%. Cependant 37 % du domaine du sous-bassin de l'Oued Ressoul est utilisé pour fins agricoles et aussi une portion de 23% constitue des parcours.
- L'analyse cartographique des formations lithologiques a fait ressortir une dominance d'environ 60% de formations tendres et moyennement tendres. Il s'agit notamment de marnes du Lutétiens, des dépôts alluvionnaires récents (Quaternaires) et des marno-calcaires du Crétacé supérieur. Les formations lithologiques restantes, correspondent à des roches dures et très variées impliquant plusieurs types de Grès, des Microbrèches et des conglomérats (Oligocène- Crétacé supérieur).

---

## Conclusion générale

---

Ces caractéristiques physico-géographiques ont donc mis l'accent sur la forte vulnérabilité des sols du le sous-bassin de l'Oued Ressoul au phénomène de l'érosion hydrique.

Toutefois, la part d'influence de la topographie, de l'occupation du sol et de la pédologie sur l'intensité de l'érosion est difficile à évaluer puisque ces facteurs interagissent d'une manière simultanée.

En dehors des déductions faites, concernant la sensibilité du milieu à l'érosion, la synthèse hydro-climatique entamée pour la période allant de 1979/80 à 1996/97 nous ramène aux conclusions suivantes :

- Le sous-bassin de l'Oued Ressoul est soumis exclusivement à un climat sub-humide, chaud de type méditerranéen, impliquant un module pluvieux modéré égal à 583,24 mm/an et une température moyenne annuelle de 18°C.
- Le régime pluvieux mensuel et saisonnier est plus au moins irrégulier ( $C_v = 0,65$ ) et se caractérise par un hiver très humide où l'abondance des pluies est bien présente en mois de décembre (96mm). Cette abondance persiste jusqu'au printemps mais avec une cadence moins forte que celle de l'hiver, au point que la saison du printemps reste plus humide que celle de l'été et de l'automne. La saison estivale se démarque par une rareté des événements pluvieux, impliquant une période extrêmement sèche, notamment en mois de Juillet.
- En ce qui concerne les écoulements, la synthèse hydrologique à fait ressortir un module annuel de 0,42 m<sup>3</sup>/s pour l'Oued Ressoul. Ce débit correspond à un apport hydrologique moyen de 13,6 millions de mètres cubes et une lame écoulée de 126 mm/an. Ces caractéristiques hydrologiques reflètent un taux d'évapotranspiration annuel relativement élevé. Ce dernier marque un dépassement de +53% du module pluvieux annuel.
- la variabilité des écoulement à l'échelle mensuelle et saisonnière est plus forte que celle constatée à l'échelle annuelle ( $0,89 \leq C_v \leq 1,07$ ). Il semble que le régime hydrologique du bassin est soutenu essentiellement par les flux hydrologiques des saisons d'Hiver et du printemps. Ces deux sasions représentent les seules périodes excédentaires en écoulement. Le débit mensuel record est enregistré durant le mois de février avec une valeur équivalent à presque 3 fois le module annuel (1,16 m<sup>3</sup>/s). A l'opposé , la sasion d'été se démarque par un déficit hydrologique important , au cours de cette période de l'année, l'Oued Ressoul devient presque sec, son débit moyen se voit réduire à seulement quelques dizaines de litre par seconde.

## Conclusion générale

---

Enfin, la dernière partie de ce travail, qui a évoquée l'essentiel de ce mémoire, en l'occurrence la quantification du transport solide en suspension à l'Oued Ressoul à permis de tirer les conclusions définitives suivantes :

- Les courbes de transports solides développées pour la relation  $Q-Q_s$  et en intégrant la technique des classes de débits, ont parvenues à la quantification des apports et de la charge solide, au niveau de l'Oued Ressoul pour la période 1979/80-1996/97,
- Il s'avère que la situation du sous-bassin de l'Oued Ressoul vis-à-vis de l'érosion hydrique est inquiétante, dans la mesure où ce dernier se dégrade avec une moyenne de 370, 37 T/Km<sup>2</sup>/an. Au cours de la période allant de 1979/80 à 1996/97, l'Oued Ressoul a véhiculé une quantité totale d'environ 700 milles tonnes de sédiment. Sa concentration moyenne annuelle des MES est de 2,37 g/l.
- Les apports solides mensuels, saisonniers et annuels de l'Oued Ressoul varient d'une manière très significative ( $0,97 \leq C_v \leq 1,1$ ), cette irrégularité est étroitement liée à celle des écoulements. La saison hivernale à fournit 64% des sédiments transportées par l'Oued Ressoul durant les 18 années d'observation. Durant cette saison, les averses torrentielles susceptibles de générer des processus éroifs ( $> 30$  mm en 24h) sont très fréquentes, surtout en décembre et en janvier. L'érosion est donc très intense en cette période de l'année et la concentration des MES est très élevée (3,41 g/l).
- Le printemps fournit la moitié de la quantité de sédiments évacuée en hiver mais cet apport en sédiment reste, quand même, supérieur à celui estimé pour les saisons de l'automne et de l'été.
- Durant la période estivale, l'érosion des sols est très faible, voir inexistante et les sols se retrouvent fortement asséchés par les chaleurs importantes. Ces conditions fragilisent la résistance mécanique des sols et les rendent facilement érodables et battants au contact des averses automnale. Il est à noter que les averses automnales sont très brèves et le potentiel absorbant des sols est très élevé en cette période, ce qui affaiblie les écoulements et l'intensité de l'érosion. En conséquence, l'automne contribue surtout à l'approvisionnement en matière solide sous forme de colluvions et de matière détachées et qui ne peuvent être transportés vers l'Oued. L'apport solide estimé pour cette saison est plus faible que celui du printemps et de l'hiver.

### Références bibliographiques

- [1] Achite, M., & Ouillon, S. (2007). Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *Journal of Hydrology*, 343(3-4), 187-202. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.06.026.
- [2] ANBT. (2011). Etude d'avant projet detaille du barrage de Ouldjet mellegue. Rapport du bureau d'étude « Energo Projekt-Agence Nationale des Barrages et Transferts » .
- [3] Annandale, G. (1990). Discussion of “Uncertainty in Suspended Sediment Transport Curves” by Edward A. McBean and Sabah Al-Nassri (January, 1988, Vol. 114, No. 1). *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(1), 140-141.
- [4] Arabi, M., & Roose, E. (1989). Influence de quatre systeme de production en zone méditerranéenne de moyenne montagne en Algérie. *Bulletin Réseau Erosion*, 9, 39-51.
- [5] Arnold, J. G., Williams, J., Nicks, A., & Sammons, N. (1990). SWRRB; a basin scale simulation model for soil and water resources management. *SWRRB; a basin scale simulation model for soil and water resources management*.
- [6] Bakker, M. M., Govers, G., Jones, R. A., & Rounsevell, M. D. A. (2007). The Effect of Soil Erosion on Europe's Crop Yields. *Ecosystems*, 10(7), 1209-1219. doi: 10.1007/s10021-007-9090-3.
- [7] Benkadja, R., Benhadouga, M., & Benkadja, A. (2013). Quantification des matières en suspension et valorisation des sédiments de dragage à l'échelle d'un bassin semi-aride: Cas du barrage du K'sob (Algérie). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72(3-4), 523-531.
- [8] Benkhaled, A., & Remini, B. (2003). Analyse de la relation de puissance: débit solide-débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 16(3), 333-356.
- [9] Bouanani, A. (2004). *Hydrologie, transport solide et modelisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie)*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Tlemcen, 249p.
- [10] Bouguerra, H. (2018). *Quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones à risques d'érosion hydrique par utilisation d'un SIG: application aux bassins de Bouhamdane et Ressoul (Nord-Est Algérien)*. Thèse de doctorat de l'université de Tlemcen-Algérie.
- [11] Campbell, F. B., & Bauder, H. (1940). A rating-curve method for determining silt-discharge of streams. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 21(2), 603-607.
- [12] Cohn, T. A., Caulder, D. L., Gilroy, E. J., Zynjuk, L. D., & Summers, R. M. (1992). The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads: An empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay. *Water Resources Research*, 28(9), 2353-2363.
- [13] Colmar, A., Walter, C., Le Bissonnais, Y., & Daroussin, J. (2010). Démarche de validation régionale par avis d'experts du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif. *Etude et gestion des sols*, 17(1), 19-32.
- [14] Colombani, J., Olivry, J.-C., & Kallel, R. (1984). Phénomènes exceptionnels d'érosion et de transport solide en Afrique aride et semi-aride.
- [15] Combes, F., Hurand, A., & Meunier, M. (1995). La forêt de montagne: un remède aux crues. *Compte rendu de recherches*(3), 113-121.

- [16]Cordova, J. R., & Gonzalez, M. (1997). Sediment yield estimation in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements. *Soil technology*, 11(1), 57-65.
- [17]Côte, M. (1998). *Les régions bioclimatiques de l'est algérien*. (in Mébarki Azzedine., 2005), Les régions bioclimatiques de l'Est algérien, Rhumel, n° 6, pp. 57-71.
- [18]De Vente, J., & Poesen, J. (2005). Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Science Reviews*, 71(1), 95-125.
- [19]Demmak, A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse doct. Ing., Paris, 323 .
- [20]Emberger, L. (1955). *Une classification biogéographique des climats*. Recueil, travaux de laboratoire géolo-zoologique, Faculté des sciences. Service botanique. Montpellier, 7, 3-43.
- [21]Etchanchu, D., & Probst, J.-L. (1986). *Érosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole*. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre, 302(17), 1063-1068.
- [22]Ferguson, R. I. (1986). River loads underestimated by rating curves. *Water Resources Research*, 22(1), 74-76.
- [23]Ferguson, R. I. (1987). Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth surface processes and landforms*, 12(1), 95-104.
- [24]Flanagan, D. C., Ascough, J. C., Nearing, M. A., & Laflen, J. M. (2001). The water erosion prediction project (WEPP) model *Landscape erosion and evolution modeling* (pp. 145-199): Springer.
- [25]Fournier, F. (1960). *Climat et érosion: la relation entre laérosion du sol par laeau et les précipitations atmosphériques*. P.U.F., Paris, 201p.
- [26]Fournier, F. (1969). L'érosion hydrique et le climat. *Bulletin technique d'information. Bulletin technique d'information*.
- [27]García-Ruiz, J. M., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., & Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, 198, 20-36. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.05.023.
- [28]Hauchard, E. (2001). *De la dynamique non lineaire a la dynamique du relief en geomorphologie. Application aux bassins-versants de la marge nord occidentale du bassin de paris*. Rouen.
- [29]Heusch, B. (1970). L'érosion du pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-Rif occidental.
- [30]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(7), 1107-1132.
- [31]Jansson, M. (1985). A comparison of detransformed logarithmic regressions and power function regressions. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 61-70.
- [32]Jansson, M. B. (1996). Estimating a sediment rating curve of the Reventazón river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. *Journal of Hydrology*, 183(3), 227-241. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02988-5](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(95)02988-5).
- [33]Jansson, M. B. (1997). Comparison of sediment rating curves developed on load and on concentration. *Hydrology Research*, 28(3), 189-200.

- [34]Khanchoul, K. (2006a). Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants du nord-est algérien. *Unpublished Ph. D. thesis, Department of Geology, University of Annaba, Algeria.*
- [35]Khanchoul, K. (2006b). Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants de l'extrême Nord-est algérien. *Thèse de Doctorat d'état en Géologie.*
- [36]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: Series A, Physical Geography, 90(3), 227-236.*
- [37]Khanchoul, K., Jansson, M. B., & Lange, J. (2007). Comparison of suspended sediment yield in two catchments, northeast Algeria. *Zeitschrift für Geomorphologie, 51(1), 63-94.*
- [38]Khanchoul, K., Tourki, M., & Le Bissonnais, Y. (2015). Assessment of the Artificial Neural Networks To Geomorphic Modelling Of Sediment Yield For Ungauged Catchments, Algeria. *Journal of Urban and Environmental Engineering (JUEE), 8(2), 175-185.*
- [39]Knisel, W. G. (1980). CREAMS: a field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems [USA]. *United States. Dept. of Agriculture. Conservation research report (USA).*
- [40]Lageat, Y. (2004). Les milieux physiques continentaux. Ed. Belin, 1ère édition, 190p.
- [41]Le Bissonnais, Y., Montier, C., Daroussin, J., & King, D. (1998). *Cartographie de l'Aléa" érosion des sols" en France: Ministère de l'aménagement du territoire et de l'Environnement, Rapport technique.91p.*
- [42]Lienou, G. (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au Cameroun. *These de doctorat PhD, Université de Yaoundé I.*
- [43]Martin, C. (1986). *Contribution à l'étude de la dynamique des versants en roches métamorphiques: l'exemple du massif des Maures.* Paris 1.
- [44]McBean, E. A., & Al-Nassri, S. (1988). Uncertainty in suspended sediment transport curves. *Journal of Hydraulic Engineering, 114(1), 63-74.*
- [45]Mebarki, A. (1982). *Le bassin du Kébir-Rhumel (Algérie): hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau.* Thèse 3eme cycle, Université de Nancy, 304p.
- [46]Mebarki, A. (2005). Hydrologie des Bassins de l'Est Algérien: Ressources en eau, aménagement et environnement .Thèse de doctorat d'état de l'Université Mentouri de Constantine.
- [47]Megnounif, A., Terfous, A., & Bouanani, A. (2003). Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, 16(3), 369-380.*
- [48]Milhous, R. T. (1990). Discussion of "Uncertainty in Suspended Sediment Transport Curves" by Edward A. McBean and Sabah Al-Nassri (January, 1988, Vol. 114, No. 1). *Journal of Hydraulic Engineering, 116(5), 730-732.*
- [49]Miller, C. R. (1951). *Analysis of flow-duration: Sediment-rating curve method of computing sediment yield:* United States Department of Interior, Bureau of Reclamation.

- [50] Miller, D. M. (1984). Reducing transformation bias in curve fitting. *The American Statistician*, 38(2), 124-126.
- [51] Milliman, J. D., & Syvitski, J. P. M. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *The Journal of Geology*, 525-544.
- [52] Morgan, R. (2001). A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan–Morgan–Finney model. *Catena*, 44(4), 305-322.
- [53] Morgan, R., Quinton, J., Smith, R., Govers, G., Poesen, J., Auerswald, K., Styczen, M. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth surface processes and landforms*, 23(6), 527-544.
- [54] Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- [55] Nordin Jr, C. F. (1990). Discussion of “Uncertainty in Suspended Sediment Transport Curves” by Edward A. McBean and Sabah Al-Nassri (January, 1988, Vol. 114, No. 1). *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(1), 145-148.
- [56] Pearson, K. (1905). “das fehlergesetz und seine verallgemeinerungen durch fechner und pearson.” a rejoinder. *Biometrika*, 4(1-2), 169-212.
- [57] Pike, R. J., & Wilson, S. E. (1971). Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 82(4), 1079-1084.
- [58] Probst, J. L., & Suchet, P. A. (1992). Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrological Sciences Journal*, 37(6), 621-637. doi: 10.1080/02626669209492628.
- [59] Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2000). Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*, 235(1), 137-149.
- [60] Rey, F., Ballais, J., Marre, A., & Rovéra, G. (2004). Role of vegetation in protection against surface hydric erosion. *Comptes rendus Geoscience. Academie des Sciences, Paris*, 336(11), 991-998.
- [61] Ritter, D. (1984). Process Geomorphology: WC Brown Co. *Debuque, Iowa*. Chapter 5, pp 169-210. Brown Company Publishers, Iowa.
- [62] Roche, M. (1963). Hydrologie de surface. Paris, Gauthier - Villars. 430 p.
- [63] Roose, E., Chebbani, R., & Bourougga, L. (2001). Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 11(4), 317-326.
- [64] Sari, D. (1977). L'homme et l'érosion dans l'Ouarsenis (Algérie). – S.N.E.D Editions, Alger, 624p.
- [65] Selmi, K. (2019). *Analyse et modélisation des transferts Hydro-sédimentaires dans le bassin Versant de Mellègue*. (Thèse de Doctorat de 3eme cycle.), Badji Mokhtar University-UBMA.
- [66] Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117-1142.
- [67] Syvitski, J. P. M. (2003). Supply and flux of sediment along hydrological pathways: research for the 21st century. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 1-11. doi: 10.1016/s0921-8181(03)00008-0.

- [68]Tavares, J. d. P. (2010). *Erosion des sols du Cap Vert : processus et quantification à l'échelle de trois bassins versants de l'île de Santiago*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Département des sciences de la terre et de l'environnement, France, 227 p.
- [69]Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- [70]Tixeront, J. (1960). Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. *General Assembly of Helsinki, 25 July–5 August 1960*, 26-42.
- [71]Tourki, M. (2010). *Etude de l'érosion et du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est-Nord-Est Algérien..* Mémoire de Magistère, Badji Mokhtar University-UBMA.
- [72]Tourki, M. (2019). *Modélisation des flux hydro-sédimentaires et cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Kébir-Rhumel, Nord-est Algérien*. Thèse de Doctorat en science, Badji Mokhtar University-UBMA.
- [73]Tourki, M., Khanchoul, K., Le Bissonnais, Y., & Belala, F. (2017). Sediment yield assessment in the Upper Wadi Kebir catchment, Kébir Rhumel River, Northeast of Algeria (1973-2006). *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 34(1), 122-133.
- [74]Vanmaercke, M., Poesen, J., Broeckx, J., & Nyssen, J. (2014). Sediment yield in Africa. *Earth-Science Reviews*, 136, 350-368.
- [75]Verhoff, F. H., Melfi, D. A., & Yaksich, S. M. (1980). River nutrient and chemical transport estimation. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 106(3), 591-608.
- [76]Vila, J.-M. (1980). *La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens*. – Thèse Sc., Paris VI, 655p.
- [77]Walling, D. E. (1977). Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Water Resources Research*, 13(3), 531-538; 1944-7973.
- [78]Walling, D. E., & Fang, D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 111-126. doi: 10.1016/s0921-8181(03)00020-1.
- [79]Walling, D. E., & Webb, B. W. (1981). The reliability of suspended sediment load data [River Creedy, England].
- [80]Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1960). A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. *Transactions 7th int. Congr. Soil Sci.*, 1, 418-425.
- [81]Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*.
- [82]Young, R., Onstad, C., Bosch, D., & Anderson, W. (1989). AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of soil and water conservation*, 44(2), 168-173.