

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Université de Batna-2-
Faculte de Technologie
Département d'hydraulique



THÈSE
Présentée pour l'obtention du diplôme de
Doctorat L.M.D en hydraulique
Option : **hydraulique**

THEME

Modélisation des flux hydro-sédimentaires et
cartographie des zones à risques d'érosion hydrique dans
certains bassins versants des hauts plateaux
constantinois.

Présentée par :
M. BALLA FAIZA

Directeur de thèse
Kabouche Nabil

Année universitaire 2018/2019

Devant le jury composé de :

Lahbari Noureddine	Professeur	Batna 2	Président
Kabouche Nabil	M.C.A	Batna 1	Rapporteur
Khanchoul Kamal	Professeur	Annaba	Co-Rapporteur
Massaid Belkacem	M.C.A	Batna 2	Examineur
Tiri Ammar	M.C.A	Batna 2	Examineur

A LA MEMOIRE DE MON CHER PAPA,

Balla Abdelkader, En témoignage de l'amour, affection et le soutien que tu m'as offerts depuis ma naissance.

Pour toutes les peines et tous les sacrifices que tu as consentis pour mon éducation, tu m'as appris à me battre jusqu'au bout pour réussir, je n'ai été guidée jusqu'à présent que par le désir de t'honorer.

Aucun mot ne saurait exprimer ma gratitude, mon amour et mon profond respect.

Puisse Dieu, tout puissant, l'accueille Dans son vaste paradis.

A MA CHÈRE MAMAN,

Nadjia Abed, A la plus douce des mamans.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'une grande aide pour mener à bien mes études.

Tu as été très patiente, tu as passé de longues nuits et vécu des moments d'angoisse pendant toutes mes années d'études, tu m'as comblée avec ta tendresse et tes sacrifices.

Puisse Dieu t'accorder santé et longue vie.

A MON CHER MARI,

Abbessene Mohamed Lamine, Depuis le jour où je t'ai connu, ma vie est comblée de bonheur. Ta présence m'inspire la sérénité et la tranquillité de l'âme.

Merci pour tes encouragements, tu as toujours su trouver les mots qui conviennent pour me remonter le morale dans les moments pénibles, grâce à toi j'ai pu surmonter toutes les difficultés.

Que dieu nous bénisse, protège notre amour et nous aide à réaliser tous nos rêves partagés.

A MA CHÈRE PETITE FILLE,

Melina que le bon Dieu fasse que ton arrivée parmi nous soit un événement heureux.

Je te souhaite de grandir dans un monde d'amour et de paix.

A MA CHÈRE TANTE et MES DEUX FRÈRE,

Chère Zahia, tu as toujours été pour moi un exemple dans tout ce que tu faisais, dur à suivre parfois, mais le meilleur certainement.

Chères Fethi et Lotfi et leurs épouses Rawia et Hadjer et leurs enfants, j'ai toujours su que j'ai le plus beau et le plus adorable des frères.

Vous m'avez toujours apporté amour, soutien et compréhension, Pour votre grande gentillesse, vous trouverez dans ce travail l'expression de mon profond amour pour vous.

Que Dieu vous protège et illumine vos chemins.

A MA CHÈRE COUSINE ANFEL,

Tu trouveras felfoula dans ce travail l'expression de mon amour pour toi.

Puisse Dieu te prêter santé et longue vie.

*A LA MEMOIRE DE MES CHERS GRANDS
PARENTS Maternelle,*

*Chère mami Zoulikha, ton grand coeur a toujours fait de toi mon refuge préféré.
Tu m'as comblée d'amour depuis mon enfance.
Merci pour tes prières pour moi tout au long de mes années d'études, tu
trouveras dans ce travail l'expression de mon amour pour toi.*

A MA CHÈRE AMIE ROUKAYA,

Merci pour tes prières pour moi, tu trouveras dans ce travail l'expression de mon amour pour toi.

Puisse Dieu te prêter santé et longue vie.

A MON TRÈS CHER TONTON,

Kamel boumaza et son épouse Salaha Kadri et leurs enfants, Je n'oublierai jamais votre amour et attention envers moi.

Je vous dédie tous ce travail en signe de mon amour pour vous.

*A MES TRÈS CHÈRES TANTES,
TOUS MES COUSINS ET COUSINES,*

Je vous dédie tous ce travail en signe de mon amour pour vous.

A MES CHERS BEAUX-PARENTS,

Merci pour vos encouragements et votre compréhension.

Veillez trouver dans ce travail, l'expression de mes sentiments et mon respect pour vous.

Je vous souhaite tout le bonheur du monde.

A TOUS MES AMIS,

Je n'oublierai jamais les bons moments passés ensemble et les beaux souvenirs partagés des années d'études et surtout de travail surtout mon frère Lotfi kadour sans oublié (Sarrah Smati, Karim chabi, Rochdi, nabil, salima, fatma, kamla, etc..) l'équipe GART 2012-2015.

Je vous souhaite plein de bonheur et que notre amitié dure toujours.

*A toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de
ce travail,*

Veillez accepter tous mes remerciements et gratitude.

Avant propos

Ce travail de recherche est le fruit de cinq années d'investigation dans le domaine de l'érosion et des transports solides. Il a été réalisé sous la direction scientifique du docteur Kabouche Nabil, comme directeur de thèse et le professeur Khanchoul Kamel, comme Co-encadreur, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

J'exprime mes plus vifs remerciements à messieurs les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail et de participer à mon jury d'examen malgré leurs nombreuses occupations.

Je remercie aussi le personnel de l'ANRH de Constantine, ANBT d'Alger et BNEDER qui ont mis à ma disposition les données climatiques et hydrométriques.

Une douce pensée pour les enseignants, qui m'ont prêté une oreille attentive et un soutien inébranlable : Mahmoud Tourki, Fares Laouacheria, Moncef Chabi, Hamouda boutagane, Soraya Bouslah et collègues et ami : Hamza Bougerra, Oussama Derdours, Hamza Bouchahed, Chemseldine Bouhedeb ; Amina Khazzazena

Je remercie aussi tout le personnel du Département d'hydraulique université badji-Mokhtar annaba sous la direction du chef de département Kechida Said, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

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

LISTE DES MATIERES

Avant Propos	ix
Résumé	1
Abstract	2
ملخص	3

Introduction générale

Introduction	4
Problématique de l'érosion en Algérie	6
Problématique	7

Chapitre I

Description de la zone d'étude

Introduction	11
I.1. Cadre général du terrain d'étude	11
I.1.1. Cadre géographique, facteur topographique :	12
I.1.1.1. La plaine :	14
I.1.1.2. Les collines :	14
I.1.1.3. Les montagnes :	14
I.2. Cadre Topographique, Système des pentes :	16
I.3. Cadre géologique, facteur lithologique :	18
I.3.1. Aperçu géologique du bassin	18
I.3.2. Tectonique et Paléogéographique :	18
I.3.3. Stratigraphie et aperçu lithologique :	20
I.4. Facteur Pédologique :	22
I.4.1. Sols à minéraux peu évolués :	22
I.4.2. Sols calcimagnésiques et sols bruns calcaires :	22
I.4.3. Sols calcimagnétiques avec des croûtes calcaires :	23
I.4.4. Sols peu développés type lithosol et régosol :	23
I.5. Facteur végétale :	24
I.6. Facteur climatique :	26
I.6.1. Aperçu sur le climat de l'Algérie :	27
I.6.2. Etude des précipitations :	27
I.6.2.1. Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles :	30
I.6.2.2. Répartitions spacialedes précipitations annuelles:	30
I.6.3. Températures :	34
Conclusions du chapitre I :	35

Chapitre II

Analyse Morphométrique

Introduction :	37
II.1. Caractéristiques de forme:	37
II.1.2. Rectangle équivalent :	38
II.2. Caractéristiques du relief :	38
II.2.1. Analyse altimétrique :	39
II.2.2. L'intégrale hypsométrique :	45
II.2.3. Coefficient orographique :	45
II.2.4. Indice de pente :	45
II.2.5. Pente moyenne :	45
II.2.6. Indice de pente globale I_g :	47
II.2.7. Dénivelée spécifique :	48
II.3. Réseau hydrographique :	49
II.3.1. Oued Chemorah :	49
II.3.2. Oued Reboa :	50
II.3.3. Oued Soultez :	50
II.4 Hiérarchisation du réseau :	51
II.4.1. Fréquence des talwegs :	52
II.4.2. Densité de drainage D_d :	53
II.4.3. Densité relative :	53
II.4.4. Coefficient de torrentialité :	54
II.4.5. Temps de concentration :	55
Conclusion du chapitre II:	56

Chapitre III

Modélisation et quantification du transport solide en suspension Par Analyse Statistique

Introduction :	58
III.1. Présentation des données:	59
III.2. Evolution des débits solides en fonction des débits liquides :	59
III.2.1. Approche et Méthodologie :	60
III.2.1.1. Analyse des débits instantanés (établissement de régression entre débits solides et débit liquides) :	62
III.2.2. Résultats et discussions :	63
III.2.2.1. Interprétation des résultats :	67

III.3. Apport Solide :	67
III.3.1. Variation annuelle des apports liquides et solides :	67
III.3.2. Variation saisonnière de l'apport solide :	69
III.4. Relations entre le taux d'érosion spécifique et quelques paramètres :	73
Conclusion du chapitre III :	75

Chapitre IV

Modélisation Cartographique de la Dégradation du sol par SIG

Introduction :	77
IV.1 Equation universelle de perte en sol :	77
IV.2 Données et Méthode d'évaluation de l'érosion utilisée :	78
IV.3 Calcul des facteurs de l'équation universelle de perte en sol.	79
IV.3.1 Facteur de l'agressivité climatique R :	79
IV.3.2 Détermination du facteur K :	82
IV.3.2.1 Facteur d'érodéabilité K de Williams :	83
IV.3.3 Facteur Topographique LS :	86
IV.3.3.1 Carte des pentes :	86
IV.3.3.2 Carte des longueurs de pentes (Facteur L) :	87
IV.3.3.3 Détermination du facteur topographique (facteur S) :	88
IV.3.4 Facteur du couvert végétal et de l'occupation des sols C :	90
IV.3.5 Facteur des pratiques antiérosives P :	92
IV.4 Evaluation des pertes en sol :	92
IV.4.1 Bassin de l'Oued Chemorah :	93
IV.4.1.1 Analyse statistique de différents facteurs :	95
IV.4.2 Bassin de l'Oued Reboa et l'Oued Sultez :	95
IV.5. Risque d'érosion :	96
IV.5.1 Comparaison entre le taux de la sédimentation mesuré et calculé :	97
IV.6. Description des zones sensibles à l'érosion:	98
IV.6.1 Zones à grande sensibilité à l'érosion :	102
IV.6.2 Zones à sensibilité moyenne :	103
IV.6.3 Zones à sensibilité réduite :	103
Conclusions du chapitre IV	105

Chapitre V

Barrage de Koudiet Medaour et les Moyens de lutte anti-érosif

Introduction:	107
V.1. Situation géographique de barrage :	107
V.2. Description du barrage :	108
V.3. Géologie du site :	112
V.4. Historique sur le déroulement des travaux du barrage :	113
V.5. Caractéristiques technique du Barrage:	114
V.6. Les impacts et la contrainte attendue sur le barrage de Koudiet Medaour :	114
V.6.1. basé sur la mesure du taux de remplissage de la retenue :	115
V.6.2. basé sur la mesure de la turbidité :	116
V.7. La vie du barrage de K.Medaour d'après l'envasement dans le temps :	117
V.8. Les moyens de lutte contre l'envasement du barrage :	117
V.8.1. Correction des ravines :	118
V.8.2. Aménagement de l'Oueds Reboa et Soultez :	118
V.85. La pollution anthropique :	118
Conclusion du chapitreV :	120
Conclusion générale :	121
Références bibliographiques :	123
Production scientifique :	129

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Description de la zone d'étude

Figure. I.1 : Bassin versant de l'Oued Chemorah dans le cadre du grand bassin versant des hauts plateaux constantinois	12
Figure. I. 2 : Localisation du bassin versant de l'Oued Chemorah dans le cadre des deux sous-bassins de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez.....	13
Figure. I.3 : Localisation et cadre structural du bassin de l'Oued Chemorah et ces bassins sous-bassin de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez.....	15
Figure. 1.4 : Carte des classes de pentes dans le bassin versant de l'Oued Chemorah et ces sous-bassins de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez	17
Figure. I.5 : Carte géologique du bassin de l'Oued Chemorah et ces deux sous bassin de l'Oued Soultez et l'Oued Reboa.....	19
Figure. I.6 : Carte Lithologique du bassin de l'Oued chemorah et ces deux sous bassin de l'Oued Soultez et l'Oued Reboa.....	21
Figure. I.7: Formation pédologique des bassins de l'Oued Chemorah de l'Oued Soultez et l'Oued Reboa.....	24
Figure.I.8 : Présentation de l'occupation du sol dans le bassin de l'Oued Reboa et le bassin l'Oued Soultez.....	25
Figure. I.9 : Précipitations moyennes annuelles aux stations pluviométriques du bassin de l' Oued Chemorah et ces sous bassins:.....	30
Figure. I.10 : Présentation des précipitations moyenne par la méthode de THEISSEN dans le bassin de l'Oued Reboa et le bassin l'Oued Soultez.....	31
Figure. I.11 : Répartition des classes de précipitations dans le bassin versant de l'Oued Chemorah, et ces sous bassins s de la période 1985 /2012	32

Chapitre II

Analyse Morphométrique

Figure. II.1 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Reboa.....	40
Figure. II.2 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Soultez	40
Figure. II.3 : Répartition des altitudes dans le bassin de l'Oued Chemorah et ses sous bassins	42
Figure. II.4 : Répartition du réseau hydrographique du bassin de l'Oued Chemorah et ces sous bassins de l'Oued Reboa et Soultez	50
Figure. II.5 : Classification du chevelu hydrographique du bassin de l'Oued Chemorah et ses sous bassins de l'Oued Reboa et Soultez	51

Chapitre III

Modélisation et quantification du transport solide en suspension

Par Analyse Statistique

Figure. III.1 : Modèles annuels reliant les débits solides aux débits liquides instantanés (1985-2012) :(a) de l'Oued Reboa ; (b) l'Oued Soultez	62
Figure. III.2 : Modèles annuels reliant les débits solides aux débits liquides instantanés $C=f(Q)$ d'après la méthode des classes :(1985-2012) de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez . 64	
Figure. III.3 : Modèles saisonnière reliant les débits solides aux débits liquides instantanés d'après la méthode des Classes : (1985-19816) à (2011-2012) de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez	65
Figure. III.4 : Variations annuelle des Apports solides et Apports liquides dans l'Oued Reboa, et l'Oued Soultez.....	68
Figure. III.5 : Crue du 08/04/1990 dans (a) le bassin de l'Oued Reboa, (b) le bassin de l'Oued Soultez.....	71
Figure. III.6 : Distribution de la dégradation spécifique dans les deux sous-bassins (a) de l'Oued Reboa et (b) de l'Oued Soultez pour la période 85/12.....	72
Figure. III.7 : relation entre le taux d'érosion spécifique annuel(E_s) et la lame ruisselée (L_r) de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez	73
Figure. III.8 : relation entre le taux d'érosion spécifique (E_s) annuel et la lame ruisselée (L_r) et lame précipitée (L_p) à l'Oued Reboa et l'Oued Soultez.....	74

Chapitre IV

Modélisation Cartographique de la Dégradation du sol par SIG

Figure. IV.1 : Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique par la méthode de Wischmeier RUSLE dans le bassin versant de l'Oued Chemorah et ses sous bassins. ...	79
Figure. IV.2: Carte du facteur d'érosivité de pluie R	81
Figure. IV.3: Distribution des valeurs du facteur K.....	85
Figure. IV.4 : Distribution des valeurs du facteur L	87
Figure. IV.5 : Distribution des valeurs du facteur S.....	88
Figure. IV.6 : Distribution des valeurs du facteur LS	89
Figure. IV. 7 : Distribution des classes du facteur C.....	91
Figure. IV.8 : Carte des pertes en sols du bassin versant de l'Oued Chemorah	93
Figure. IV.9 : Distribution des valeurs des classes de perte en sol de l'Oued Chemorah	94
Figure. IV.10 : Répartitions des pertes en sols des sous-bassins versants de l'Oued Soultez	95

Figure. IV.11 : Répartitions des pertes en sols des sous-bassins versants de l'Oued Reboa	96
Figure. IV.12 : Représentation des valeurs du taux de sédimentation calculé par le model de regression $C=f(QI)$ et le model RUSLE	97
Figure. IV.13 : Répartitions des classes de la sensibilité à l'érosion en fonction de la topographie du bassin de l'Oued Chemorah et ses sous bassins	98
Figure. IV.14 : Répartitions des classes de sensibilité à l'érosion en fonction de la Pédologie du bassin de l'Oued Chemorah et ses sous bassins	99
Figure. IV.15 : Répartitions des classes de la sensibilité à l'érosion en fonction de l'occupation du sol du bassin de l'Oued Chemorah et ces sous bassins	100
Figure. IV.16 : Répartitions des classes de la sensibilité à l'érosion en fonction de la pluviométrie du bassin de l'Oued Chemorah et ces sous bassins	101
Figure. IV.17 : Répartitions des classes de la sensibilité à l'érosion du bassin de l'Oued Chemorah et ces sous bassins	102

Chapitre V

Barrage de Koudiet Medaour et les Moyens de lutte anti-érosif

Figure V.1 : Présentation géographique et bathymétrique du barrage K.Medaour	108
Figure V.2 : Représentation de la coupe principale du Barrage de Koudiet Medaour	109
Figure V.3 : Représentation de la digue de col du Barrage de Koudiet Medaour	110
Figure V.4 : Photo Représentatif de la tour de prise du barrage Koudiet Medaour	111
Figure V.5 : Photo Représentatif de la tour de prise et la vidange de fond du barrage Koudiet Medaour	111
Figure. V.6 : Représentation de la coupe géologique longitudinale du Barrage de Koudiet Medaour	112
Figure V.7: représentation de la courbe Hauteurs Capacités pour le Barrage de Koudiet Medaour	115

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Description de la zone d'étude

Tableau. I.1 : Classes des pentes dans le bassin de l'Oued Soultez (BV1) et le bassin de l'Oued Reboa (BV2)	17
Tableau. I.2 : Distribution de la lithologie pour les deux bassins	22
Tableau. I.3 : Distribution de la pédologie pour les deux bassins.....	23
Tableau. I.4: Distribution du couvert végétal pour les deux bassins.....	26
Tableau. I.5 : Coordonnées géographique des Stations Pluviométriques.	28
Tableau. I.6: Précipitations moyennes mensuelles et annuelles 85/12	29
Tableau. I.7 : Répartition saisonnière des précipitations pour la période 85/12	33
Tableau. I.8 : Coordonnées géographique des Stations	34

Chapitre II

Analyse Morphométrique

Tableau. II.1 : Valeurs du coefficient de Gravelius pour les différents sous bassins.....	37
Tableau. II.2: Dimensions du rectangle équivalent pour les différents sous bassins	38
Tableau. II.3 : Répartition hypsométrique du bassin versant de l'Oued Reboa.....	39
Tableau. II.4 : Répartition hypsométrique du bassin versant de l'Oued Soultez	40
Tableau. II.5 : Répartition des Altitudes caractéristiques du bassin versant de l'Oued Reboa et Soultez.....	42
Tableau. II.6 : Analyse altimétrique au bassin de l'Oued Soultez	43
Tableau. II.7 : Analyse altimétrique au bassin de l'Oued Reboa.....	44
Tableau. II.8 : Valeurs du coefficient orographique pour les deux sous bassins	46
Tableau. II.9 : Pente moyenne pour les différents sous bassins.....	47
Tableau. II.10 : Indice de pente globale pour les différents sous bassins	47
Tableau. II.11 : Classification du relief selon Ig par O.R.S.T.O.M	48
Tableau. II.12 : Classification du relief selon les valeurs de D_s	49
Tableau. II.13 : Classification des longueurs et des nombres des cours d'eau du bassin de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez.....	52
Tableau. II.14 : Fréquence de lalwegs pour les deux sous bassins	52
Tableau. II.15 : Densité de drainage pour les deux sous bassins	53
Tableau. II.16 : Fréquence relative pour les deux sous bassins	54
Tableau. II.17 : Coefficient de torrencialité pour les deux sous bassins.....	54
Tableau. II.18 : Temps de concentration pour les deux sous bassins.....	55

Chapitre III

Modélisation et quantification du transport solide en suspension Par Analyse Statistique

Tableau. III.1 : Quelques modèles utilisés en Algérie	58
-------------------------------------------------------------	----

Tableau. III.2 : Modèles Annuels et saisonniers liant les débits liquides instantanés aux concentrations instantanées après la méthode des Classes pour la Station Timgad de l'Oued Soultez.....	66
Tableau. III.3 : Modèles Annuels et saisonniers liant les débits liquides instantanés aux concentrations instantanées d'après la méthode des Classes pour la Station Reboa de l'Oued Reboa.....	66
Tableau. III.4: Répartition saisonnière de l'Apport liquide Al en [Hm3], apport solide As en [tonnes], dégradation spécifique Ds en [T.km ⁻² .an-1], coefficient de ruissellement CR [%], concentration moyenne C [g l ⁻¹] de l'Oued Soultez (Station hydrométrique Timgad) et l'Oued Reboa (station hydrométrique Reboa);Période 85/12.....	72

Chapitre IV

Modélisation Cartographique de la Dégradation du sol par SIG

Tableau. IV.1 : Précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) et valeur de R moyen pour la période 1985-2012	80
Tableau. IV.2 : Distribution des valeurs du facteur R dans le Sbv. de l'Oued Reboa- Sbv. de l'Oued Soultez	82
Tableau. IV.3 : Distribution des classes du facteur K dans le Sbv. de l'Oued Reboa- Sbv. de l'Oued Soultez	84
Tableau. IV.4 : Distribution des valeurs du facteur K dans le Sbv. de l'Oued Reboa- Sbv. de l'Oued Soultez	85
Tableau. IV.5 : Distribution des valeurs du facteur LS dans le Sbv. de l'Oued Reboa- Sbv. de l'Oued Soultez.....	90
Tableau. IV.6 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant.....	92
Tableau. IV.7 : Répartition des classes en perte en sol du BV de l'Oued chemorah et ces sous bassins.....	94
Tableau. IV.8 : Valeur minimale et maximale de chaque facteur ainsi que leur moyenne	95
Tableau. IV.9 : Répartition des classes en perte en sol du BV de l'Oued Soultez.....	96
Tableau. IV.10 : Répartition des classes en perte en sol du BV de l'Oued Reboa.....	96
Tableau. IV.11 : Valeurs moyenne du risque érosif et des facteurs R, K, LS et C par sous bassin versant	97
Tableau. IV.11 : Classement du degré de sensibilisation à l'érosion en fonction de la superficie	104

Chapitre V

Barrage de Koudiet Medaour et les Moyens de lutte anti-érosif

Tableau V.1 : Estimation des valeurs de l'envasement du barrage de Koudiet Medaour basé sur les mesures de turbidité.....	116
Tableau V.2 : Les valeurs de l'envasement dans le temps du barrage de Koudiet Medaour	118

Résumé

L'érosion est un phénomène majeur qui cause des dommages non seulement au sol et à l'agriculture, mais aussi à la qualité de l'eau s'élevant à des tonnes de matière transportées annuellement à la surface de la terre. Ce fait a attiré l'intérêt des chercheurs à comprendre son mécanisme et à en expliquer les causes et les conséquences. Ce travail est une étude comparative de l'érosion hydrique dans les deux bassins semi-arides de l'Oued Soultez et l'Oued Reboa; situé dans le nord-est de l'Algérie. Une description de l'ensemble des paramètres géomorphologiques, géologiques, hydrologiques et climatiques du bassin versant a été réalisée. L'approche retenue pour la quantification du transport sédimentaire consiste à rechercher le meilleur modèle régressif pour représenter la relation statistique entre le rendement sédimentaire et l'écoulement de l'eau à différentes échelles: annuelle, saisonnière et mensuelle, a permis d'observer des relations entre le transport solide et leurs débits liquides. Les données disponibles couvrent 27 ans à partir de 1985-2012. Les résultats montrent que le modèle de puissance a donné le meilleur coefficient de corrélation. Les résultats ont indiqué que l'Oued Reboa a transporté en moyenne 14,66 hm³ d'eau et de 0,25 million de tonnes de sédiments / an. Tandis que l'Oued Soultez a transporté 4,2 hm³ d'eau et de 0,11 million de tonnes de sédiments /an. A une échelle saisonnière, les quantités de sédiments ont montré une érosion hydrique significative en automne avec environ 44% et secondairement au printemps avec 29% à l'Oued Soultez. Contrairement à l'Oued Reboa, le transport de sédiments représente 32% et 46% en automne et au printemps respectivement. Sur la base des quantités de sédiments obtenues; il est constaté que les physiques facteurs: tels que les reliefs escarpés, la nature lithologique vulnérable des roches et la couverture végétale pauvre, ont considérablement Contribué à accélérer l'érosion des sols. L'intégration des cartes thématiques des différents facteurs par le modèle RUSSEL (Revised Universal Soil Loss Equation) avec leurs bases de données, a permis d'une manière rapide fournir des éléments pour cartographier la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion en passant par une analyse des principaux facteurs de l'érosion à savoir la lithologie, les pentes et l'occupation du sol. Les cartes obtenues sont intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG ARCGIS10.1) à l'aide d'une combinaison additive pour établir une carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique. quatre classes de vulnérabilité à l'érosion ont été distinguées : les zones à faible vulnérabilité (>3 t/ha/an) qui représente 52% de la superficie totale ; les zones à vulnérabilité moyenne (3-7 t/ha/an) de 25% de sa superficie totale , les zones fortement vulnérables (7-12 t/ha/an) et qui représente 14% de sa superficie , les zones très fortement vulnérables (>12t/ha/an) qui présente les haute reliefs de formations marno-calcaire de 8% de sa superficie totale. Cette première étude cartographique est un outil devant aider les décideurs pour l'attribution des zones de cultures et des sites pouvant abriter des infrastructures socio-économiques.

Mots clés : Erosion hydrique- Apport solide -SIG- Oued Soultez-Oued Reboa

Abstract

Erosion is a major phenomenon that causes damage not only to soil and agriculture, but also to the quality of the water amounting to tonnes of matter annually transported on the earth's surface. This fact has attracted the

Interest of researchers to understand its mechanism and explain its causes and consequences. This work is a comparative study of water erosion in the two semi-arid catchments of Wadi Soultez and Wadi Reboa; located in the North-East of Algeria. The approach adopted for the quantification of sediment transport consists on researching the best regressive model to represent the statistical relation between the sediment yield and the measured water discharge at different scales: annual, seasonal and monthly. The available data cover 27 years from

1985–2012. The results show that the power model has given the best correlation coefficient. Results have indicated that Wadi Reboa transported an average of 14.66 hm³ of water and 0.25 million tonnes of sediments annually.

While Wadi Soultez has transported 4.2 hm m³ of water and 0.11 million tonnes of sediments annually. At a seasonal scale, sediment amounts have showed significant water erosion in autumn with around 44% and secondarily in the spring with 29% in Wadi Soultez. Unlike Wadi Reboa, sediment transport represents 32% and 46% in autumn and spring respectively. Based on the obtained sediment amounts; it is found that the physical factors: such as steep reliefs, vulnerable lithological nature of rocks and poor vegetal cover, have significantly

Contributed in accelerating soil erosion. The integration of the thematic maps of the various factors by the RUSLE model (Revised Universal Soil Loss Equation) with their databases, allowed to quickly provide elements to map the multifactorial vulnerability to erosion through an analysis the main factors of erosion, namely lithology, slopes and land use. The resulting maps are integrated into a Geographic Information System (GIS ARCGIS10.1) using an additive combination to establish a vulnerability map to water erosion. four classes of vulnerability to erosion were distinguished: areas with low vulnerability (> 3 t / ha / year) which represents 52% of the total area; the areas of medium vulnerability (3-7 t / ha / year) of 25% of its total area, the highly vulnerable areas (7-12 t / ha / year) and which represents 14% of its area, the areas very strongly vulnerable (> 12t / ha / year) which presents the high reliefs of marl-limestone formations of 8% of its total area. This first mapping study is a tool to help decision-makers to allocate crop areas and sites that can house socio-economic infrastructures.

Key words: Water Erosion- Sediment loads-GIS- Wadi Soultez-WadiReboa.

ملخص

يعتبر الانجراف ظاهرة رئيسية لا تسبب أضراراً في التربة والزراعة فحسب، وإنما أيضاً لنوعية المياه التي تصل إلى أطنان من المواد المنقولة سنوياً إلى سطح الأرض. وقد جلبت هذه الحقيقة اهتمام الباحثين بفهم آليته وشرح أسبابه وعواقبه. هذا العمل هو دراسة مقارنة لتآكل المياه في الحوضين شبه القاحلين في وادي سلتيوز ووادي ربوة. وتقع في شمال شرق الجزائر، وتم الانتهاء من وصف جميع المعالم الجيومورفولوجية والجيولوجية والهيدرولوجية والمناخية لمستجمعات المياه. ويتمثل النهج المستخدم في تحديد حجم نقل الرواسب في البحث عن أفضل نموذج رجعي يمثل العلاقة الإحصائية بين محصول الرواسب وتدفق المياه على مستويات مختلفة: سنوية وموسمية وشهرية. والعلاقات بين النقل الصلب وتدفقاتها السائلة. وتغطي البيانات المتاحة 27 عاماً من 1985-2012.

وأظهرت النتائج أن نموذج القدرة أعطى أفضل معامل ارتباط. أشارت النتائج إلى أن وادي ربيوا حمل متوسط 14.66 هيدرو متر مكعب من المياه و0.25 مليون طن من الرواسب / السنة. في حين أن أويد سولتيوز نقل 4.2 من المياه و0.11 مليون طن من الرواسب / السنة.

على نطاق موسمي، أظهرت كميات الرواسب تآكل كبير في المياه في الخريف مع حوالي 44٪ وثنانياً في الربيع مع 29٪ في وادي سولتيوز. وعلى عكس وادي ربيوا، يشكل نقل الرواسب 32٪ و46٪ في الخريف والربيع على التوالي. استناداً إلى كميات الرواسب التي تم الحصول عليها. ووجد أن العوامل المادية: مثل الانتكاسات الحادة، والطبيعة الصخرية الضعيفة للصخور وضعف الغطاء النباتي، ساهم في تسريع تآكل التربة.

وقد أتاح دمج الخرائط المواضيعية لمختلف العوامل من خلال النموذج مع قواعد بياناتها أن يوفر بسرعة عناصر لتخطيط قابلية التأثير المتعددة العوامل للتآكل من خلال إجراء تحليل للعوامل الرئيسية للتآكل إلى معرفة علم الصخور، المنحدرات واستخدام الأراضي.

وتدمج الخرائط الناتجة في نظام معلومات جغرافية (جيس اركجيس 10.1) باستخدام تركيبة مضافة لإنشاء خريطة ضعف لتآكل المياه.

تم تصنيف أربع فئات من الضعف للتآكل: المناطق ذات الضعف الضعيف (أكثر من 3 طن / هكتار / سنة) والتي تمثل 52٪ من المساحة الكلية. (3-7 طن / هكتار / سنة)، وهي تمثل 14٪ من مساحة المنطقة، والمناطق شديدة الضعف (12 طن / هكتار / سنة)، وهو ما يمثل انتصارات عالية من تشكيلات الحجر الجيري المارلي بنسبة 8٪ من المساحة الكلية. هذه الدراسة الأولى هي أداة لمساعدة صانعي القرار على تخصيص مناطق المحاصيل والمواقع التي يمكن أن تستضيف البنى التحتية.

الكلمات الدالة: تآكل الماء - أحمال الرواسب - جيس - وادي سولتيوز - وادي ربيوا

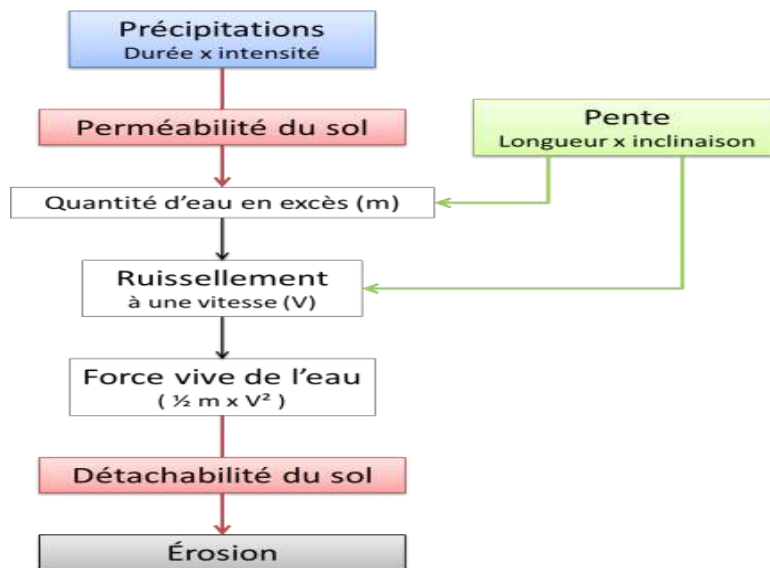
Introduction générale

Les environnements montagneux algériens présentent aujourd'hui un enjeu socio-économique important, c'est le siège des processus biologiques vitaux pour la continuité de la vie en milieu terrestre. Ils constituent, en effet, les fondements de la quasi-totalité de notre alimentation et de nos ressources forestières. Or, elles sont les plus vulnérables aux dégradations liées en premier lieu au développement des populations et à la pression qu'elles exercent sur les ressources naturelles qui, aujourd'hui, sont largement perturbées. L'un des aspects de cette dégradation réside dans l'érosion hydrique des sols qui s'est accélérée d'une façon alarmante au cours de ces dernières décennies. Ce phénomène qui résulte des interactions entre plusieurs facteurs dont les principaux sont les pluies, la pente, la nature du substrat des sols et l'occupation des sols est accentué par des ruissellements excessifs provoqués par des pratiques humaines qui déstabilisent et fragilisent le sol. Le surpâturage, le défrichement des forêts et les pratiques culturales inappropriées ont eu pour conséquence une augmentation de la quantité de matériaux perdus par les sols et qui se retrouvent dans les cours d'eau, les retenues des barrages, les lacs et les zones de sédimentation. Elles entraînent des conséquences néfastes sur l'économie nationale. Les plus considérables sont :

- Un sol dégradé, essentiellement sur les terres cultivées.
- Une dégradation de la qualité de l'eau due aux particules transportées
- l'envasement des barrages et la diminution de leur capacité de stockage
- les menaces qui pèsent sur les installations humaines par les crues exceptionnelles et par les mouvements de terrain.

L'homme cherche à protéger ses terres et s'acharne à lutter contre ce phénomène d'érosion.

L'érosion hydrique est définie comme étant un phénomène spatial et temporel consistant en un arrachage, un transport et un dépôt des particules du sol, sous l'effet de l'eau, provoquant des conséquences très néfastes aux milieux naturels où la productivité de la terre et la qualité des eaux sont menacés. Son mécanisme, les facteurs qui l'influencent et les conséquences qui en découlent sont bien connues dans la littérature. Les facteurs de l'érosion qui influencent les phénomènes érosifs associent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (Wischmeier et Smith, 1978 ; King et Le Bissonnais, 1992). Son mécanisme est résumé par l'organigramme ci-dessous :



Mécanisme du phénomène d'érosion. (Source : <http://www.supagro.fr>)

L'érosion se présente aujourd'hui comme un problème universel d'actualité. La dégradation spécifique moyenne pour l'ensemble du globe terrestre, tous continents réunis est estimée à 152 t/km²/an (Milliman & Meade, 1983). De ce fait, les recherches dans ce domaine, restent toujours d'actualités, ses recherches visent à simplifier et à rendre efficaces les méthodes pour la quantification et la prédiction de ce phénomène. Ce n'est que dans les années 1950, après le Congrès de Madison de l'association internationale de science du sol, que les méthodes américaines de mesure du ruissellement et de l'érosion ont débuté. Ces études ont commencé d'abord sur des petites parcelles en Afrique francophone (Fournier, 1960), puis en Amérique et récemment, en Asie et en Europe (Hudson, 1973 in Roose 1994). L'Amérique avait donc 20 ans d'avance sur le reste du monde pour collecter des données et développer un premier modèle empirique de prévision des pertes en terre à l'échelle de la parcelle de W.H. Wischmerier et D.D. Smith (Wischmeier et Smith, 1960 à 1978 in Roose 1994).

Néanmoins, ce modèle reste insuffisant pour ceux qui recherchent des modèles basés sur les processus élémentaires d'érosion en s'appuyant sur les événements des années ou encore mieux sur des événements au cours de chaque averse.

Au niveau maghrébin, ce phénomène semble particulièrement très significatif, Heusch et Millies-Lacroix (1971) estime une dégradation spécifique entre 265 et 2569 t/km²/an. Heusch et al (1971), Demmak (1982), Walling (1984) ont évalué cette dégradation spécifique entre 1000 et 5000 t/km²/an. Probst et Amiotte-Suchet (1992) la situent autour de 397 t/km²/an.

D'autres études menées dans cette région incitent à un programme de lutte contre l'érosion nécessitant des interventions urgentes. Parmi ces études, on distingue ceux de :

- Snoussi et al. (1990), appliqués pour le cas des trois Oueds au Maroc montrent une dégradation d'environ 750 t/km²/an.
- Sibari et al. (2001) ont estimé l'apport spécifique moyen annuel du bassin versant marocain de l'Oued Inaouène à 2142 t/km²/an.
- Bergaoui et al. (1998) ont attribué au micro-bassin versant de Tebaga en Tunisie, une dégradation spécifique de 318 t km²/ an.
- Probst et Amiotte -Suchet (1992) ont estimé l'érosion spécifique égale à 7.200 t/km²/an dans l'Oued d'Agrioun en Algérie pour la période 1972-1979.
- Bourouba (1998) attribue à l'Oued Madjerdah supérieure, situé en Algérie orientale, une valeur de 113 t/km²/an.

Les méthodes utilisées par les auteurs suscités ont montré leurs limites lorsqu'elles sont appliquées avec des valeurs très variables d'un bassin à un autre. Ce constat a motivé d'autres chercheurs à publier leurs travaux de recherche sur les transports solides. Ces résultats de recherche montrent l'ampleur de l'érosion hydrique au Maghreb d'une manière générale, et en particulier dans les zones semi-arides où le climat a tendance à accélérer et à amplifier ce phénomène (Benblidia et al. 2001).

Problématique de l'érosion en Algérie :

L'érosion hydrique en Algérie constitue une contrainte majeure au développement de l'agriculture et à la promotion des activités rurales. En conséquence, environ 6 millions d'hectares sont exposés à une érosion active, la dégradation spécifique dans les bassins versants atteint 2000 tonnes/km²/an (Heddadj, 1997). Ce sont donc, en moyenne, 120 millions de tonnes de sédiments qui sont emportés annuellement par les eaux. Les conséquences directes d'un tel phénomène, sont d'abord la diminution de la fertilité des sols et la perte de surfaces agricoles, ce qui fait de l'Algérie l'un des plus gros importateurs mondiaux de produits agricoles. Ensuite la diminution annuelle de la capacité de stockage des barrages. Actuellement évaluée à 20 millions de m³.

Plusieurs organismes nationaux et internationaux se sont mobilisés dans la lutte contre l'érosion. Nous citons à titre d'exemple :

- l'administration des forêts qui, pour protéger les terres et réduire l'envasement des barrages, a imposé une stratégie d'équipement hydraulique rural appelée «**Défense et restauration des sols**». (ROOSE et al. 1993)
- Deux instituts de recherche l'**INRF**«Institut National de **R**cherche **F**orestière » et l'**Orstom**«Office de la recherche scientifique et technique **o**utre-**m**er » ont décidé, d'unir les efforts d'une douzaine de chercheurs pour tester une nouvelle approche participative visant à la valorisation de la terre et du travail tout en réduisant les risques d'érosion en milieu rural. (ROOSE et al. 1993)
- Certains organismes nationaux comme par exemple, **A.N.R.H** « Agence Nationale des Ressources Hydrauliques », **A.N.B.T**«Agence Nationale des **B**arrages et **T**ransferts », se sont attaqués également à ce problème.

Malgré tous les efforts engagés sur le terrain, la dégradation des ressources se poursuit à un rythme effréné. Cela tient d'une part à la modestie des programmes face à l'ampleur des phénomènes érosifs et d'autre part à la faible intégration d'une démarche de conservation des sols et des eaux au niveau des terres agricoles et pastorales. Face à cette situation, il est nécessaire et urgent de réfléchir à des stratégies pour évaluer les enjeux actuels et futurs. Si à l'échelle de la parcelle ce phénomène est maîtrisable, il l'est moins à l'échelle du bassin versant. L'insuffisance ou l'absence de données de jaugeage et de teneurs en sédiments rend plus complexe la connaissance et l'identification du phénomène. Seules des synthèses régionales et des études bathymétriques peuvent permettre d'identifier les zones productrices de sédiments et d'élaborer des cartes ou des abaques d'aide à la décision.

Suite à la gravité de ce phénomène d'érosion, la situation géographique et la disponibilité des données régionales, nous avons décidé d'apporter notre contribution dans la lutte contre le phénomène d'érosion dans le Nord Est de l'Algérie selon la problématique présentée ci-dessous :

Problématique :

Dans le nord-est de l'Algérie, les conditions géomorphologiques et socioéconomiques sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération du phénomène de l'érosion et du transport solide. Outre les pertes en terres fertiles, les sédiments transportés en suspension par les cours d'eau constituent des dépôts importants dans les réservoirs hydrauliques. Dans de

nombreuses zones cultivées de la ceinture des bassins des hauts plateaux constantinois, des problèmes environnementaux graves dus à l'érosion des sols sont de plus en plus fréquents. Les dommages les plus notables sont surtout ressentis par les collectivités locales. La détermination des conditions géomorphologiques susceptibles de provoquer l'érosion et l'utilisation de modèles de prédiction de ce phénomène sont nécessaires pour l'évaluation de la dégradation du milieu et l'implémentation de mesures de conservation des sols efficaces et adaptées.

Depuis des années de nombreux efforts de recherche ont été investis dans le développement de modèles à base physique qui reflètent le niveau des connaissances dans la compréhension des processus. Les efforts de développement investis dans la modélisation ont permis de générer des pistes de recherches et d'améliorer nos connaissances des mécanismes de l'érosion. Toutefois, il y a un besoin pour une cartographie spatialisée et numérique, qui se concentre sur les facteurs physiques et les processus dominants opérant au niveau du bassin versant. Le fonctionnement hydro-sédimentaire à base de mesure des débits et des sédiments reste le moyen le plus adéquat pour la modélisation de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant.

Notre problématique s'inscrit dans la compréhension des facteurs contributeurs de l'érosion au niveau de l'aire d'étude par le biais des méthodes semi-quantitatives et quantitatives.

Dans ce contexte et pour mieux comprendre l'influence des facteurs naturels sur le phénomène de la dégradation des milieux physiques à savoir les bassins versants des hauts plateaux constantinois, on s'intéresse à l'élaboration de modèles de prédiction de l'érosion à l'échelle du bassin versant qui s'appuie sur une paramétrisation simple. Les sols des régions semi-arides et arides subissent de façon variable les effets de l'érosion hydrique, principal facteur de la dégradation de cette ressource. Peu de travaux sur la compréhension des flux hydro-sédimentaires ont été réalisés dans le nord-est algérien. La lutte contre l'érosion hydrique en particulier et la complexité de ce phénomène imposent aujourd'hui l'utilisation de méthodes, modèles et moyens performants pour la gestion de l'information géographique tels que la télédétection et le SIG (Système d'Information Géographique). C'est dans cette optique que s'intègre ce travail, dont l'objectif principal de la thèse est de contribuer à la compréhension et à l'évaluation du risque potentiel d'érosion dans certains bassins versants des hauts plateaux constantinois.

Dans sa réalisation pratique, la thèse se fera de la façon suivante :

- Recherche bibliographique sur les thèmes de la quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones à risques d'érosion hydrique à partir d'une base de données gérée par un SIG ;
- Collecte des données climatiques et hydrométriques au niveau des différents services de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) ;
- Acquisition de la documentation sur les bassins versants étudiés.
- Cartographie, analyse et description des facteurs de l'érosion (Orographie, pentes, lithologie, occupation des sols) en utilisant l'outil informatique et le SIG ;
- Traitement et analyse statistique des caractéristiques hydro-climatiques.
- Une composante de modélisation est mise en évidence dont l'intérêt d'un Système d'Information Géographique (Arcgis) en tant qu'outil informatisé dédié à la gestion de l'information géographique dans le suivi et la quantification de l'érosion hydrique et des transports solides. En outre, la modélisation de la dégradation des sols sera élaborée en se servant d'un logiciel Arcgis, d'une application de ces techniques aux bassins versants choisis servira, entre autres, à montrer comment un SIG permettra à un utilisateur potentiel d'obtenir et de cartographier l'information relative à la sensibilité au sol du phénomène érosif.
- une composante opérationnelle liée à la gestion et la protection des ressources en sol. La compréhension de l'ampleur, de la diversité spatiale, des facteurs et des tendances d'évolution des formes d'érosion hydrique, contribue à lutter contre l'érosion hydrique et à élaborer des documents d'aide au choix des aménagements adéquats.
- Ces composantes alterneront avec des phases de traitement, synthèse, publication et rédaction de la thèse.

Chapitre I

Description de la zone d'étude

Introduction :

Les deux sous-bassins des Oueds Sultez et Reba font partie du bassin versant du barrage de Koudiet Medour, qui lui même appartient au bassin versant de l'Oued Chemorah ont été choisis comme bassins d'application de notre travail suite à l'absence des études sur ces derniers malgré la diversité des données disponibles. Leurs unités naturelles seront étudiées d'abord sur le plan physique (morphologie, géologie, hydrographie, couvert végétal...) pour caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans l'écoulement ensuite sur le plan hydro-climatologique pour évaluer le potentiel hydrique de chaque bassin. Ce choix de terrain nous a été dicté suite au caractère bien individualisé de chaque bassin choisi. Le barrage de Koudiet-Medaour est alimenté par le bassin de l'Oued Chemorah et ses sous bassins. Il s'intègre dans le grand système de mobilisation et des transferts des eaux de surface dans les hautes plaines constantinoises et des Aurès au Nord - Est algérien. Il dispose d'une bonne base documentaire et des données hydro-pluviométriques comparativement aux autres bassins des hautes plaines constantinoises.

Nous présentons dans ce chapitre les principales caractéristiques du bassin ainsi que les données du milieu physique dont nous disposons.

I.1. Cadre général du terrain d'étude :

L'aire est située au nord-est de l'Algérie dans la région des Aurès et fait partie du grand bassin versant des hauts plateaux constantinois dont la surface totale est de 9578 Km² (Figure. I.1). Elle est incluse dans le bassin versant de l'Oued chemorah qui représente le principal affluent avec 35 Km de longueur et 755 Km² de surface. La superficie de ce dernier représente seulement 8% de la superficie totale du grand bassin versant des hauts plateaux constantinois. Malgré sa taille limitée, il participe activement dans la production de sédiments qui envasent le barrage de Koudiet-Medouar en raison de sa nature orographique et lithologique, et sa modestie en couverture végétale.

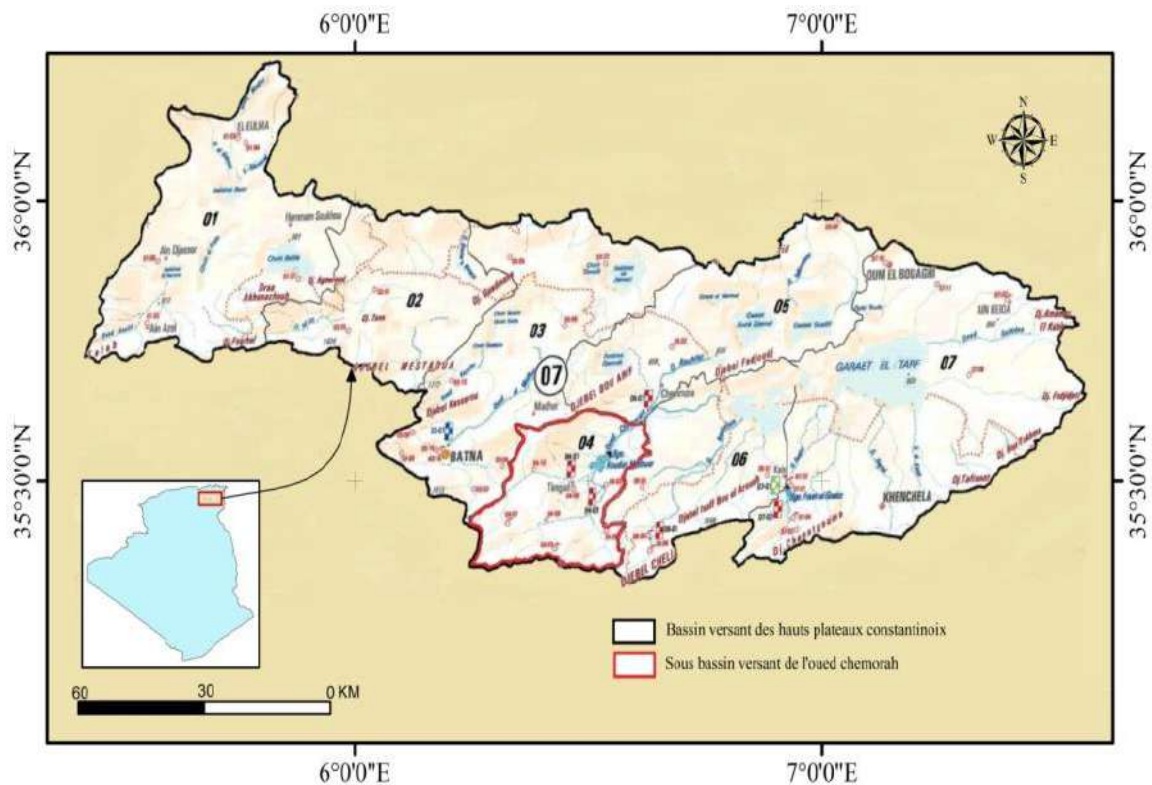


Figure. I.1 : Bassin versant de l’Oued Chemorah dans le cadre du grand bassin versant des hauts plateaux constantinois. (Source : ANRH, 2001)

Les facteurs lithologiques, géographiques et climatiques dans cette zone semi-aride ont donné naissance à un écoulement endoréique des eaux souterraines dans des nappes superficielles qui s’écoulent vers des lacs salés (Sebkhas, Garaâs, ..) (Figure. I.1).

I.1.1. Cadre géographique, facteur topographique :

Appartenant au bassin versant de l’Oued Chemorah, les deux sous-bassins, de l’Oued Reboa, et l’Oued Sultez occupent des superficies égales à 328 Km² et 207 Km² respectivement (Figure. I.2). Les Oueds des deux sous bassin se jettent dans la cuvette du barrage de Koudiet-Medouar, qui compte une capacité de 20 x 10⁶ m³, régularisés depuis 2003 (ANB ,2005).

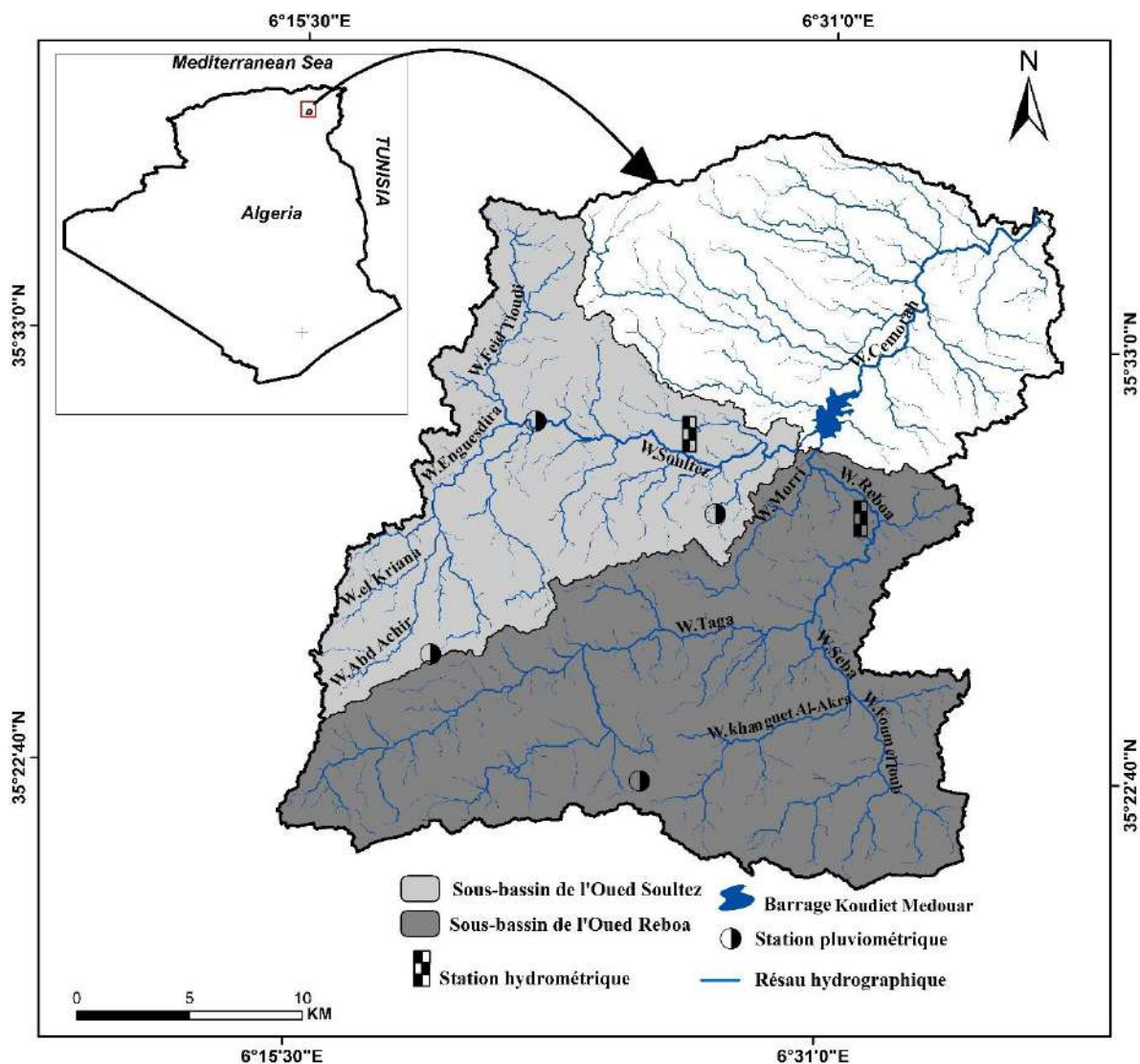


Figure. I. 2 : Localisation du bassin versant de l'Oued Chemorah dans le cadre des deux sous-bassins de l'Oued Reboa et l'Oued Soultz. (Source: Auteur, 2017)

Le bassin versant de l'Oued Chemorah présente des ensembles naturels fortement variés, dont les rebords sont constitués des massifs montagneux des Aurès au Sud, Djebels Bou-Arif au Nord-Ouest, Djebels Asker et Ras er Rih au Sud-ouest, Djebels Tizagrou au Sud-est, et Djebels Amrane au Nord-est, ces grands ensembles physiques agissent surtout sur le comportement hydrologique des deux bassins et qui sont subdivisés en trois milieux naturels bien distincts:

I.1.1.1. La plaine :

Cette zone plutôt plate occupe la plus grande partie du bassin de l'Oued Chemorah, s'étend du Nord à l'Est du bassin avec une altitude de 890 à 1200 m et s'étale jusqu'aux rives des lacs sales avec une déclivité qui ne dépasse pas le plus souvent les 8%. Elle représente 30,8% de la superficie totale du bassin versant de l'Oued Chemorah. Les dépôts accumulés dans cette plaine sont composés dans l'ensemble, de sable, gravier et de limon résultant de la charge solide des Oueds qui perdent leur compétence avant d'atteindre les lacs salés. Ce terrain est utilisé pour les activités agricoles saisonnières (Figure. I.3).

I.1.1.2. Les collines :

C'est une zone de transition entre la montagne et la plaine. Elle s'allonge de l'ouest à l'Est au pied du versant Sud et celui du Djebels Bou-Arif au Nord-ouest, sous forme des collines constituées par les dépôts colluviaux qui descendent en pente atténuée vers la plaine, son altitude varie entre 1200 et 1400 m. En plus le bassin se caractérise par les drains dans ces collines, il s'agit d'une série de glacis sous forme des petits reliefs monoclinaux, La zone de piedmont est le plus souvent agricole (Figure. I.3).

I.1.1.3. Les montagnes :

Elles sont composées essentiellement de massifs montagneux des Aurès qui traversent le Sud du bassin en orientation sensiblement NW-SE. Elles sont constituées par les monts d'Asker (1833 m), Ras er Rih (1916 m), el Mahmel dont l'altitude s'élève jusqu'à 2321 m, plus à l'Est, on rencontre les massifs du Djebels Timagoult (1875 m), Dj Aurès (1746 m), et Djebels Aslaf (1606 m). Au Nord-Ouest du bassin, la ligne de partage des eaux est constituée par les monts de Bou-Arif qui s'allongent du Sud-ouest et au Nord-Est suivant l'orientation générale de l'Atlas Saharien, et présente une altitude maximale de 1746 m, alors que Djebels Tagratine ne forme qu'un petit archipel qui s'élève à 1375 m. Ces zones montagneuses au couvert végétal largement dégradé sont le siège d'une érosion intense. Au massif des Aurès sur le bassin de l'Oued Chemorah, les zones montagneuses constituent les lignes de partage des eaux. L'Oued Reboa prend forme par la jonction de l'Oued Taga issu des massifs montagneux des Aurès (Dj.Aurès) en direction SW-NE et l'Oued Seba qui résulte de la confluence des deux Oueds, Oued Khanguet El-Akra et Oued Fom Toub (Figure. I.2). L'Oued Reboa change brusquement de direction (roche gréseuse) vers le Nord-Ouest où il reçoit l'Oued Morri sur sa rive gauche, et reprend ensuite son orientation SW-NE pour confluer avec l'Oued Soultez à environ 3 Km,

formant finalement le cours d'eau principale Chemorah de 35 Km de longueur (Figure. I.2). L'Oued soultez résulte aussi de la jonction de deux Oueds : Feid Tlouidi qui prend sa source au nord-ouest de djebel Tagratine et l'Oued, et Enguesdira qui prend naissance à partir de la confluence de l'Oued El-kriane et l'Oued Abdel Achir qui se forment dans les Tagratine avant de confluer avec l'Oued Reboa (Figure. I.2). Dans la zone des Aurès algérien s'organisent un ensemble de massifs montagneux, qui constituent la limite sud du bassin de l'Oued Reboa et qui remonte jusqu'à 2321 m d'altitude (Djebel el Mahmel, Dj Aurés). La dépression de ces monts s'allonge et se rétrécit vers le nord du bassin formant une zone plate avec une altitude minimale de 981m (Figure. I.3). Le massif des Aurès constitue également la limite Sud-Est du bassin de l'Oued Soultez. Ces monts peuvent aller jusqu'aux 1938 m (Djebel Askar). Leur dépression s'allonge et s'élargit du nord vers l'Est (Figure. I.3).

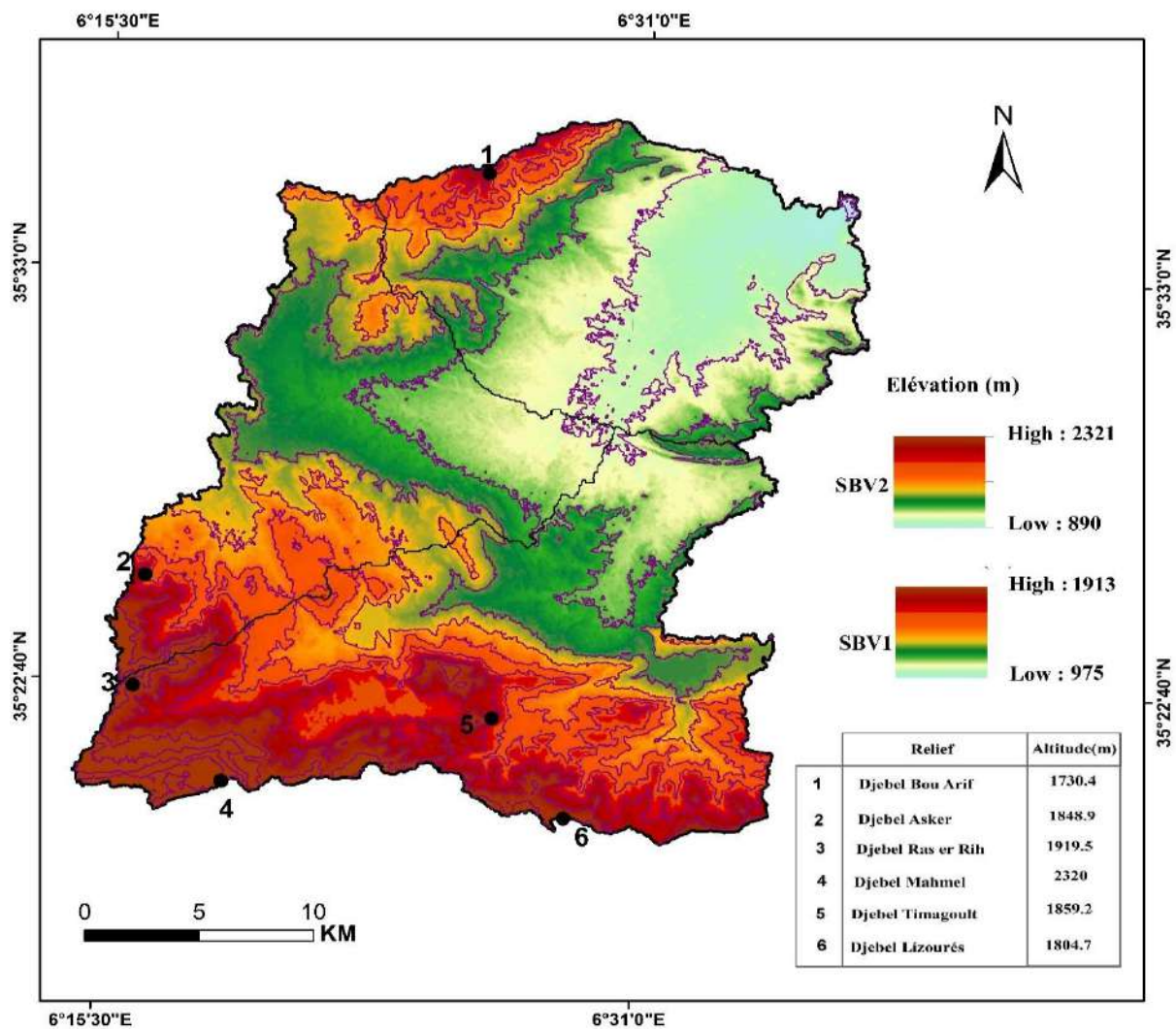


Figure. I.3 : Localisation et cadre structural du bassin de l'Oued Chemorah et ces bassins Sous-bassin de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez. (Source : Auteur, 2017)

I.2. Cadre Topographique, Système des pentes :

Elle est l'un des facteurs primordiaux de l'érosion surtout sur des substrats tendres. On assiste à une répartition des processus et des formes d'érosion qui vont du ruissellement diffus sur pentes faibles au glissement rotationnel et ravinement généralisé sur des pentes fortes (SADIKI, 2005). Les proportions des classes de pentes dans le bassin sont relativement proportionnelles aux degrés d'inclinaison. Les plus fortes sont les moins représentées et vice-versa (Figure. I.3).

La distribution spéciale des pentes dans les deux bassins des Oueds Reboa et Soultez dépendent en général de la nature lithologique des substrats, ainsi les pentes fortes > 25 % qui sont rares et qui ne représentent que 6% du bassin de l'Oued Soultez (Figure. I.4), dominant les montagnes, les sommets et les pourtours montagneux d'Asker et Ras er Rih et Mahmel, représentent presque 20% du bassin de l'Oued Reboa qui englobe surtout les versants de djebel Mahmel Djebels Timagoult et Djebels les Aurès (Figure.I.3). Elles coïncident avec des affleurements de roches marno-calcaire moyennement dures à l'érosion alors que les collines où ces pentes comprises entre 15-25 % sont nettement moins raides, elles représentent 30% de la surface totale du bassin de l'Oued Reboa et 13% du bassin de l'Oued Soultez. Ces pentes occupent un couvert végétal dégradé. Les pentes faibles < 3 % sont rares et ne dépassent pas 8%, contrairement au bassin de Soultez où la plaine est plus répandue, avec 25% de surface totale (Figure. I.4).

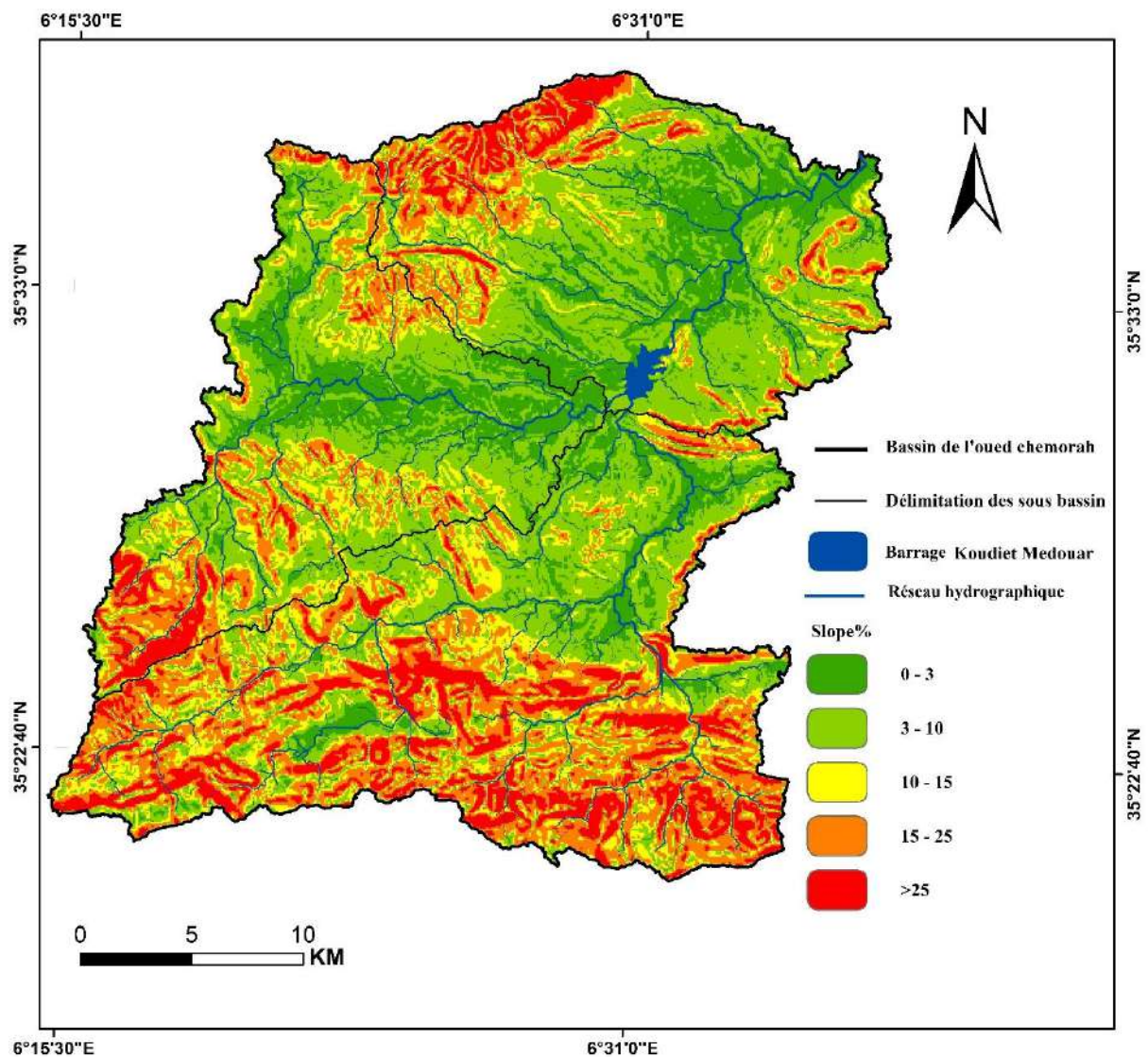


Figure. 1.4 : Carte des classes de pentes dans le bassin versant de l’Oued Chemorah et ces sous-bassins de l’Oued Reboa et l’Oued Soultez. (Source : Auteur, 2017).

Tableau. I.1 : Classes des pentes dans le bassin de l’Oued Soultez (BV1) et le bassin de l’Oued Reboa (BV2). (Source : Auteur, 2017)

Pentes [%]	S ₁ [Km ²]	S ₁ [%]	S ₂ [Km ²]	S ₂ [%]
0 - 3	51.85	25.04	25.71	7.84
3 - 10	84.33	40.76	89.50	27.29
10 - 15	31.42	15.17	50.67	15.45
15 - 25	26.65	12.87	97.34	29.67
> 25	12.75	6.16	64.78	19.75
Total	207	100	328	100

I.3. Cadre géologique, facteur lithologique :

L'étude géologique a pour but de déterminer la perméabilité des formations lithologiques. L'étude est faite sur la base des données géologiques détaillées dans les feuilles Boulehilet, Ain el Ksar, Tazoult, Touffana, situées au cœur des hautes plaines constantinoises à mi-chemin entre les hauts reliefs du Tell constantinois et celles de l'Aurès (Vila., 1973). Les résultats de cette étude ont dévoilé l'existence de différents mouvements tectoniques source de soulèvement des reliefs et d'affaissement des dépressions. La conjonction de ce phénomène tectonique dans les formations quaternaires a engendré la création de reliefs et de plaines.

I.3.1. Aperçu géologique du bassin versant de l'Oued Chemorah et ses sous bassins :

Le bassin de l'Oued Chemorah englobe trois ensembles géologiques bien distincts. Le Miocène de l'Oued Soultez, dans lequel se sont accumulés d'abondantes formations détritiques continentales et fluviatiles issues du démantèlement des massifs, et les deux structures anticlinales d'âge Crétacé, il s'agit de djebels l'Aurès dans le Sud et les monts de Bou-Arif au Nord-Ouest du bassin. Ces plissements majeurs de la fin de l'Eocène (phase fini-lutétienne) qui a donné lieu des anticlinaux et synclinaux, de la direction SW-NE. Une phase cassante pliocène s'est soldée ensuite, par des formes d'effondrements qui ont donné lieu à de nombreux fossés tectoniques, notamment la fosse Sud-Atlantique qu'a bouleversé l'ensemble de réseau hydrographique. Une phase quaternaire a accentué les mouvements des grands compartiments, ceci a engendré une dissection intense des chaînes de montagnes, et a conduit au remblaiement alluvial des dépressions, et par conséquent un changement de la direction de l'écoulement du sud-Nord vers le SW-NE

I.3.2. Tectonique et Paléogéographique :

Du point de vue tectonique, le bassin de Chemorah est d'apparence relativement peu complexe, ses structures plissées assez lourdes sont le résultat de plusieurs événements successifs qu'il convient d'analyser ou de rappeler. Les premiers mouvements sont peu discernables ici et se rapportent à la phase atlasique fini-Eocène. Comme l'Oligocène est connu par ses microfaunes marines remaniées, qui correspondent bien à l'Eocène. Il est probable que dès cette époque les grands plis ont été ébauchés. En effet, la formation rouge conglomératique (Aquitano-Burdigalien) repose ici directement sur le Turonien et rien n'indique que le Sénonien ne se soit pas déposé. La phase « alpine » n'est pas non plus directement perceptible. En fait, le Tortonien repose ici sur des niveaux plus anciens que les couches rouges. Il est donc probable que cette phase a accentué les plis déjà formés. Plus au Nord, cette phase a embouti à des

structures atlasiques, ce qui est net au Djebel Bou-Arif par exemple. Au début du Miocène, la région est envahie par la mer Burdigatienne, et lors du retrait de cette mer qui s'effectua à la fin du Miocène, une série de reliefs émergea notamment les monts de Bou-Arif et les monts des Aurès, qui furent immédiatement soumis à une forte érosion dont les dépôts se sont accumulés dans la cuvette, provoquant ainsi son comblement et la disparition totale des derniers golfs marins. Le plissement majeur de la fin de l'Eocène (phase fini-Lutétienne) qui a donné lieu à des anticlinaux et synclinaux, de direction générale SW-NE. Les structures actuelles sont donc le résultat d'une orogénèse récente qui a accentué et surélevé le dispositif Tortonien. En effet, le relief est surtout conforme. Le Miocène forme les dépressions et le Crétacé forme l'essentiel des hauteurs. Une phase cassante Pliocène s'est soldée ensuite, par des formes d'effondrements qui ont donné lieu à de nombreux fossés tectoniques, notamment la fosse Sud-Atlasique qu'a bouleversé l'ensemble de réseau hydrographique. Une phase quaternaire a accentué les mouvements verticaux des grands compartiments, ceci a engendré une dissection intense des chaînes de montagnes, et a conduit au remblaiement alluvial des dépressions, et par conséquent un changement de la direction de l'écoulement du Sud-Nord vers le SW-NE. Les terrains les plus anciens qui affleurent dans le secteur étudié sont attribués au Crétacé, et les plus récentes au quaternaire (R Laffitte, 1939).

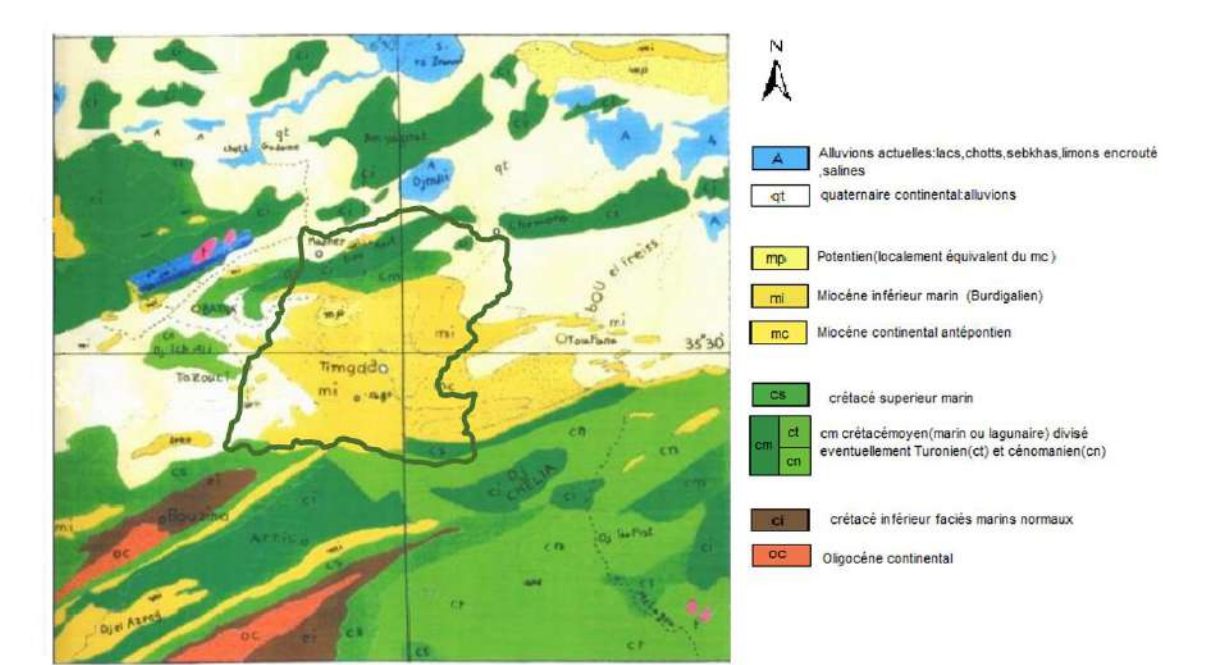


Figure. I.5 : Carte géologique du bassin de l'Oued Chemorah et ces deux sous bassin de l'Oued Soultez et l'Oued Reboa. (Source : ANRH, 2001)

I.3.3. Stratigraphie et aperçu lithologique :

Le Crétacé constitue le principal affleurement des monts des Aurès et des Djebels Bou-Arif. La série de Crétacé inférieur à une extension réduite, elle affleure au Nord-Ouest du bassin (Dj. Bou-Arif) ; il s'agit d'une série à dominance calcaire, alors que le Crétacé supérieur est constitué essentiellement de marno-calcaire et de marne dominant, il apparaît sur la majorité des reliefs. Les terrains attribués au Miocène et Pliocène non différencié (Tertiaire), affleurent largement dans le secteur d'étude, il s'agit d'une série constituée par alternance d'argile silteuse et des grés, qui occupent les reliefs de Djebels Tagratine; et des Grés blancs et grossiers qui affleurent en de nombreux endroits de vastes surfaces. La formation conglomératique constituée de marne, conglomérats, et de calcaire, a une extension très limitée, elle affleure au Sud-ouest du bassin. Les formations superficielles du Quaternaire sont représentées par les nappes d'éboulis d'origine calcaire ou gréseuse, localisées sur les flancs de Djebels Timagout. Les alluvions récentes sont formées le long des Oueds Reboa-Chemorah. Les glacis polygéniques nappant les reliefs couvrent de très vastes surfaces et organisés en pente douce.

Les croûtes calcaires qui affleurent en de nombreux endroits sont localisées dans le Nord-Ouest du bassin. Pour plus de précision, nous allons discuter les caractéristiques lithologiques des sous-bassins versants issues des cartes géologiques au 1 /50.000 de Ain el Ksar, Boulehilet, Tazoult, et Toufana qui nous montrent que : Le bassin de l'Oued Soultz est composé de formations quaternaires sous forme de glacis qui nappent les reliefs. Ces glacis forment des surfaces les plus caractérisées du bassin et qui correspondent à des surfaces de faible pente près de la plaine. Cette dernière augmente progressivement vers la montagne et bute sur un knick très prononcé recouverts d'un matériel très fragmenté de glacis anciens encroûtés et nettement entaillés. Ces glacis produisent un mouvement de nombreux galets et de limons durant les gros orages couvrant presque la moitié du bassin, soit de 47% de la superficie totale qui est de 109 Km². La formation gréseuse grossière d'âge Miocène localisée dans le sud du bassin occupe 23% de la totalité du bassin. Au sud-ouest du bassin sur les monts, il existe de petits niveaux de calcaires dispersés dans les marnes mais ne jouent aucun rôle morphologique. Cette alternance de marne et de calcaire d'âge Crétacé couvre 21 Km², soit 10 % de la surface du bassin (Figure. I.5). On trouve au Nord-Est du bassin sur les piedmonts une série d'argile siliceuse d'âge Crétacé associée aux grés et qui occupe uniquement 11% de superficie. Cette série forme des collines avec des altitudes qui s'étendent de 1000 m à 1400 m (Figure. I.3). Les formations de marnes, conglomérats et calcaires d'âge Miocène ont une extension très réduite couvrant les plus hautes collines au sud du bassin qui dépassent les 1900 m. Dans le sous-bassin de l'Oued Reboa, la formation quaternaire de glacis encroûtés

peu nappant les reliefs affleure principalement au niveau des argiles siliceuses et couvre de très faibles surfaces à faible pente. Cette formation récente est caractérisée par des croûtes rosâtres feuilletées qui produisent à l'intérieur du glacis des ravines (Vila., 1973). Entre autres, au nord des glacis se trouvent des alluvions récentes de superficie égale à 100 Km² (Figure. I.6). Au sud du bassin de Reboa les formations à alternance de marne et de calcaire d'âge Crétacé représentent la partie majeure des reliefs (Djebels Aslef, Timagoult et Dj Aurés). Ces formations couvrent 30% (97 Km²) de surface. Les formations gréseuses à grés grossiers d'âge Miocène occupent 17% et sont représentées par des collines modestes ne dépassant pas 1600 m au sud-ouest du bassin. Elles englobent les reliefs des Djebels Amrane, Tizagout, Koudiat Safia, Djebel el Faoun. Dans la région sud du bassin les éboulis de calcaire couvrent des talus marneux qui sont dominés par des reliefs calcaires ou gréseux (Figure. I.6). Les séries à dominance marneuse avec des calcaires au sommet d'âge Crétacé couvrent 19 Km², soit 6% de la surface et s'étendent sur les parties Sud-Est du bassin (Djebel Aurés), alors que les calcaires massifs cristallins d'âge Eocène affleurent au niveau de Djebel Timagoult et sur les flancs au Nord de Djebel el Mahmel, avec uniquement 17 Km² de surface. On distingue aussi des marnes associées aux calcaires et conglomérats, d'âge Miocène, qui montrent les montagnes élevées dépassant 1900 m et des pentes raides >25 % exemple à Djebel Ras er Rih (Figure. I.6).

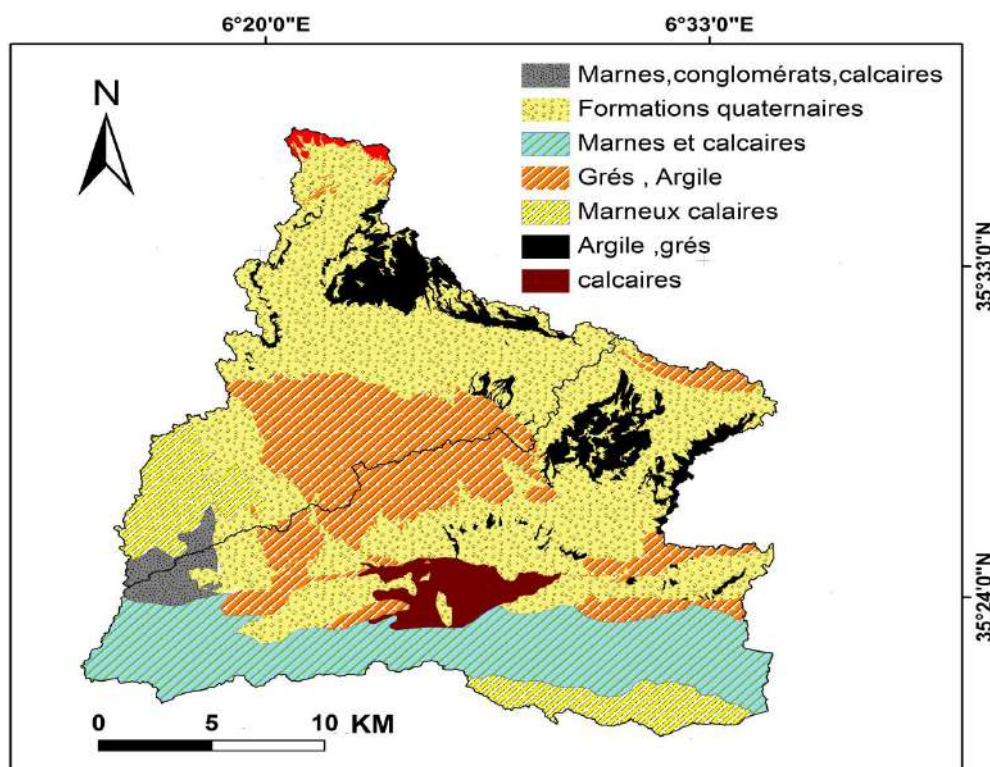


Figure. I.6 : Carte lithologique du bassin de l'Oued chemorah et de ses deux sous bassins de l'Oued Soultez et l'Oued Reboa. (Source : Auteur, 2017)

Tableau. I.2 : Distribution de la lithologie pour les deux bassins (Source : Auteur, 2017)

- BV1 : bassin versant de l'Oued Soultez
- BV2 : bassin versant de l'Oued Reboa

Types	Age	SBV1 (Km ²)	SBV1 (%)	SBV2 (Km ²)	SBV2 (%)
Formations quaternaires	Quaternaires	115	56	110	34
Grés, argiles	Miocène	45	22	58	18
Argiles	Crétacé	18	9	24	7
Marnes, conglomérats, calcaires	Miocène	4	2	5	2
Marno-calcaires	Crétacé	23	10	29	9
Calcaires	Eocène	2	1	17	4
Marne et calcaires	Crétacé	/	/	85	26

I.4. Facteur Pédologique :

Il apparaît de façon évidente que les processus pédogénétiques et l'installation des sols peut être compromise par la rapidité des phénomènes sédimentaires, donc il est judicieux de présenter son squelette terrestre des deux bassins fonctionné par l'intensité notamment la modalité des processus érosifs. On peut alors y identifier quatre types de sol au niveau des deux bassins :

I.4.1. Sols à minéraux peu évolués :

Les sols peu évolués sont des sols jeunes qui se distinguent par une faible altération des minéraux et une faible teneur en matière organique laquelle se superpose généralement au substrat minéral sans former de complexe organo-minéraux. Ces sols ont des origines diverses liées au climat, à l'érosion ou encore aux apports extérieurs. Les sols alluviaux caractérisent les dépôts récents réalisés par les rivières et les fleuves (Figures I.1 et I.2). Ces sols alluviaux sont fertiles et facile à cultiver : ils sont plats, de texture légère, riches en limons et bien alimentés en eau.

I.4.2. Sols calcimagnésiques et sols bruns calcaires :

Les roches calcaires ou magnésiennes, libèrent des quantités suffisantes de calcaire, Ces sols sont riche en Rendzine : il s'agit de sols récemment rajeunis par l'érosion. Influencé par le cycle climatique successif. Les sols bruns calcaires, peu humifères. Ce sont des sols plus

profonds et surtout beaucoup plus riches, initialement, en argile que les rendzines vraies. Cette richesse en argile influe sur les processus de décarbonatation qui sont favorisés et entretenus.

I.4.3. Sols calcimagnétiques avec des croûtes calcaires :

IL s'agit de formations relativement minces et dures, étendues en surface formées généralement par l'accumulation progressive des calcaires dus au lessivage.

I.4.4. Sols peu développés type lithosol et régosol :

Ce sont des sols caractérisés par des pentes continuellement soumises à l'érosion. Ces sols constituant des matériaux les plus fins et la matière organique disparaît rapidement. de régosols lorsque ces sols s'installent sur des matériaux tendres (argiles, marnes, sables, ...) et de lithosols lorsque ces sols se rencontrent sur des matériaux durs.

Tableau. I.3 : Distribution de la pédologie pour les deux bassins. (Source : Auteur, 2017)

- BV1 : bassin versant de l'Oued Soultez,
- BV2 : bassin versant de l'Oued Reboa.

types	S ₁ (Km ²)	S ₁ (%)	S ₂ (Km ²)	S ₂ (%)
Sols calcimagnésiques et sols bruns calcaires	7,1	4	8	3
Sols calcimagnésiques rendzine et sols bruns calcaires	29,7	14	57	17
Sols calcimagnétiques avec des croûtes calcaires	117	56	81	25
Sols peu développés type lithosol et régosol	53,2	26	182	55
Total	207	100	328	100

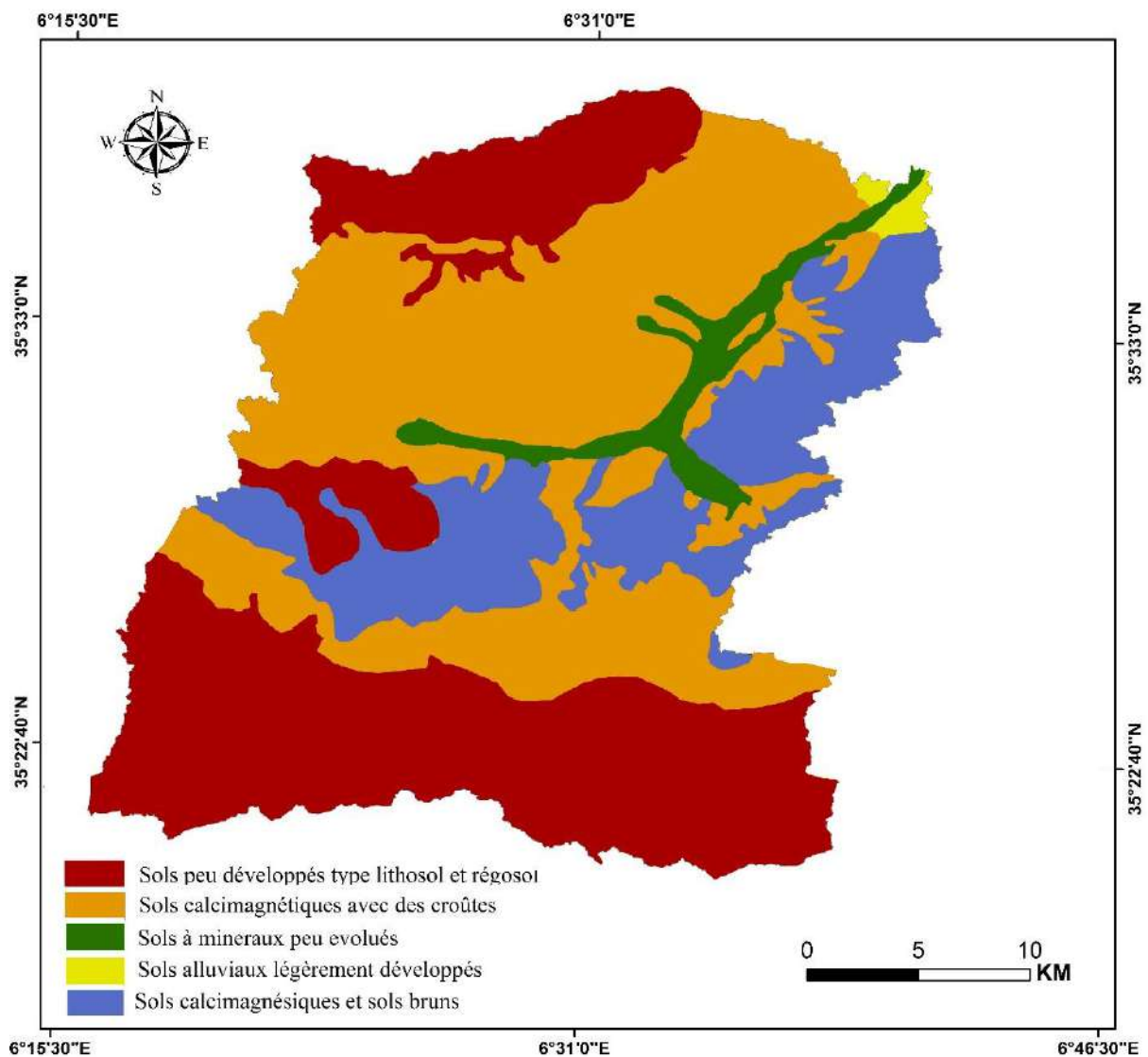


Figure. I.7 : Formation pédologique des bassins de l’Oued Chemorah de l’Oued Soultez et l’Oued Reboa. (Source : Auteur, 2017)

I.5. Facteur végétale :

La végétation joue un rôle essentiel dans la protection du sol, elle exerce une protection mécanique directe sur l'écoulement fluviale, en diminuant la force vive des eaux et en favorisant leur infiltration. Cette résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal et plus dense. L'action complexe et contradictoire de la couverture végétale, s'exerce aussi bien sur les paramètres climatiques notamment l'évaporation que sur les bilans hydriques des sols, Elle donne de l'ombre, ce qui conserve l'humidité et l'activité biologique nécessaire à l'équilibre du sol, l'infiltration en profondeur est facilitée par les fissurations préparées au sein du sol par le réseau des racines. Enfin, les végétaux jouent un rôle mécanique très important dans les zones de forte déclivité, en atténuant la violence des crues, ils protègent le sol contre l'érosion et limitent le transport solide. Le rôle de la végétation consiste essentiellement à protéger le sol

contre le phénomène érosif et à limiter la dégradation surtout dans les zones de forte déclinaison qui favorisent le ruissellement et l'arrachement du sol. Pour les surfaces partiellement nus entre les surface de forte densité de recouvrement végétale et les terrains protégées qui peuvent déclencher des actions érosifs causées par le ruissellement agressif des averses, il s'agit généralement des terres de culture céréaliculture et l'arboriculture et surtout la pratique de la jachère nue, laissant principalement les terrains au repos une année a deux sans aucune protection.

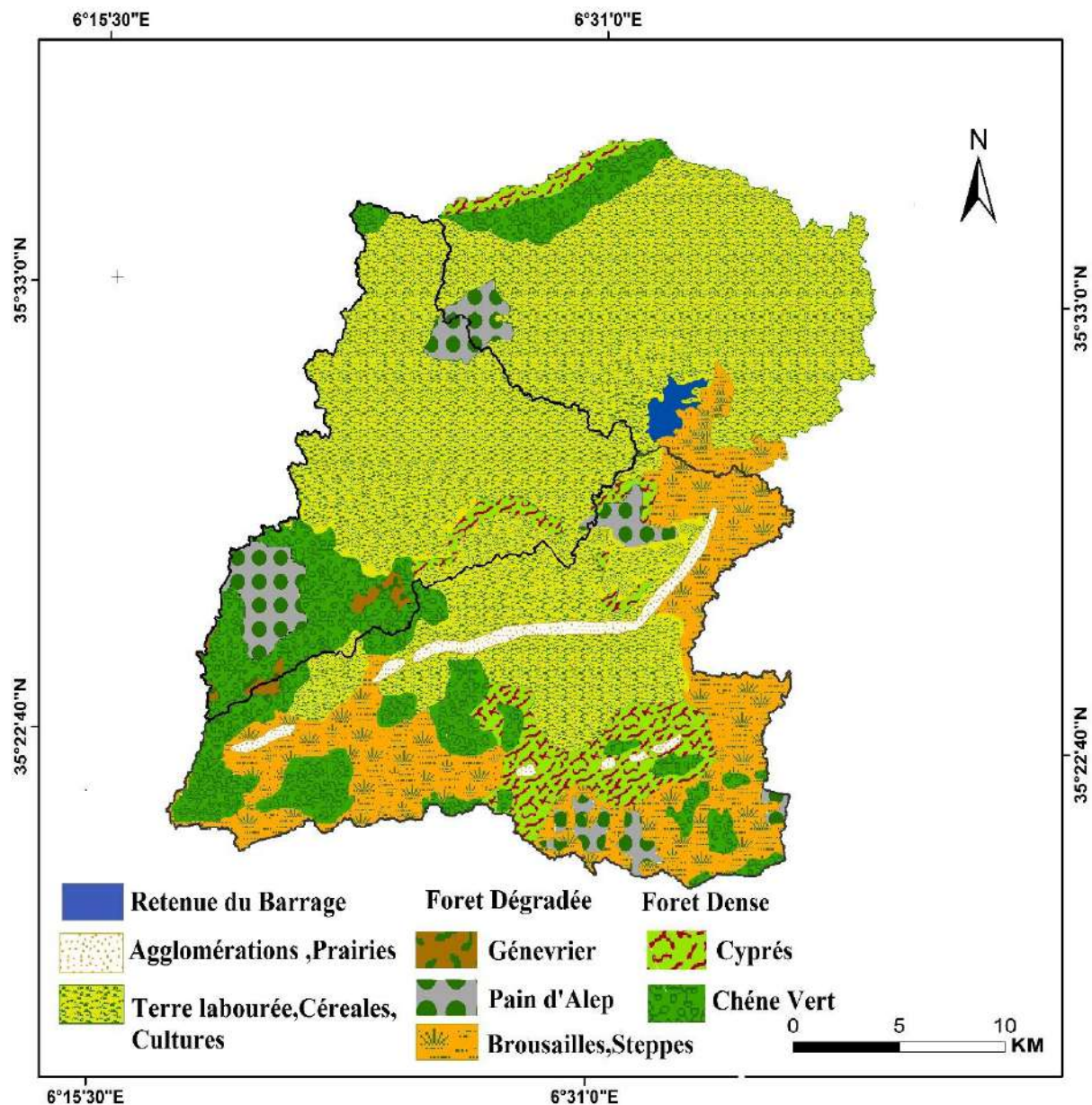


Figure. I.8 : Présentation de l'occupation du sol dans le bassin de l'Oued Reboa et le bassin l'Oued Soultez (Source : Auteur, 2017)

L'utilisation prédominante des terres dans les bassins versants de Soultez et Reboa est dominée par les terres agricoles qui représentent plus de 60% et les terres forestières, (Tableau.I.4 et Figure.I.8) Cependant, dans le sous-bassin de l'Oued Reboa à une dominance remarquable de forêt dégradées qui couvre 25% du bassin versant Soultez (Figure. I.8). La forêt se trouve principalement au niveau des sols de marnes et calcaires sur des pentes supérieures à 20%. La région de Soultez est endommagée par le bétail et les incendies pendant la saison estivale. Le surpâturage est observé dans les pâturages et les broussailles ouvertes. Comme dans la région du sous bassins de l'Oued Soultez, les forêts denses sont dominantes exactement dans les hauts reliefs contrairement dans le sous-bassin de l'Oued Reboa qui sont rares. En raison du régime climatique de la région et des incendies fréquents en été, les zones forestières sont généralement plus ouvertes, avec des sols nuisibles exposés à l'érosion. Ces sous-bassins versants, comme le principal bassin versant, se caractérise par un surpâturage, et une topographie ondulée couplée à des tempêtes de pluie irrégulières et intenses (Figure. I. 8).

Tableau. I. 4 : Distribution du couvert végétal pour les deux bassins

(Source : Auteur, 2017)

BV1 : bassin versant de l'Oued Soultez

BV2 : bassin versant de l'Oued Reboa

Type	BV1 (Km ²)	BV1(%)	BV2 (Km ²)	BV2(%)
Retenue	1.2	0.6	1.1	0.3
Agglomération	2.5	1.2	10	3
Forêt dégradées	20	9.7	82.9	25.3
Forêt dense	52.3	25.3	37	11.3
Cultures	131	63.3	197	60.1

I.6. Facteur climatique :

Les facteurs climatiques jouent un rôle déterminant dans le régime des cours d'eau, surtout les précipitations qui constituent le facteur essentiel intervenant par leur répartition annuelle et mensuelle, leurs totaux journaliers, et surtout les averses génératrices des crues. Ces différents aspects des précipitations plus ou moins modifiés par l'effet combiné avec d'autres paramètres physiques (altitude, pente, couvert végétal. lithologie...), et climatiques

(températures et évapotranspiration surtout), permettent d'expliquer les variations du régime hydrologique du bassin.

I.6.1. Aperçu sur le climat de l'Algérie :

Selon l'ANRH, le climat de l'Algérie est de type méditerranéen caractérisé par une période pluvieuse allant en moyenne de Septembre à Mai et un été sec et ensoleillé. L'Atlas tellien joue le rôle d'un rempart qui provoque la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau amenée par les vents soufflant de la mer. L'altitude entraîne une diminution générale de la température, l'éloignement de la mer, une augmentation des amplitudes diurnes et annuelles. Le climat de l'Atlas tellien présentera donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagne pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige et un climat de plaines plus sec relativement chaud et à forts écarts thermiques. La région des hauts plateaux constantinois se trouve entre deux domaines géographiques contrastés : Les monts des Aurès et Mahmel au Sud et la zone des plaines qui s'étendent vers le Nord, Où elle présente en général la même configuration géographique.

I.6.2. Etude des précipitations :

En Algérie plusieurs Auteurs ont étudié la pluviométrie (P.Seltzer, 1913-1938 ; G.Medinger, 1913-1953 ;M.Chaumont et C.Paquin,1913-1963). La plupart des stations du bassin ont été arrêtées pendant la guerre d'Algérie, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci se traduit par des résultats entachés d'erreurs et le nombre élevé de lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle. Le but de cette série est de permettre la confrontation avec l'écoulement correspondant afin de dégager une étude hydro pluviométrique et d'estimer la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin. Le bassin de l'Oued Chemorah est équipé de six(6) stations pluviométriques, Ces stations sont réparties de manière relativement homogène, plus particulièrement dans le bassin supérieur à caractère montagnard et le plus arrosé. Pour les besoins de l'étude, nous avons aussi utilisé d'autres stations pluviométriques (7 stations) situées aux alentours du bassin. Ainsi pour une analyse détaillée des précipitations de la région, une étude comparative de la série récente (1969/70 – 2011/12). Par ailleurs, vu la qualité médiocre des observations, les données ne sont pas toujours dépourvues d'erreurs, de plus, faute de sécurité ces dernières années, plusieurs postes ont cessé de fonctionner. Pour résoudre ce problème de fiabilité des données, l'emploi d'outils statistiques et graphiques est nécessaire pour contrôler la qualité des échantillons pluviométriques et l'anomalie qui pourrait les affecter en vue de leur homogénéisation. Cette dernière opération est indispensable si l'on veut déterminer

de façon plus ou moins précise les caractéristiques des précipitations. Nous n'avons pas entrepris un contrôle systématique des relevés journaliers, ou mensuels, par la méthode de la corrélation linéaire, nous avons essayé de reconstituer par extrapolation les données manquantes dans les stations pourvues de lacunes. Néanmoins, une objection s'impose quant au caractère théorique des résultats, du fait qu'il n'est parfois pas tenu compte des réalités du terrain, notamment de l'effet déterminant du relief (altitude, exposition, éloignement par rapport à la mer,...) A l'échelle du bassin, certaines stations de référence (Timgad, Sidi Mançer, Ain-Tinn, Baiou, Foug el Toub, Toufana, Chélia, Yabous) ont été choisies au titre de la série 1969/70-2011/12, chacune d'entre elles servira de base de comparaison à un groupe de postes se trouvant dans des conditions climatiques comparables. Bien que la notion de la moyenne pluviométrique est la réalité des faits climatiques. Elle permet également de cerner la variabilité des pluies sur de longues périodes d'observation.

Les données disponibles (Tableau. I.5 et I.8) sur les précipitations et les températures proviennent de la Direction Régionale de l'ANRH. Le bassin versant de l'Oued Chemorah qui englobe les deux bassins de l'Oued Reboa et Soultez est encadré vers le sud et l'ouest par des montagnes d'altitudes relativement élevées qui forment des barrières face aux influences atlantiques, ce qui favorise les influences sahariennes.

Tableau. I.5 : Coordonnées géographiques des Stations Pluviométriques.

(Source : Auteur, 2017)

Nom	Code	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Période
Tazoult	70303	35° 30'N	6° 16'E	1200	1970-2012
Batna	70316	35° 34'N	6° 11'E	1410	1970-2012
Ali ben tenoun	070306	35° 38'N	6° 20'E	1325	1970-2012
Reboa	070403	35° 42'N	6° 25'E	1100	1970-2012
Ain tin	70405	35° 23'N	6° 26'E	1650	1970-2012
Baiou	70407	35° 26'N	6° 20'E	1550	1970-2012
Timgad	70409	35° 29'N	6° 28'E	1000	1970-2012
Sidi mançer	70410	35° 32'N	6° 23'E	1112	1970-2012
Toufana	70605	35° 29'N	6° 37'E	1040	1985-2012
Chélia	70606	35° 22'N	6° 38'E	1260	1970-2012
Bouhlilet	70502	35° 44'N	6° 41'E	859	1970-2012
Yabous	70604	35° 24'N	6° 38'E	1200	1970-2012
Foug toub	70406	35° 25'N	6° 33'E	1160	1984-2001

Pour les données manquantes, nous avons procédé à l'interpolation à partir des stations pluviométriques par l'application de la méthode de régression. Elle concerne les stations qui

diffèrent de plus de 10 % avec une des trois stations voisines, L'interpolation dans ce cas est une pondération par rapport à des moyennes annuelles :

$$P_x = 1/3. \sum_{i=1}^3 \frac{N_x}{N_i} P_i$$

P_x : Données mensuelles manquantes de la station x

P_i : Donnée de la station voisine i pour la même période

N_x : Moyenne annuelle de la station x

N_i : Moyenne annuelle de la station i sur une période qui s'étale de 27 ans (1985 / 2012).

La répartition des moyennes de précipitations se fait selon un gradient pluviométrique d'ouest en est et plus localement nord sud au niveau du bassin de l'Oued Chemorah. Dans notre bassin le climat du type méditerranéen semi-aride, humide et froid en hiver, chaud et sec en été. Il est caractérisé par des précipitations très irrégulières et qui sont souvent intenses, d'une moyenne interannuelle dépasse 300 mm/an. Elle diminue progressivement vers le Nord-Est (Timgad 285,3 mm, Toufana 277,3 mm, Reboa 221,9 mm) et augmente en allant vers Sud-Est (Chelia 508,4mm, foug toub mm, Ain tinn). Sur une période de 27 ans (Tableau. I.6 et Figure. I.9).

Tableau. I.6 : Précipitations moyennes mensuelles et annuelles (1985 - 2012)

(Source : Auteur, 2017)

Nom	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Somme
Tazoult	37,1	30,4	37,2	33,2	35,8	31,5	39,4	41,7	38,5	19,5	5,0	16,6	366,0
Batna	43,7	29,8	34,7	35,9	34,6	29,8	39,8	41,4	39,0	22,4	9,0	15,4	375,4
Ali ben tenon	48,9	39,8	16,3	22,4	20,0	14,8	55,9	39,9	17,6	18,3	4,1	8,4	306,2
Timgad	33,5	23,3	21,7	23,2	25,2	19,8	30,6	33,4	37,1	13,3	9,1	15,1	285,3
Baiou	38,9	29,8	39,4	33,3	28,0	26,8	41,9	43,4	38,9	23,1	8,2	22,9	374,7
Sidi mançer	32,7	24,5	29,1	29,7	36,8	26,3	33,7	34,8	32,8	20,3	7,1	14,1	321,8
Chélia	45,1	39,0	48,4	46,0	50,2	39,4	62,0	46,2	55,5	29,9	14,2	32,4	508,4
Ain tinn	46,8	38,8	44,4	39,4	32,9	31,4	49,3	43,9	40,5	24,0	11,6	26,6	429,5
Toufana	32,4	24,7	22,0	22,8	26,2	20,7	29,2	29,2	37,5	15,5	5,4	11,9	277,3
Yabous	39,3	28,0	37,5	32,9	33,0	30,5	45,4	38,9	44,1	21,3	10,8	20,6	382,3
Reboa	20,6	15,1	15,9	25,3	24,3	14,9	25,7	19,5	30,3	17,3	5,5	7,4	221,9
Foug etoub	57,5	47,8	37,8	44,2	39,6	31,8	56,2	44,8	53,2	25,4	17,6	30,6	486,6
Bouhlilet	44,7	39,9	47,6	35,3	37,1	28,0	20,3	28,5	36,1	18,8	10,5	9,8	356,5
Medina	46,0	38,9	46,4	42,7	37,5	35,4	55,7	45,0	44,7	27,0	12,6	22,3	454,1

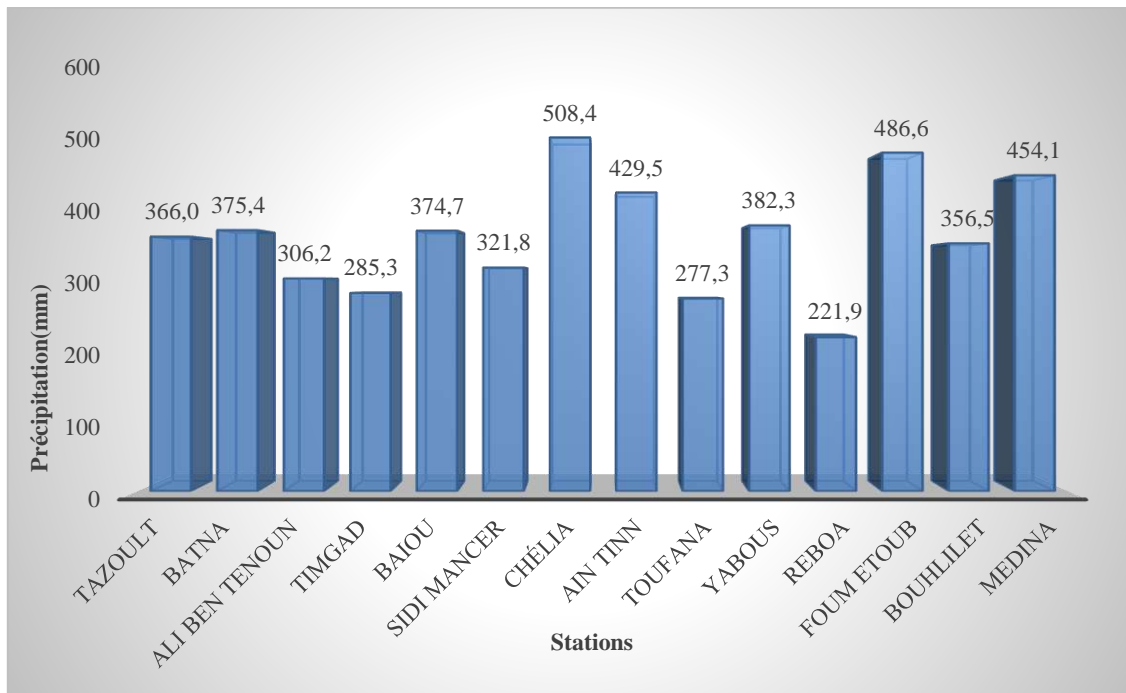


Figure. I.9 : Précipitations moyennes annuelles aux stations pluviométriques du bassin de l'Oued Chemorah et ces sous bassins. (Source : Auteur, 2017)

I.6.2.1. Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles :

Il convient de remarquer également à partir de la **Figure.I.9**, la tendance déficitaire des précipitations lors des 43 dernières années (à partir de 1969) où plusieurs valeurs annuelles se trouvent inférieures de la moyenne. C'est là, en effet, que l'on repère les années les plus sèches. Ceci implique donc que les séries pluviométriques qui seront utilisées pour le calcul des bilans hydrologiques correspondent à des périodes de faible pluviosité.

I.6.2.2. Répartitions spatiales des précipitations annuelles:

Pour mieux cerner cette irrégularité inter annuelle des précipitations qui ont un rôle essentiel et décisif sur l'écoulement fluvial et afin de caractériser le régime des précipitations annuelles, nous allons essayer de trouver une loi d'ajustement de la distribution des pluies annuelles dans le but d'aboutir à une estimation des paramètres d'ajustement et calculer des variables réduites. L'ajustement des séries pluviométriques des différentes stations de la région pour la période (1969/2012) situées dans nos bassins d'étude, par les isohyètes construites par la méthode de THIESSEN qui considère qu'il existe un gradient de précipitations entre les différentes stations (Tableau. I.5). La variation spatiale observée est assujettie à différents facteurs tels que l'altitude, l'orientation des reliefs et la continentalité. Laouina en 1990 explique

ce phénomène par l'effet Foehn, Les masses d'air dans le NE du bassin s'assèchent après leur descente sur le versant continental du Rif oriental. La plus part des perturbations d'Est qui donnent des précipitations importantes sur la façade Est du Rif ne donnent que de maigres pluies sur le versant exposé au Nord du bassin.

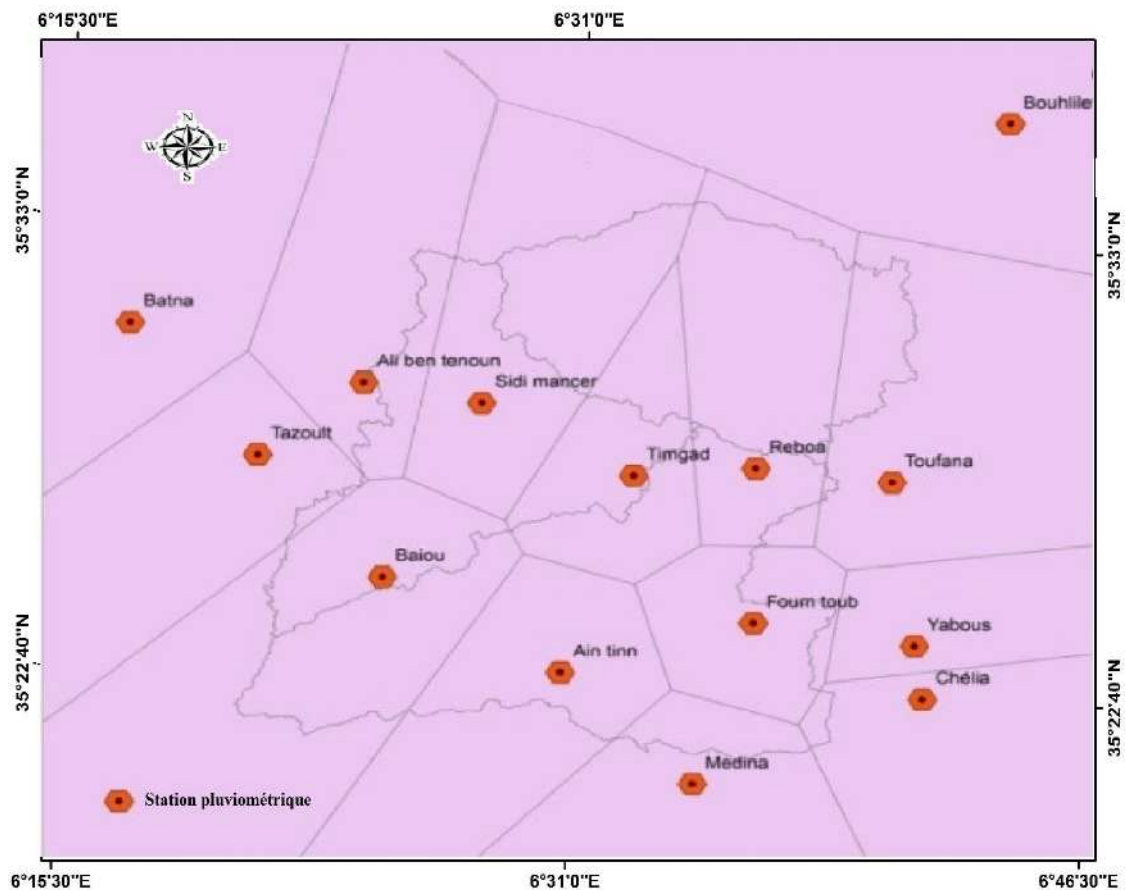


Figure. I.10 : Présentation des précipitations moyenne par la méthode de THEISSEN dans le bassin de l'Oued Reboa et le bassin l'Oued Soultez (Source : Auteur, 2017).

Cette répartition spatiale est parfois perturbée par des dépressions localisées en Algérie ou en Méditerranée et qui envoient des vents de NE et peuvent donner d'importantes chutes d'eau. Cependant, la fréquence de ces situations météorologiques est faible et, certaines années, aléatoire (Laouina,1990).La répartition des précipitations obéit aussi à une irrégularité temporelle au cours de l'année et d'une année à l'autre Au cours de l'année il y a un régime saisonnier constant avec une saison pluvieuse et s'étendant d'octobre à mai enregistrant des maximums situés pour la plus part des stations en novembre et avril et une saison sèche (juin, juillet et août) où des précipitations généralement inférieures ou égale à 16 % en montagne et à

10 % dans la zone aride (Station Foum etoub, Ain Tinn, Baiou) tombent sous forme d'orages violents qui causent des crues catastrophiques, surtout en fin d'été. Le tableau 11 montre les écarts énormes entre les précipitations mensuelles moyennes et les précipitations maximales mensuelles enregistrées dans les stations Chélia et Ain-tinn.

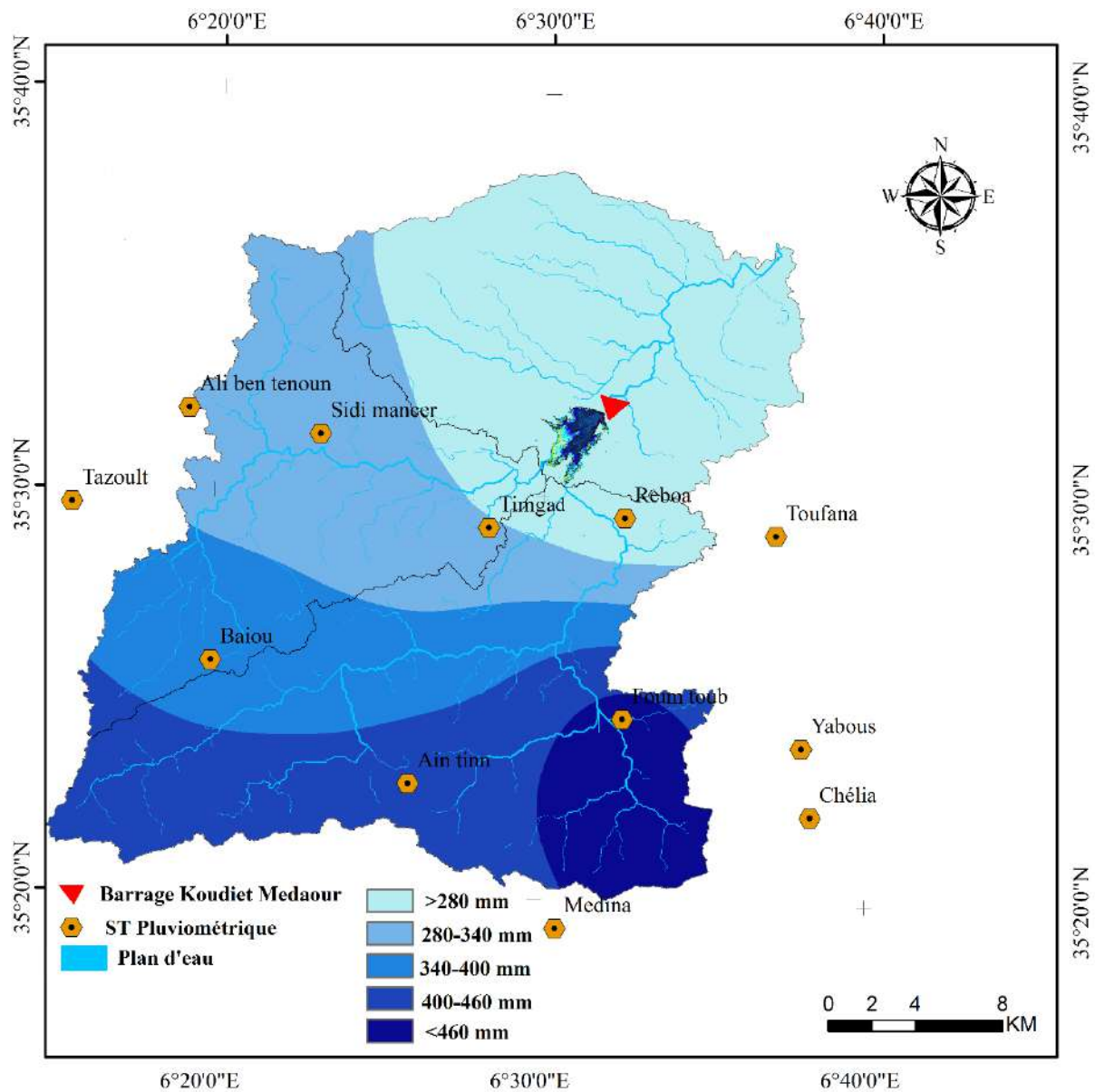


Figure. I.11 : Répartition des classes de précipitations dans le bassin versant de l'Oued Chemorah, et ces sous bassins s de la période 1985 /2012 (Source : Auteur, 2017).

Tableau. I.7 : Répartition saisonnière des précipitations pour la période 1985 – 2012
(Source : ANRH, 2001)

Station	Automne	%	Hiver	%	Printemps	%	Été	%
Tazoult	104,8	28,6	100,5	27,5	119,7	32,7	41,1	11,2
Batna	108,2	28,8	100,4	26,7	120,1	32,0	46,7	12,5
Ali ben tenoun	105,0	34,3	57,1	18,6	113,4	37,0	30,8	10,0
Timgad	78,5	27,5	68,2	23,9	101,1	35,4	37,5	13,1
Baiou	108,1	28,8	88,2	23,5	124,2	33,2	54,2	14,5
Sidi mancer	86,3	26,8	92,7	28,8	101,3	31,5	41,5	12,9
Chélia	132,4	26,1	135,7	26,7	163,7	32,2	76,5	15,1
Ain tinn	130,0	30,3	103,7	24,1	133,7	31,1	62,2	14,5
Toufana	79,1	28,5	69,6	25,1	95,9	34,6	32,7	11,8
Yabous	104,8	27,4	96,4	25,2	128,4	33,6	52,7	13,8
Reboa	51,6	23,3	64,5	29,1	75,5	34,0	30,3	13,6
Foum etoub	143,1	29,4	115,6	23,8	154,2	31,7	73,6	15,1
Bouhlilet	132,2	37,1	100,4	28,2	84,9	23,8	39,1	11,0
Medina	131,2	28,9	115,6	25,5	145,4	32,0	61,8	13,6
Moyenne	106,8	29,1	93,5	25,4	118,7	32,3	48,6	13,2

Selon la méthode de THIESSEN (Figure. I.10), la pluviométrie moyenne annuelle est de 367.6 mm, La région est caractérisée par une variation pluviométrique inter-saisonnière très importante. La saison la plus pluvieuse est le printemps avec des précipitations variant de 32,3 % de la pluviométrie totale. On constate ensuite, un automne relativement pluvieux de 29% des précipitations annuelles (Figure. I.11).

Enfin, la zone est marquée par un hiver et un été moins pluvieux avec des précipitations annuelles (Tableau. I.7), mais bien que cette pluviosité estivale soit faible, elle est en réalité la plus agressive pour le sol, car elle est généralement orageuse et tombe avec une forte intensité. On note également que la période automnale est caractérisée par un couvert végétal très faible et un sol sec généralement dénudé après une période estivale relativement longue, ce qui accentue alors l'érodabilité des sols.

Cependant, la période automnale est généralement la saison du début de la campagne agricole, période où les précipitations sont très bénéfiques pour le démarrage des cultures pluviales appliquées dans la région (céréales et autres). Donc on se trouve dans une situation paradoxale, où les pluies sont à la fois très utiles et « relativement nocives». Pour remédier à cette situation et profiter de cet apport hydrique sans nuire

au patrimoine sol, les techniques de conservation des eaux et des sols ont donc un rôle vital à jouer.

I.6.3. Températures :

Seules les stations de Yabous et Batna disposent de données continues sur les températures (Tableau. I.9) car le terrain d'étude ne dispose d'aucune station climatique, de ce fait nous avons utilisé deux stations au voisinage du bassin, contrôlées par **F.O.N.M**, pour lesquelles on dispose des données d'une série homogène (1985/2012) : Stations de Batna à l'Ouest du bassin et Ain Yagout au Nord-Ouest (Tableau. I.7). Le problème posé est simplifié du fait que la majorité de la superficie du bassin (72%), est située dans le même régime bioclimatique que les stations de Batna et Ain Yagout (domaine des hautes plaines à climat semi-aride).

Tableau. I.8 : Coordonnées géographiques des Stations

(Source : ANRH, 2001)

Nom	Code	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Température
Batna	70316	35° 34'N	6° 11'E	1410	1970-2012
Yabous	70604	35° 24'N	6° 38'E	1200	1970-2012

La saison chaude s'étend de mai à octobre, mois pendant lesquels les températures moyennes sont supérieures à la moyenne annuelle qui est de 14°C avec un maximum en juillet ou août, qui atteint la valeur de 28°C. Alors que la saison froide correspond à novembre-avril, avec un minimum en janvier (4,4°C). La diminution du Nord vers le Sud des températures pour le bassin de l'Oued Chemorah, est liée essentiellement à l'altitude, mais aussi à cause de l'effet de la continentalité dans la région des hautes plaines. L'amplitude thermique annuelle qui traduit la différence entre la température moyenne du mois le plus chaud et celle du mois le plus froid, est environ 22°C, ce qui confirme la continentalité marquée de ce bassin. Les températures annuelles de la zone varient entre 22.8°C et 8.26°C (Période : 1985–2012). La moyenne étant de 15.6°C.

Conclusions du chapitre I

L'analyse des données illustrées dans ce chapitre nous montre que :

Les facteurs de l'érosion sont généralement liés et interdépendants mais les différentes caractéristiques morphologique, géologique et bioclimatique du bassin versant des deux Oueds Reboa et Soultez peuvent expliquer la dynamique érosive qui prévaut dans le bassin versant.

Du point de vue climatique, la disposition des reliefs joue un grand rôle dans la juxtaposition des milieux climatiques.

La présence du massif Mahmel et Aurès qui culminent à 2320 m et 1900 m à l'est du bassin versant de l'Oued Reboa confèrent à ce dernier un gradient climatique semi-aride (les précipitations varient d'environ de 508 mm au SW à 490 mm au sud) contrairement à l'ensemble du bassin versant de l'Oued Soultez où l'arrivée des masses nuageuses atlantiques de l'ouest permet une avancée du domaine subhumide. Les chaînes de montagnes sont assez bien arrosées et reçoivent des chutes de pluie pouvant dépasser 500 mm. La forêt y est relativement dense. Les précipitations diminuent vers l'est à cause de l'influence saharienne, la végétation s'éclaircit. L'action érosive des précipitations dépend donc des caractéristiques de l'évènement pluvieux et aussi de l'état de la surface qui reçoit les pluies (pente, lithologie et couvert végétal). Sous les averses orageuses, la prédominance de roches relativement tendres dans la partie rifaine et pré-rifaine du bassin versant (marnes, marno-calcaires...) peut donner lieu à toutes sortes de processus érosifs liés à ces formations, une érosion en nappes par l'impact des gouttes de pluies, par ruissellement diffus et par ravinement peut se produire.

La présence de formations calcaires dures et fracturées serait responsable de d'autres types de processus érosifs tels que le décapage des produits de décalcifications par érosion en nappes et le ravinement torrentiel. Sur les formations tendres, les pluies intenses et étalées dans le temps et la présence de formations colluviales peuvent provoquer plutôt des mouvements de masse. Ces manifestations dépendent aussi de la morphologie des versants, de leur couverture végétale et surtout de l'action humaine.

L'interdépendance des facteurs a eu pour conséquence un comportement complexe de l'érosion hydrique dans les deux bassins versants, c'est pourquoi l'un de nos Objectifs est d'essayer de démêler et d'estimer l'influence de chaque facteur sur les quantités de matériaux évacués par un processus d'érosion qui est l'érosion en nappes, en utilisant la modélisation mathématique intégrée dans un Système d'Informations Géographiques qui nous permettra de calculer les corrélations entre les taux d'érosion avec le comportement de chaque facteur et de comparer les résultats avec ceux de la susceptibilité du model statistique $C = f(Q)$.

Chapitre II

Analyse Morphométrique

Introduction :

Cette partie s'inscrit dans le cadre d'une étude générale relative à l'influence des caractères physiques et morphologiques sur l'écoulement dans le cas des deux sous bassins appartenant au bassin de l'Oued Chemorah (nature, forme, ...). L'identification de ces caractéristiques morphométriques est nécessaire pour analyser le comportement hydrologique du bassin versant (lame d'eau précipitée, débit, ...). Leurs variations ont une influence sur le comportement hydrologique du bassin versant et leur analyse permet une meilleure compréhension des causes des variations des régimes hydrologiques et donc le régime hydrographique et dynamique des matériaux. Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les images satellitaire SRTM d'une résolution de 30 m, leur utilisation est nécessaire pour élaborer une mise à jour du chevelu hydrographique.

II.1. Caractéristiques de forme :

La forme du bassin versant à une grande influence sur l'écoulement global. Cette caractéristique est donnée par l'indice de Gravelius(1914) K_G donné par l'équation suivante :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

- P : périmètre du bassin versant.
- A : surface du bassin versant.

Dans notre cas, les valeurs du coefficient de Gravelius K_G sont données par le tableau ci-dessous.

Tableau. II.1 : Valeurs du coefficient de Gravelius pour les différents sous bassins.

(Source : Auteur, 2017)

Bassin	S(Km ²)	P(Km)	K _G
Oued Chemorah	755	182	1,9
Oued Reboa	328	128	2,0
Oued Soultez	207	108	2,1

D'après les valeurs de K_G mentionnées sur le tableau ci dessus, on peut conclure que : notre bassin est de forme allongée, ce qui favorise les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau vers l'exutoire sur une distance plus importante.

- le bassin le plus compacté est celui de l'Oued Chemorah ($K_G=1.9$). Cette compacité diminue avec l'augmentation de la surface, donc le bassin de l'Oued Chemorah dans son ensemble présente une forme moyennement étirée.
- Les sous bassins de l'Oued Soultez ($K_G = 2,00$) et l'Oued Reboa ($K_G = 2,10$) ont une faible compacité.

II.1.2. Rectangle équivalent :

C'est un modèle établi par ROCHE, il est défini comme un rectangle de longueur L et de largeur l qui a la même surface et le même périmètre que le bassin :

$$L = K_G \frac{\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G}\right)^2} \right], \quad l = K_G \frac{\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G}\right)^2} \right]$$

Tableau. II.2: Dimensions du rectangle équivalent pour les différents sous bassins.

(Source : Auteur, 2017)

Bassin	L (Km)	l (Km)
Oued Chemorah	43,2	35,96
Oued Reboa	33,4	22,01
Oued Soultez	25,3	17,8

Avec :

- L : longueur du rectangle (Km)
- l : largeur du rectangle (Km)

II.2. Caractéristique du relief :

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine par les caractéristiques suivantes :

II.2.1. Analyse altimétrique :

La courbe hypsométrique peut être aperçue comme une sorte de profil du bassin. Elle est obtenue en calculant la répartition du bassin versant (en Km² et en % de la surface totale) par tranches d'altitudes. Les valeurs des surfaces comprises entre les différentes courbes de niveau, obtenues par planimétrie de la carte relative au bassin versant, sont reportées sur la carte de l'altimétrie, Cette dernière permet de calculer la masse actuelle du relief qui n'est pas encore consommée par l'érosion. Les paramètres des courbes hypsométriques permettent de déterminer le volume partiel et total au relief .ces courbes ont été tracées en fonction des superficies cumulées en Pourcentage et leurs altitudes correspondantes. En général. la courbe hypsométrique montre que plus l'altitude augmente plus le pourcentage des superficies diminue du bassin versant.

Tableau. II.3 : Répartition hypsométrique du bassin versant de l'Oued Reboa.

(Source : Auteur, 2017)

Altitude(m)	Surface en Km ²	surface (%)	surface cumulée en Km ²	surface cumulée (%)
2321-2200	0,930	0,28	0,9300	0,28
2200-2100	4,640	1,41	5,5700	1,70
2100-2000	2,290	0,70	7,8600	2,40
2000-1900	4,410	1,34	12,2700	3,74
1900-1800	11,190	3,41	23,4600	7,15
1800-1700	25,570	7,80	49,0300	14,95
1700-1600	38,120	11,62	87,1500	26,57
1600-1500	45,350	13,83	132,5000	40,40
1500-1400	36,130	11,02	168,6300	51,41
1400-1300	34,620	10,55	203,2500	61,97
1300-1200	33,160	10,11	236,4100	72,08
1200-1100	42,510	12,96	278,9200	85,04
1100-1000	45,480	13,87	324,4000	95,70
1000-796	2,720	0,83	328	100,00

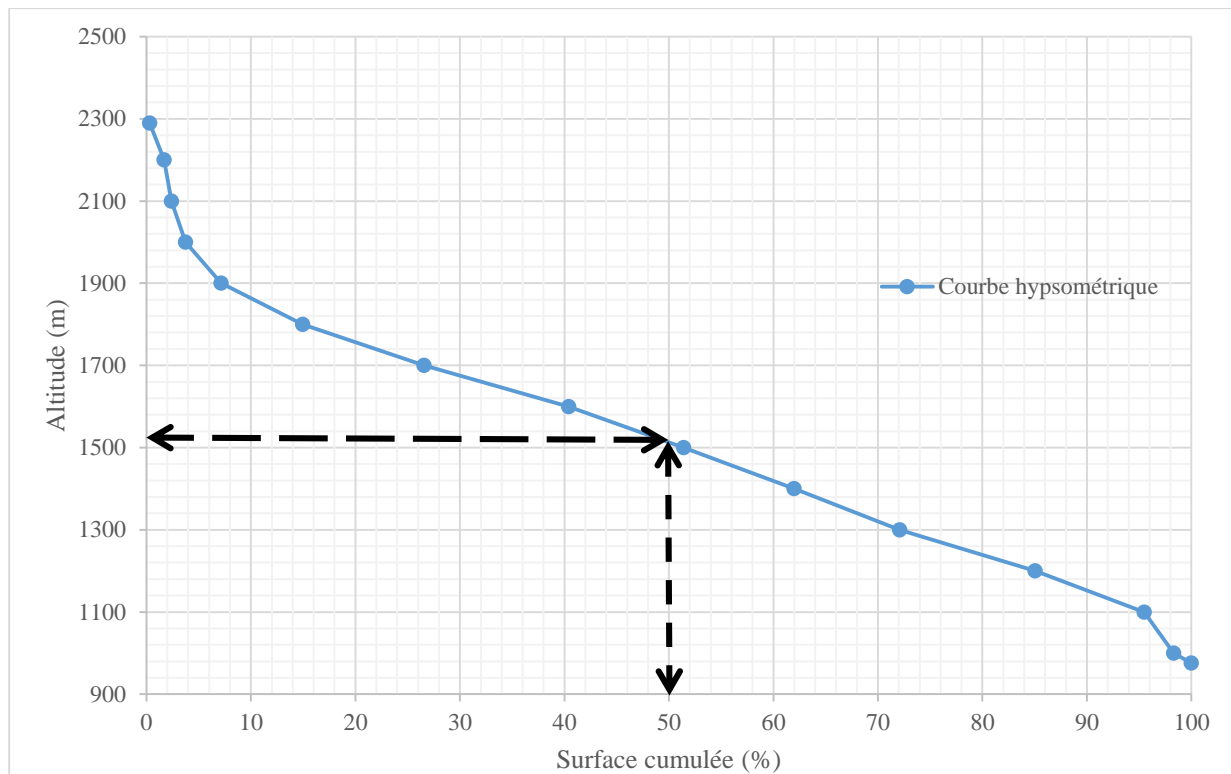


Figure. II.1 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l’Oued Reboa

(Source : Auteur, 2017)

Tableau. II.4 : Répartition hypsométrique du bassin versant de l’Oued Soultez.

(Source : Auteur, 2017)

Altitude (m)	Surface en Km ²	Surface(%)	Surface cumulée en Km ²	Surface cumulée (%)
1939-1900	0,10	0,05	0,10	0,05
1900-1800	2,85	1,38	2,95	1,43
1800-1700	2,98	1,44	5,93	2,86
1700-1600	4,44	2,14	10,37	5,01
1600-1500	5,76	2,78	16,13	7,79
1500-1400	15,76	7,61	31,89	15,41
1400-1300	27,66	13,36	59,55	28,77
1300-1200	48,06	23,22	107,61	51,99
1200-1100	56,34	27,22	163,95	79,20
1100-1000	38,86	18,77	202,81	97,98
1000-973	2,56	1,24	207,00	100,00

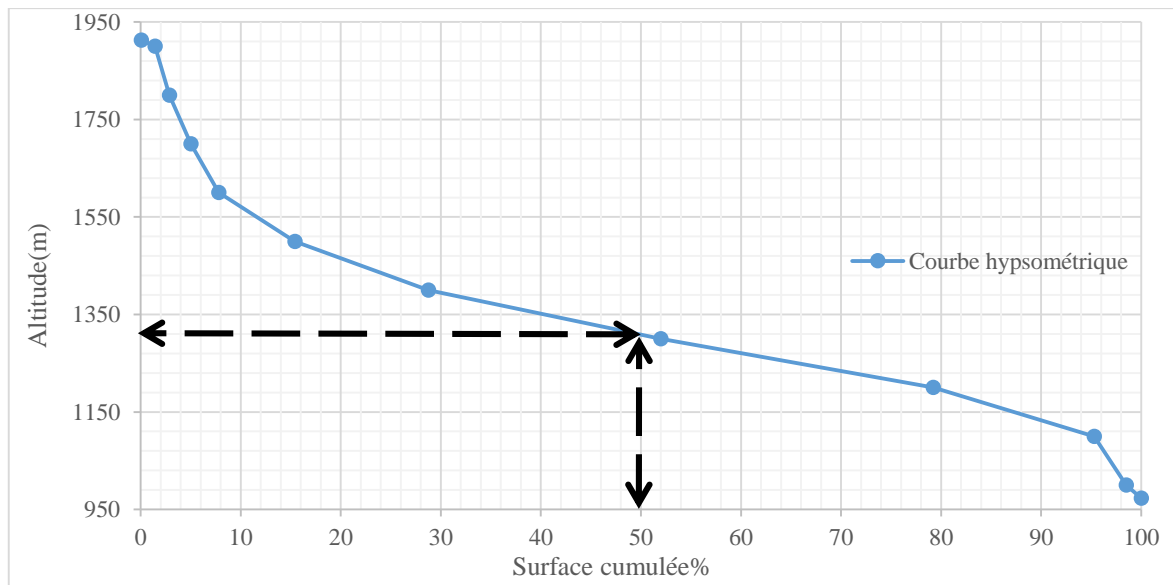


Figure. II.2 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l’Oued Soultz

(Source : Auteur, 2017)

Les courbes hypsométriques représentées sur les (Figures. II.1 et Figure. II.2) montrent une allure plus concave dans le bassin de l’Oued Soultz, ce qui se traduit par un relief bas pour le bassin et un développement de la plaine influencée par une forte érosion vers l’amont des deux versants vers les basse d’altitudes, cette courbe prend une forme convexes au niveau des zones d’épandages ou s’étalent les alluvions des cours d’eau. La concavité de la courbe hypsométrique montre que la forme des deux bassins présente un état de maturité ou le potentiel érosif est moyen.

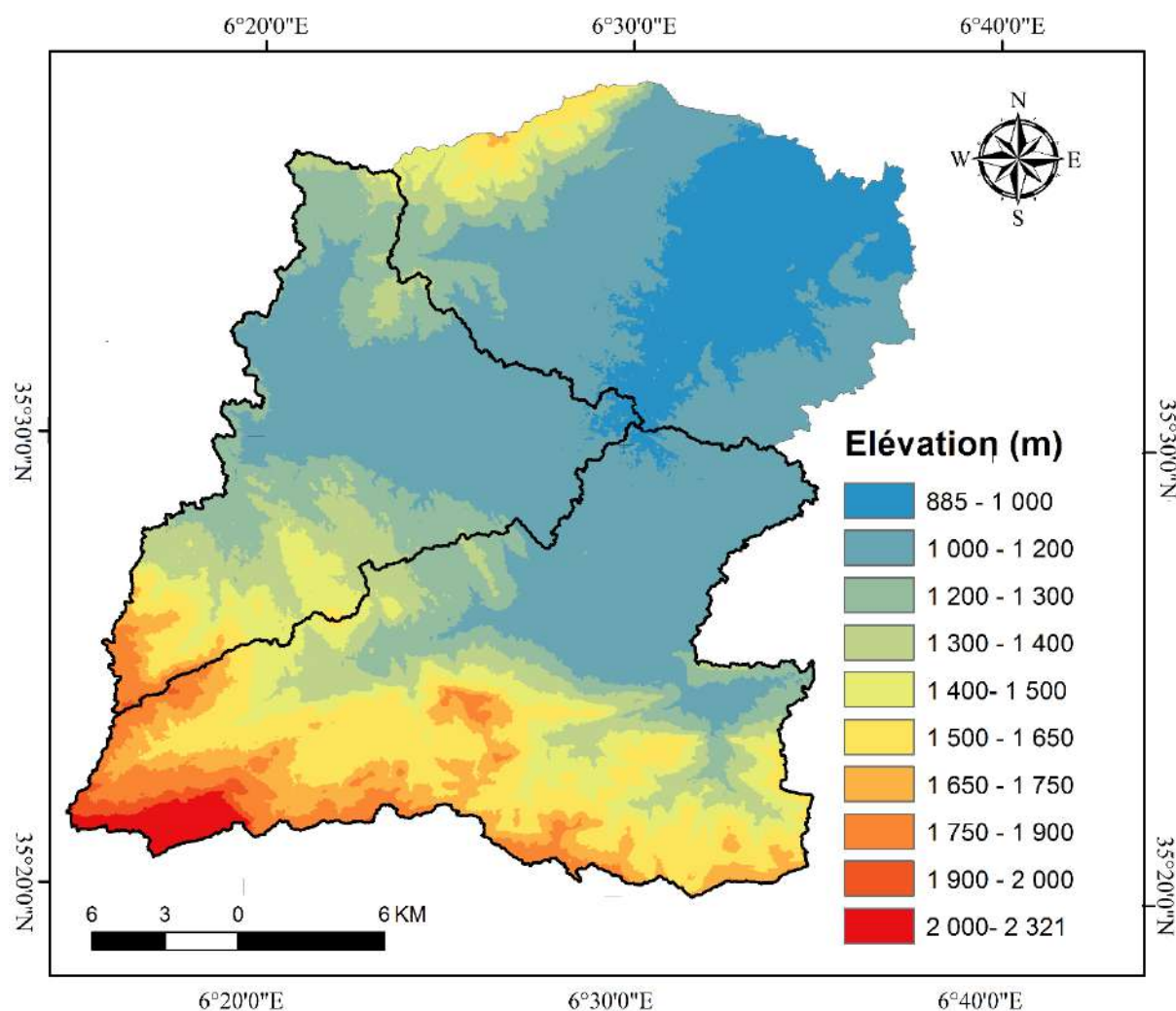


Figure. II.3 : Répartition des altitudes dans le bassin de l’Oued Chemorah et ses sous bassins
(Source : Auteur, 2017)

La Figure. II.3 englobe le modèle numérique du terrain (M.N.T), elle donne un aperçu quant à la répartition des altitudes dans le bassin et confirme par ailleurs les informations données par la courbe hypsométrique. A partir de la courbe hypsométrique, on peut déterminer les altitudes caractéristiques du bassin versant :

Tableau. II.5 : Répartition des Altitudes caractéristiques du bassin versant de l’Oued Reboa et Soultez. (Source : Auteur, 2017)

Bassin	Altitudes caractéristiques (m)						
	H_{max}	H_{min}	H_{moy}	$D = H_{max} - H_{min}$	$H_{médiane}$	$H_{5\%}$	$H_{95\%}$
Oued Reboa	2321	976	1420,44	1345	1500	1960	1100
Oued Soultez	1939	973	1339,0	966	1310	1700	1100

Avec :

- Altitude minimale (H_{min}) : égale au point le plus bas du bassin versant.
- Altitude médiane ($H_{médiane} = H_{50\%}$) : correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.
- Altitude moyenne (H_{moy}) : se déduit directement de la courbe hypsométrique. On peut la définir comme suit : $H_{moy} = \frac{\sum H_i A_i}{A}$

Avec :

- H_{moy} : altitude moyenne du bassin en [m] ;
- A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [Km²] ;
- H_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;
- A : superficie totale du bassin versant [Km²].

Tableau. II.6 : Analyse altimétrique au bassin de l'Oued Soultez.

(Source : Auteur, 2017)

Altitude (m)	Altitude moyenne (H_i)	Surface (A_i) en Km ²	$A_i \cdot H_i$
1939-1900	1919,5	2,85	5470,6
1900-1800	1850	2,98	5513,0
1800-1700	1750	4,44	7770,0
1700-1600	1650	5,76	9504,0
1600-1500	1550	15,76	24428,0
1500-1400	1450	27,66	40107,0
1400-1300	1350	48,06	64881,0
1300-1200	1250	56,34	70425,0
1200-1100	1150	38,86	44689,0
1100-1000	1050	2,56	2688,0
1000-973	986,5	1,73	1706,6
		$\Sigma = 207,00$	$\Sigma = 277182,2$

$$H_{moy} = 1339 \text{ m}$$

Avec :

- H_{moy} : altitude moyenne du bassin en [m] ;
- A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [Km²] ;
- H_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;
- A : superficie totale du bassin versant [Km²].

Tableau. II.7 : Analyse altimétrique au bassin de l'Oued Reboa.

(Source : Auteur, 2017)

Altitude (m)	Altitude moyenne (H_i)	Surface (A_i) Km ²	$A_i \times H_i$
2321-2200	2260,5	1,810	4091,505
2200-2100	2150	4,640	9976
2100-2000	2050	2,290	4694,5
2000-1900	1950	4,410	8599,5
1900-1800	1850	11,190	20701,5
1800-1700	1750	25,570	44747,5
1700-1600	1650	38,120	62898
1600-1500	1550	45,350	70292,5
1500-1400	1450	36,130	52388,5
1400-1300	1350	34,620	46737
1300-1200	1250	33,160	41450
1200-1100	1150	42,510	48886,5
1100-1000	1050	45,480	47754
1000-976	988	2,720	2687,36
		$\Sigma=328$	$\Sigma=465904,37$

$$H_{moy} = 1420,44 \text{ m}$$

Avec :

- H_{moy} : altitude moyenne du bassin en mètre [m] ;
- A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [Km²] ;
- H_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;
- A : superficie totale du bassin versant [Km²].

II.2.2. L'intégrale hypsométrique :

L'intégrale hypsométrique est donc définie à partir de la formule de Pike et Wilson (1971) :

$$HI = \frac{H_{moy} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} 100$$

$H_{moy}, H_{max}, H_{min}$: Sont respectivement l'altitude moyenne, l'altitude maximale et l'altitude minimale.

Ce coefficient reflète l'énergie d'une morphométrie favorable ou défavorable à l'érosion, Il est donc un indicateur de l'intensité des processus de l'érosion.

D'après le résultat ($HI=37.89\%$) pour le bassin de l'Oued Soultez, le bassin est dans un stade de mi-maturité, ou 62.11% du volume montagneux a été consommée par l'érosion.

Pour le bassin de l'Oued Reboa ($HI=33\%$) le bassin est dans un stade de fin maturité, ou 67% du volume montagneux a été consommée par l'érosion.

II.2.3. Coefficient orographique :

Ce coefficient reflète l'énergie d'une morphométrie favorable ou défavorable à l'érosion. Il est donc un indicateur de l'intensité des processus de l'érosion opérant sur les versants dont il mesure la raideur générale du bassin. Ce coefficient est vraisemblablement analogue au ratio du relief proposé par Melton (1957). Ce coefficient exprime le rapport de la différence entre l'altitude moyenne et minimale à la superficie totale du bassin de la façon suivante :

$$CO = H_{moy} \cdot tg \alpha \quad \text{Et} \quad tg \alpha = \frac{H_{moy} - H_{min}}{A}$$

Avec:

- CO : coefficient orographique.
- H_{moy} : Altitude moyenne (m).
- H_{min} : Altitude minimale (m).
- A : Surface du bassin (Km²).

Tableau. II.8 : Valeurs du coefficient orographique pour les deux sous bassins.

(Source : Auteur, 2017)

Bassin	$H_{moy} - H_{min}$	A (Km ²)	$tg \alpha$	CO
Oued Reboa	624,44	328	1,90	2698,80
Oued Soultéz	366,00	207	1.77	2370,03

- Lorsque CO > 6 m le relief est accentué
- Lorsque CO < 6m le relief n'est pas accentué

Les valeurs du coefficient orographique CO > 6m pour les deux sous-bassins indiquent une énergie élevée, aussi bien importante au sous bassin de l'Oued Reboa d'une morphométrie favorable à l'érosion.

II.2.4. Indice de pente :

Selon Dubreuil (1974), le but de ces indices est de caractériser les pentes de chaque bassin versant, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension permet de faire des comparaisons et des classifications entre bassins. Ils sont déterminés à partir de la connaissance des courbes hypsométriques.

II.2.5. Pente moyenne :

C'est le rapport entre la dénivelée totale et la longueur du rectangle équivalent. La pente moyenne est donnée par l'équation suivante:

$$I_{moy} = \frac{H (0,5 L_1 + L_2 + \dots + L_n)}{A}$$

Avec :

I_{moy} : Pente moyenne du bassin en (%).

H : hauteur entre deux courbes de niveaux consécutives (m).

$L_{1,2,\dots,n}$: longueur de la courbe de niveau en (Km).

A : superficie du bassin versant (Km²).

Tableau. II.9 : Pente moyenne pour les différents sous bassins.

(Source : Auteur, 2017)

Bassin	I _{moy} %
Oued Chemorah	10.34
Oued Reboa	11.86
Oued Soultez	9.46

II.2.6. Indice de pente globale I_g :

Pour comprendre et mettre en évidence l'influence du relief sur le ruissèlement à l'intérieur d'un bassin versant, un Indice de pente globale (I_g) a été introduit.

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H(5\%) - H(95\%)}{L}$$

Tableau. II.10 : Indice de pente globale pour les différents sous bassins.

(Source : Auteur, 2017)

Bassin	L (Km)	H _(5%) - H _(95%)	I _g
Oued Reboa	33,4	1345	0,0257
Oued Soultez	25,3	966	0,0237

Avec :

D : dénivelée entre les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin versant tirées à partir de la courbe hypsométrique (m),

L : longueur du rectangle équivalent (m)

Tableau. II.11 : Classification du relief selon I_g par O.R.S.T.O.M

Relief très faible	$I_g < 0,002$
Relief faible	$0,002 < I_g < 0,005$
Relief assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
Relief modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
Relief assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
Relief for	$0,05 < I_g < 0,1$
Relief très fort	$0,1 < I_g$

D'après la classification d'O.R.S.T.O.M résumée dans le tableau ci-dessus, notre deux bassins sont de classifications $0,02 < I_g < 0,05$ ce qui indique par un relief assez Fort.

II.2.7. Dénivelée spécifique :

La dénivelée spécifique apparaît donc comme une correction de la dénivelée simple par application d'un coefficient qui dépend de la forme du bassin, ce qui donne la possibilité de faire une comparaison entre ses valeurs pour différents bassins présenté par une classification de la dénivelée permettant de se prononcer sur le relief par l'Office de Recherche Scientifique d'Outre-Mer (ORSTOM) résumée dans le tableau ci-dessus.

$$D_s = I_g \sqrt{A}$$

Avec :

- I_g : indice de pente global
- A : superficie du bassin versant

Tableau. II.12 : Classification du relief selon les valeurs de D_s .

(Source : Auteur, 2017)

Relief très faible	$D_s < 10 \text{ m}$
Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$
Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$
Relief modéré	$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$
Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$
Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$
Relief très fort	$500 < D_s$

Les valeurs de D_s dans le Tableau. II.12, traduisent bien l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief. En effet, les valeurs concernant le bassin de l'Oued Reboa sont plus fortes par rapport à ceux du bassin de l'Oued Soultez, les valeurs présentées pour les deux bassins permettent de les ranger dans les classes de relief très fort. Ceci est lié, à la massivité des reliefs calcaires et marneux calcaire que comporte ce secteur.

II.3. Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement, par lequel se convergent vers un seul point le plus bas dans le bassin (exutoire). Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle l'écoulement est présent, les principaux cours d'eau sont les suivant :

II.3.1. Oued Chemorah :

Résulte de la jonction de deux affluents Oued Reboa et Oued Soultez qui drainent dans les bassins de l'Oued Reboa et Soultez d'une superficie respectivement de 328 Km² et 207 Km², et qui reçoit sur sa rive gauche les Oueds de Taguedai et Amizraguen (Figure. II.4), avec un trajet d'environ de 35 Km formant des lacs salés dans des hautes plaines constantinoises après une dépression d'eau ; il s'agit de Sebket Djendli, Garàet Ank Djmel, et Garaet el-Taref (Figure.I.1).

II.3.2. Oued Reboa :

Prend forme par la jonction de l'Oued Taga issu des massifs montagneux des Aurès (Dj Aurès) en direction SW-NE et l'Oued Seba qui résulte de la confluence des deux Oueds, Oued Khanguet El-Akra et Oued Foum el Toub. L'Oued Reboa change brusquement de direction (roche gréseuse) vers le Nord-Ouest où il reçoit l'Oued Morri sur sa rive gauche, et reprend ensuite son orientations SW-NE pour confluer avec l'Oued Soultez a environ 3Km, formant finalement le cour d'eau principale de Chemorah qui représente 35Km de longueur (Figure. II.4).

III.3.3. Oued Soultez :

Résulte aussi de la jonction de deux Oueds Feid Tlouidi qui prend sa source au nord-ouest de djebel Tagratine et l'Oued, et Enguesdira qui prend naissance à partir de la confluence de l'Oued El-kriane et l'Oued Abdel Achir qui se forment dans les Tagratine avant de confluer avec l'Oued Reboa (Figure. II.4).

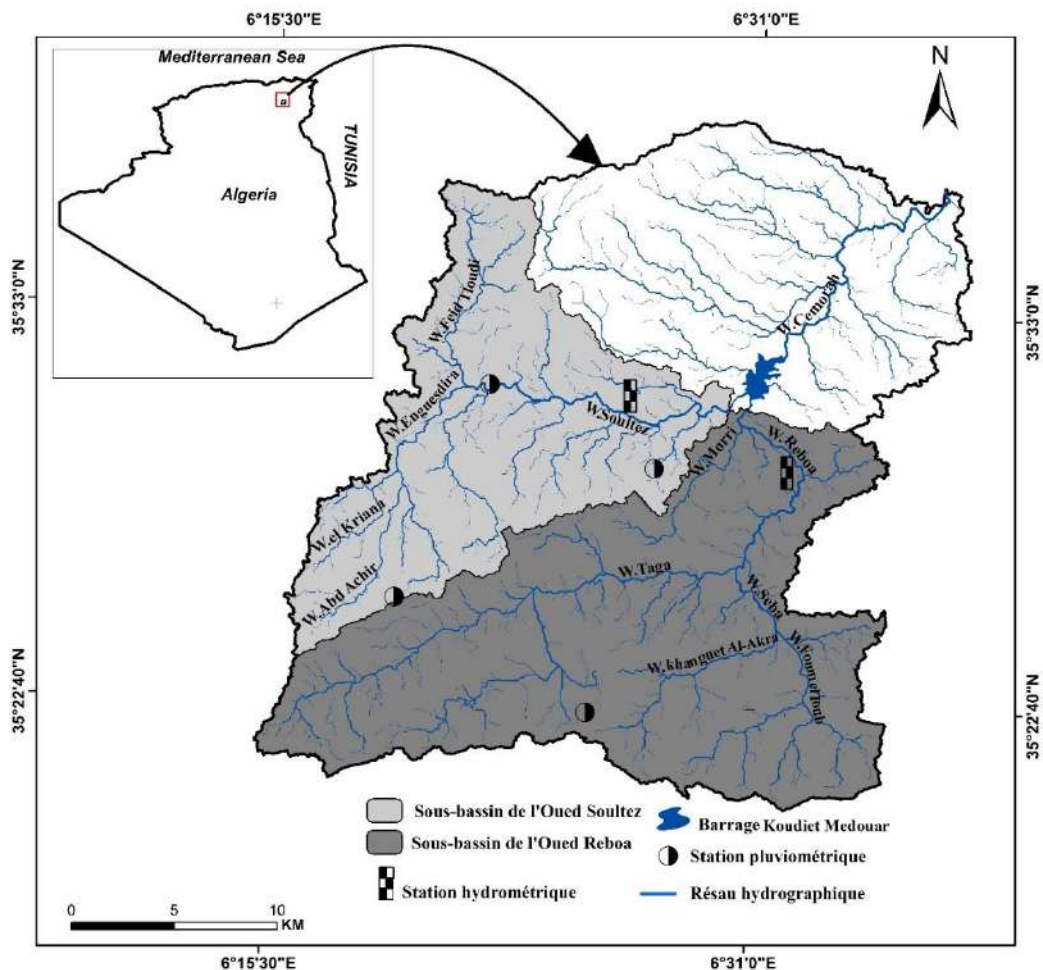


Figure. II.4 : Répartition du réseau hydrographique du bassin de l'Oued Chemorah et ces sous bassins de l'Oued Reboa et Soultez (Source : auteur 2017)

II.4 Hiérarchisation du réseau :

La classification topologique du réseau hydrographique représenté sur la figure.4 est basée sur une méthode proposée initialement par HORTON en 1945 puis modifiée par STRAHLER en 1947. Elle est la plus utilisée aujourd'hui, son principe est le suivant :

- tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1.
- au confluent de deux cours d'eau de même ordre n , le cours d'eau résultant est d'ordre $(n+1)$
- un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre.

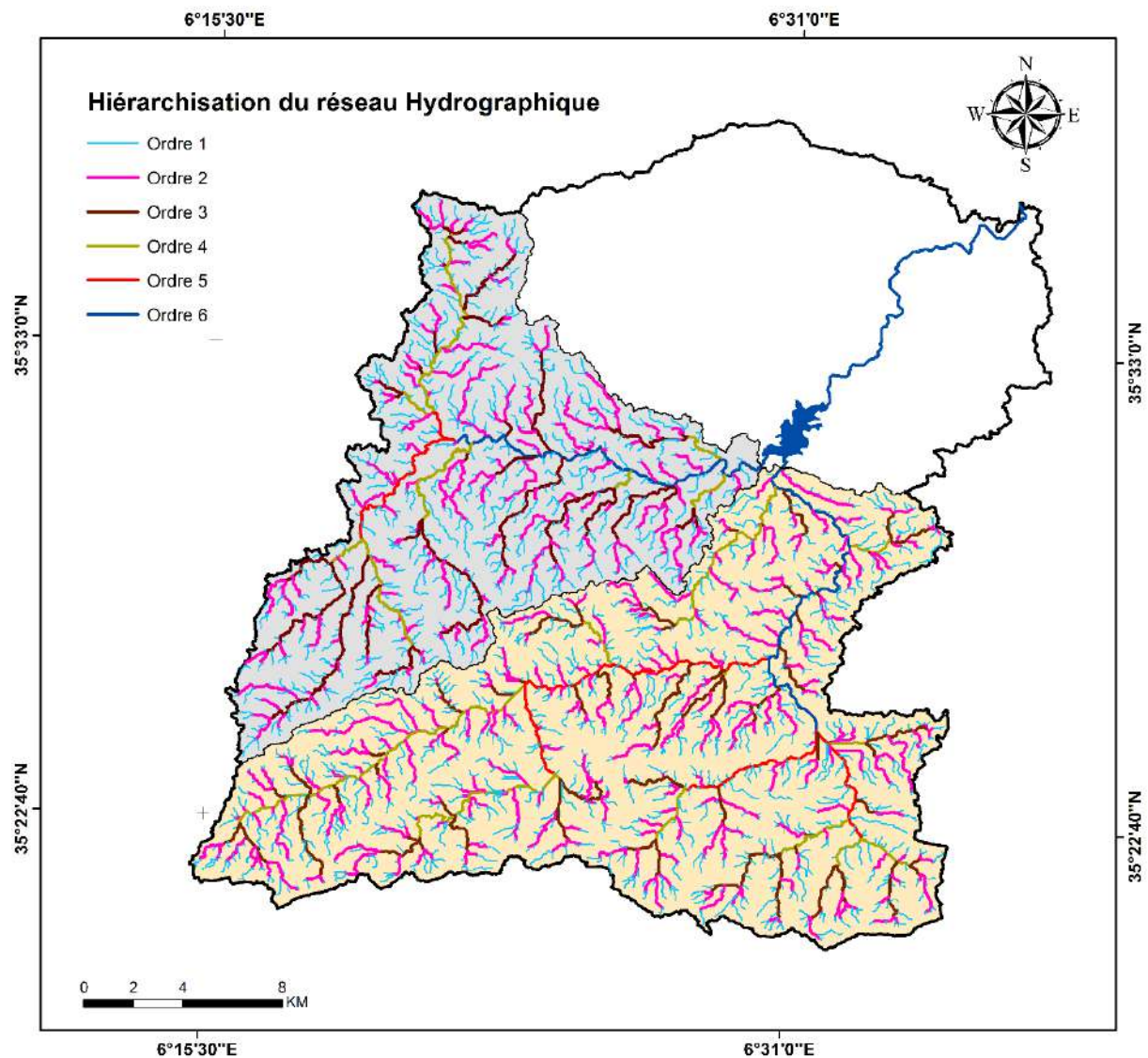


Figure. II.5 : Classification du chevelu hydrographique du bassin de l'Oued Chemorah et ses sous bassins de l'Oued Reboa et Soultez (Source : auteur 2017)

Tableau. II.13 : Classification des longueurs et des nombres des cours d'eau du bassin de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez (Source : auteur 2017)

Ordre	Oued Soultez		Oued Reboa	
	Longueur(Km)	Nombre	Longueur(Km)	Nombre
1	301,20	696	457,73	1123
2	144,81	325	245,33	577
3	84,13	215	94,86	232
4	30,77	82	51,47	147
5	9,19	21	29,20	99
6	18,25	46	18,44	50
	$\Sigma 588,34$		$\Sigma 897,03$	

II.4.1. Fréquence des talwegs :

La hiérarchisation du réseau est donnée par le classement de Schum (méthode de Strahler). La densité de drainage correspond à un bassin qui possède des rivières peu nombreuses mais courtes. Tel est le cas dans les deux bassins versants concernés pour notre étude. D'où la nécessité de calculer la fréquence qui est donnée par le rapport du nombre des cours d'eau d'ordre 1 (N_x) à la superficie correspondante.

$$F = \frac{N_x}{A}$$

Avec :

- N_x : nombre des talwegs d'ordre 1;
- A : la surface (Km²)

Tableau. II.14 : Fréquence de talwegs pour les deux sous bassins.

(Source : Auteur, 2017)

Bassin	N_n (Km)	F (Km ⁻¹)
1 Oued Reboa	1123	3,42
Oued Soultez	696	3,36

II.4.2. Densité de drainage D_d :

C'est le paramètre le plus important qui caractérise le chevelu hydrographique, il correspond au rapport entre la longueur totale des cours d'eau à la surface du bassin.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

Tableau. II.15 : Densité de drainage pour les deux sous bassins.

(Source : Auteur, 2017)

Bassin	D_d (Km/Km ²)
Oued Reboa	2,73
Oued Soultez	2,84

Avec :

- D_d : Densité de drainage (Km/Km²),
- L_i : Longueur cumulée des thalwegs (Km),
- A : Surface du bassin versant (Km²).

Dans l'ensemble, la densité de drainage est importante dans le cas du sous bassin de l'Oued Soultez (2.84 Km/Km²), surtout au niveau du massif de Dj Tagratine où les facteurs du couvert végétal et de la lithologie sont dégradés. Pour le bassin de l'Oued Reboa, il présente une densité de drainage (2.73Km/Km²) faible dans le secteur d'étude. On constate également que les deux bassins présentent un chevelu hydrographique assez dense ce qui se traduit par une action érosive extrême, par conséquent, le ruissellement y trouve un terrain de prédilection et la roche est disséquée dans les deux bassins de l'Oued Reboa et Soultez, avec des valeurs de densité respectivement de 2.73 et 2.84 Km/Km².

II.4.3. Densité relative :

C'est le rapport de fréquence(F) au carré de la densité de drainage. Elle indique le degré de ramification à l'intérieur du bassin versant.

$$D_r = F/D_d^2$$

Tableau. II.16 : Fréquence relative pour les deux sous bassins.

Bassin	D _r (%)
Oued Reboa	45.91
Oued Soultez	35.01

On constate que les valeurs de densité relative signifient que l'érosion est activée de 45.91% dans le bassin de l'Oued Reboa et de 35% dans le bassin de l'Oued Soultez ce qui signifie que l'érosion est activée dans la totalité de de chaque bassin versant.

II.4.4. Coefficient de torrentialité :

Ce coefficient peut être plus indicatif et plus expressif que la densité de drainage. Plus il est élevé plus la torrentialité des averses est forte. Ce coefficient dépend de la fréquence et de la densité de drainage .il est donné par la formule :

$$C_t = F \cdot D_d$$

Tableau. II.17 : Coefficient de torrentialité pour les deux sous bassins.

(Source : Auteur, 2017)

Bassin	F ₁	C _t (%)
Oued Reboa	3.42	9.37
Oued Soultez	3.36	9.54

Avec :

- D_d: densité de drainage ;
- F₁: La fréquence des talwegs d'ordre 1 ; $F_1 = \frac{N_1}{A}$

Ce paramètre permet l'estimation de la grandeur de l'énergie érosive du cours d'eau.

II.4.5. Temps de concentration :

C'est le temps que met la particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour arriver à l'exutoire, il se calcule par la formule de GIONDOTTI.

$$T_c = \frac{4 \sqrt{A} + 1,5 L}{0,8 \sqrt{H_{moy}} - H_{min}}$$

Avec :

- T_c : temps de concentration (heure),
- A : superficie du bassin (Km²),
- L : longueur du talweg principal (Km),
- H_{moy} : altitude moyenne (m),
- H_{min} : altitude minimale (m).

Tableau. II.18 : Temps de concentration pour les deux sous bassins.

(Source : Auteur, 2017)

Bassin	T_c (Heures)
Oued Reboa	5.87
Oued Soultez	5,53

Les deux sous bassins, situés au sud ou l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief présentent des temps de concentration très rapprochés de 5.87 heures pour l'Oued Reboa et 5.53 heure pour l'Oued Soultez. On peut dire d'après ces résultats que la repense hydrographique est vite dans les deux sous bassins versants (Tableau. II.18)

Conclusion du chapitre II

L'analyse morphométrique est la base de toute étude hydrologique. Elle permet de quantifier les différentes caractéristiques du milieu physique de chaque bassin.

L'étude morphométrique du bassin versant de l'Oued Chemorah et ces sous bassins de l'Oued Soultez et l'Oued Reboa, nous a permis de connaître certaines caractéristiques à savoir :

- Un coefficient de Gravelus K_G modérément allongé pour les deux sous bassins. Cette valeur a une influence sur le temps de concentration, qui se caractérise aussi par un relief assez fort conformément à l'indice de pente globale.
- Les reliefs accentués dans le sous bassin de l'Oued Reboa sont dominant et marqués par une altitude maximale de 2321 m et une altitude minimale de 976 m ce qui génère un ruissellement plus important par rapport au bassin de l'Oued Soultez marqué par une altitude maximale de 1939 m et une altitude minimale de 973m.
- Une torrentialité liée à une densité du chevelu hydrographique, avec un temps de concentration long dans les valeurs sont de l'ordre de 6h pour les deux sous bassins, favorisant ainsi l'infiltration des eaux au niveau des formations géologiques perméables et la stagnation des eaux, surtout sur une structure lithologique imperméable avec une pente faible à l'aval des deux sous bassins versants.
- le temps de concentration dépend de plusieurs facteurs : la forme du bassin, le couvert végétal, la lithologie et est conditionné par la superficie, la pente moyenne et la longueur du thalweg principal.

Chapitre III

Modélisation

Et

Quantification du transport

solide en suspension

Par

Analyse Statistique

Introduction :

Selon plusieurs études, la quantification du phénomène érosif présente un grand intérêt dans le cycle sédimentaire. Son objectif est d'expliquer les phénomènes de l'écoulement, du transport solide et de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions où les mesures sont rares ou inexistantes.

Les quantités de matière perdues par le sol, transportées et stockées sont évaluées selon des principaux composants par rapport à la roche mère par des critères granulométriques, minéralogiques et chimiques. Selon la taille, la forme et la masse des particules, la matière est transportée en solution, en suspension ou par charriage sur le fond. Les mesures des quantités de matière transportée en solution ou en suspension (MES) sont effectuées sur le mélange eau - matière (concentration). Pour avoir une idée sur la quantité des sédiments transitant en suspension, les prélèvements tiennent compte de la variabilité de la tranche d'eau dans l'espace et dans le temps. Ces paramètres font que les modèles diffèrent d'un auteur à un autre. Chacun tente de caractériser la région ou le bassin étudié par le modèle le plus représentatif et le plus fiable (coefficient de corrélation). Ces modèles ont été testés dans différentes régions du globe et ont donné des résultats plus ou moins satisfaisants les rendant presque universels (Tableau. III.1).

Tableau. III.1 : Quelques modèles utilisés en Algérie (Source: Bouanani, 2005).

Bassins ou région	Modèle	Equation	Auteur
Massif central (France)	Puissance	$Q_1 = 16 P^2$	Coutagne
Bassins algériens	Puissance	$Q_1 = 11.8 P^{2.82}$	A.N.R.H
Bassins algériens	Linéaire	$Q_1 = 0.736 (P - 404)$	Samie
Oued M'riha (Algérie)	Polynôme	$Q_1 = 50.6 P^2 - 3.54 P$	Roeder
Oued Ouergha (Maroc)	Puissance	$A_1 = 690 A_s^{0.58}$	Lahlou
Medjerda supérieur (Algérie)	Linéaire	$A_{ss} = 1.06 E - 66.2$	Bourouba
La garonne (France)	Puissance	$C = 3.6 \cdot 10^{-3} Q_1^{1.583}$	Probst & Bazerbachi

III.1. Présentation des données :

Les données utilisées dans cette étude proviennent de l'Agence Nationale des ressources Hydriques (A.N.R.H). Elles sont mesurées essentiellement de suivi hydrométrique effectué à l'amont du barrage de Koudiet - Medouar au niveau des deux stations hydrométrique Timgad (X = 841.80 m, Y = 251 m, Z = 1010.79 m) et Reboa (X = 848.2 m, Y = 250.20 m, Z = 1008.5 m) appartenant respectivement à l'Oued Soultez et l'Oued Reboa sur une période de 27 ans (1985- 2012).

Les débits liquides sont estimés à partir de la courbe d'évaluation $Q = f(H)$ à partir des hauteurs d'eau lues sur une échelle limnimétrique par un limnigraphe à flotteur et sont transformées en débits liquides. Les prélèvements sont effectués en bordure utilisant des bouteilles d'un litre, dans l'Oued Soultez et l'Oued Reboa selon un protocole de mesure par le service de l'A.N.R.H. Les échantillons d'eau qui sont pris à des conditions d'écoulement différentes sont filtrées dans un tamis du type Laurent ($Q = 32$ cm), la boue contenue dans ce dernier est pesée après séchage dans un four spécial durant 30 minutes à une température de 110°C. Cette méthode a été effectuée afin de déterminer la charge solide selon une procédure standard établie sur le territoire national et utilisée par beaucoup d'agence dans le monde monde (Achite et Ouiillon, 2007 ; Khanchoul et Jansson, 2007).

Les caractéristiques climatiques, morphométriques et morphologiques diffèrent d'une région à une autre ou d'un bassin à un autre. Aussi, il est admis aujourd'hui que les fluctuations climatiques sont des phénomènes quasi-cycliques (Tardy Y., 1994). En effet, du siècle écoulé, le climat du monde a changé. La pluviosité sur les continents, le débit des cours d'eau, la température ont augmenté dans plusieurs régions du monde et diminué dans d'autres (Tardy et al 1992 et 1995). Les caractéristiques Morphométriques des bassins changent aussi au cours des années, on sait par exemple que le couvert végétal se développe et se conserve ou non en fonction de la pluviosité.

III.2. Evolution des débits solides en fonction des débits liquides :

La mobilisation des matériaux solides sur les versants et leur transport éventuel par les cours d'eau représentent deux phénomènes distincts, mais liés entre eux. Le débit solide moyen des sédiments en suspension qui transitent sur une section d'écoulement moyen est calculé par le produit de la concentration moyenne des sédiments en suspension C_s par le débit liquide moyen Q_l durant une période de temps donnée suivant la loi : $Q_s = Q_l \cdot C_s$

III.2.1. Approche et Méthodologie :

Depuis longtemps, on a essayé de corréler les débits solides aux débits liquides et de déterminer une relation qui permettait d'estimer les premiers à partir des seconds. A ce titre, nous citons les travaux de de Jakuschoff (1932) sur les rivières de Turquie et ceux de Straub (1936) sur le fleuve du Missouri (USA) (Einstein., 1950, Leopold. et al., 1953).

Pour une très bonne représentation de la dynamique érosive des deux cours d'eau étudiés de Reboa et Soultz, une analyse de régression est faite entre les concentrations instantanées en sédiments C (g/l) et les débits liquides Q_1 (m^3/s). Parmi les courbes de tendances généralement utilisées pour représenter la relation $C = f(Q_1)$ sont :

Linéaire: $y = a x + b$; En puissance : $y = a x^b$; Exponentiel : $y = a e^{b x}$

Nous avons opté pour une fonction de type puissance donnant le meilleur coefficient de détermination R^2 qui s'écrit comme suit :

$$C = a \cdot Q_1^b$$

Avec :

C : Concentration mesurée (g/l),

Q_1 : Débit liquide en (m^3/s),

a et b : Constantes de régression.

Ce type de relation a été proposé dès 1997 par Jansson pour les rivières ou les cours d'eau. Depuis, plusieurs chercheurs ont essayé d'identifier surtout la valeur de l'exposant b . (Cohn et al. 1992; Duan 1983; Jansson 1985; 1997; Neyman, Scott 1960), ce qui permet de changer la direction de la droite et améliorer le coefficient de corrélation R^2 , Cette méthode a été appliquée en Algérie par différents auteurs tels que Khanchoul et Jansson, 2007 ; Achite et Ouillon, 2007 ; Yahiaoui et al. 2011. Pour ajuster la relation de régression, la méthode des classes des débits de Jansson consiste à subdiviser les débits en classes et calculer les moyennes arithmétiques des valeurs de concentrations (C_m) pour chaque classe de débit.

Toutefois, dans tous les modèles de régression un biais responsable de l'erreur existe (Duan, 1983 ; Newman, 1993 ; Walling et al. 1988 ; Jansson, 1985 ; Jansson, 1996), et pour surmonter ce biais Miller (1984) a proposé une technique statistique (retransformation logarithmique) qui a permis de développer un facteur de correction CF logarithmique déterminé par la formule suivante:

$$CF = \exp(0.5 \times \delta^2) \times \delta^2 = 1 \times [(N - 1) \times \sum (\ln C_{obs} - \ln C_{cal})^2]^{-1}$$

Après application du coefficient de correction, on obtient :

$$C = CF \times (aQ^b)$$

Entre autres, la charge solide (Q_s) se calcule par l'équation suivante :

$$Q_s[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] = Q[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \times C[\text{g} \cdot \text{l}^{-1}]$$

Selon plusieurs travaux, le facteur de correction logarithmique a été appliqué avec succès pour améliorer l'estimation de la charge solide Q_s . Selon (Asselman, 2000), l'utilisation de la loi en puissance issue de la transformation logarithmique tend à sous-estimer la charge solide de 10% à 50%, Ferguson a trouvé une amélioration de moins de 10% d'après ces études sur le bassin de Rhine. Une fois les calculs précédents sont achevés, on doit choisir le meilleur modèle de régression pour les deux stations hydrométriques et le valider par le coefficient de corrélation R^2 et le facteur d'Erreur qui présente la divergence qui existe entre le modèle basé sur les données de concentrations mesurées et estimées exprimé en pourcentage suivant la formule ci-dessous :

$$\text{Erreur}[\%] = \left[\frac{\sum Q_s \text{ Observés}}{\sum Q_s \text{ estimés}} - 1 \right] \times 100$$

Ensuite en étudiant les réponses de chaque bassin, en quantifiant le transport solide à l'échelle annuelle et saisonnière.

Apport solide et la charge spécifique : la charge sédimentaire (SL) dans les exutoires de deux sous bassins de l'Oued Soultez et Reboa est calculée par la formule suivante :

$$As[\text{tonnes}] = \sum Q[\text{m}^3/\text{s}] \times C[\text{g}/\text{l}] \times T[\text{s}] \times 10^{-3}$$

Lorsque T est la durée du temps entre les valeurs de concentration, mesurées ou calculées.

$$Ds[\text{T}./\text{km}^2/\text{an}] = \sum As [\text{t}] \times A^{-1}[\text{km}^2] \times N^{-1}[\text{an}]$$

Avec :

Ds : Dégradation spécifique moyenne annuelle en (tonnes/km²/an)

As : Apport solide annuel en (tonnes)

A : Superficie du bassin en (km^2)

N : Nombre d'années utilisées

III.2.1.1. Analyse des débits instantanés (établissement de régression entre débits solides et débit liquides) :

L'étude est réalisée à partir des données collectées au niveau des deux bassins étudiés, Reboa et Soultez sur une période de 27 ans (1985-2012). Les valeurs instantanées pour lesquelles un nombre suffisant et représentatif de prélèvements a été effectué permettant une bonne reconstitution du turbidigramme. Les couples de valeurs sélectionnées sont reportés sur une échelle Log-Log

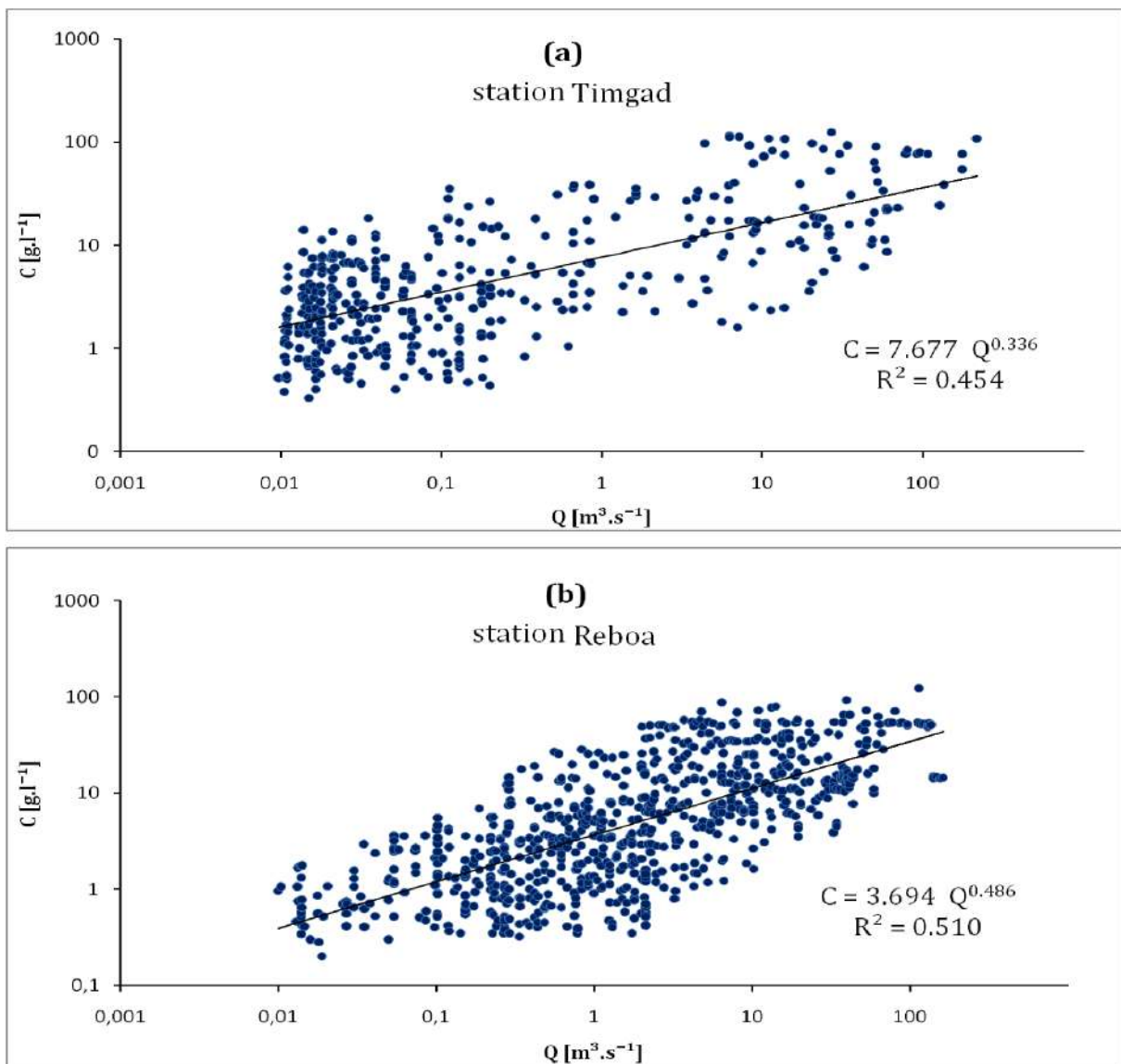


Figure. III.1 : Modèles annuels reliant les concentrations aux débits liquides instantanés (1985-2012) : (a) de l'Oued Reboa ; (b) l'Oued Soultez (Source : Auteur, 2017).

La relation en puissance $C = f(Q_1)$ qui relie le débit liquide et la concentration instantanée à l'échelle annuelle utilisant 427 couples de mesures pour l'Oued Soultz et 812 de l'Oued Reboa, bien qu'elle ne présente pas un coefficient de corrélation assez fort (0.45-0.51), elle permet de constater la grande divergence qui existe entre le modèle basé sur les données de concentrations mesurées et estimées pour les deux stations Timgad et Reboa (Figure. III.1).

III.2.2. Résultats et discussions :

L'étude porte sur les valeurs instantanées des débits liquides en m^3/s et des concentrations en g/l , mesurés au niveau des bassins des Oueds Reboa, Soultz, respectivement aux stations de Reboa et Timgad. Les regroupements des valeurs de débits liquides et des concentrations des deux stations ont été effectués pour étudier la réponse hydrosédimentaire à l'échelle annuelle et saisonnière suivant trois saisons, automne (Septembre - Novembre), hiver (Décembre- Février), printemps (Mars-Mai), sur une période (1985-2012).

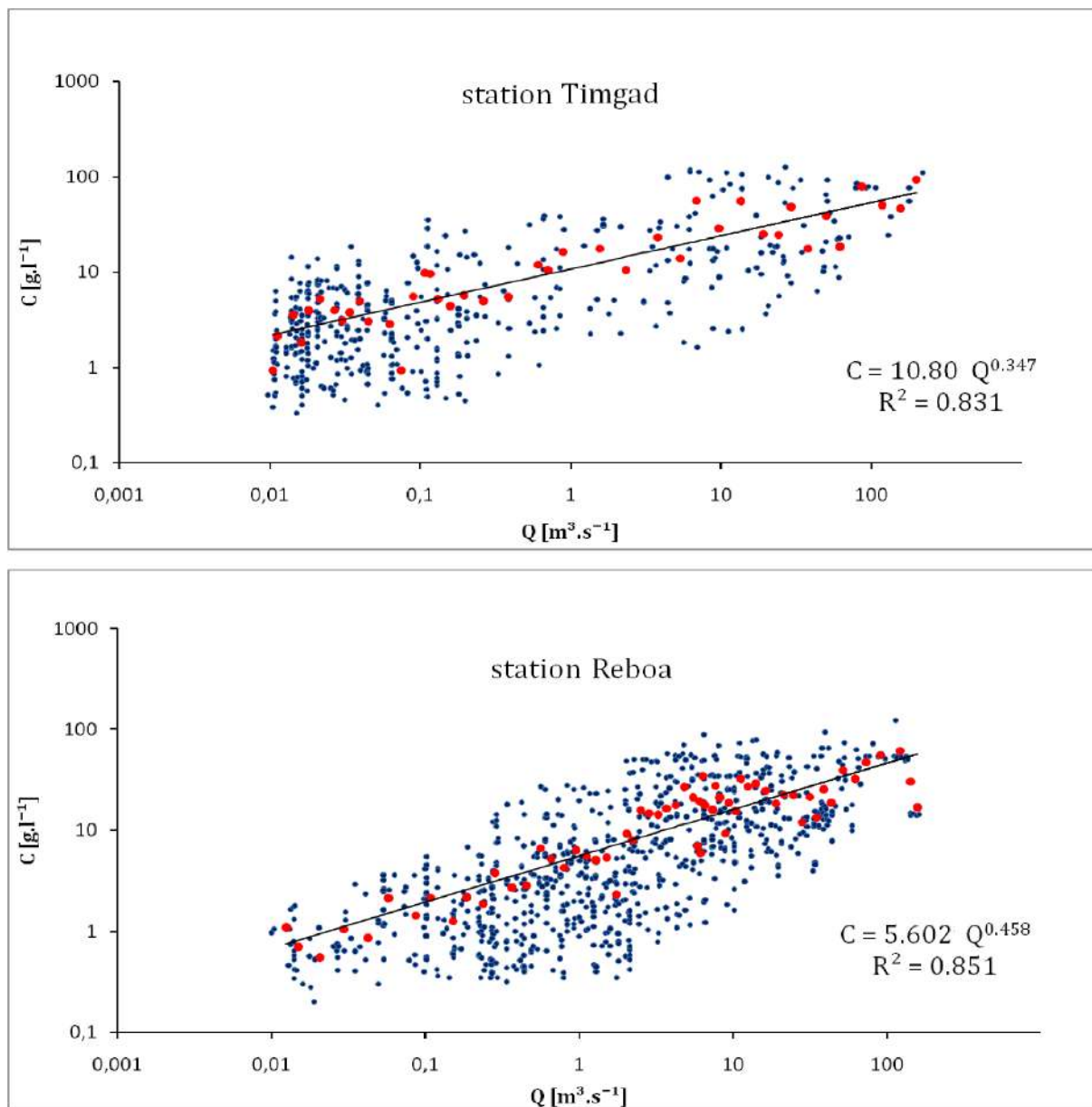


Figure. III.2 : Modèles annuels reliant les concentrations aux débits liquides instantanés $C=f(Q)$ d'après la méthode des classes :(1985-2012) de l'Oued Reboa et l'Oued Soultetz (Source : Auteur, 2017).

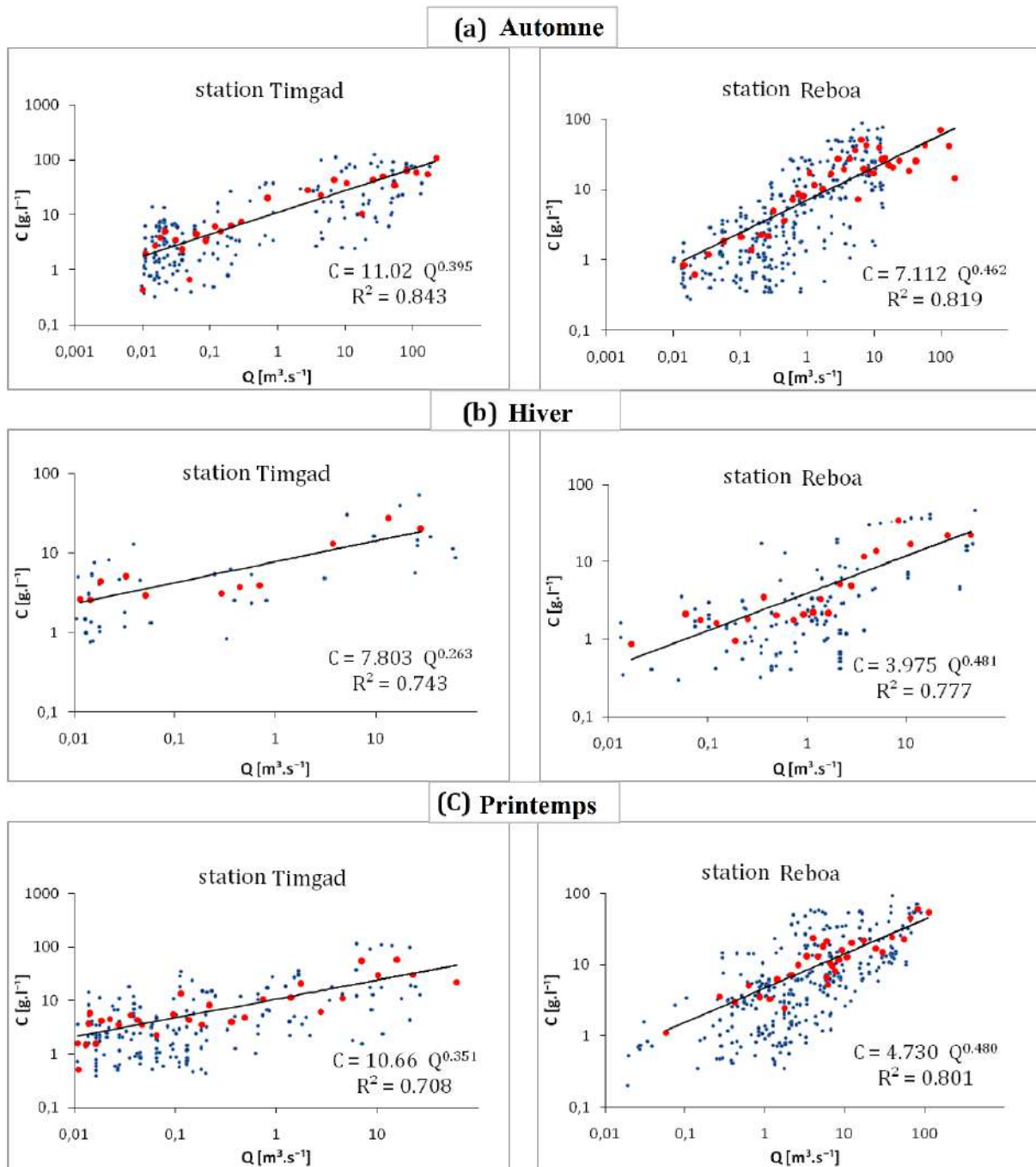


Figure. III.3 : Modèles saisonnière reliant les concentrations aux débits liquides instantanés d'après la méthode des Classes : (1985-19816) à (2011-2012) de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez (Source : Auteur, 2017).

Tableau. III.2 : Modèles Annuels et saisonniers liant les débits liquides instantanés aux concentrations instantanées après la méthode des Classes pour la Station Timgad de l'Oued Soultez (Source : Auteur, 2017).

	Periode	Nombre de données	δ^2	CF	R ²	Equation de corrélation	Debit Solide Qs (kg.s ⁻¹ x10 ³)		Erreur [%]	Erreur Total [%]
							Observé	Calculé		
Tout les données	Annuelle	427	-	-	0.83	$C = 10.80 * Q^{0.347}$	149.18	142.89	4.21	4.21
Sous-Série	Automne	186	-	-	0.84	$C = 11.02 * Q^{0.395}$	133.09	154.29	15.93	14.08
	Hiver	42	-	-	0.74	$C = 7.80 * Q^{0.263}$	4.98	5.82	16.90	
	Printemps	199	0.3	1.1	0.75	$C = 10.66 * Q^{0.351}$	11.11	11.98	7.85	

Tableau. III.3 : Modèles Annuels et saisonniers liant les débits liquides instantanés aux concentrations instantanées d'après la méthode des Classes pour la Station Reboa de l'Oued Reboa (Source : Auteur, 2017).

	Periode	Nombre de données	δ^2	CF	R ²	Equation de corrélation	Debit Solide Qs (kg.s ⁻¹ x10 ³)		Erreur [%]	Erreur Total [%]
							Observé	Calculé		
Tout les données	Annuelle	812	-	-	0.83	$C = 5.602 * Q^{0.458}$	243.69	265.14	8.80	8.80
Sous-Série	Automne	381	-	-	0.82	$C = 7.112 * Q^{0.462}$	151.35	214.29	41.58	27.80
	Hiver	125	0.3	1.2	0.78	$C = 3.975 * Q^{0.481}$	9.34	10.58	13.32	
	Printemps	306	0.2	1.1	0.81	$C = 4.730 * Q^{0.480}$	83.00	87.07	4.91	

III.2.2.1. Interprétation des résultats :

Comme pour la plupart des cours d'eau, on trouve pour les deux Oueds (Figures.III.2 et III.3) une bonne relation en puissance (Probst et Bazerbachi, 1986), liant le débit des matières solides en suspension en g/l au débit liquide en m³/s. Les meilleurs modèles de régression pour les deux bassins versants ont été trouvés en considérant la série annuelle. Ils ont été améliorés en utilisant la correction factorielle où l'erreur calculée a surestimé la valeur de 4,21% et 8,80% respectivement. Le taux d'erreur obtenu est considéré faible, il est du même ordre que celui obtenu par (JANSSON, 1997). Cependant, les sous-séries qui représentent les saisons (automne, hiver et printemps) ont donné une surestimation de 14,08% et 27,80% pour les deux stations Timgad et Reboa respectivement après la correction effectuée à l'aide du facteur de correction (Tableaux. III.2. et III.3). En outre, la saison d'automne à l'Oued Soultez peut être considérée comme une période active à l'érosion et à la mobilisation des sédiments dont la surestimation est significative de l'apport solide automnal surtout dans la station de Reboa près de 42%. Une première analyse, graphique montre qu'à de faibles débits liquides généralement estivaux (moins de 0,2 m³/s) peuvent être associés de forts débits solides (près de 30 g/l) déclenchés sûrement à la suite d'orages violents. De même, de fortes valeurs des débits liquides n'ont engendré qu'une faible concentration donc un faible transport solide dû à la vidange des nappes survenue à la suite d'une crue importante.

III.3. Apport Solide :

III.3.1. Variation annuelle des apports liquides et solides :

Les années qui ont été les plus productives des sédiments pour une période de 27 ans de 1985 à 2012 sont représentées sur la (Figure. III.4) qui illustre l'apport liquide et l'apport solide pour les deux bassins d'étude. Une contribution inégale a été observée pendant les années concernant la quantité de l'apport solide et l'apport liquide observées au cours des années 1989/1990, 1999/2000, 2008/2009 et 2011/2012 dans le bassin versant de l'Oued Reboa. Ces quatre années ont contribué avec 57% de la charge totale des apports solides. Pendant ce temps, les trois années de 1989/1990, 2004/2005 et 2007/2008 observées dans le bassin versant de l'Oued Soultez ont une contribution de 48%, ces résultats des charges sédimentaires des apports solides dans les deux bassins versants ont montré une discordance de l'approvisionnement en sédiments par rapport aux autres années. Cela est dû à l'irrégularité de la distribution des précipitations d'un bassin à l'autre. La contribution annuelle moyenne des sédiments enregistrés à la sortie du bassin hydrographique de l'Oued Soultez a été estimée à 1.15×10^5 tonnes, ce qui correspond à une dégradation spécifique moyenne annuelle de 575 T/Km²/an. Cette valeur était faible par rapport à celle du bassin versant de l'Oued Reboa dont le montant était égal à 2.250×10^5 tonnes, correspond à une

dégradation spécifique moyenne annuelle de 678 T/ km²/an. Le dernier bassin se distingue par un approvisionnement en sédiments assez élevé dû à ses conditions géomorphologiques spécifiques favorables à l'accélération de l'érosion des sols, comme les roches faibles, les précipitations et une topographie plus étendues.

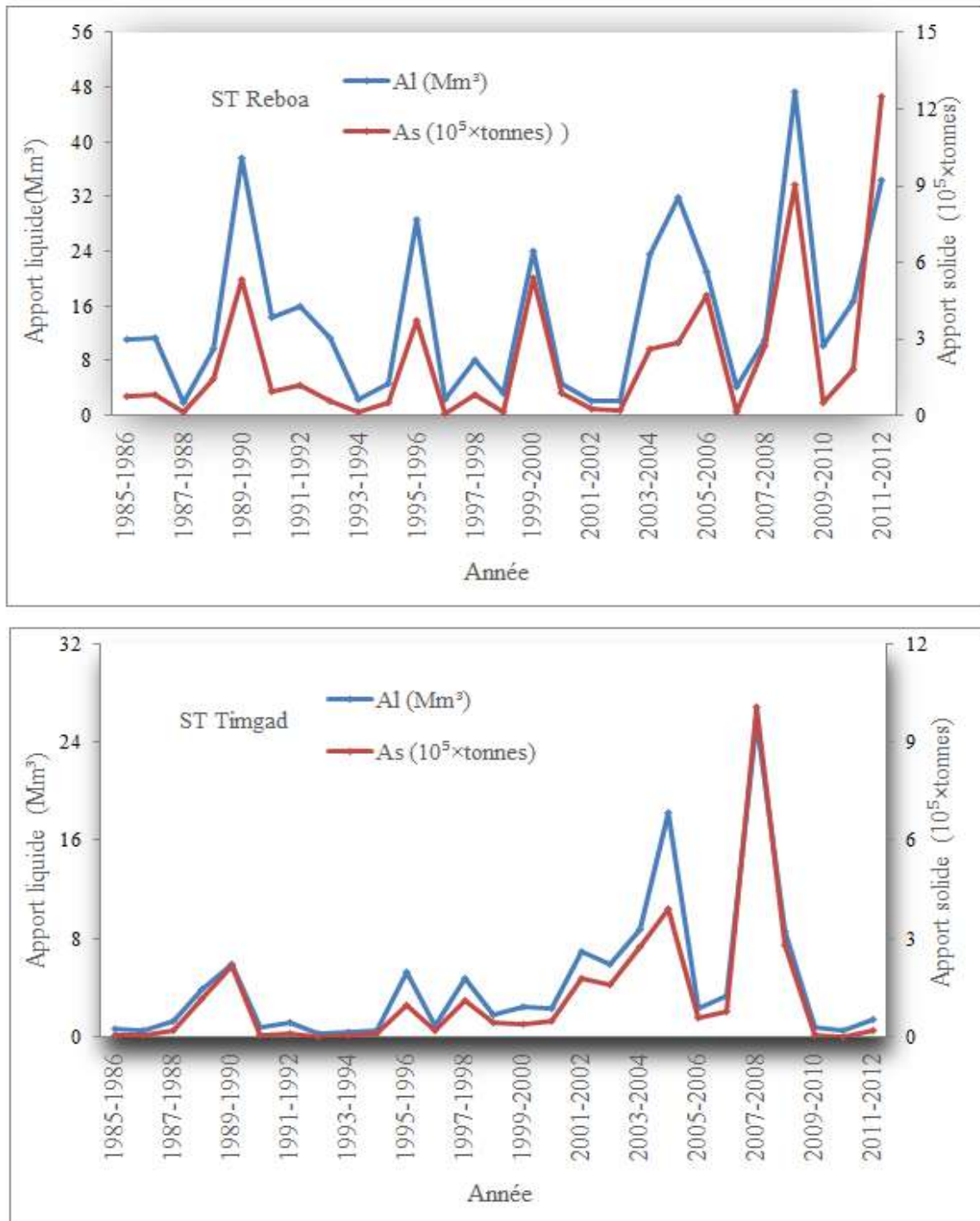


Figure. III.4 : Variations annuelle des Apports solides et Apports liquides dans l’Oued Reboa, et l’Oued Sultez (Source : Auteur, 2017).

En ce qui concerne la variation annuelle des charges de sédiments, on constate à partir des graphiques que les deux bassins d'eau présentent une forte variabilité ou une dispersion de leurs valeurs. En calculant le coefficient de variation (CV) qui est l'écart-type divisé par la moyenne, nous avons remarqué que le bassin de l'Oued Soultez à la variation la plus élevée avec un CV égal à 173% par rapport au bassin de l'Oued Reboa dont le CV est égal à 134%. Contrairement au bassin de l'Oued Soultez, le bassin de l'Oued Reboa a montré une déviation des charges sédimentaires et des volumes d'eau vers la droite, ce qui signifie que la production élevée de sédiments a commencé à partir de l'année 2000. La masse de la distribution concentrée est illustré sur la droite de la (Figure.III.4) qui montre une distribution importante vers la gauche.

III.3.2. Variation saisonnière de l'apport solide :

On a noté que la charge des sédiments était très variable d'une saison à l'autre. Au cours de la période d'étude, il a été noté que les valeurs mensuelles des sédiments transportés dans les deux Oueds étaient très élevées pendant les saisons d'automne et de printemps. En fait, ces valeurs mensuelles élevées étaient plus abondantes en automne dans le bassin versant de l'Oued Reboa, dont la charge de sédiments en septembre représentait près de 32% de la charge annuelle de sédiments, tandis que dans le bassin versant de l'Oued Soultez, 25% de la charge annuelle de sédiments a été trouvée au cours du mois d'octobre. Les inondations des deux bassins versants ont été principalement caractérisées par trois types d'hystérésis : boucles simultanées, positives et négatives. Les précipitations d'automne dans les zones semi-arides sont souvent de forte intensité générant des inondations plus élevées que celle de l'hiver, avec un coefficient de ruissellement mensuel moyen allant de 10 à 20% dans le bassin de l'Oued Reboa et de 4 à 15% dans le bassin versant de l'Oued Soultez. De plus, en septembre, la dégradation spécifique moyenne estimée à 183 T/km² avec une concentration de 28,71 g/l dans le bassin de l'Oued Soultez, tandis qu'elle est de 150 /km² avec une concentration de 32,96 g/l pendant le mois d'Octobre dans le bassin versant de l'Oued Reboa. Cela s'explique par le fait qu'après une longue saison sèche (été), les premières pluies d'automne pourraient rencontrer un sol sec et dur, qui pourrait être facilement érodé. Les pluies torrentielles ont généré des éclaboussures de pluie sur des sols non protégés. Cette situation a permis aux événements de tempête d'arracher de grandes quantités de matières fines du sol, qui se sont alors déplacés en suspension par les cours d'eau. Egalement, les écoulements étaient très importants dans le bassin de l'Oued Reboa, alors que dans le bassin de l'Oued Soultez de grandes zones agricoles se sont trouvées sur des pentes de faible raideur.

En hiver, La production en transport solide était plus faible comparée à la saison automnale. Néanmoins, la dégradation spécifique est restée plus élevée dans le bassin versant de l'Oued Reboa 90 T/Km² que dans le bassin de l'Oued Soultez qui a uniquement 57 T/Km² (Tableau. III.4). Ces valeurs faibles sont dues principalement aux faibles quantités de pluies reçues dans les deux bassins versants durant cette saison. Au cours de la saison printanière, de mars à mai, on remarque que la dégradation spécifique moyenne est deux fois plus élevée dans le bassin de l'Oued Reboa avec 314 T/Km² que dans le bassin de l'Oued Soultez qui présente que 167 T/Km².

Ces valeurs ont représenté le maximum en mai pour les deux bassins. Les concentrations en matière de suspension variaient entre 20 et 37g/l dans le premier bassin et entre 12 et 20 g/l dans le second bassin. Les fortes concentrations durant le printemps dans le bassin versant de l'Oued Reboa peuvent être expliquées par des facteurs comme les pentes fortes qui sont toujours utilisées par une couverture végétale non protectrice telle que les cultures, processus d'érosion, tels que des pentes abruptes et des cultures de couverture végétales de mauvaises cultures.

Les crues ont été un événement majeur en termes de transport de sédiments dans le bassin de l'Oued Reboa qui s'est produit après la forte crue hivernale. Les précipitations totales de 64 mm ont produit un écoulement de 39 mm. L'impact morphologique de cet événement d'inondation a certainement été influencé par la saturation des sols hautement érodable et de faible couvert végétal. Le pic élevé de débit liquide (17 m³/s) obtenu après sept heures et demie n'a pas coïncidé avec le sommet de la concentration de sédiments (42 g/l), cela devrait être une hystérésis positive où le sommet de la concentration des sédiments était avant le pic de débit liquide (Figure 10-a). Il y avait plus de sédiments prêts à être transportés par le ruissellement sur les pentes à cause de l'érosion des bancs. La charge de sédiments en suspension de cette crue a été estimée à 22.10³ tonnes, cette concentration élevée pourrait être produite sur des sols saturés donnant un écoulement trop élevé inhabituel.

La nature de ces sols a été distinguée par un matériau argileux qui a été facilement érodé en même temps la crue dans le bassin versant de l'Oued Soultez, on remarque une diminution de l'intensité et de l'ampleur de cet événement de tempête. Tout d'abord, les précipitations et le ruissellement étaient la moitié des valeurs par rapport au bassin de Reboa. Il y avait respectivement 49,20 mm et 45 mm. Deuxièmement, la crue a été caractérisée par une augmentation simultanée de la concentration. Pour la concentration sédimentaire 36 g/L un pic de débit liquide égal à 5 m³/s (Figure. III.5). On pense que cette faible quantité de charge sédimentaire de 5,76 tonnes à l'Oued Soultez pourrait être causée par une moindre quantité de sédiments en raison d'une couverture végétale et de pentes moins raides et des conditions climatiques défavorables.

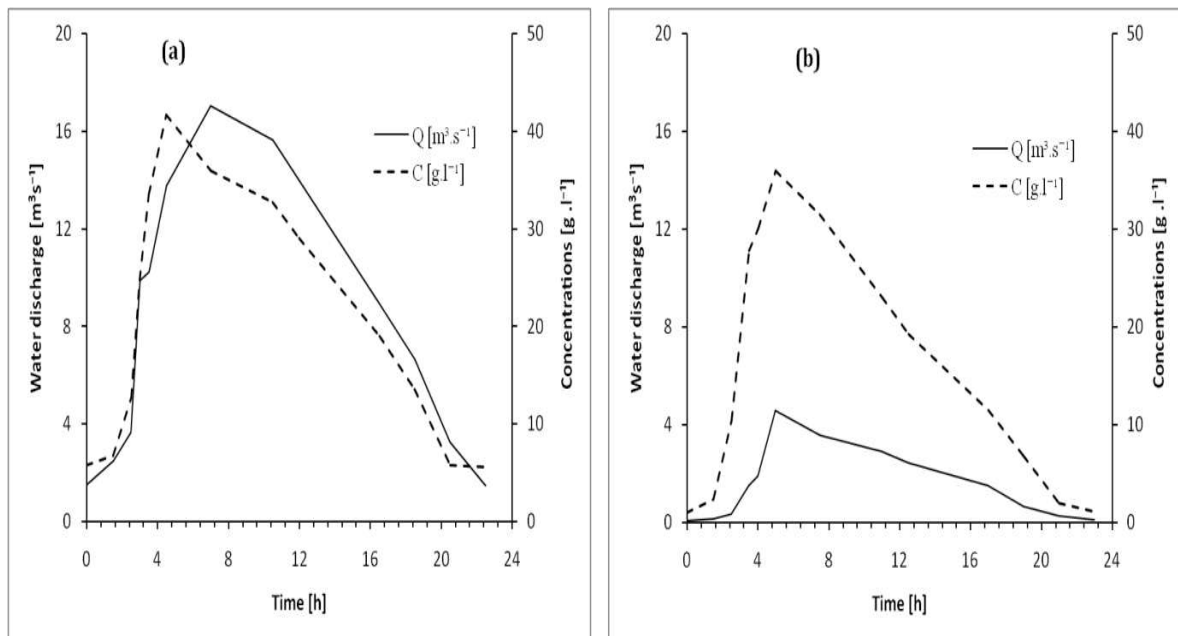


Figure. III.5 : Crue du 08/04/1990 dans (a) le bassin de l’Oued Reboa, (b) le bassin de l’Oued Soultez. (Source : Auteur, 2017).

En saison estivale, les conditions climatiques sont défavorables au transport des sédiments car les précipitations sont souvent inexistantes ou trop faibles pour générer un ruissellement capable d'éroder et de transporter des quantités importantes de sédiments. Cette saison a été caractérisée par une dégradation spécifique de 56,5 T/Km² dans le bassin de l’Oued Soultez et de 101 T/Km² dans le bassin de l’Oued Reboa (Tableau. III.4). Ce dernier a un coefficient de ruissellement plus élevé de 15% en juillet par rapport au bassin versant de l’Oued Soultez qui a un coefficient de seulement de 9%. Cela devrait certainement être lié au fait que les pluies torrentielles sont moins fréquentes dans le bassin versant de l’Oued Soultez que dans le l’Oued Reboa.

Tableau. III.4: Répartition saisonnière de l'Apport liquide A_l en [Hm^3], apport solide A_s en [tonnes], dégradation spécifique D_s en [$\text{T.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$], coefficient de ruissellement C_R [%], concentration moyenne C [g l^{-1}] de l'Oued Soultez (Station hydrométrique Timgad) et l'Oued Reboa (station hydrométrique Reboa);Période 85/12 (Source : Auteur, 2017).

Saisons		Automne	Hiver	Printemps	Eté	Annuel
Oued Reboa	C_R [%]	11.49	8.38	19.14	9.74	12.19
	A_l [Hm^3]	2.75	2.82	6.88	1.55	14.00
	$A_s.10^5$ [T]	0.65	0.32	1.18	0.10	2.25
	C_{moy} [g/L]	23.80	11.18	27.43	9.59	18.00
	D_s [T/Km ² /an]	218.62	89.56	313.72	56.47	678.34
Oued Soultez	C_R [%]	9.14	4.23	6.44	5.53	6.34
	A_l [Hm^3]	1.69	0.82	1.25	0.63	4.39
	$A_s.10^5$ [T]	0.52	0.15	0.33	0.25	1.25
	C_{moy} [g/L]	15.01	6.31	14.54	11.82	12.78
	D_s [T/Km ² /an]	249.78	57.13	166.56	101.13	575.60

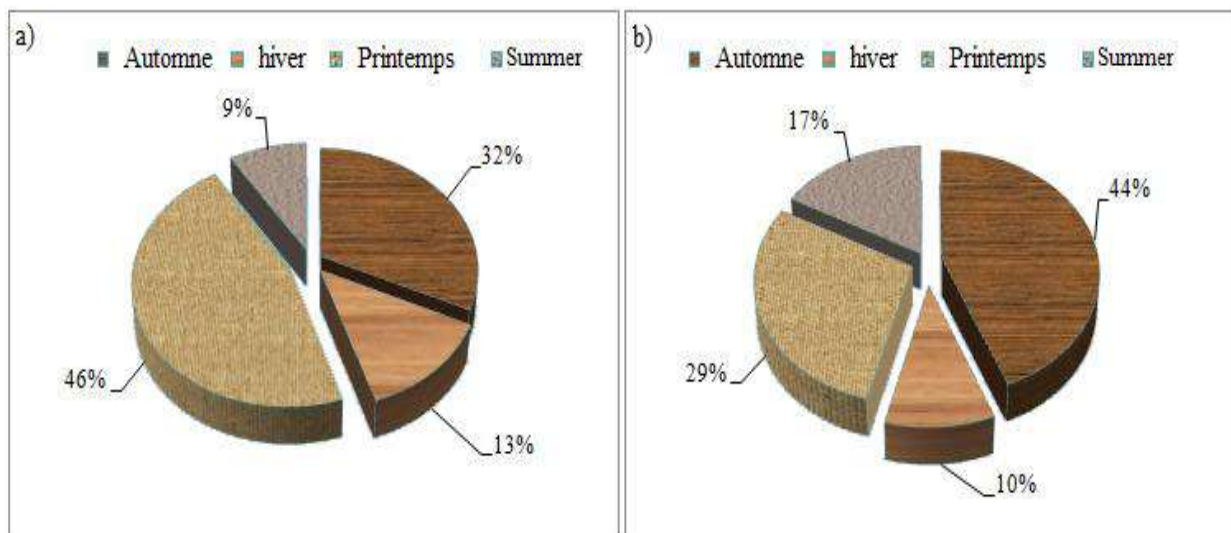


Figure. III.6 : Distribution de la dégradation spécifique dans les deux sous-basins (a) de l'Oued Reboa et (b) de l'Oued Soultez pour la période 85/12 (Source : Auteur, 2017).

Dans l'ensemble, il convient de noter qu'une relation significative pourrait exister entre le coefficient de ruissellement et la dégradation spécifique sédimentaire dont les facteurs topographiques et lithologiques pourraient favoriser l'érosion des sols qui pourraient varier en fonction de la présence ou de l'absence de couverture végétale et des pratiques culturelles.

III.4. Relations entre le taux d'érosion spécifique annuel et quelques paramètres :

Des relations entre l'apport de sédiment, et les facteurs de précipitations et d'écoulement ont été fait. Les résultats sont les suivants :

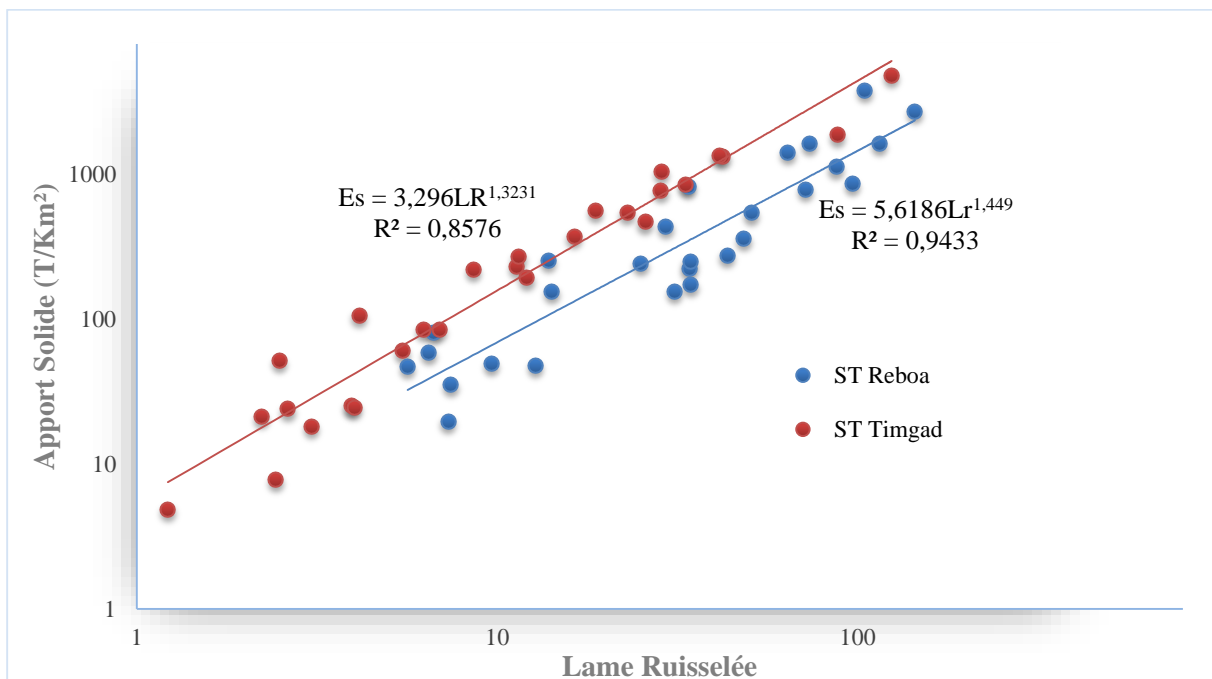


Figure. III.7 : Relation entre le taux d'érosion spécifique annuel (Es) et la lame ruisselée (Lr) de l'Oued Reboa et l'Oued Sultez (Source : Auteur, 2017).

La mise en graphe (Figure.III.7) de la dégradation spécifique (Es) en fonction de la lame d'eau ruisselée (Lr) $Es = F(Lr)$ reflète bien leur dispersion et marque un très fort coefficient de corrélation R^2 obtenue pour les deux sous bassins 0.94 pour la Station hydrométrique de Reboa et 0.86 pour la Station hydrométrique de Timgad. Ce qui donne une bonne relation entre l'apport solide et lame ruisselée. Cela s'explique par le ruissellement des événements pluvieux absorbé par le sol qui ne débute qu'après un seuil de pluie selon des conditions d'humidité préalable.

La lame d'eau ruisselée dépend de la pluviométrie et la température moyenne annuelle de chaque bassin (Megueni et Remini, 2008).

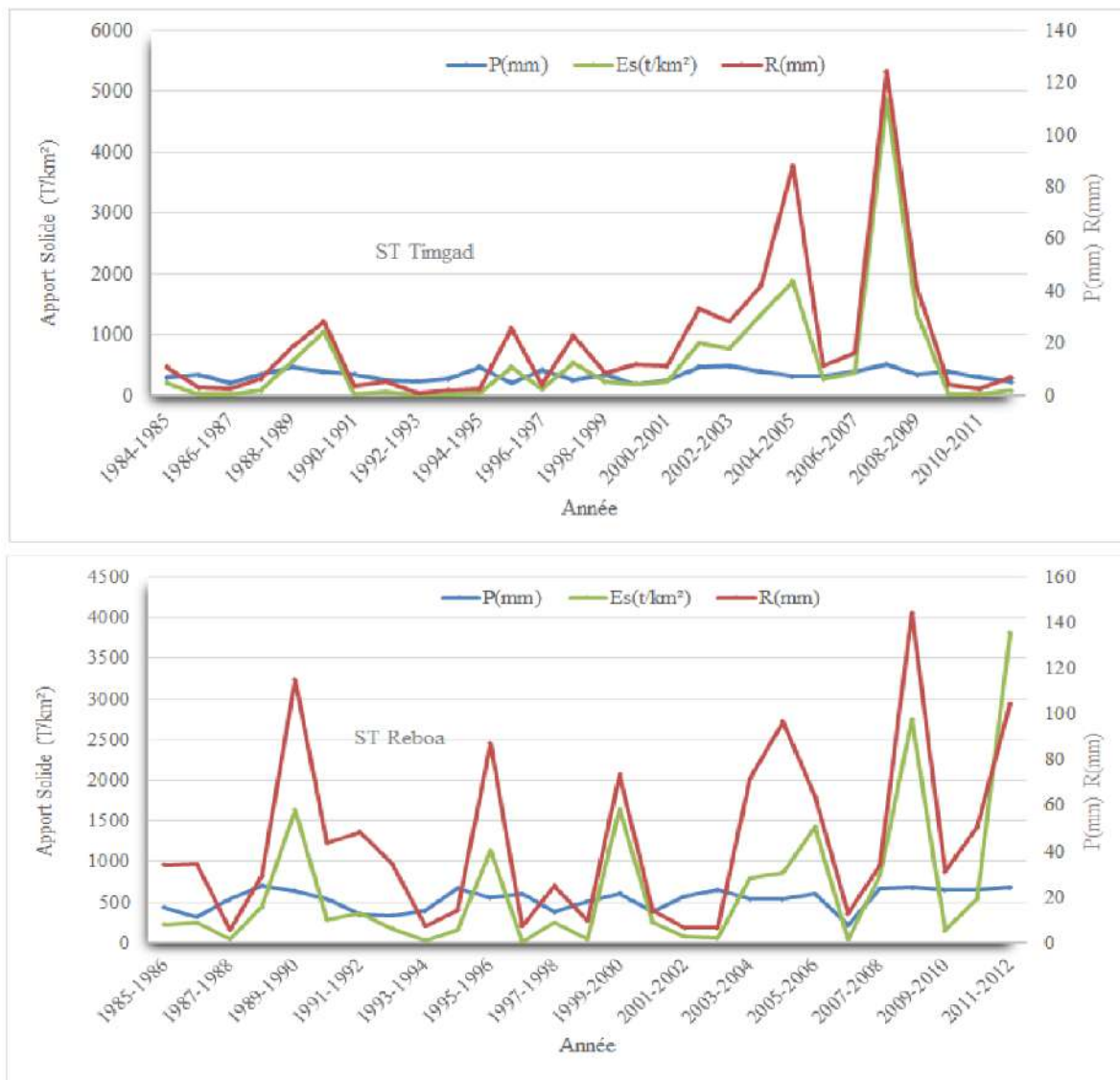


Figure. III.8 : Relation entre le taux d'érosion spécifique (Es) annuel et la lame ruisselée (Lr) et lame précipitée (Lp) à l'Oued Reboa et l'Oued Soultez (Source : Auteur, 2017).

D'après la Figure.III8, les deux graphes $Es = F(R, P)$ des deux stations hydrométriques Timgad et Reboa, montrent clairement que l'Oued Reboa est soumis à des conditions physico-géographiques plus favorables à l'écoulement par rapport à l'Oued Soultez. Ces caractéristiques sont expliquées par les montagnes de forte pente (Figure.I.4) qui favorisent largement l'écoulement de surface, l'apport solide réalise une très bonne relation avec la lame ruisselée et la lame précipitée des deux sous bassins, ceci peut être expliqué par le fait que le sol n'est pas bien protégé par le couvert végétal ce qui sert à freiner la dégradation du sol (Cultures,....etc.) .

Conclusion du chapitre III

Le transport de sédiments en suspension a été calculé pour l'Oued Reboa avec une surface de 328 km² et pour l'Oued Soultez avec une superficie de 207 km².

La valorisation de la décharge d'eau et les données de concentration des sédiments ont été rendues possibles grâce à l'application d'un modèle statistique de type puissance ainsi qu'à l'application de la technique moyenne de la classe de décharge d'eau.

La méthode de la courbe de classification des sédiments a fourni un moyen d'estimer les charges de sédiments dans les deux bassins d'étude. Les quantités de sédiments en suspension enregistrés au cours de la période comprise entre 1985 et 2012 ont été évaluées à 32.10⁵ tonnes d'apport solide dans l'Oued Soultez avec une dégradation spécifique de 575 T/Km²/an, Ainsi que le l'Oued Reboa présente 60.10⁵ tonnes d'apport solide qui représente une dégradation spécifique de 678 T/Km²/an.

La différence des valeurs fournit des informations sur l'intensité de l'érosion des sols dans chaque bassin et par conséquent, ces valeurs révèlent une très forte disparité qui résulte principalement des conditions géomorphologiques telles que la lithologie, les pentes et la couverture végétale.

La variabilité interannuelle est encore plus fortement influencée par les paramètres hydroclimatiques, qui impliquent un transport de sédiments en suspension plus élevé en raison des fortes intensités de pluie en automne et en printemps qui peuvent générer de fortes inondations. Le bassin versant de l'Oued Reboa se caractérise par des conditions d'écoulement plus agressives.

Au cours de la période d'étude de 27 ans, quatre années ont contribué à 57% du transport de sédiments dans le bassin versant de l'Oued Reboa. Au contraire, la contribution à la production de sédiments dans le bassin versant de l'Oued Soultez est un peu inférieure, elle est estimée à seulement 48% en quatre années.

Le rendement en sédiments en suspension a été le plus élevé dans les saisons de l'automne et du printemps. Les différences d'érosion entre les deux bassins ont été particulièrement plus ou moins importantes au printemps. Au cours de la grandeur des événements de tempête dans les deux saisons précédentes, les bassins ont des diagrammes de décharge et de concentration très peuplés avec un léger avantage pour le bassin de Reboa, ce qui implique un écoulement de surface avec une forte érosion à cause des zones de pâturage cultivées étendues sur des pentes supérieures à 10% de sols argileux.

J'espère que ces découvertes aideront les conservateurs du sol dans ces deux bassins à prévenir le risque de sédimentation dans le réservoir de Koudiet Medouar.

Chapitre IV

Modélisation et Cartographie de la Dégradation du sol par le SIG

Introduction :

Dans cette partie de notre étude, on fait appel à la télédétection et aux systèmes d'informations géographique (SIG) avec ARCGIS pour évaluer et cartographier l'érosion hydrique en utilisant l'équation universelle des pertes en sol « USLE » dans le bassin versant de l'Oued Chemorah et ses sous bassins de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez.

IV.1 Equation universelle de perte en sol :

Il existe plusieurs modèles pour quantifier et estimer le risque d'érosion. L'application de ces modèles nécessite souvent beaucoup de données qui la rend de plus en plus problématique. Dans notre cas, nous avons choisi Le model empirique de perte en terre proposé par (Wischmeier et Smith ,1965). C'est un modèle développée aux Etats Unis au Centre National du Ruissellement et de Calcul de Perte en Sol. Son application demande moins de données-sources. Ce modèle a été appliqué largement à toutes les échelles (Fistikoglu et al. 2002), il est constitué d'un ensemble de cinq sous-modèles:

$$A = R .K .LS. C. P$$

Avec :

A : taux annuel de perte en sol en t /ha /an;

R : facteur de l'érosivité des pluies, il correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité en 30 min consécutives, et est Exprimé en MJ mm (ha h an)⁻¹;

K : l'érodibilité des sols, dépend de la granulométrie, de la quantité de matière organique, de la perméabilité et de la structure du sol, et est exprimé en t ha h (ha MJ mm)⁻¹;

LS : facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S en%) et la longueur de pente (L en m);

C : facteur sans dimension qui représente l'effet de la couverture végétale;

P : facteur sans dimension, rapport qui tient compte des techniques culturales antiérosives telles que le labour en courbes de niveau.

L'USLE « Revised Universal Soil Loss Equation » a connu par la suite plusieurs variantes (Renard et al. 1997) qui retient la structure de base de ce modèle, le facteur LS est modifié pour pouvoir rendre compte d'une topographie variable. Ces modifications sont

incluses dans différentes variantes d'USLE, dont les deux principales sont l'équation MUSLE (modified USLE) de Williams, 1975, et USLE-M (USLE -modified) de Kinnell, 2001.

IV.2 Données et Méthode d'évaluation de l'érosion utilisée :

Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG sont utilisés pour évaluer et Cartographier chaque facteur individuellement et à les spatialiser en utilisant les images satellitaires LANDSAT. L'USLE est la combinaison de cinq facteurs spécifiques qui décrivent leur caractéristiques et qui contrôlent l'érosion de chaque bassin versant, qui présentent des taches complexes pouvant être résolus avec l'intégration de plusieurs sources de données (données spatiales, mesures, enquêtes sur le terrain et images satellitaires). Des couches individuelles ont été créées pour chaque paramètre de l'USLE et sont ensuite combinées par une procédure de modélisation dans la grille du SIG ARCGIS.

Chaque grille de facteur avait une taille de cellule de 30 m. Toutes les couches ont été projetées en UTM zone 32 N en utilisant le WGS 1984. L'application de l'équation universelle des pertes en terre dans le bassin versant de l'Oued Chemorah et ses sous bassins versants de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez se résume par le calcul des différents facteurs sur toute la superficie de chaque bassin versant et leur présentation sous forme de cartes thématiques (facteur d'agressivité climatique, facteur d'érodibilité des sols, facteur d'inclinaison et longueur de pente, facteur de la couverture végétale, et facteur pratiques antiérosives). L'intégration de ces cartes dans le système d'information géographique ARCGIS nous a permis de les superposer et d'évaluer le taux d'érosion en appliquant la formule de Wischmeier et Smith. Le schéma ci-dessus résume les étapes précédentes :

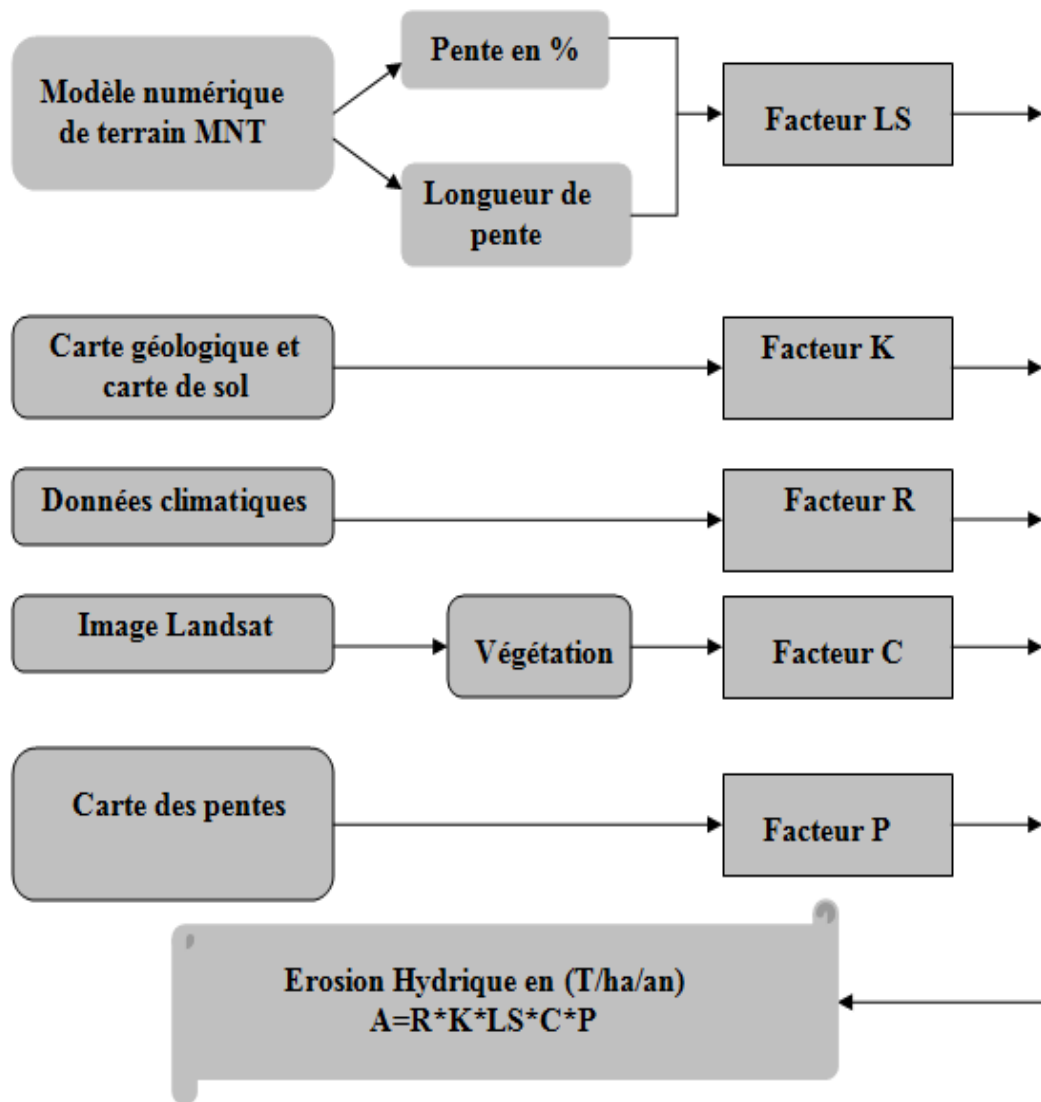


Figure. IV.1 : Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique par la méthode de Wischmeier RUSLE dans le bassin versant de l'Oued Chemorah et ses sous bassins.

IV.3 Calcul des facteurs de l'équation universelle de perte en sol.

IV.3.1 Facteur de l'agressivité climatique R:

L'estimation du facteur (R), se calcul selon la formule de Wischmeier et Smith 1978 données par la formule empirique:

$$R = E_c \cdot I_{30}$$

E_c : énergies cinétiques

I_{30} : intensité moyenne sur 30 minutes

Elle ne peut s'appliquer que dans certaines régions équipées par un pluviographe qui enregistre instantanément les pluies. La majorité des stations n'enregistrent que la moyenne journalière. Les seules données disponibles au niveau de A.N.R.H (Agence National des Ressources Hydrique) pour les précipitations dans les stations qui se trouvent dans chacun de nos bassins ou à sa proximité sont des moyennes mensuelles et annuelles, donc nous avons fait le choix de la formule de Rango et Arnoldus (1987) donnée par :

$$\text{Log } R = 1,74 \text{ Log } \left(\frac{P_i}{P} \right) + 1,29$$

Avec :

P_i : Précipitations moyennes mensuelles en (mm)

P : Précipitations moyennes annuelles en (mm)

Tableau. IV.1 : Précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) et valeur de R moyen pour la période 1985-2012. (Source : Auteur, 2017)

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	total	R
Tazoult	37,1	30,4	37,2	33,2	35,8	31,5	39,4	41,7	38,5	19,5	5,0	16,6	366,0	52,7
Batna	43,7	29,8	34,7	35,9	34,6	29,8	39,8	41,4	39,0	22,4	9,0	15,4	375,4	53,7
Ali ben tenoun	48,9	39,8	16,3	22,4	20,0	14,8	55,9	39,9	17,6	18,3	4,1	8,4	306,2	55,2
Timgad	33,5	23,3	21,7	23,2	25,2	19,8	30,6	33,4	37,1	13,3	9,1	15,1	285,3	36,3
Baiou	38,9	29,8	39,4	33,3	28,0	26,8	41,9	43,4	38,9	23,1	8,2	22,9	374,7	52,9
Sidi mancer	32,7	24,5	29,1	29,7	36,8	26,3	33,7	34,8	32,8	20,3	7,1	14,1	321,8	42,4
Chélia	45,1	39,0	48,4	46,0	50,2	39,4	62,0	46,2	55,5	29,9	14,2	32,4	496,1	81,7
Ain tinn	46,8	38,8	44,4	39,4	32,9	31,4	49,3	43,9	40,5	24,0	11,6	26,6	427,0	63,8
Toufana	32,4	24,7	22,0	22,8	26,2	20,7	29,2	29,2	37,5	15,5	5,4	11,9	277,3	35,5
Yabous	39,3	28,0	37,5	32,9	33,0	30,5	45,4	38,9	44,1	21,3	10,8	20,6	382,3	53,4
Reboa	20,6	15,1	15,9	25,3	24,3	14,9	25,7	19,5	30,3	17,3	5,5	7,4	221,9	25,7
Foum etoub	57,5	47,8	37,8	44,2	39,6	31,8	56,2	44,8	53,2	25,4	17,6	30,6	486,6	77,1
Bouhliet	14,7	10,9	8,6	15,3	17,1	23,0	20,3	28,5	18,1	12,8	2,5	5,4	356,4	82,75
Medina	46,0	38,9	46,4	42,7	37,5	35,4	55,7	45,0	44,7	27,0	12,6	22,3	454,1	70,0

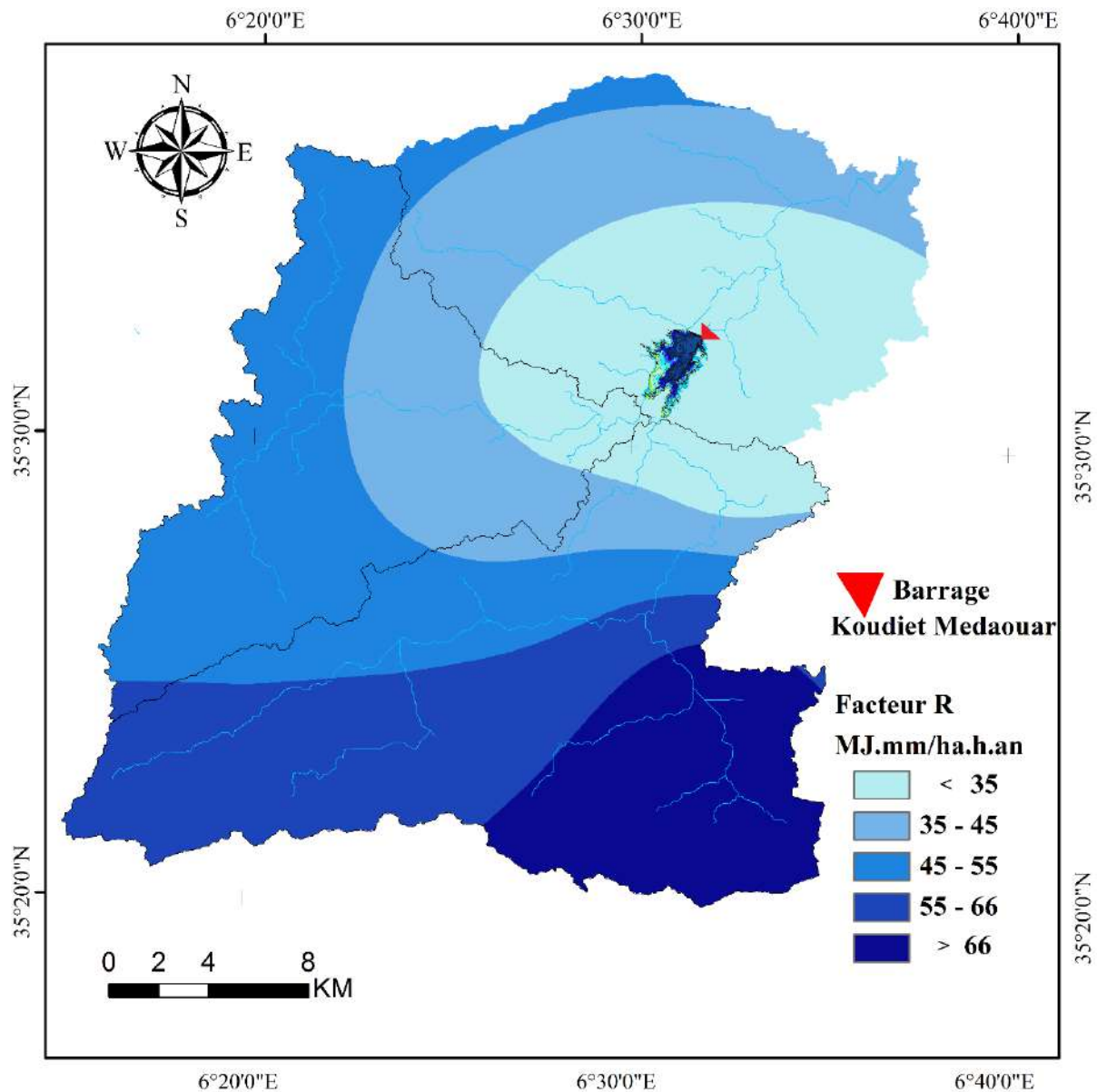


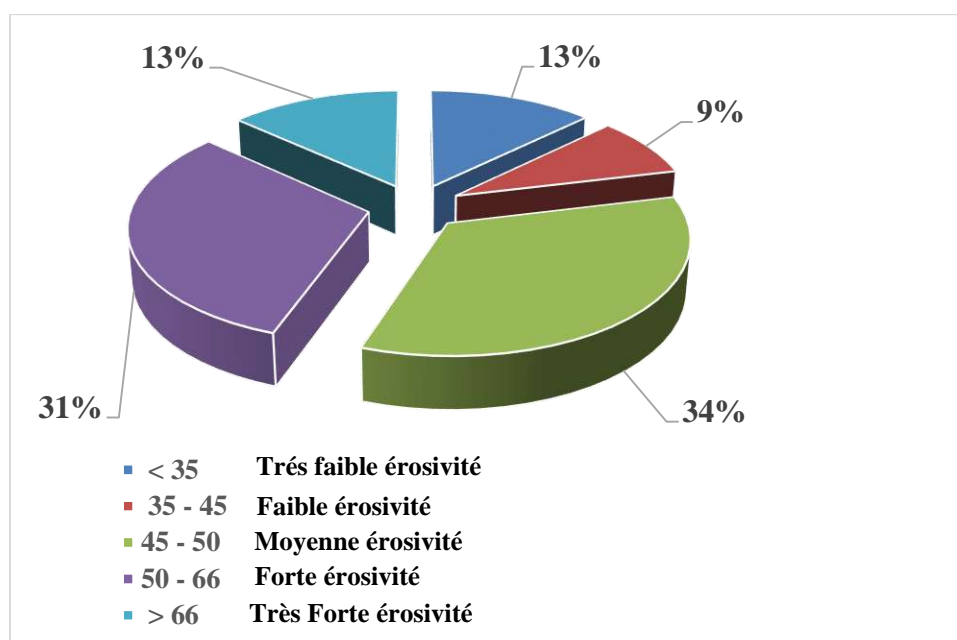
Figure. IV.2 : Carte du facteur d'érosivité de pluie R, calculée d'après la formule de Rango et Arnoldus (1987) (Source : Auteur, 2017).

D'après le Tableau. IV.1, qui donne les mesures de la quantité annuelle totale et d'après la Figure. IV.2, qui montre la répartition spatiale des pluies érosives aux stations, le bassin de l'Oued Chemorah est soumis à une agressivité pluviale. Ainsi, les valeurs de R subissent un gradient croissant de l'aval vers l'amont du bassin avec une augmentation légère du N-W vers le S-E, ce qui implique que le sous bassin de l'Oued Reboa est soumis à une agressivité plus importante correspondant à une classe de R supérieure et qui varie entre 66 à 81.4 MJ.mm/ha.h.an par rapport au sous bassin de l'Oued Soultez qui présente des valeurs de R variants entre 55 à 66 MJ.mm/ha.h.an. Ces Valeurs de R varient entre 25 MJ.mm/ha.h.an et

81.41 MJ.mm/ha.h.an avec une moyenne établie à 55.94 MJ.mm/ha.h.an. Les valeurs de R les plus faibles présentées par la classe 25 à 35 MJ.mm/ha.h.an qui localisent 70% de la plaine du bassin de l'Oued Chemorah vers l'exutoire, alors que les valeurs les plus fortes plus que 66 MJ.mm/ha.h.an se focalisent dans les zones des plus hautes montagnes du bassin. Ces résultats nous permettent de conclure que notre bassin est généralement soumis à un pouvoir érosif important.

Tableau. IV.2 : Distribution des valeurs du facteur R dans le Sbv. de l'Oued Reboa-Sbv. de l'Oued Soultez (Source : Auteur, 2017).

Facteur R (MJ.mm/ha.h.an)	< 35	35 - 45	45 - 50	50 - 66	> 66
Surface Km ²	96,5	64	257,5	236,5	100,5
Surface/bassin %	12,8	8,5	34,1	31,3	13,3



IV.3.2 Détermination du facteur K :

L'érodabilité d'un sol se traduit par la résistance inhérente au détachement des particules du sol par l'eau. Les paramètres comme la stabilité structurale et sa texture contribuent à influencer la sensibilité des sols à l'érosion (Roose et Sarrailh, 1990). Le facteur K est en fonction de la texture, la teneur du sol en matière organique, et la perméabilité du sol. Les images satellitaires utilisées au cours de cette étude ont été téléchargées gratuitement à partir du site : <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?currTab=simple&id=14116> du FAO.

Le choix des images téléchargées a été fait rigoureusement. Toute image téléchargée est accompagnée d'un fichier « DSMW » offrant toutes les informations possibles sur chaque couche sous forme d'un shepfile, Excel donnant : la période de prise de vue, ces coordonnées géographiques, le système de projection, la qualité de l'image et les autres informations de calibration.

IV.3.2.1 Facteur d'érodabilité K de Williams : il est donné par l'équation ci-dessous :

$$K = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand}$$

Avec :

f_{csand} : facteur qui abaisse l'indicateur K dans les sols à forte teneur en sable grossier et plus élevé pour les sols peu sableux

f_{cl-si} : facteur d'érodabilité du sol faibles pour les sols avec rapports argile-silt élevés

f_{orgc} : valeurs de K dans les sols avec teneur élevée en carbone organique

f_{hisand} : valeurs K pour les sols à très haute teneur en sable.

Avec :

$$f_{csand} = \left[0.2 + 0.3 \cdot \exp \left[-0.256 \cdot ms \cdot \left[1 - \frac{msilt}{100} \right] \right] \right]$$

$$f_{cl-si} = \left[\frac{msilt}{mc + msilt} \right]$$

$$f_{orgc} = \left[1 - \frac{0.25 \cdot COrg}{COrg + \exp[3.72 - 2.95 \cdot COrg]} \right]$$

$$f_{hisand} = \left[1 - \frac{0.7 \cdot \left[1 - \frac{msilt}{100} \right]}{\left[1 - \frac{msilt}{100} \right] + \exp \left[-5.51 + 22.9 \cdot \left[1 - \frac{ms}{100} \right] \right]} \right]$$

Avec :

ms : la teneur en fraction de sable (0,05-2,00 mm de diamètre) [%].

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

mc : la teneur en fraction d'argile (<0,002 mm de diamètre) [%].

Corg: la teneur en carbone organique (CO) [%].

A partir de ces formules, nous avons obtenu les résultats représentés sur le tableau ci-dessous.

Tableau. IV.3 : Distribution des valeurs du facteur K dans le Sbv. de l'Oued Reboa- Sbv. de l'Oued Soultez (Source : Auteur, 2017).

Symbole de l'unité de sol	Formation A(ZO)	Formation B(XH)	Formation C(BK)
sable% couche arable	43,2	54,8	81,6
limon% couche arable	24,6	20,6	6,8
argile% couche arable	32,4	24,9	11,7
carbone organique% couche arable	0,4	0,53	0,44
F_{csand}	0,330	0,298	0,243
F_{cl-si}	0,777	0,788	0,741
F_{orgc}	0,992	0,986	0,991
F_{hisand}	1,000	1,000	1,000
K	0,255	0,232	0,178
K_{usle}	0,0336	0,0305	0,0235
Sensibilité du Sol	Très peu érodable	peu érodable	Moyennement érodable

Pour simplifier la lecture des résultats et leur représentation graphique, nous avons regroupé les valeurs rapprochées de K dans 3 classes différentes réparties selon un gradient d'érodibilité croissant. Ensuite grâce au SIG, nous avons pu avoir la répartition spatiale de ces classes qui se présente dans la figure ci-dessus :

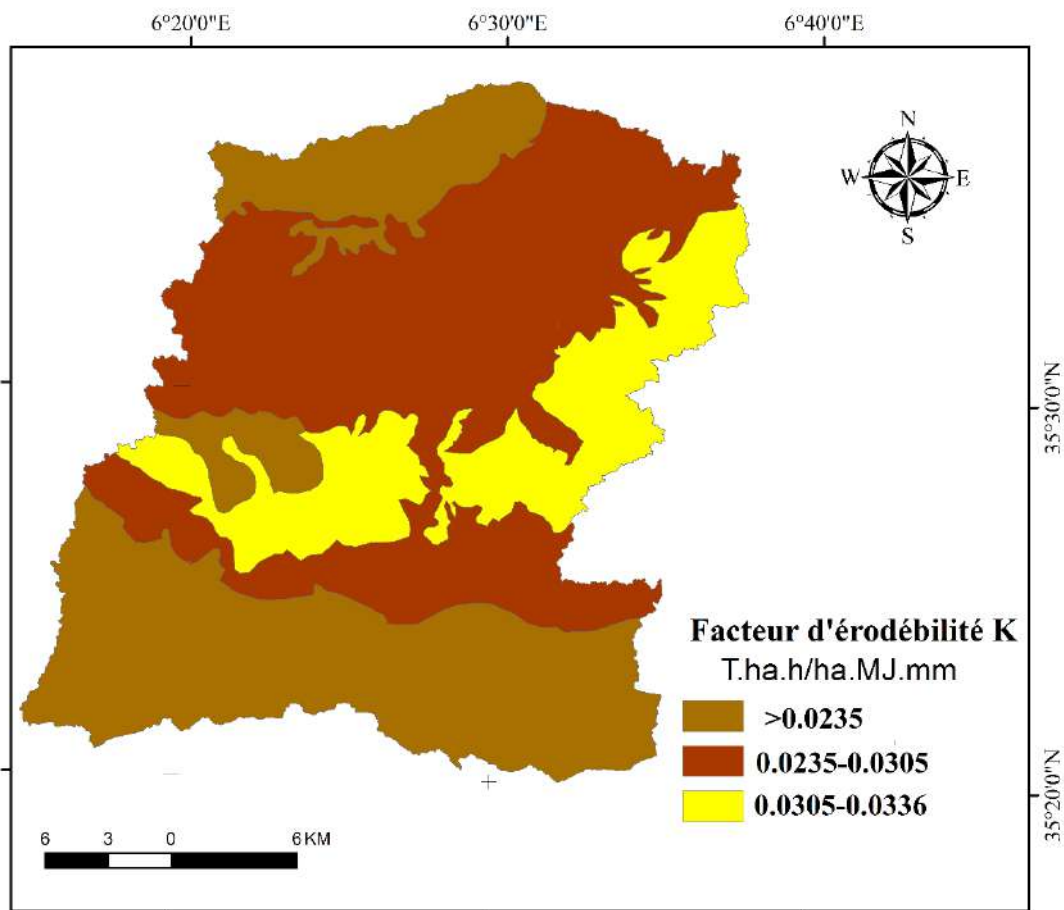
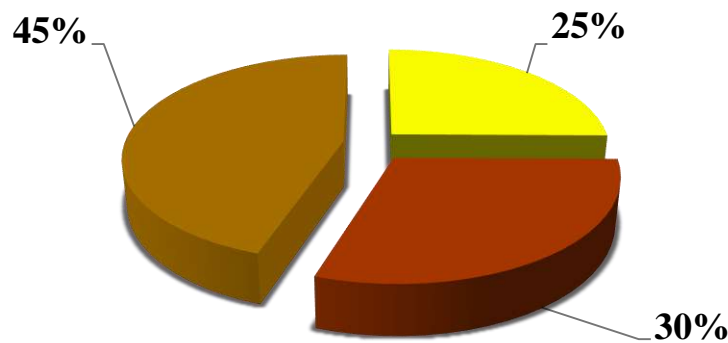


Figure. IV.3: Distribution des valeurs du facteur K (Source : Auteur, 2017).

La valeur moyenne du facteur d'érodabilité K atteint 0,029 t. h ha/ MJ. ha.mm sur l'ensemble du bassin versant de l'Oued Chemorah. Les régions accusant une très faible érodabilité ($K < 0,05$ t h ha/MJ ha.mm) sont localisées principalement à l'amont du bassin versant. Ces régions sont caractérisées par une lithologie imperméable. Les valeurs maximales d'érodabilité K atteint 0.034 t h ha /MJ. ha.mm localisent le centre du bassin exactement, ils sont localisées dans les régions du Nord-Ouest du sous bassin de l'Oued Reboa Et Sud-Est du sous bassin de l'Oued Soultez (Figure.IV.3).

Tableau. IV.4 : Distribution des classes du facteur K dans le Sbv. de l'Oued Reboa-Sbv. de l'Oued Soultez (Source : Auteur, 2017).

Facteur K	<0,024	0,024-0,031	0,031-0,034
Surface km ²	220	196	339
%Surface/bassin	29	26	45



■ <0,024	Très peu érodable
■ 0,024-0,031	Peut érodable
■ 0,031-0,034	Moyennement

IV.3.3 Facteur Topographique LS :

IV.3.3.1 Carte des pentes :

La carte des pentes a été élaborée grâce au SIG ARCGIS à partir d'un modèle numérique de terrain MNT de 30 m. Nous avons obtenu une carte de pentes, carte dans laquelle nous avons regroupé les pentes en quatre classes. L'estimation des composantes de l'effet de la topographie dans l'érosion de sol établi par la RUSLE: le facteur longueur de la pente (L) et le facteur gradient (S). Ci-après, les équations du calcul en ARCGIS 10.1.

IV.3.4.2 Carte des longueurs de pentes (Facteur L) :

La longueur de la pente est définie comme la distance horizontale d'où provient le flux superficiel jusqu'au point où le dépôt commence ou où l'écoulement s'écoule vers un canal défini (Foster et al. 1977, cité par BARRIOS et QUINONEZ, 2000).

$$L = (\lambda/22.13)^m \quad m = F / (1 + F) \quad F = \frac{\sin\beta / 0,0896}{3(\sin\beta)^{0,8} + 0,56}$$

Avec:

λ : est la pente en (m) ;

m : exposant de la longueur de la pente

β : est l'angle de la pente.

Le facteur L avec la zone de drainage contributive par Desmet et Govers, (1996) cité par VELASQUEZ (2008) :

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \cdot D^{m+2} \cdot (22.13)^m}$$

Avec :

A_(i,j) : accumulation de flux au niveau du pixel (cellule)

D : c'est la taille du pixel

x : coefficient de forme (x=1 pour système de pixel)

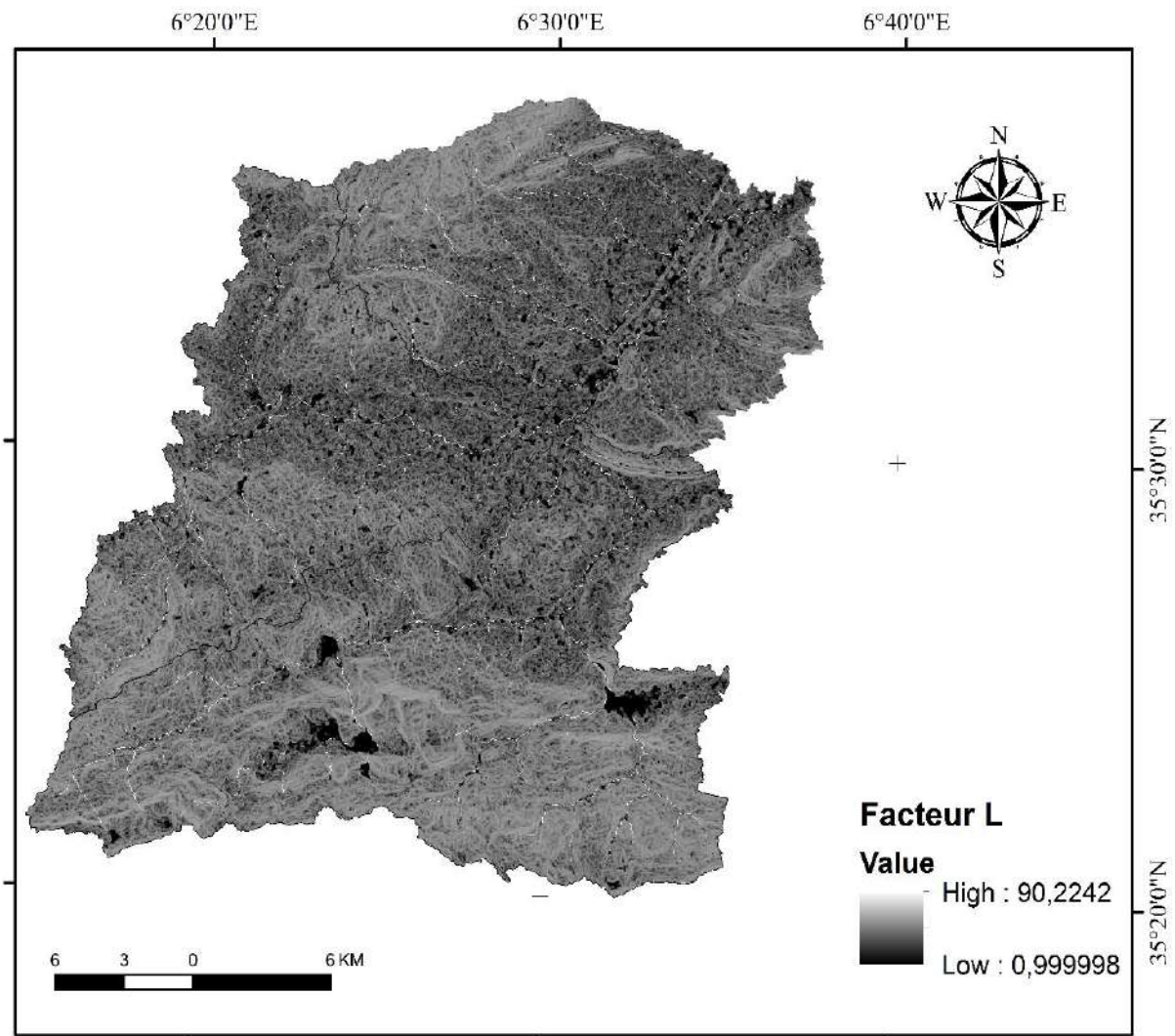


Figure. IV.4 : Distribution des valeurs du facteur L (Source : Auteur, 2017).

IV.3.3.3 Détermination du facteur topographique (facteur S) :

Par le biais du module overlay du SIG ARCGIS, nous avons superposé les deux cartes en appliquant la formule de Wischmeier et Smith (1978) :

Donnée par :

$$S(i,j) = \begin{cases} 10,8 \cdot \sin\beta_{(i,j)} + 0,03 & \text{Tan}\beta_{(i,j)} < 0,09 \\ 16,8 \cdot \sin\beta_{(i,j)} - 0,5 & \text{Tan}\beta_{(i,j)} \geq 0,09 \end{cases}$$

$S = \text{Con} (\text{Tan} ("slope" * 0.01745) < 0.09, (10.8 * \text{Sin} ("slope" * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \text{Sin} ("slope" * 0.01745) - 0.5)).$

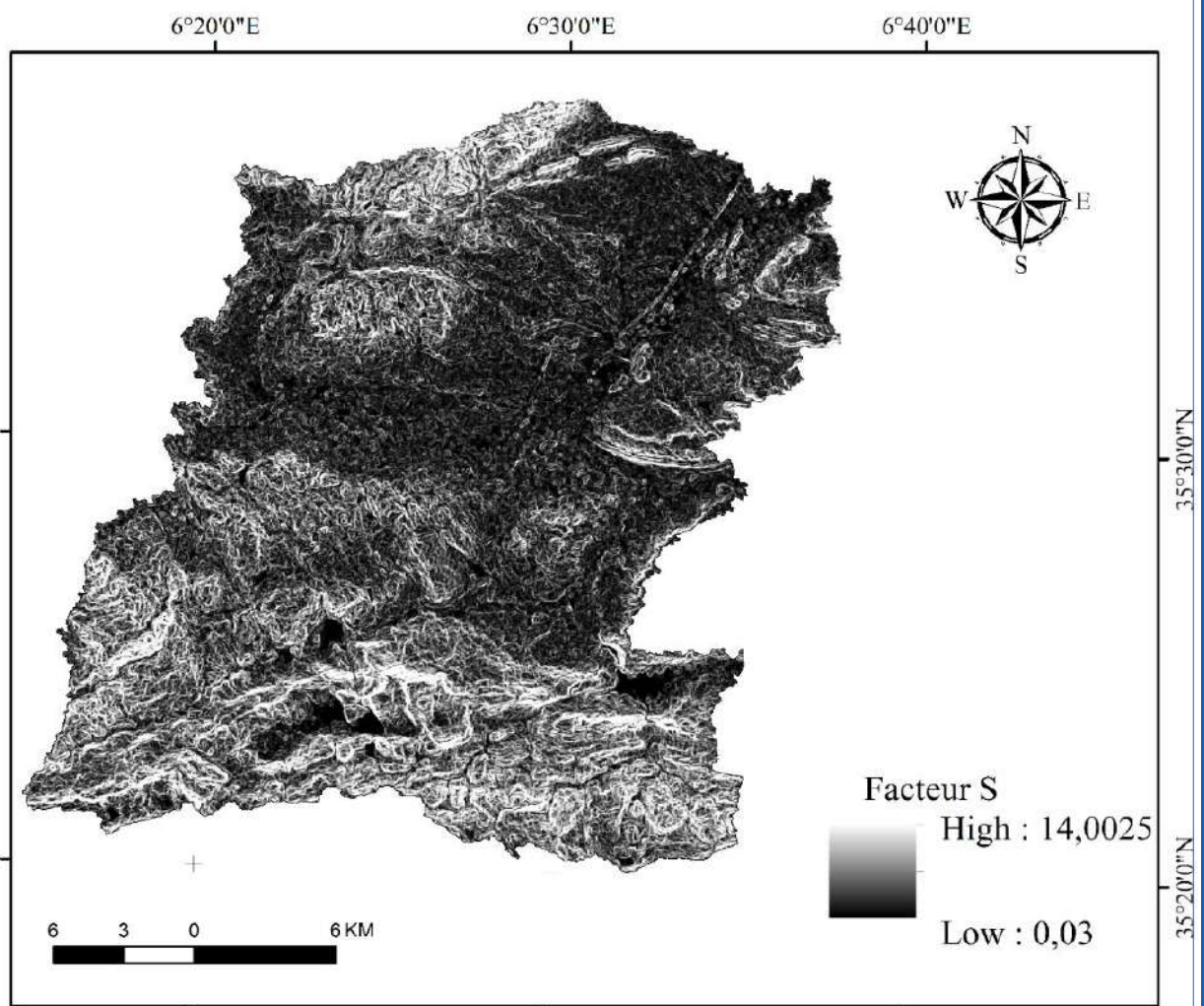


Figure. IV.5 : Distribution des valeurs du facteur S (Source : Auteur, 2017)

En dernier lieu, est obtenu le facteur LS à travers la multiplication du facteur L et S, sa distribution spatiale dans la figure ci-dessus :

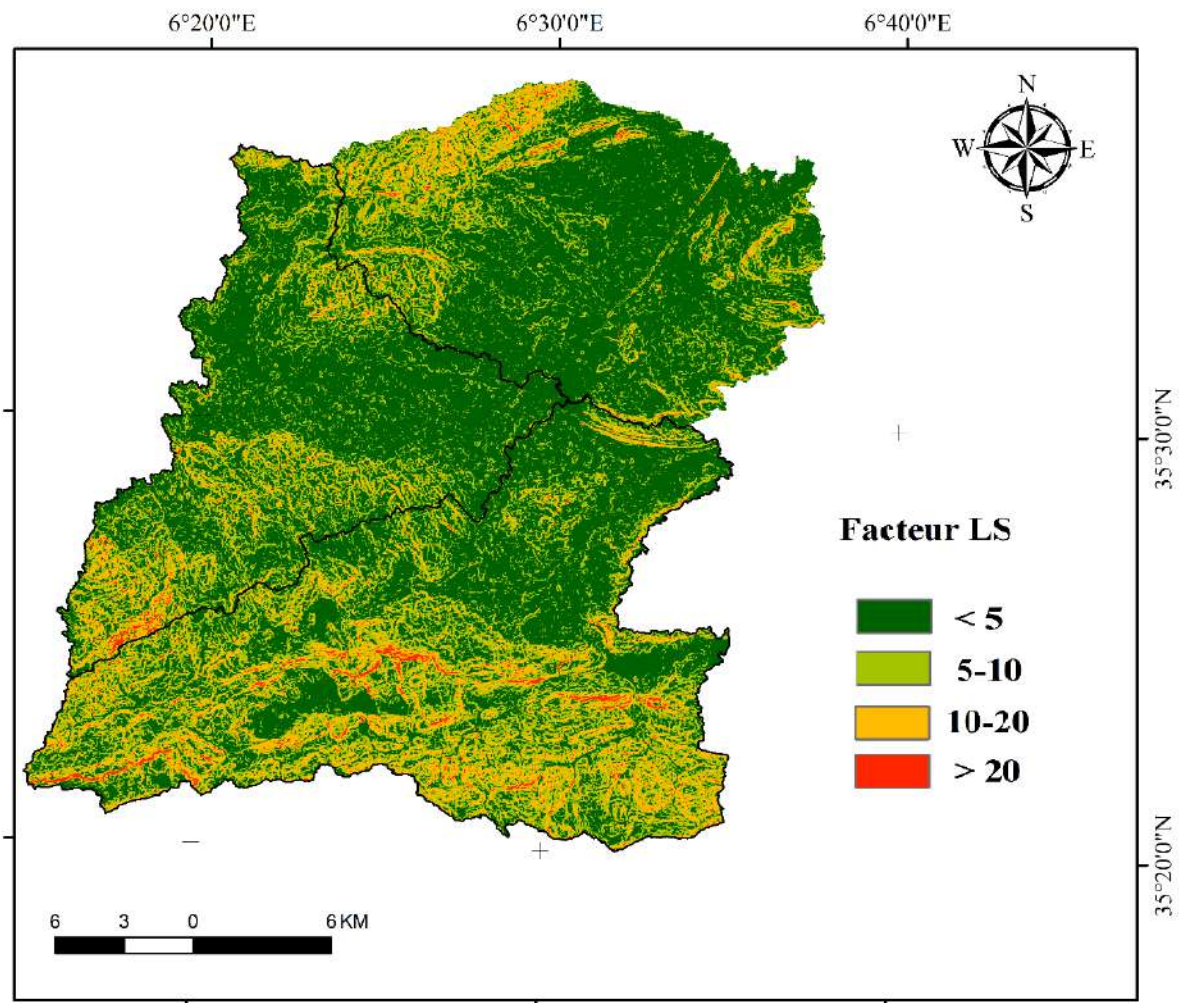
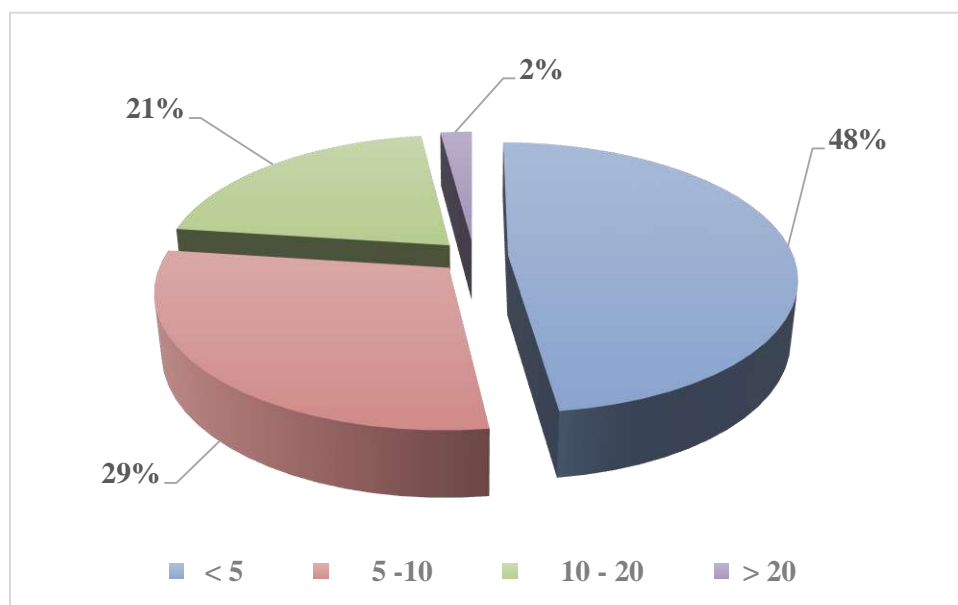


Figure. IV.6 : Distribution des valeurs du facteur LS (Source : Auteur, 2017).

La (Figure. IV.6) qui représente les valeurs obtenues pour le facteur LS, nous montre quatre classes de valeurs. Elles ont été définies pour la cartographie de ce facteur à l'échelle du bassin de l'Oued Chemorah. Nous remarquons que, la longueur L (figure. IV.4) et l'inclinaison de pente S (figure. IV.5) influencent d'une manière significative le processus de l'érosion. La classe des valeurs (0-5) domine avec une valeur, considérée faible, de l'ordre de 46 % de la superficie du bassin dans les zones naturellement attribuées à la plaine au lit du cours d'eau. Par conséquent, les 22% de la surface du bassin sont soumis à un grand risque d'érosion et qui se trouvent dans le Nord, et le Sud – Ouest du bassin versant avec des classe >10 %.

Tableau. IV.5 : Distribution des valeurs du facteur LS dans le Sbv. de l'Oued Reboa-Sbv. de l'Oued Soultez (Source : Auteur, 2017).

Facteur LS	< 5	5-10	10-20	>20
Surface Km ²	350	215	153	18
% Surface/bassin	46	28	20	2



IV.3.4 Facteur du couvert végétal et de l'occupation des sols C :

L'occupation des terres et la végétation sont en rapport avec d'autres facteurs tels que: la Topographie, la géologie, le climat et les caractéristiques hydrologiques. Pour élaborer la carte du couvert végétal. Nous avons, dans un premier temps, téléchargé une image satellitaire du site USGS et nous l'avons insérer dans un logiciel adapté en ARCGIS10.1. L'occupation du sol présentée dans les images satellitaires, est en rapport direct avec les endroits éloignés (White, 1986). L'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Chemorah et ses sous bassins ont été analysées en se basant sur l'interprétation d'images satellites Landsat-8 du 06.04. 2014.

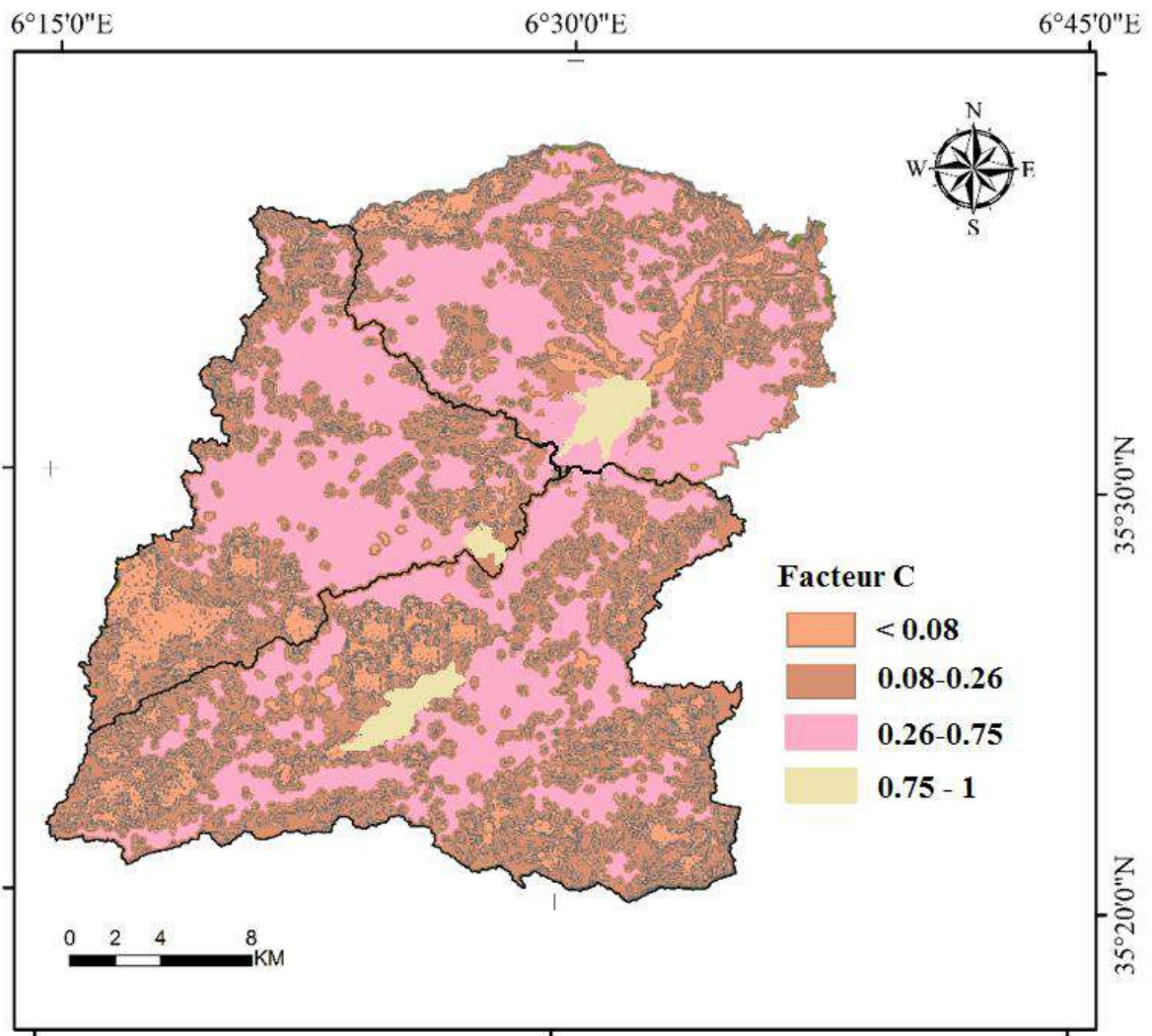


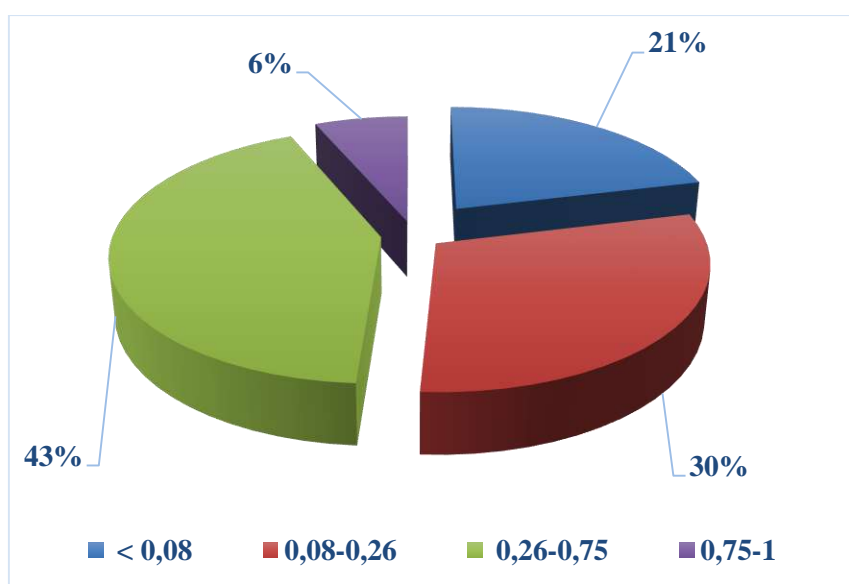
Figure. IV. 7 : Distribution des classes du facteur C (Source : Auteur, 2017).

La carte d'occupation des sols obtenue a été intégrée au système d'information géographique par digitalisation dans la base de données qui lui a été affectée. On a introduit les valeurs du facteur C sous forme image raster correspondant à chaque utilisation du sol que nous avons déterminé à partir des tableaux de Wischmeier et Smith (1978) et de Cormary et Masson(1963).Le tableau. IV.6 et la Figure. IV.7 donnent la distribution du couvert végétal et des valeurs du facteur C dans le bassin versant de l'Oued Chemorah et ses sous-bassins de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez.

Tableau. IV.6 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant

(Source : Auteur, 2017).

Facteur C	< 0,08	0,08 - 0,26	0,26 - 0,75	0,75 - 1
Surface Km ²	160	225	321	49
%Surface/bassin	21	30	43	6



IV.3.5 Facteur des pratiques antiérosives P :

Dans tous les bassins versant concernées par notre étude, il n'y a pas d'aménagements antiérosifs, et les agriculteurs n'utilisent pas de pratiques culturales antiérosives. Les cultures sont surtout des culture labourées et céréales parallèles aux courbes de niveaux. Il y a quelques essais de réhabilitation des forêts par des reboisements d'arbres de façon aléatoires. Pour toutes ces raisons, nous avons attribué la valeur $P = 1$ dans les bassins versants de l'Oued Chemorah et ses sous bassins.

IV.4 Evaluation des pertes en sol :

L'évaluation des pertes en terre, par érosion hydrique a été obtenue par la multiplication des couches avec la résolution présentée par les paramètres de RUSLE avec des cartes thématiques réalisées par la formule empirique de Wischmeier et Smith (RUSLE) avec leurs bases de données à l'aide du ARCGIS 10.1 et l'application de l'équation universelle (Figure.

IV.8) qui indique la perte du sol de chaque pixel et fournit son degré de risque érosif présenter sur chaque bassin étudié.

IV.4.1 Bassin de l'Oued Chemorah :

Les différentes unités ont été regroupées en classes adaptée comme suit :

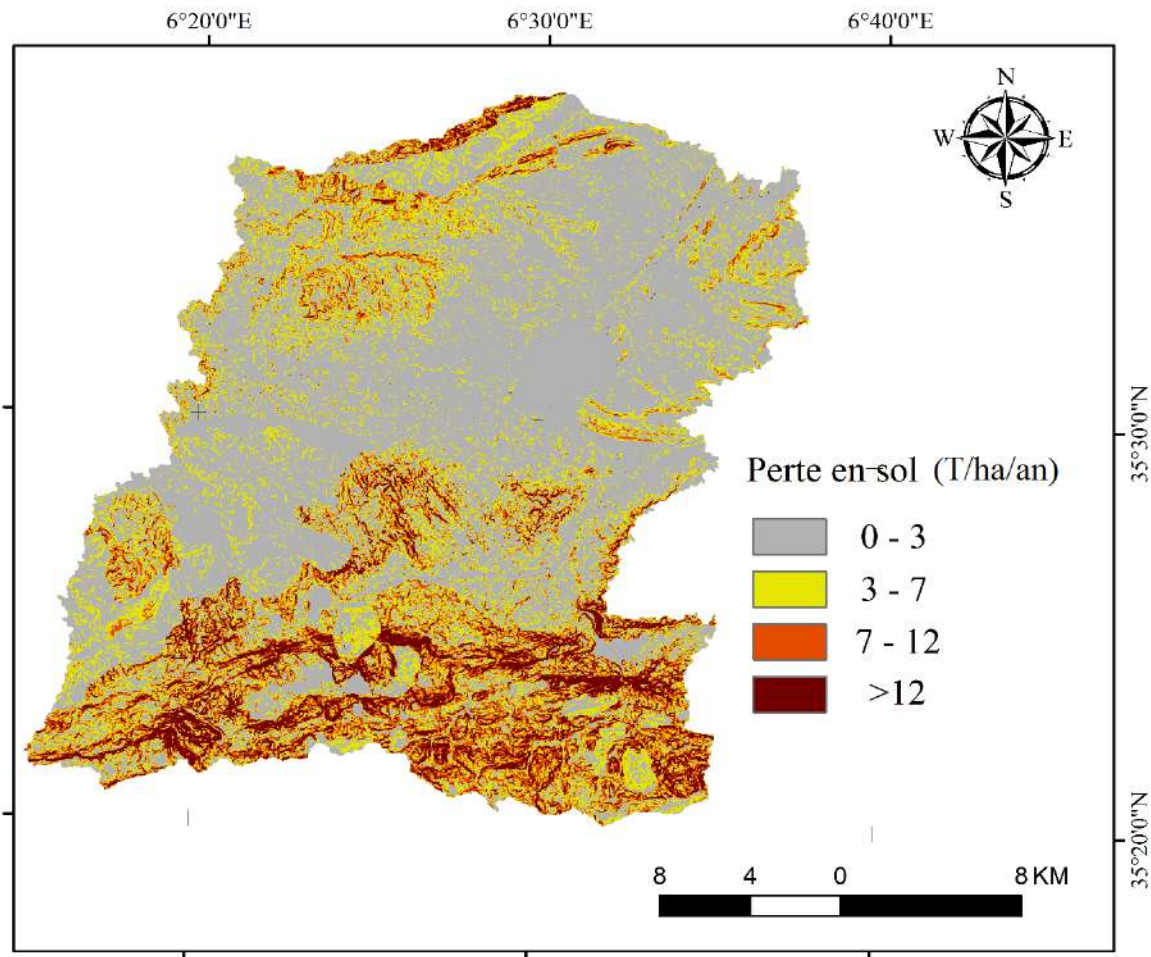


Figure. IV.8 : Carte des pertes en sols du bassin versant de l'Oued Chemorah.

(Source : Auteur, 2017).

Elle suppose qu'en moyenne, les sols peuvent tolérer des pertes allant jusqu'à 3 t/ha/an tout en permettant un niveau élevé de production agricole. Au-delà de 7 t/ha/an, la perte est forte et les sols sont dégradés ce qui peut nuire à la production. Les valeurs faibles du risque érosif occupent presque la moitié du bassin de 46% de sa superficie (Figure. IV.8), ces régions sont quasiment plates alors que les valeurs fortes à très forte sensibilité se localisent dans la région Sud dans les haute reliefs et aussi dans la région Ouest du territoire, à cause de la forte

inclinasion de ces régions mais aussi aux fortes valeurs du facteur d'érosivité R malgré l'existence d'une végétation (foret denses et dégradé) dans la plus part de ces régions avec un facteur protecteur (Figure. IV.7). La perte moyenne par érosion hydrique en nappes pour l'ensemble du bassin versant est d'environ 4.43 T/ha/an. Les pertes maximales et minimales par unité sont respectivement de 227.25 T/ha/an et de 0.003 T/ha/an. Les pertes totales annuelles du bassin sont de 15525 T/an.

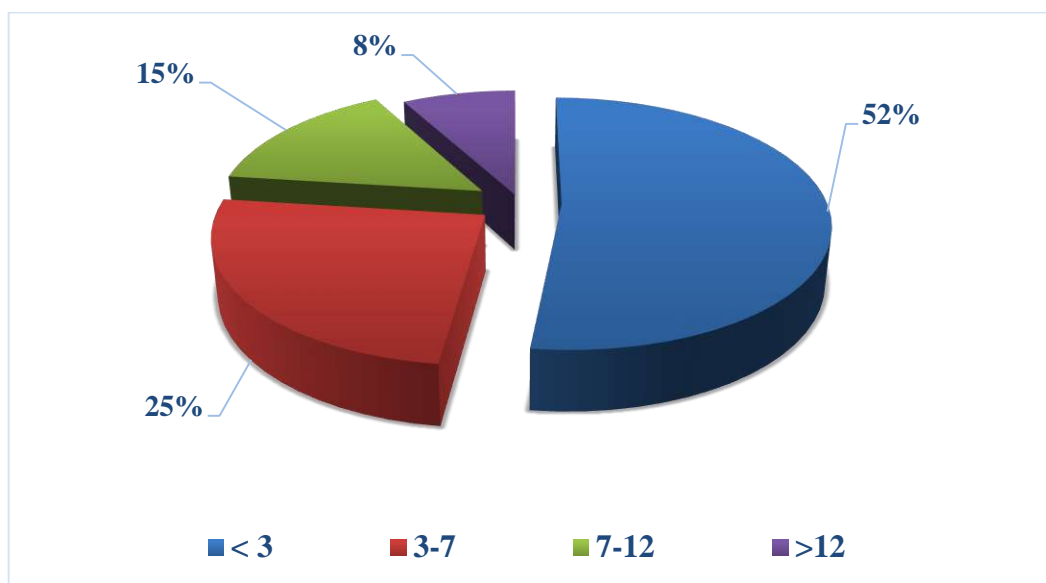


Figure. IV.9 : Distribution des valeurs des classes de perte en sol de l'Oued Chemorah. (Source : Auteur, 2017).

Tableau. IV.7 : Répartition des classes en perte en sol du BV de l'Oued chemorah et ces sous bassins (Source : Auteur, 2017).

Risque d'érosion T/ha/an	< 3	3-7	7-12	>12
Surface km ²	392.6	188.75	113.25	60.4
%Surface/bassin	52	25	15	8

Les résultats obtenus, sous format cartographique, permettent une analyse à plus grande échelle, en vue de trouver les solutions appropriées pour lutter contre l'érosion et protéger le milieu naturel.

IV.4.1.1 Analyse statistique de différents facteurs :

Les différentes couches thématiques élaborées sont superposées dans le SIG (ARCGIS10.1). Ce dernier permet de faire une analyse spatiale de chaque couche présentée dans le tableau suivant :

Tableau. IV.8 : Valeur minimale et maximale de chaque facteur ainsi que leur moyenne (Source : Auteur, 2017).

Couches	Min	Max	Moyenne
Facteur R	25	81,64	48,14
Facteur K	0,0235	0,0336	0,029
Facteur LS	0,03	328,55	5,18
Facteur C	0,05	0,99	0,61
Facteur P	1	1	1
Risque érosif	0,0014	191,71	4,43

D'après le Tableau. IV.7, on constate que la corrélation est très forte entre le risque érosif et les facteurs R, K, C, LS et P.

IV.4.2 Bassin de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez :

Les différentes unités ont été regroupées en classes dans chaque sous bassins adaptée comme suit :

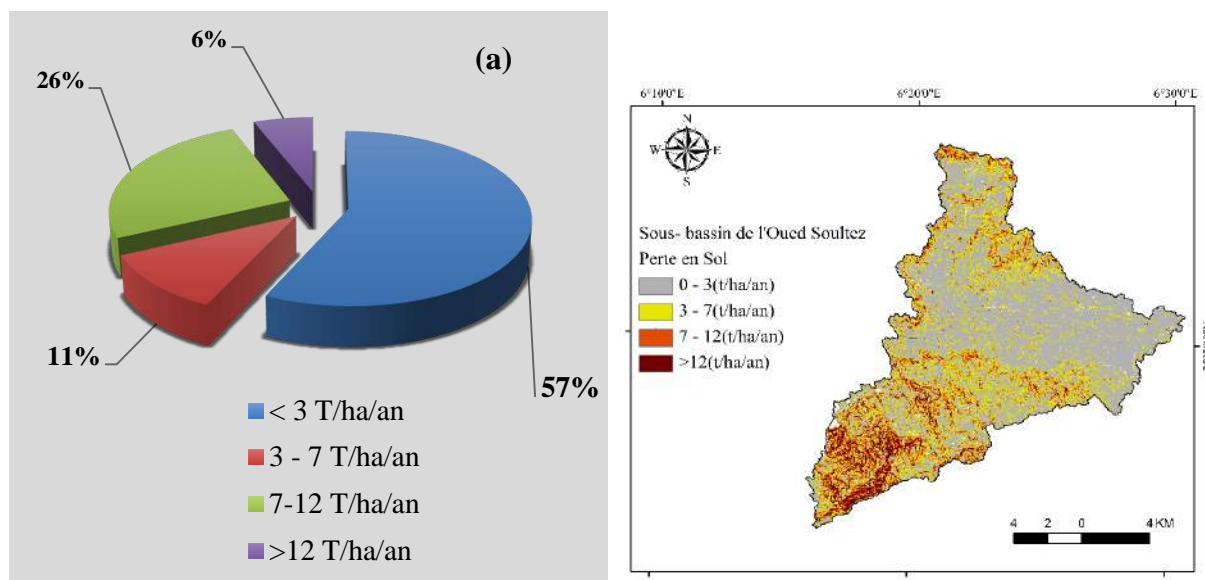


Figure. IV.10 : Répartitions des pertes en sols des sous-bassins versants de l'Oued Soultez (Source : Auteur, 2017).

Tableau. IV.9 : Répartition des classes en perte en sol du BV de l'Oued Soultez
(Source : Auteur, 2017).

Risque d'érosion T/ha/an	< 3	3-7	7-12	>12
Surface km ²	118	22.76	53.82	12.42
%Surface/bassin	57	11	26	6

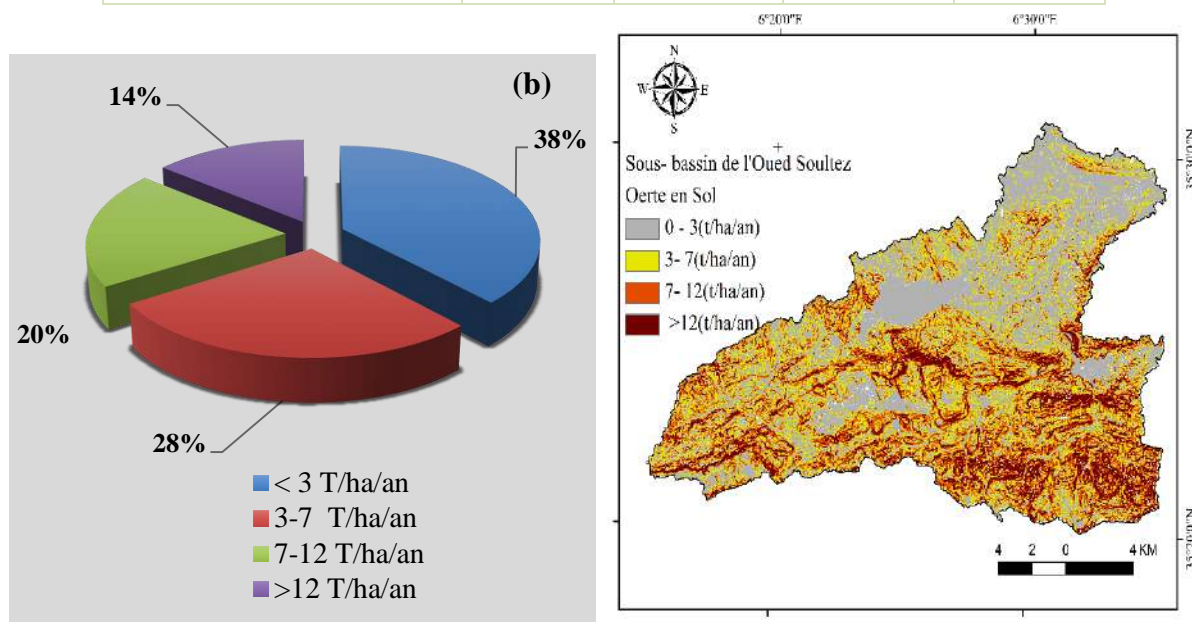


Figure. IV.11 : Répartitions des pertes en sols des sous-bassins versants de l'Oued Reboa. (Source : Auteur, 2017).

Tableau. IV.10 : Répartition des classes en perte en sol du BV de l'Oued Reboa
(Source : Auteur, 2017).

Risque d'érosion T/ha/an	< 3	3-7	7-12	>12
Surface km ²	124.64	91.84	65.6	45.92
Surface/bassin%	38	28	20	14

IV.5 Risque d'érosion :

La valeur moyenne de chaque facteur est aussi estimée par sous bassin, les figures (IV.10 et IV.11) montrent le risque d'érosion actuel par sous bassin. La carte a été réalisée en calculant, pour chaque sous bassin la moyenne de l'érosion prédite et la moyenne des facteurs R, K, C et LS est déterminée (Tableau. IV.8). D'après les cartes présentées le sous bassin, de l'Oued Reboa présente de très fortes valeurs de perte en sol et qui sont localisés dans le Sud et Sud-est exactement dans les hauts reliefs par rapport au sous bassin de l'Oued Soultez de faible à moyen valeur.

Les faibles valeurs s'enregistrent dans le Nord et au centre de chaque bassin en amont du barrage de Koudiet-Medaour qui présente les zones de faibles pentes < 10 %. Ces valeurs de perte en sol sont dominantes dans le sous bassin de l'Oued Soultez avec un taux de 57% de la superficie totale.

Tableau. IV.11 : Valeurs moyenne du risque érosif et des facteurs R, K, LS et C par sous bassin versant (Source : Auteur, 2017).

SBV	Valeurs	Facteur R	Facteur K	Facteur LS	Facteur C	Facteur P	E _{moy} Erosion moyen (T/ha/an)
Oued Reboa	Min	25	0,0235	0,03	0,05	1	0,0014
	Max	81,62	0,0336	185,44	0,99	1	94,05
	Moy	58,75	0,029	6,29	0,61	1	3,78
Oued Soultez	Min	27,75	0,0235	0,03	0,05	1	0.002
	Max	56,23	0,0336	83,75	0,99	1	191.71
	Moy	46,63	0,029	4,46	0,62	1	6,06

IV.5.1 Comparaison entre le taux de la sédimentation mesuré et calculé:

La comparaison entre le taux de la sédimentation annuelle obtenu par la relation des deux modèles utilisés dans notre étude pour estimer et quantifier la perte en sol, à savoir :

Le model de régression $C = f(QI)$ de Jansson, 1997.

Le model de wischmier RUSLE de Wischmeier et Smith ,1978.

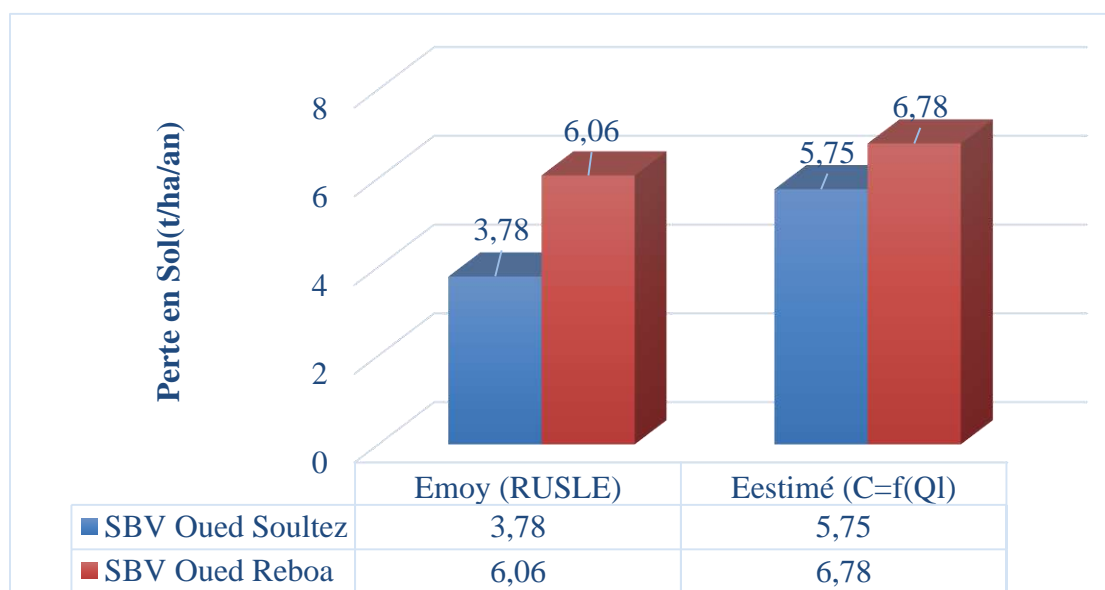


Figure. IV.12 : Représentation des valeurs du taux de sédimentation calculé par le model de regression $C=f(QI)$ et le model RUSLE. (Source : Auteur, 2017)

La Figure. IV.12, montre une approche très approximative des valeurs, jugée satisfaisante. Elle présente une ligature des résultats et traduit un fort impact du ruissellement dans le processus de l'érosion du bassin versant de l'Oued Chemorah et ses sous bassins.

IV.6 Description des zones sensibles à l'érosion :

La réalisation des cartes, nous a permis de ressortir les zones sensibles de chaque facteur et surtout la sensibilité du phénomène du risque érosif. Pour chaque facteur topographique : nous avons distingué quatre classes de sensibilité à l'érosion (Figure. IV.13).

1. Classe des pentes à sensibilité faible: Pentés de 0 à 5%,
2. Classe des pentes à sensibilité moyenne: Pentés de 5 à 10%,
3. Classe des pentes à Forte sensibilité: Pentés supérieurs à 10 à 20%.
4. Classe des pentes à très Forte sensibilité: Pentés supérieurs à 20%.

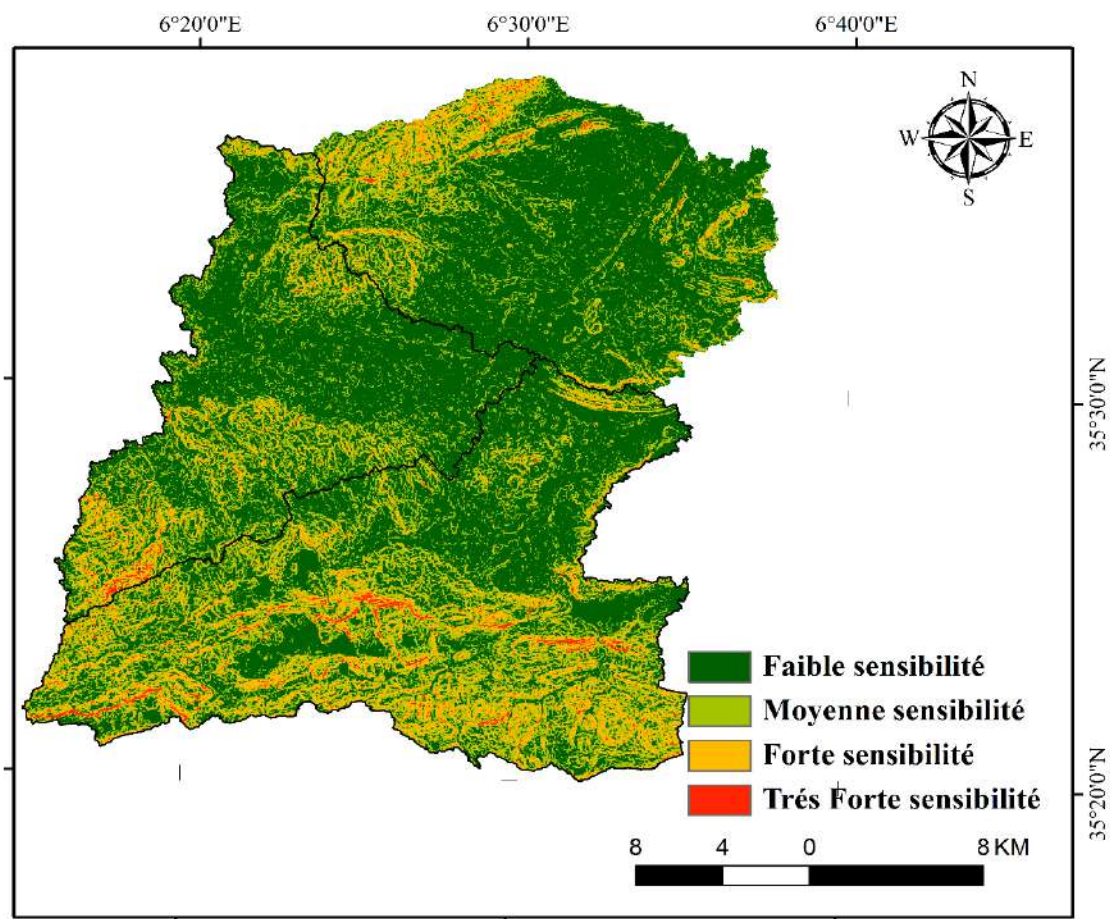


Figure. IV.13 : Répartitions des classes de la sensibilité à l'érosion en fonction de la topographie du bassin de l'Oued Chemorah et ses sous bassins. (Source : Auteur, 2017).

Pour le facteur des formations pédologique existant sur le bassin de l'Oued Chemorah et ses sous-bassins, nous avons déduit trois classes de sensibilité à l'érosion (Figure. IV.14).

1. Classes à sensibilité très faible et donc très peu érodable (Sols calcimagnésiques rendzine et sols bruns).
2. Classes à sensibilité faible et donc peu érodable (Sols minéraux peu évolués, sols calcimagnétiques avec des croûtes calcaires)
3. Classes à sensibilité moyenne (sols peu développés du type lithosols et régosols)

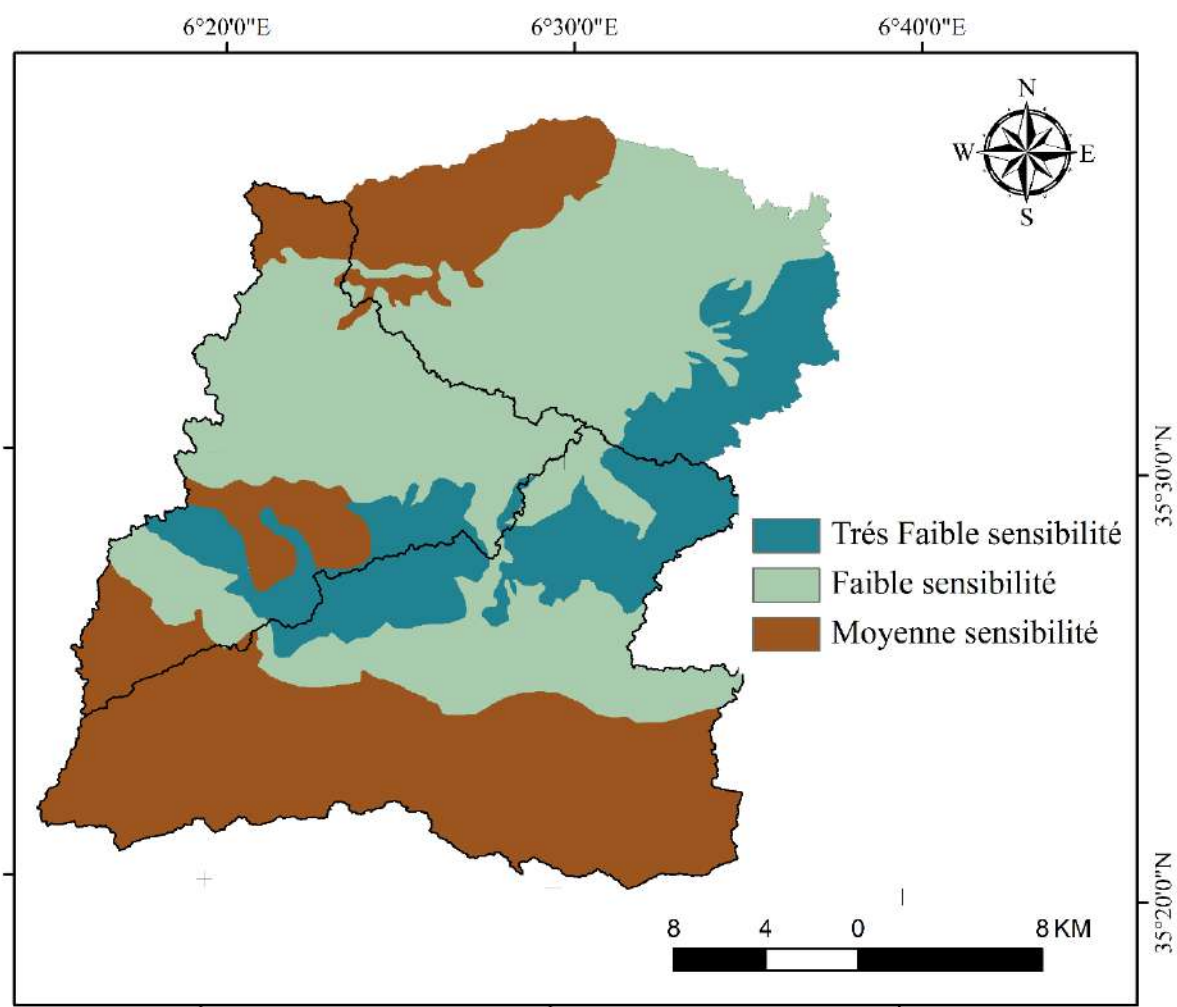


Figure. IV.14 : Répartitions des classes de sensibilité à l'érosion en fonction de la Pédologie du bassin de l'Oued Chemorah et ses sous bassins (Source : Auteur, 2017).

Pour la carte de l'occupation du sol, les classes de sensibilité retenues sont les suivantes :

1. Classes à très Faible sensibilité et qui présentent les zones d'agglomérations
2. Classes à Faible sensibilité et qui englobe les forêts denses;
3. Classes à Moyenne sensibilité qui représentent les forêts dégradés ;
4. Classes à Forte sensibilité et qui sont les zones de cultures, c'est l'ensemble de la couverture végétale qui est traité sur la carte de l'occupation du sol et qui est précédemment analysée (Figure. IV.15).

L'ensemble de la couverture végétale est traité sur la carte de l'occupation du sol, précédemment analysée (Figure. I.7).

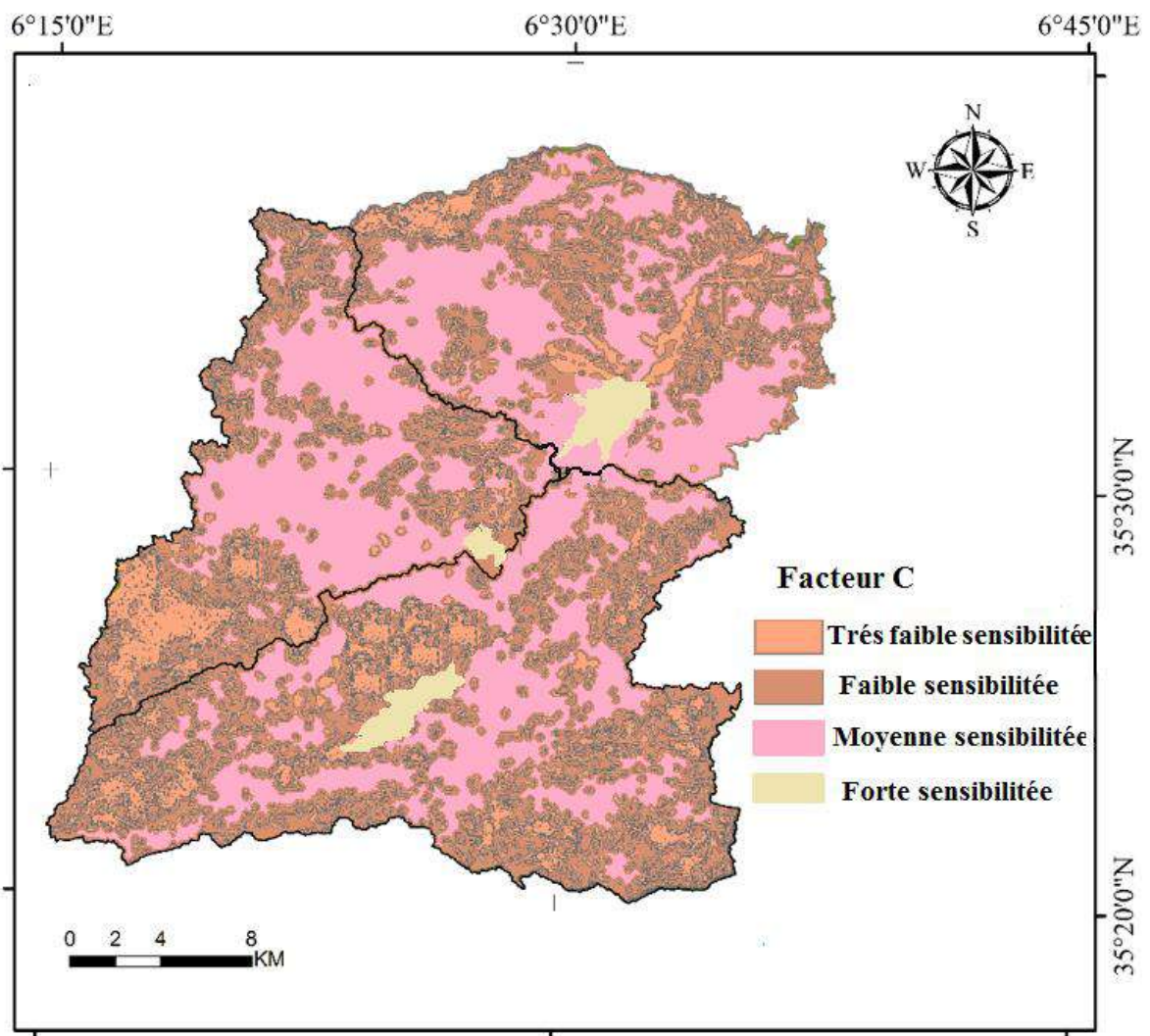


Figure. IV.15 : Répartitions des classes de la sensibilité à l'érosion en fonction de l'occupation du sol du bassin de l'Oued Chemorah et ces sous bassins (Source : Auteur, 2017).

Pour la carte érosive (Figure. IV.16): les classes de sensibilité retenues sont les suivantes :

1. Classes à très faible sensibilité : c'est l'ensemble des zones de culture qui englobe les plaines >275mm.
2. Classes à faible sensibilité : présente l'épandage du bassin qui localise le centre du bassin 275mm-345mm;
3. Classes à moyenne sensibilité : présente les versant du bassin de l'Oued chemorah où les forêts dégradées sont dominantes 345mm-450mm ;
4. Classes à forte sensibilité : les zones de hauts reliefs de forêts denses à dégradées <450mm.

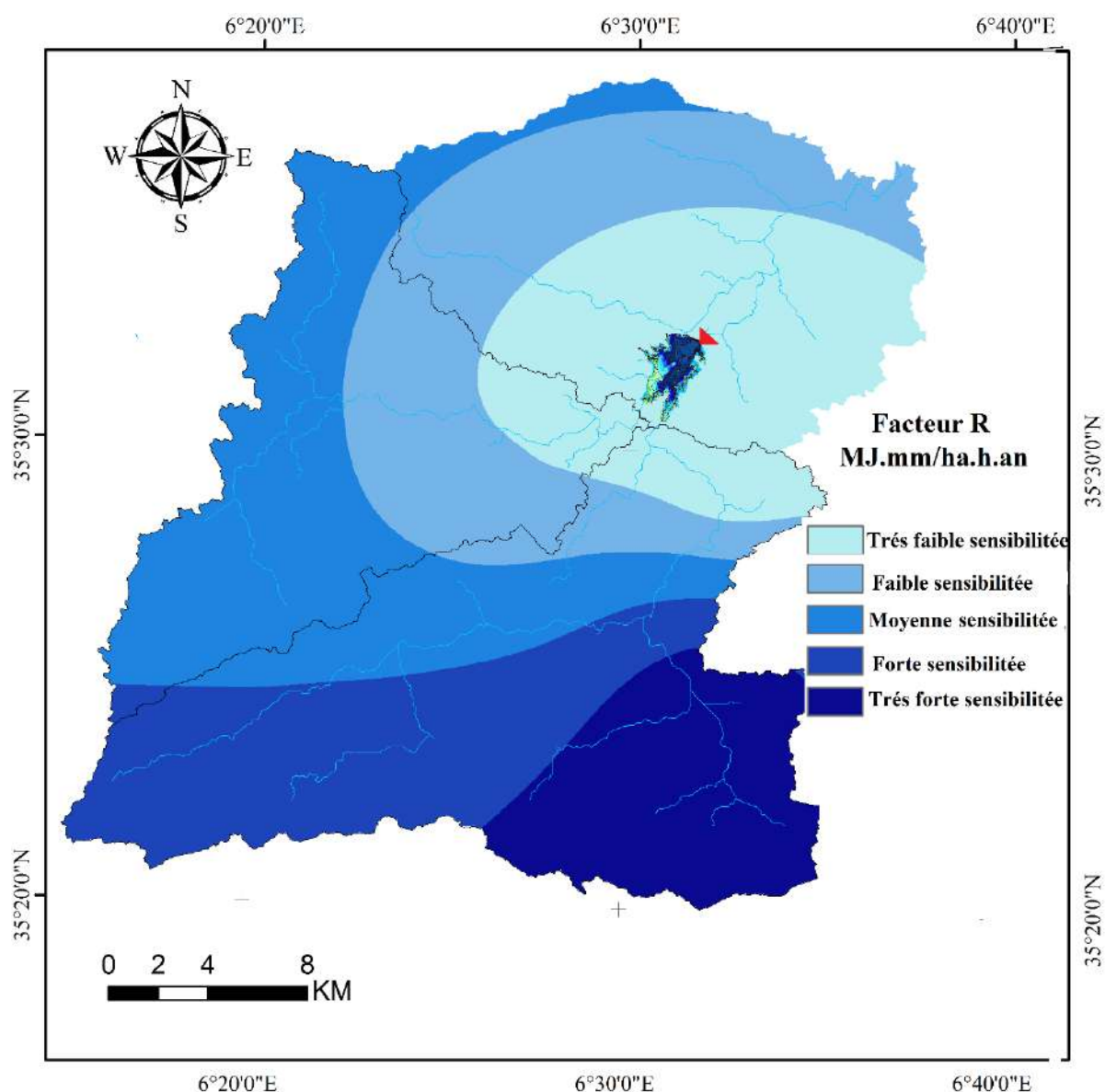


Figure. IV.16 : Répartitions des classes de la sensibilité à l'érosion en fonction de la pluviométrie du bassin de l'Oued Chemorah et ces sous bassins. (Source : Auteur, 2017).

nous avons procédé à une organisation logique de la série des valeurs des indices de la carte du croisement final suivant trois classes homogènes, chacune de ces classes représente un degré de sensibilité choisit en fonction de la moyenne de la série des indices du croisement final représenté comme suit:

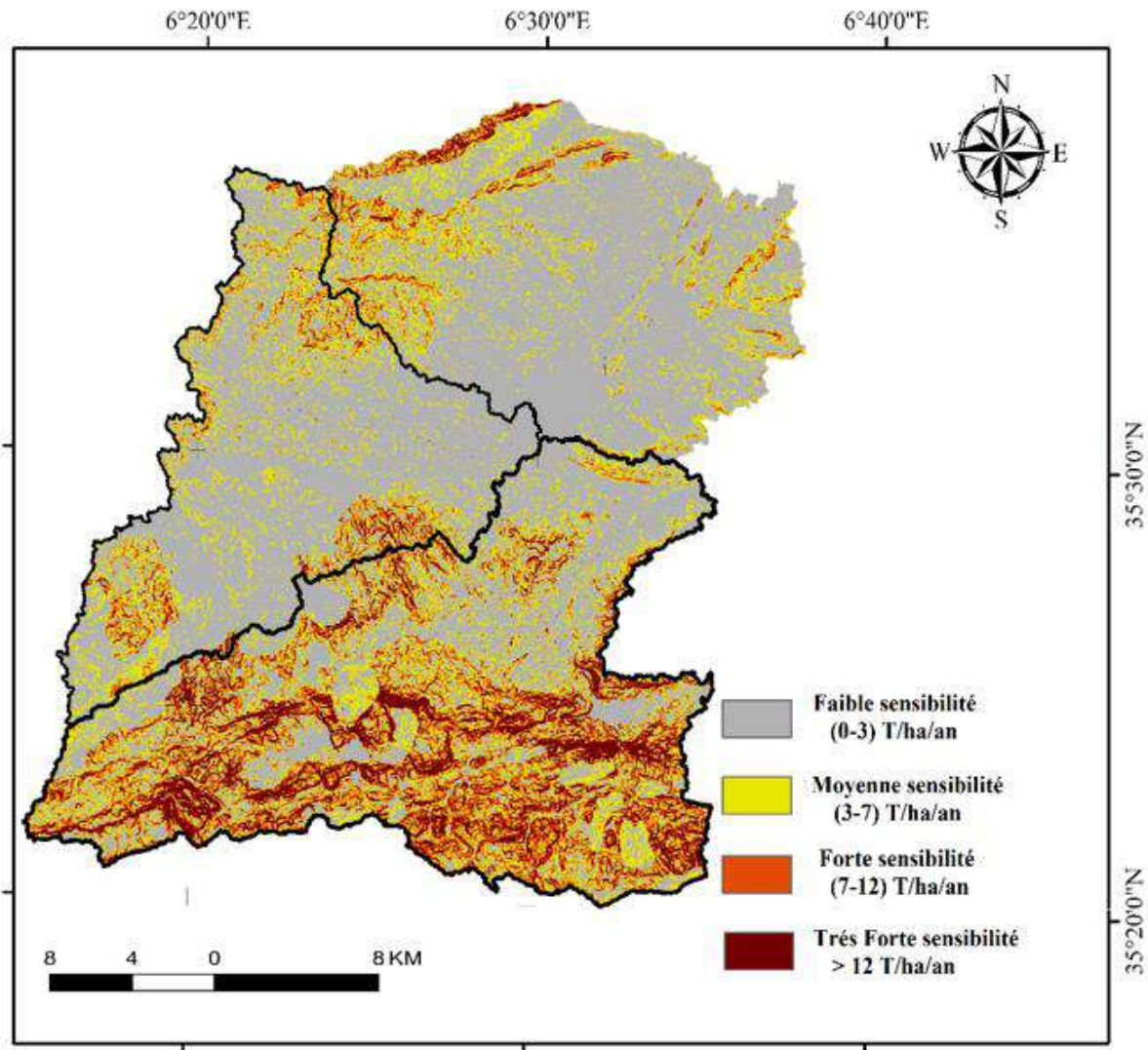


Figure. IV.17 : Répartitions des classes de la sensibilité à l'érosion du bassin de l'Oued Chemorah et ces sous bassins. (Source : Auteur, 2017).

IV.6.1 Zones à grande a très grande sensibilité à l'érosion :

Les zones à grande sensibilité à l'érosion s'étalent dans les hauts reliefs du massif de Mahmel et les Aurès au Sud-Est des versants du sous bassin de l'Oued Reboa et peut développés au Sud du sous bassin de l'Oued Soutlez. Du point de vue exposition, ce sont des zones affectées

par l'agressivité des pluies importante (Figure. IV.17) qui permettent une dynamique appréciable qui affecte et modifie la topologie de leurs surfaces. Cette dynamique peut être rapide, isolée dans le temps et dans l'espace, ou fréquente et Généralisée. Ces milieux représentent les zones d'apport en sédiments de différente Granulométrie. Le développement de la couverture végétale est gêné par la dynamique de ces milieux. Les unités pédologique appartenant à ces milieux sont essentiellement constituées de très faible sensibilité et se trouvent sur des moyenne à forte pentes généralement supérieur à 10 % on y trouve cette constitution pédologique en général dans les forêts dense ou les maquis clairsemés qui favorisent la dynamique érosive.

IV.6.2 Zones à sensibilité moyenne :

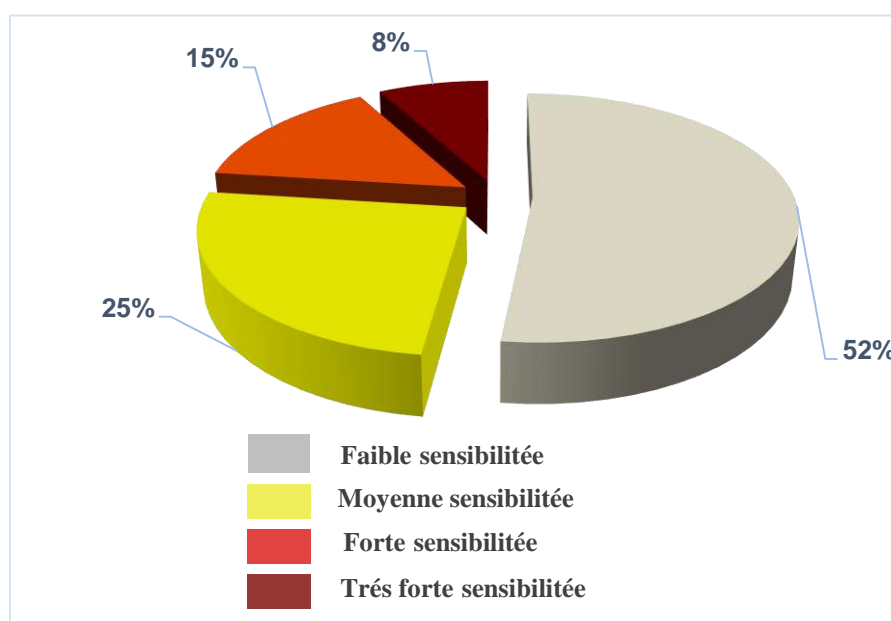
Ces zones intermédiaires entre les milieux à sensibilité réduite et les milieux à grande sensibilité (Figure. IV.17) sont peu développées dans la totalité du bassin versant de l'Oued chemorah. Ces milieux se caractérisent par milieu argileux et gréseux supportant en majorité des zones cultivées avec des pentes qui varient de 10 à 20 %.

IV.6.3 Zones à sensibilité réduite :

Les zones à sensibilité réduite situées principalement dans la plaine au centre du bassin versant de l'Oued Chemorah, En revanche, elle occupe une portion importante dans le sous bassin de l'Oued Soultez par comparaison au sous bassin de l'Oued Reboa. Ces milieux se caractérisent par des sols des interférences de la pédogénèse-morphogénèse de forme. On y trouve une prédominance des formations quaternaires supportant en majorité des zones cultivés dans des pentes inférieur sont de l'ordre de 10%. Elle présente un système morphogéniques comportant peu de processus mécaniques et des formes du modelé évoluant lentement avec une stabilité assurée soit par biostasie soit par les conditions topographiques. En effet, ces milieux sont exposés à des conditions climatiques et morphométriques qui favorisent le développement de la végétation. On y trouve des cultures installées sur des pentes douces inférieures à 3% et moyennes entre 3 et 10 % (Figure. IV.17).

Tableau. IV.12 : Classement du degré de sensibilisation à l'érosion en fonction de la superficie (Source : Auteur, 2017).

Classe	Faible sensibilité	Moyenne sensibilité	Forte sensibilité	Très Forte sensibilité
Surface Km ²	392.6	188.75	113.25	60.4
Surface %	52	25	15	8



Conclusions du chapitre IV

L'intégration des cartes thématiques des facteurs de l'équation universelle des pertes en sol dans le système d'information géographique ARCGIS nous a permis dans une certaine mesure de répondre à un certain nombre de questions relatives à :

- la classification multicritère des zones d'érosion ;
- la contribution de chaque facteur dans l'explication des pertes en sol ;
- la quantification des pertes en sol qui sont relativement moins importantes que celles mesurées dans les bassins versants du Rif central.

La superposition des cartes de facteurs et le croisement multiple des bases de données nous a permis de démêler partiellement la complexité et l'interdépendance de facteurs tels que le climat, la lithologie, la pente et la couverture végétale dans l'analyse des risques d'érosion. Et on peut donc conclure que pour le bassin versant de l'Oued Chemorah, le degré de la pente, l'érodibilité des sols est à un moindre degré la couverture végétale sont les facteurs prédominant dans le contrôle de l'érosion et que l'interdépendance de ces facteurs entraîne une Erosion très variable dans l'espace.

L'analyse statistique de ces résultats par les méthodes multidimensionnelles amènera certainement plus d'éclaircissement et peut permettre de meilleures interprétations quant à la contribution des principaux facteurs qui contrôlent l'érosion.

L'existence d'une certaine proportion de formations superficielles non apparentées au substrat (colluvions et alluvions récentes et anciennes) mobilisables par l'érosion par la formule de Wischmeier mais qui peuvent aussi être site d'accumulation pour l'érosion actuelle laisse planer des questions quant à leur contribution dans les pertes totales. Une étude de leur répartition spatiale et de leur dimension ainsi que leur érodibilité contribuera certainement à corriger la contribution des différentes formations lithologiques au taux d'érosion trouvé par le modèle empirique.

Chapitre V

**Barrage de Koudiet
Medaour et les
Moyens de lutte anti-érosive**

Introduction :

Depuis longtemps, une grande importance est accordée à la mobilisation de cette ressource dans la région des Aurès, malgré les dures contraintes du milieu et le régime souvent capricieux de l'écoulement, en vue son utilisation pour pallier le déficit hydrique, et le développement d'une agriculture irriguée

Le réservoir du barrage K. Medaour dont les travaux ont été achevés, est le plus important aménagement, qui constitue un aménagement hydraulique moderne dans la région. Son impact attendu sur le développement économique et social. Et les contraintes auquel il est confronté qui sont lies aux conditions naturelles du milieu comme l'envasement de la retenue du barrage, est provoqué par l'homme suite à la réalisation des barrages dans les cours d'eau. En effet, ces ouvrages freinent l'écoulement et accélèrent les dépôts sédimentaires (Remini, 2001).qui présente au fil du temps un Phénomène ou ces barrages sont menacés de disparaître si des dispositions de lutte ne sont pas prises. Et aux actions anthropiques (la pollution).

V.1. Situation géographique de barrage :

Le barrage de Koudiat Medouar est situé sur l'Oued Chemorah à 35 kilomètres du chef-lieu de Batna. Il fait partie du bassin de l'Oued Chemorah, il est situé à environ 7Km au Nord-Est du site historique de Timgad à environ 35 Km Est de la ville de Batna d'une superficie de 590 km², son réservoir présente un exutoire pour les sous bassins de l'Oued Reboa et l'Oued Soultez (Figure V.1). Le Barrage est situé à une longitude de 06°30' 32 61'' E et une latitude de 35° 31' 27 03''N. Il appartient au système complexe de Béni-Haroun. IL a été construit en 1993, et a été mis en service à partir du début de l'année 2001. Depuis, le barrage n'a pas fait l'objet de travaux de confortement.

Ce barrage est destiné à l'alimentation en eau potable (AEP) de Batna, Aris, Khenchela et Barika, à l'alimentation en eau industrielle de Batna et à l'irrigation de la plaine de Chemora, Batna et Taoufana.

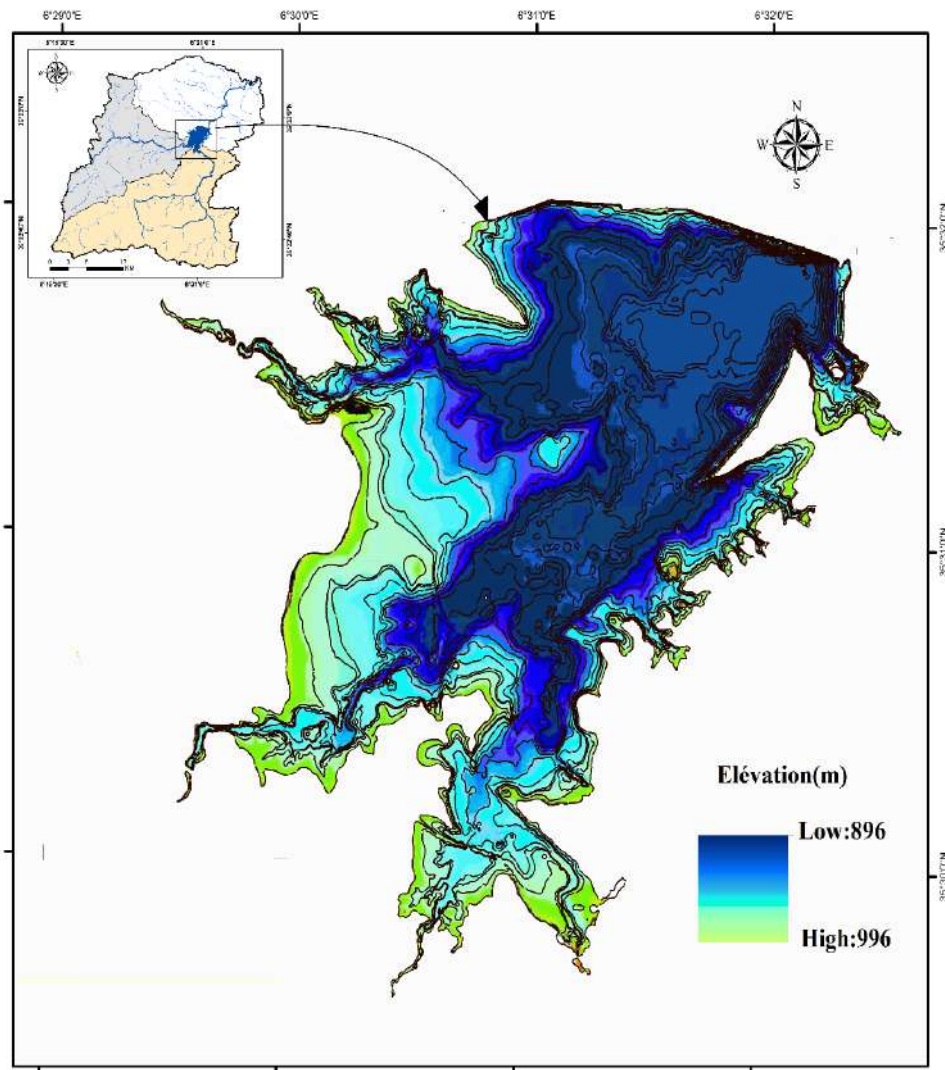
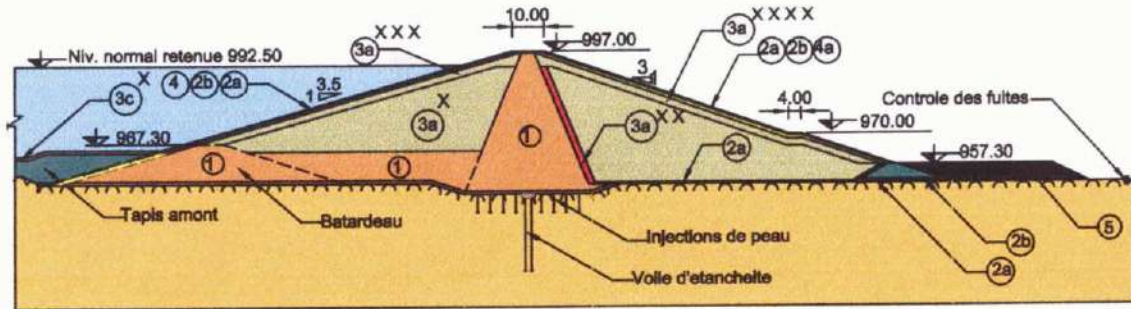


Figure V.1 : Présentation géographique et bathymétrique du barrage Koudiat Medaour.
(Source : ANB, 2005)

V.2. Description du barrage :

Le barrage de Koudiet Medaour est de type Barrage en Poids, sa digue principale est constituée d'un remblai en terre compactée dont l'étanchéité est assurée par un noyau en argile. La digue principale est d'une hauteur maximale de 48 m et d'une longueur d'environ 1,3 km, décrite par la coupe ci-dessous :

BARRAGE PRINCIPAL - COUPE TYPE



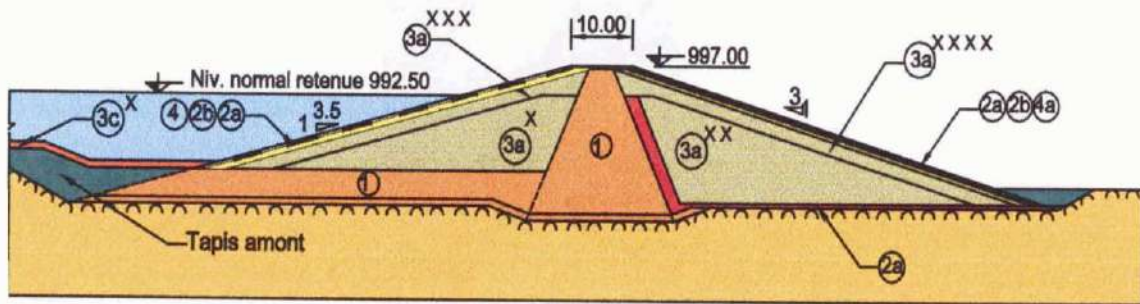
NOMENCLATURE DES MATERIAUX

1	Noyau en argile	3a ^{***}	Remblai en terre (enveloppe de la recharge aval)
2a	Filtre fin	3c [*]	Enrochements (rip-rap amont) - matériaux provenant des excavations utiles
2b	Filtre grossier	4a	Enrochements (protection aval)
3a [*]	Remblai en terre (recharge amont)	5	Enrochements
3a ^{**}	Remblai en terre (recharge aval)		
3a ^{***}	Remblai en terre (enveloppe de la recharge amont)		

FigureV.2 : Représentation de la coupe principale du Barrage de Koudiet Medaour.
(Source : ANB, 2005)

La digue de col située en rive gauche ferme la vallée secondaire de l'Oued Reboa. Elle est constituée d'un remblai en terre compactée dont l'étanchéité est assurée par un noyau en argile, sa hauteur maximale est de 25 m et sa longueur est d'environ 1 km. Elle est décrite par la coupe ci-dessous :

DIGUE DE COL - COUPE TYPE



NOMENCLATURE DES MATERIAUX

1	Noyau en argile	3a ^{xxx}	Remblai en terre (enveloppe de la recharge aval)
2a	Filtre fin	3c ^x	Enrochements (rip-rap amont) - matériau provenant des
2b	Filtre grossier		excavations utiles.
3a ^x	Remblai en terre (recharge amont)	4a	Enrochements (protection aval)
3a ^{xx}	Remblai en terre (recharge aval)	5	Enrochements
3a ^{xxx}	Remblai en terre (enveloppe de la recharge amont)		

Figure V.3 : Représentation de la digue de col du Barrage de Koudiet Medaour.
(Source : ANB, 2005)

L'évacuateur de crue est un seuil situé en rive droite. Ses caractéristiques principales sont telles que :

- Cote de la crête du déversoir : 992,50
- Largeur du seuil déversant : 2,0
- Longueur du déversoir : 14,0 m
- Débit d'évacuation pour la crue décennale : 826 m³/s
- Débit d'évacuation pour la crue millénaire : 520 m³/s

La tour de prise (Figure V.4), située en rive droite à côté de la vidange de fond (Figure V.5) est une construction en béton armé. Ses caractéristiques principales sont telles que :

- Hauteur : 49 m
- Diamètre intérieur : 6,5 m
- Diamètre extérieur : 8,0 m



Figure V.4 : Photo Représentative de la tour de prise du barrage Koudiet Medaour
(Source : ANB, 2005)



Figure V.5 : Photo Représentative de la tour de prise et la vidange de fond du barrage
Koudiet Medaour (Source : ANB, 2005)

Une vidange de fond située à la base de la rive droite, constituée d'une large galerie en béton armé qui traverse le barrage et la chambre des vannes. Les caractéristiques de la vidange de fond sont :

- Longueur totale : 324,50 m
- Longueur de la galerie : 222,00 m
- Dimensions de la galerie :
- Hauteur : 8,80 m
- Largeur : 8,80 m
- Capacité d'évacuation : $2 \times 80 \text{ m}^3/\text{s}$.

V.3. Géologie du site :

D'après les études faites par l'agence nationale du barrage (ANB), les sols de fondations sont assez hétérogènes sur l'ensemble des deux vallées. Les digues sont fondées sur des argilites greso-marneuses, sauf la partie rive droite de la digue principale qui est fondée sur des grès présentés dans la coupe ci-dessus :

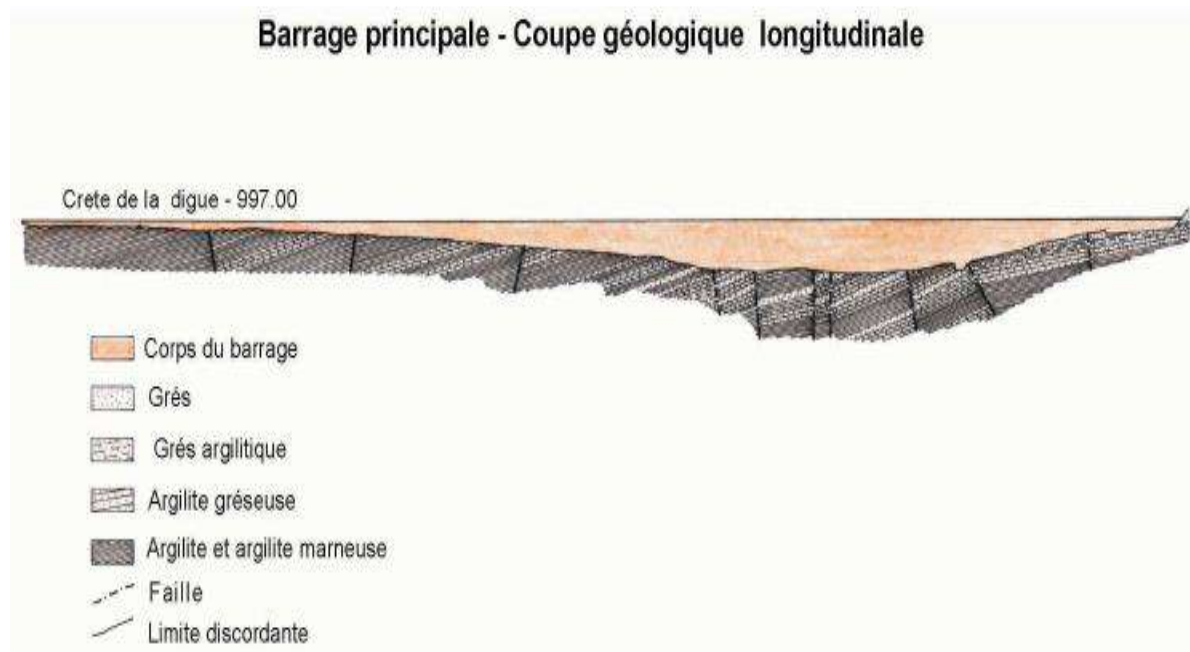


Figure. V.6 : Représentation de la coupe géologique longitudinale du Barrage de Koudiet Medaour. (Source : ANB, 2005)

Les grès de la rive droite sont en majorité des grès fins à ciments calcaires. Ils correspondent à une barre de grès qui a des épaisseurs de 4 à 6 m posée sur des argilites gréseuses. Cette dalle est très fracturée (maille régulière de 0,5 à 3 m). Le barrage dans sa zone centrale et de la rive gauche est fondé sur le substratum de la vallée composé d'argilites marneuses et gréseuses, comptant des barres de grès fins à ciments calcaires et à ciments argilitiques. Les terrains alluvionnaires situés sur ce substratum sont composés de graves et limons très perméables. Il a donc été prévu d'excaver les terrains alluvionnaires et de traiter par injection le substratum. La roche possède certaines zones saines mais garde cependant une fissuration assez intense avec météorisation des roches et circulation des eaux. Certaines fissures présentent des remplissages pelliculaires de gypses. Les terrains de fondation de la digue de col sont représentés par des argilites marneuses de la série marine du miocène et par des argilites gypseuses d'origine lagunaire. Le gypse a la particularité de se dissoudre avec l'eau. Ce phénomène peut conduire à la dégradation du sol et induire des écoulements importants, et accélérer le processus d'érosion. Par ailleurs, la présence de gypses dans l'argilite diminue la résistance au cisaillement du matériau.

V.4. Historique sur le déroulement des travaux du barrage :

La construction du barrage s'est étalée sur une période de 23 ans, (1978 à 2001).

- 1978 : Avant-projet du barrage détaillé (APD) – Hydrotechnic Corporation – New York - Madrid.
- 1994: Expertise de l'avant-projet détaillé (APD) – Bureau d'études ROMELECTRO.
- 1994-2001: Etudes d'exécution - Bureau d'études ROMELECTRO.
- 1993-2002: le barrage a été réalisée par l'entreprise nationale COSIDER, sa réalisation a débuté le 22/03/1993, mais pour les raisons financières, les travaux ont été arrêtés pendant 3ans puis relancés en septembre 1996.
- En juillet 2004-Mai 2005 : levés bathymétriques et topographique du barrage Koudiat Medaour. -Entreprises HYDRODRAGAGE-C.T.SYSTEMS.

Cette opération a permis d'actualiser la capacité de stockage de la retenue et la surveillance de l'envasement ainsi que la délimitation de la retenue à la cote de plus haute eaux exceptionnelles (PHE). Les caractéristiques techniques du barrage sont résumées ci-dessus :

V.5. Caractéristiques technique du Barrage :

Année de construction	1993
Année de Mise en eau	2001
Capacité	69,0 hm ³
Capacité dernier levé (2004)	74,32 hm ³
Apport moyen annuel	30,0 hm ³
Surface du bassin versant	590 km ²
Hauteur	48 m
Longueur	1280,0 m
Côte retenue Normale (R.N)	992,50 m
Surface du réservoir(RN)	703,0 ha
Volume du réservoir(RN)	74,324 Hm ³
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	996,65 m
Surface du réservoir(PHE)	925,6 ha
Volume du réservoir(PHE)	108,479 Hm ³
Déversoir à seuil libre	867 m ³ /s
Vidange de Fond	2 x 10 ² m ³ /s
Volume de Terrassement	2,8x10 ⁶ m ³
Volume de béton	80 000 m ³
Injection	38 800ml

V.6. Les impacts et la contrainte attendue sur le barrage de Koudiet Medaour :

Le barrage dès sa mise en eau est confronté à plusieurs contraintes liées aux conditions naturelles du site comme la pollution de l'eau du barrage et le phénomène érosif. Les dépôts solides sont constitués d'une part des matériaux grossiers charriés sur les fonds du lit et qui s'accumulent en amont de la retenue, et d'autre part les éléments fins transportés en suspension et qui se déposent par décantation près de la digue. L'estimation du volume envasement du barrage se fait comme suivant :

V.6.1. basé sur la mesure du taux de remplissage de la retenue :

L'envasement c'est le processus qui présente la durée de vie du barrage, compté de la date de sa mise en eau et la période où la sédimentation est tellement avancée que le barrage ne sert plus les objectifs prévus. Les dépôts solides sont constitués d'une part des matériaux grossiers charriés sur les fonds du lit et qui s'accumulent en amont de la retenue, et d'autre part l'élément fins transportés en suspension et qui se déposent par décantation près de la digue. La mesure des apports solide effectuées au niveau de la retenue du barrage, qui se fait à partir des levés topographiques effectués en 1993 par COSIDER et une bathymétrie réalisée au 29 avril-mai 2005 par l'Agence Nationale des Barrages et des Transferts (ANBT) qui a confié au groupement d'Entreprises HYDRODRAGAGE-C.T.SYSTEMS, sur le barrage de Koudiet Medaour, ainsi l'estimation de l'envasement de pour la retenue du barrage basées sur les mesures effectuées par (ANB), sont données dans (Figure V.7).

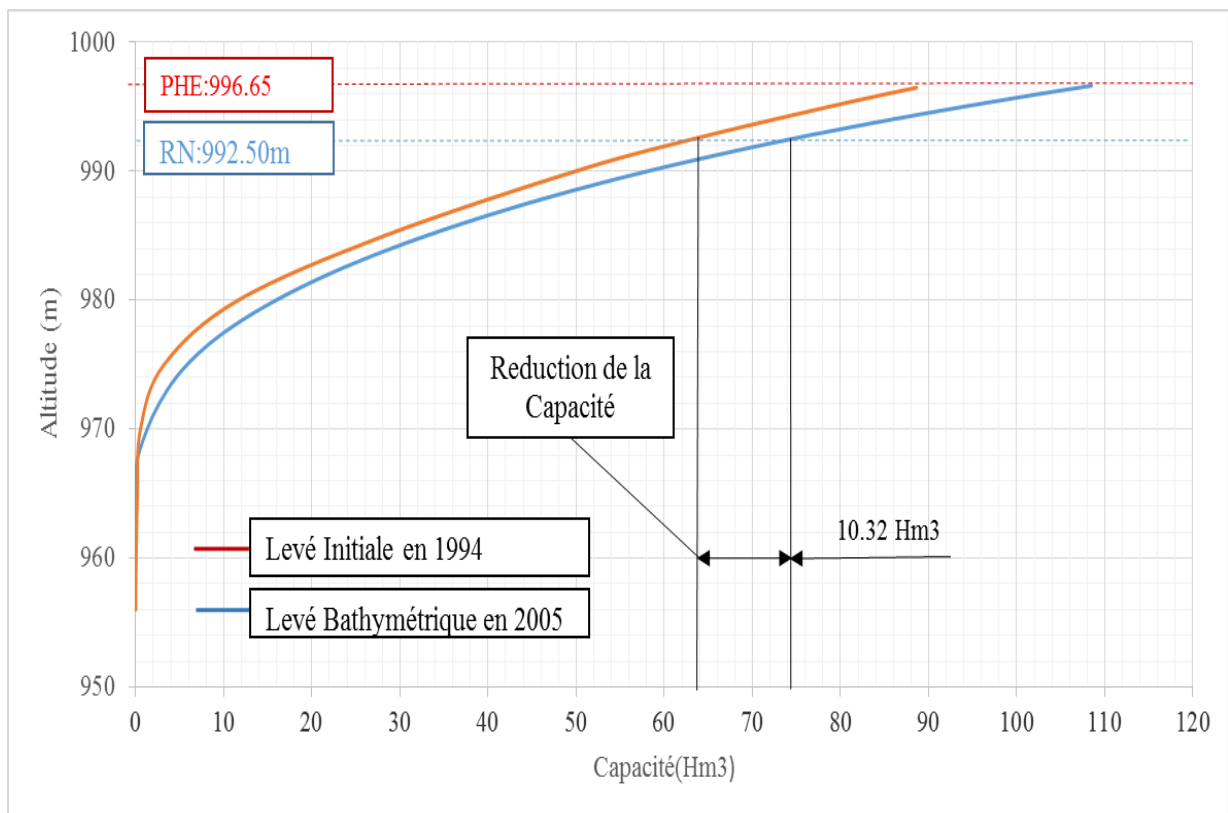


Figure V.7: Représentation de la courbe Hauteurs Capacités pour le Barrage de Koudiet Medaour. (Source : Auteur 2017)

D'après la figure ci-dessous l'envasement du réservoir de la retenue du barrage était évalué à 10.324 Hm³ d'après les courbes hauteurs capacités qui correspondent à une perte d'environ 14% de sa capacité initiale.

V.6.2. basé sur la mesure de la turbidité :

Le volume en eau mort de la retenue est déterminé en partant de l'hypothèse de son envasement avec transport solide de l'Oued et des produits de transformation des berges sous l'action du remous alternatif et des vagues, le volume d'envasement calculé d'après la formule de TEXERONT :

$$V_m = \frac{S * T_a * t}{\gamma_s}$$

Avec:

V_m : Volume mort (m³)

S : La superficie du bassin versant ; (**S** =590Km²).

t : temps de fonctionnement (an)

γ_s : poids spécifique des matériaux (**γ_s** =1.6t/m³)

T_a : taux d'abrasion (T/Km²/ans).

Tableau V.1 : Estimation des valeurs de l'envasement du barrage de Koudiet Medaour basé sur les mesures de turbidité. (Source : Auteur, 2017)

			Estimation de données de l'Oued Chemorah par la méthode de régression C=f(QI)		Estimation de données calculées par l'Agence Nationale des Barrage (ANB)		
	Superficie	Barrage	Apport moyen annuel	Envasement annuel	Apport solide	Envasement annuel	Apport solide
	Km ²		Hm ³	Hm ³	t/an	Hm ³	t/an
Oued Chemorah	590	Koudiet Medaour	Hm ³	Hm ³	340.10 ³	0.19	310.10 ³

Cette étude est une tentative de validation des sédiments entre les valeurs du taux de sédimentation annuelle estimé par la méthode de régression $C=f(QI)$ et celui obtenu par les calculs obtenus de l'agence nationale des barrages (ANBT), auquel il faut ajouter les transports par charriage de fond qui présente 10% de l'apport solide totale, comme le montre le Tableau.V.1 est jugée satisfaisant.

On peut conclure aussi que les terrains cultivés en amont du barrage contribuent à l'approvisionnement en sédiments qui pouvant envaser le barrage de Koudiet Medaouar.

V.7. La vie du barrage de Koudiet Medaouar d'après l'envasement dans le temps :

Nous constatons sur la Figure V.8, l'évolution de l'envasement dans le temps pour le barrage de Koudiet Medaouar, que les résultats obtenus par la relation de prévision de transport solide, les mesures obtenues présentées dans la figure et le tableau ci-dessus :

Tableau V.2 : Les valeurs de l'envasement dans le temps du barrage de Koudiet Medaouar. (Source : Guidoum, 2004)

Période (ans)	10	25	30	40	50	100
Envasement Hm^3	2,7	5,4	8,10	10.8	13.5	27
Envasement %	3,63	7,27	10.90	14.53	18.16	36.33
Volume de l'eau Hm^3	71,62	68,92	66,22	63,52	60.82	47.32
Volume de l'eau %	96,37	94.6	91.9	89.2	81.84	63.67

D'après la figure la durée de vie de ce barrage peut aller à plus de 100 ans à condition d'assurer d'une part l'entretien et une gestion saines du barrage comme la vidange de fond pour la prévention de la sédimentation de la retenue du barrage, et l'évacuation des crues pour assurer la sécurité de l'ouvrage, Aussi l'accélération des travaux de protection technique et biologique du bassin versant de l'autre part **Tableau V.2.**

V.8. Les moyens de lutte contre l'envasement du barrage :

Le principe consiste à protéger la retenue contre l'envasement, et garantir le volume régularisé engendrés par les eaux de ruissellement du bassin versant de l'Oued Chemorah, de nombreuses solutions a été engagé, nous citons les suivantes :

V.8.1. Correction des ravines :

Le réseau hydrographique du BV est essentiellement constitué de ravines, le traitement de ces dernier qui dans le but de les stabiliser est d'une extrême urgence. Dépourvues de végétation, les ravines fonctionnent comme de vrais torrents en saisons pluvieuses. Leur lit se creuse d'avantage et d'importantes quantités de matériaux solides sont entraînées en aval. Ainsi, la stabilisation des lits de ces ravines doit tenir une place essentielle dans les travaux d'aménagement. Pour ce faire, de simples corrections biologiques pourront être appliquées pour les petites et moyennes ravines en implantant des espèces d'arbres le meme sens que les courbes de niveaux appropriées. Pour les ravines assez développées, on doit modifier leur profil initial par des techniques mécaniques en vue de provoquer des atterrissements au moyen des seuils. Par ailleurs, les travaux d'aménagement (mise en place des seuils en pierre sèche) doivent être entrepris durant les saisons sèches. Cela empêchera la détérioration des ouvrages et facilitera leur achèvement (A.Bouchetata, 2006).

V.8.2. Aménagement des deux Oueds Reboa et Soultez :

Notre proposition pour réduire la vulnérabilité d'érosion hydrographique (sapement des berges de l'Oued) cet Aménagement a pour but de remanier l'Oued en réalisant une canalisation de ce dernier ou l'existante du phénomène est importante, ses aménagements consiste au bétonnage des berges et il est souhaitable d'éviter le bétonnage du lit (pour avoir une capacité naturel d'autoépuration).

Avec les principaux physiques qui affectent les ressources en eau mobilisées par le barrage de Koudiet Medaouar sur le plan quantitatif, un autre paramètre intervient également sur le plan qualitatif il s'agit de la pollution anthropique des ressources en eau.

V.8.3. La pollution anthropique :

C'est une conséquence directe de l'activité humaine qui représente un facteur de la dégradation non seulement sur le sol mais aussi sur la qualité de l'eau. L'homme peut être à l'origine du déclenchement et de l'accélération ce facteur anthropique par ses actions de défrichement des forêts, incendies et surpâturages et pratiques culturelles. De plus, les aménagements routiers et urbains, en augmentant les surfaces imperméables, exacerbent les inondations, favorisent le ruissellement et donc constituent un facteur d'entraînement du sol. Il existe une certaine contamination des Oueds du bassin versant et la cuvette du barrage de

Koudiet Medaour d'après les activités anthropique comme les eaux usées des agglomérations de Timgad et Fom toub et Sidi Mancer, Baiou, El Marefeg déversés dans les Oueds sans aucune épuration, Ainsi les eaux industrielle et les ordures ce qui compte l'importance des mesures physico-chimique et biologique qui présente une absence, effectuer des station d'épurations ce qui permettra une réduction importante de la pollution des Oueds, et aussi encouragé la ferme d'élevage de poisson dans les eaux douces du barrage qui élimine la pollution par l'autoépuration des espèces aquatiques. L'espace pastoral s'amenuise suite au surpâturage. La disparition de la couverture végétale, laisse donc des surfaces importantes du sol non protégées et par la suite plus exposées aux effets érosifs de l'eau de la pluie et du ruissellement Le feu endommage et ravage le couvert végétal. Cela sous-entend un risque élevé d'érosion. En fait, les zones sans aucune couverture végétale courent toujours un plus grand risque de forte érosion que les autres.

Le Défrichement des forêts provoque la perte en sol surtout dans les zones où il n'y a pas des moyens pour s'échauffer pendant l'hiver dont l'esprit de vie est traditionnelle, ces conditions font reculer la forêt d'une année à l'autre se qui provoque la déforestation et qui favorise la perte du sol, car le système racinaire des forêts contribue à maintenir la cohésion des particules, les matières organiques et améliorent la structure des sols (K. F Benbrahim, 2004)

Conclusion du chapitre V

La prévision des dépôts des sédiments dans la retenue du barrage de Koudiet Medaour, est extrêmement importante pour les ingénieurs et les gestionnaires de barrages. La relation prévisionnelle, donne des résultats satisfaisants. Grâce à cette relation, nous estimons le volume des dépôts sédimentaires du barrage avec un envasement considérable qui présente près de 14 % de sa capacité initiale.

La cause essentielle de cet envasement rapide de la retenue du barrage provient de la nature même des caractéristiques de son bassin versant formé de roches tendres généralement marno-calcaire dans les haute reliefs (Dj Aurès et Mahmel) avec un couvert végétal mince et dégradés c'est pourquoi ils est très important de freiner ce phénomène par les moyens de lutte anti érosifs.

Pour nous, il est indispensable d'entretenir le barrage et lancées les travaux et techniques en extrême en urgence, pour que la situation s'améliore rapidement.

Conclusion générale

Arrivé au terme de notre étude, nous pensons que notre travail ne serait pas complet si nous ne faisons pas le bilan des réponses que nous avons apporté, On parvient aux conclusions suivantes :

Estimation des pertes en sol a été élaborée pour le sous-bassin de l'Oued Reboa avec une surface de 328 km² et pour le sous-bassin de l'Oued Soultez avec une superficie de 207 km² durant une période de 27 ans (1985/2012).

Il faut noter que la valorisation des débits liquides et les données de concentration instantanées des sédiments ont été rendues possibles grâce à l'application d'un modèle statistique de type puissance $C=f(Q)$, amélioré par la méthode des classes créée par Jansson et qui a fourni un moyen d'estimer les charges de sédiments dans les deux bassins d'étude. La dégradation spécifique est de 575 T/Km²/an pour le sous bassin de l'Oued Soultez, Ainsi que pour l'Oued Reboa présente 678 T/Km²/an.

Vous avez notamment un apport solide plus élevé dans les saisons de l'automne et du printemps. Expliquer par le fait qu'après une longue saison sèche d'été la première forte pluie d'automne pourraient rencontrer un sol sec et dur ce qui pourrait être facilement érodés. Pour le printemps exactement dans les zones semi aride qui sont caractérisés par les crues printanières après un temps hivernal (fondation de la neige -gelée) exactement dans les hautes reliefs qui provoque un ruissellement torrentielles qui génères surtout sur des sols non protégés (culture , de foret généralement dégradé et peut dense) se qui implique un sol érodés Se qu'il faut retenir aussi que la réalisation de la carte finale des pertes en sol d'après la superposition des cinq facteurs dans chaque sous bassins nous a permis de regroupés 4 classes différentes de (faible sensibilité –moyenne sensibilité –forte sensibilité à très forte sensibilité) notamment le sous bassin de l'Oued Reboa qui présente de très fortes valeurs de perte en sol par rapport au sous bassin de l'Oued Soultez, et qui sont localisés dans le Sud et Sud-est du bassin.

Une approche très approximative entre les valeurs du modèle de régression $C=F(QI)$ et le modèle RUSLE a donné un résultat satisfaisant. Elle présente une ligature des résultats et traduit un fort impact de l'effet érosif surtout dans le sous-bassin de l'Oued Reboa,

A partir de tous ces résultats on peut conclure que la plupart de la production sédimentaire arrivée au barrage de Koudiet-Medeaour provient du sous bassin de l'Oued Reboa, ce qui nécessite des travaux antiérosifs au niveau de cette dernière et qui présente au fil du temps une menace d'envasement accéléré réduisant ainsi la capacité de stockage en eau du barrage. Ainsi les dispositions d'aménagement principalement au niveau du sous-bassin-versant de l'Oued Reboa doivent être prises en compte.

Reference bibliographique

Achite M., Ouillon S. (2007). Suspended sediment transport in a semiarid watershed. Wadi Abd. Algeria (1973–1995). *Journal of Hydrology*. Vol. 343. Iss. 3 p. 187–202.

ANBT 2(005). Etude des lèvements bathymétriques des barrages en exploitation (rapport technique), groupement d'entreprises Hydrodragage-C.T. Systems en vue de la protection du barrage Koudiet Medaour (W. Batna). [Study of the bathymetric lifts of dams in operation (Technical report), Hydrodragage-C.T. Systems for the protection of the Koudiet Medaour (W. Batna)]. Alger. Agence Nationale des Barrages et Transferts.

ANRH (2001). Inventaire des ressources en sols d'Algérie 1963–2001. Atlas cartographique. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Alger [Inventory of Algeria's Soil Resources 1963–2001. National Agency of Water Resources. Algiers].

Asselman N.E.M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*. Vol. 234. Iss. 3 p. 228–248.

Barrios, A. G., & Quiñonez, E. (2000). Evaluación de l'erosión utilizando el modelo USLE, con apoyo de SIG. Aplicación en una microcuenca de los Andes Venezolanos. *Revista Forestal Venezolana*, 44(1), 2000.

Benblidia M., Salem A., Demmak A. (2001). Extraction des sédiments dans les retenues [Extraction of sediments in reservoirs]. *La Houille Blanche*. No. 6–7 p. 76–78.
Benbrahim, K. F., Ismaili, M., Benbrahim, S. F., & Tribak, A. (2004). Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation: impact du phénomène au Maroc. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(4), 307–320.

Bergaoui M., Camus H., Nouvelot J.F. (1998). Essai de modélisation du transport solide sur les microbassins versants de Tebaga (Tunisie centrale) [Modeling test of sediment transport on micro watersheds of Tebaga (Central Tunisia)]. *Science et changements planétaires*.

Bouanani, A., Baba Hamed, K., Mania, J., & Bensalah, M. (2005). Le comportement d'un système hydrologique en climat méditerranéen par l'analyse corrélatrice et spectrale des débits et des pluies. Cas de trois sous bassins sud-méditerranéens: (Oued Sebdou, Moulah et Isser-Tafna-NW Algérie). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 18(2), 215–224.

Bouchetata, A., & Bouchetata, T. (2006). Propositions d'aménagement du sous-bassin-versant de l'Oued Fergoug (Algérie) fragilisé par des épisodes de sécheresse et soumis à l'érosion hydrique. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 17(3), 415–424.

Bourouba M. (1998). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides de l'Oued Medjerda supérieur (Algérie orientale) [Contribution to the study of water erosion and sediment

transport in the upper Wadi Medjerda (Eastern Algeria)]. Bulletin ORSTOM. Vol. 18 p. 76–97.

Chaumont, M., & Paquin, C. (1971). Carte pluviométrique de l'Algérie: au 1: 500,000. Société d'histoire naturelle.

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.

Cormary, Y., & Masson, J. (1963). Application à un projet type de la formule de perte de sols de Wischmeier. Etude de conservation des eaux et du sol au Centre de recherches du génie rural de Tunisie.

Demmak, A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale [Contribution to the study of erosion and sediment transport in northern Algeria] (Doctoral dissertation, PhD Thesis. Manuscript. Paris. Université de Pierre et Marie Curie).

Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of soil and water conservation, 51(5), 427-433. developed on load and on concentration. Hydrology Research.

Duan, N. (1983). Smearing estimate: a nonparametric retransformation method. Journal of the American Statistical Association. Vol. 78. Iss. 383 p. 605–610.

Ducloux, J., Laouina, A., Chaker, M., & Diné, H. (1990). Carbonate accumulation and weathering of the granitic substratum of Tanecherfi Basin, northeastern Morocco. Catena, 17(6), 493-508.

Einstein, H. A. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows (Vol. 1026). Washington DC: US Department of Agriculture et Sécheresse. Vol. 9. Iss. 1 p. 51–57.

Foster, G. (1977). Quarterly accounting data: Time-series properties and predictive-ability results. Accounting Review, 1-21.

Fournier, F. (1960). Climat et érosion: la relation entre laérosion du sol par laeau et les précipitations atmosphériques.

Gravelius, H. (1914). Flusskunde (Vol. 1). GJ göschen.

Guidoum A. (2004) .Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Chemorah à la station de Chemorah. (W.de Batna, Est Algerian).Diss.Université El Hadj Lakhdar de Batna1.

H.E. Müller, K.-R. Nippes. Beiträge zur Hydrologie.Sonderheft 5 (1) p. 219–233.

Heddadj, D. (1997). La lutte contre l'érosion en Algérie. Bull. Réseau Erosion, 17, 168-175.

Heusch, B., & Millies-Lacroix, A. (1971). Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin. Application au Maghreb. Mines et Géologie, 33, 21-39.

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological society of America bulletin, 56(3), 275-370.

<http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?currTab=simple&id=14116> du FAO.

Hudson, E. N., & Weber, G. (1973). Synthesis and characterization of two fluorescent sulfhydryl reagents. Biochemistry, 12(21), 4154-4161.
Iss. 1 p. 63–94.

Jakuschoff, P. (1932). Die Schwebestoffbewegung in Flüssen in Theorie und Praxis (Doctoral dissertation, Technische Hochschule zu Berlin).

Jansson M.B. (1985). Sediment rating curves of the Ljusnan at Funäsdalen. In: Problems in regional hydrology. Eds.

Jansson M.B. (1996). Estimating a sediment rating curve of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. Journal of Hydrology. Vol. 183 p. 227–241.

Jansson M.B. (1997). Comparison of sediment rating curves Kebir drainage basin, Algeria. Quaternary International. Vol. 262 p. 25–31.

Khanchoul K., Altschul R., assassi F. (2009). Estimating suspended sediment yield. Sedimentation controls and impacts in the Mellah Catchment of Northern Algeria. Arabian Journal of Geosciences. Vol. 2. Iss. 3 p. 257–271.

Khanchoul K., Boukhrissa Z., Acidi A., Altschul R. (2012). Estimation of suspended sediment transport in the

Khanchoul K., Jansson M.B., Lange J. (2007). Comparison of suspended sediment yield in two catchments, northeast Algeria. Zeitschrift für Geomorphologie. Vol. 51.

King, D., & Le Bissonnais, Y. (1992). Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. CR Acad. Agric. Fr, 78(6), 91-105.

Kinnell, P. I. (2005). Alternative approaches for determining the USLE-M slope length factor for grid cells. Soil Science Society of America Journal, 69(3), 674-680.

Laffitte, R. (1939). Etude géologique de l'Aurès [Algérie]. Service de la carte géologique de l'Algérie.

Leopold, L. B., & Maddock, T. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications (Vol. 252). US Government Printing Office.

Medinger, G. (1956). Hauteurs de pluies en Algérie, moyenne 1913-1953 (recueil statistique). SES, Alger. Mediterranean area]. Hydrological Sciences Journal. Vol. 54. Iss. 2 p. 338–348.

Meguenni, K., & Remini, B. (2008). Evaluation du débit solide dans le bassin versant de Harreza (Algérie). *LARHYSS Journal* ISSN 1112-3680, (7).

Melton, M. A. (1957). An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology (No. CU-TR-11). COLUMBIA UNIV NEW YORK.

Miller D.M. (1984). Reducing transformation bias in curve fitting. *The American Statistician*. Vol. 38. Iss. 2p. 124–126.

Milliman J.D., MEADE R.H. (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*. Vol. 91. No. 1 p. 1–21.

Milliman, J. D., & Meade, R. H. (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, 91(1), 1-21.

Neyman J., SCOTT E.L. (1960). Correction for bias introduced by a transformation of variables. *The Annals of Mathematical Statistics*. Vol. 31. Iss. 3 p. 643–655.

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.

Probst J.L., AMIOTTE SUCHET P. (1992). Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 37. Iss. 6 p. 621–637.

Probst, J. L., & Bazer Bachi, A. (1986). Transport en solution et en suspension par la Garonne supérieure. *Sciences géologiques, Bulletin*, 39(1), 79-98.

Rango, A., & Arnoldus, H. M. J. (1987). Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO*, 1-11.

Remini, R. V. (2001). Andrew Jackson. *American History*.

Renard, K. G. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE).

Roose, E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES).

Roose, E., & Sarrailh, J. M. (1990). Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahiers d'ORSTOM, SeHrie PeHdologie*, 25(1), 2.

Roose, E., Arabi, M., Brahamia, K., Chebbani, R., Mazour, M., & Morsli, B. (1993). Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. *Cahiers Orstom, série pédologie*, 28(2), 289-308.

Roose, E., Kabore, V., & Guenat, C. (1993). Le zaï: fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la

productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). Cahiers ORSTOM. Série Pédologie, 28(2), 159-173.

Sadiki, A. (2005). Estimation des taux d'érosion et de l'état de dégradation des sols dans le bassin versant de l'Oued Boussouab, Maroc nord-Oriental: application du modèle empirique (USLE) de la technique du radio-isotope ^{137}Cs et de la susceptibilité magnétique. Sciences. Vol. 11. Iss.1 p. 43–54.

Seltzer, P. (1946). Le climat de l'Algérie, période 1913-1938, Inst. Météo, Univ. Alger, 129-155.

Sibari H., HAIDI S., Fora A. (2001). Typologie des crues et érosion mécanique dans un bassin versant de zone semiaride: Bassin versant de l'Inaouène. Maroc [Typology of floods and mechanical erosion in a catchment of a semiarid area: Catchment of Inaouène. Morocco]. Science et changements planétaires/Sécheresse. Vol. 12. Iss. 3 p. 187–193.

Snoussi M., Jouanneau J. M., Latouche C. (1990). Flux de matières issues de bassins versants de zones semi-arides (Bassins du Sebou et du Souss. Maroc) [Flows of sediments from watersheds in semi-arid areas (Basins of Sebou and Souss. Morocco)]. Journal of African Earth.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Eos, Transactions American Geophysical Union, 38(6), 913-920.

Straub, F. B. (1936). Quantitative Methoden zur Untersuchung der Fumarsäurekatalyse. Hoppe-Seyler's Zeitschrift für physiologische Chemie, 244(3-4), 117-127.
Study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay. Water Resources Research. Vol. 28. Iss. 9 p. 2353–2363.

Tardy, Y. (1994). PIRAT: programme interdisciplinaire de recherche de biogéodynamique intertropicale périalantique: 1. Rapport d'activité scientifique: synthèse et essai prospectif; 2. Climats, paléoclimats et biogéodynamique du paysage tropical.

Tardy, Y., McGrath, J. L., Hartwig, J. H., & Dewey, C. F. (1995). Interpreting photoactivated fluorescence microscopy measurements of steady-state actin dynamics. Biophysical journal, 69(5), 1674-1682.

Velásquez, J. D., & Palade, V. (2008). Adaptive web sites: A knowledge extraction from web data approach (Vol. 170). Ios Press.

Vila, J. M. (1974). Le Rocher de Constantine: Stratigraphie, microfaunes et position structurale. Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, 65, 385-392.
Vol. 28. Iss. 3 p. 189–200.

Walling D.E. 1988. Erosion and sediment yield research some recent perspectives. Journal of Hydrology. Vol.100. Iss. 1–3 p. 113–141.

White, F. (1986). La Vegetation de L'Afrique (The Vegetation of Africa) (Vol. 20). IRD Editions.

Williams, R. (1975). The country and the city (Vol. 423). Oxford University Press, USA.

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.

Wischmeier W.H., Smith D.D. (1965). Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. U. S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook. No. 282 pp. 58.

Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook No. 537.

Yahiaoui A., Touaibia B., Bouvier C. (2011). Modélisation du régime de crue en Débit-Durée-Fréquence du bassin de l'Oued Mekerra dans l'Ouest Algérien [Flood condition modelling by Flow-Duration-Frequency in the Oued Mekarra basin Western Algeria]. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science. Vol. 24. Iss. 2 p. 103–115.

Production Scientifique

Received: 05.10.2016
Reviewed: 15.01.2017
Accepted: 07.05.2017A – study design
B – data collection
C – statistical analysis
D – data interpretation
E – manuscript preparation
F – literature search

Hydro-sedimentary flow modelling in some catchments Constantine highlands, case of Wadis Soultez and Reboa (Algeria)

Faiza BALLA^{1) ABCDEF} ✉, Nabil KABOUCHE^{2) D},
Kamel KHANCHOUL^{3) BC}, Hamza BOUGUERRA^{4) A}

¹⁾ University El-Hadj Lakhdar, Batna 2, Department of Hydraulic, Laboratory LRHYA, 05000 Batna, Algeria;
e-mail: balla-faiza@hotmail.fr

²⁾ University El-Hadj Lakhdar, Batna 1, Department of Architecture, Laboratory LEMPAU, Algeria;
e-mail: nkabouche@yahoo.fr

³⁾ University Badji Mokhtar, Faculty of Earth Sciences, Department of Geology, Annaba, Algeria;
e-mail: kkhanchoul@yahoo.fr

⁴⁾ University AbouBakr Belkaid, Faculty of Technology, Department of Hydraulic, Laboratory No 25, Tiemcen,
Algeria; e-mail: bouguerrahamza23@gmail.com

For citation: Balla F., Kabouche N., Khanchoul K., Bouguerra H. 2017. Hydro-sedimentary flow modelling in some catchments Constantine highlands, case of Wadis Soultez and Reboa (Algeria). *Journal of Water and Land Development*, No. 34 p. 21–32. DOI: 10.1515/jwld-2017-0035.

Abstract

Erosion is a major phenomenon that causes damage not only to soil and agriculture, but also to the quality of the water amounting to tonnes of matter annually transported on the earth's surface. This fact has attracted the interest of researchers to understand its mechanism and explain its causes and consequences. This work is a comparative study of water erosion in the two semi-arid catchments of Wadi Soultez and Wadi Reboa; located in the North-East of Algeria. The approach adopted for the quantification of sediment transport consists on researching the best regressive model to represent the statistical relation between the sediment yield and the measured water discharge at different scales: annual, seasonal and monthly. The available data cover 27 years from 1985–2012. The results show that the power model has given the best correlation coefficient. Results have indicated that Wadi Reboa transported an average of 14.66 hm³ of water and 0.25 million tonnes of sediments annually. While Wadi Soultez has transported 4.2 hm³ of water and 0.11 million tonnes of sediments annually. At a seasonal scale, sediment amounts have showed significant water erosion in autumn with around 44% and secondarily in the spring with 29% in Wadi Soultez. Unlike Wadi Reboa, sediment transport represents 32% and 46% in autumn and spring respectively. Based on the obtained sediment amounts; it is found that the physical factors: such as steep reliefs, vulnerable lithological nature of rocks and poor vegetal cover, have significantly contributed in accelerating soil erosion.

Key words: *accelerating, regressive model, sediment transport, Wadi Reboa, Wadi Soultez, water discharge, water erosion*

INTRODUCTION

The sediment transport is a complex phenomenon by its intermittent nature, randomness and by its spatio-temporal discontinuity [BERGHOUT, MEDDI 2016].

It constitutes a major constraint for development by decreasing soil productivity and storage capacity of dams and by degrading state of ancillary structures.

Many river systems in the Maghreb and especially in Algerian regions continue to experience severe

environmental soil erosion. This has resulted into enhanced sediment transport increase in the catchments, thereby causing a range of problems from considerable loss of soil fertility to accelerated river erosion. In the case of Wadis Soultz and Reboa, the declining catchment resources have put considerable pressure on the agricultural land and reservoir to support households.

Considering the principles of river material extraction and transported sediments by river flow in design of river structures, study of various methods to predict river sediment transport rate seems to be necessary. Various sediment transport models have been used to predict sediment loads, and the most widely used ones have been the construction of a sediment rating curve, which combines suspended sediment concentrations with water discharges (e.g. JANSSON [1997], KHANCHOUL *et al.* [2007]).

Studies conducted in the Maghreb have shown erosion varying significantly from one catchment to another; such as the work of SNOUSSI *et al.* [1990] who

have evaluated, when studying the case of three wadis in Morocco, the sediment yield about $750 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$. SIBARI *et al.* [2001] have estimated the average annual sediment yield contribution of the Moroccan catchment of Wadi Inaouène at $2142 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$. BERGAOUL *et al.* [1998] have attributed a sediment yield of $318 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ to the micro-catchment of Tebaga, Tunisia. PROBST and AMOTTE SUCHET [1992] have estimated the mean annual sediment yield equal to $7200 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ in Wadi Agriouin (Algeria) for the period 1972 to 1979. BOUROUBA [1998] has attributed a value of $113 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ to the High Wadi Madjedah catchment located in the eastern part of Algeria.

Assessments of methods for estimating loads in reservoirs have been recently carried out by KHANCHOUL *et al.* [2012] and TEBBI *et al.* [2012] who have predicted sediment inflow in Mexa and Foun El Kherza reservoirs using hydrological data. The importance of the erosion phenomenon has led other researchers to focus on the estimation of sediment transport and some examples are presented in Table 1.

Table 1. Magnitude of water erosion in some Algerian catchments

Catchment	Period	S, km ²	P, mm	SY, t·km ⁻² ·yr ⁻¹	Source
Wadi Moulah	1977–1993	2650	300.90	126.40	TERFOUS <i>et al.</i> [2001]
Wadi Moulah	1977–1995	2650	297	165	GHEM <i>et al.</i> [2008]
Wadi Haddad	1973–1995	470	200–379	287	ACHITE, MEDDI [2004]
Wadi Abd	1973–1995	2480	174–303	136	ACHITE, OULLON [2007]
Wadi Soubella	1974–1989	183.5	288.50	126	ACHITE, OULLON [2007]
Wadi Saf Saf	1976–1997	322	377.52	461	KHANCHOUL <i>et al.</i> [2007]
Wadi Kebir Ouest	1976–1997	1130	394.12	247	KHANCHOUL <i>et al.</i> [2007]
Wadi Mellah	1975–1999	550	707	562	KHANCHOUL <i>et al.</i> [2009]
Wadi McKerra	1950–2001	1890	350–450	111	CHERIF <i>et al.</i> [2009]
Wadi El Hamman	1973–2006	8348	280	256	EL-MAHI <i>et al.</i> [2012]
Wadi Elham	1968–2006	5604	185	530	HASBAIA <i>et al.</i> [2012]

Source: own elaboration acc. to literature datas.

These examples have shown the level of erosion in the Maghreb in general; particularly in semi-arid areas where the climate tends to accelerate and amplify this phenomenon [BENBLIDIA *et al.* 2001].

This study has been conducted on the two basins of Wadi Soultz and Wadi Reboa, which are part of the semi-arid bioclimatic stage where water erosion appears more problematic. This study, which has investigated the estimation of the sediment yield, is based on the measurement data of instantaneous water discharges and suspended sediment concentrations over a period of 27 years.

The purpose of this study is to (i) develop a method for the estimation of sediment loads using relationships between suspended sediment concentrations ($\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$) and water discharges ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) in Wadis Soultz and Reboa, (ii) to focus on the temporal variability of sediment yield and runoff. The role of the geomorphic factors on the landscape degradation is going to be discussed.

STUDY AREA

Belonging to the catchment of Wadi Chemorah (755 km^2), the two sub-catchments of Wadi Reboa and Wadi Soultz are located in the Aures region to the northeast of Algeria (Fig. 1). They spread over an area of 327 km^2 and 207 km^2 respectively. The wadis of the two sub-catchments flow into the catchment of Koudiet-Medouar Dam with the capacity of $20\cdot 10^6 \text{ m}^3$ regularized since 2003 [ANBT 2005].

CLIMATE

The semi-arid Mediterranean climate is wet and cold in winter and hot and dry in summer. It is characterized by very irregular precipitations that come often intense with an average interannual rainfall of $330 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ in Wadi Soultz catchment and an average of $458 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ in Wadi Reboa catchment for the period of 27 years (from 1985 to 2012). Although sporadic

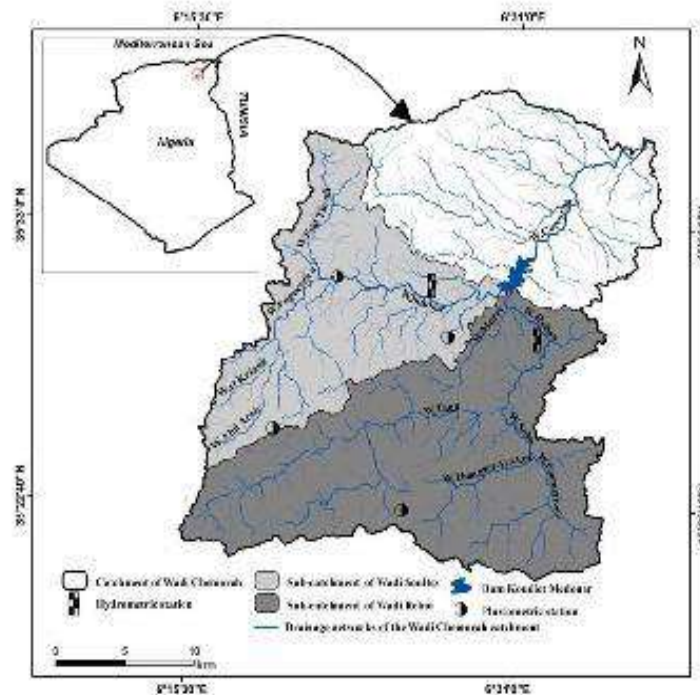


Fig. 1. Location map of Wadi Reboa and Wadi Soultez catchments; source: own elaboration

rainfall events occurred almost throughout the year, the rainy season in the area normally lasted for about four months (September to November and February). Annual temperatures in the area vary between 8.26 and 22.8°C (from 1985 to 2012) with an average of 15.6°C.

MORPHOMETRY

In the Aures region of Algeria, a series of mountains ranging long the southern boundary of Wadi Reboa catchment and reach up to 2294 m in elevation (Djebels El Mahmel and Djebels Aurès). Depression of these Mountains widens and narrows towards the north of the catchment forming a flat area with a minimum altitude of 981 m (Fig. 2). This figure has been realized by using Digital Elevation Model (DEM) at 50 m of resolution. Moreover, the Aurès Mountains form the southern boundary of Wadi Soultez catchment. These mountains can go up 1938 m in elevation (Djebel Askar). Their depression lengthens and widens from the north towards the east.

Reboa is composed with the junction of Wadi Taga; issuing from the Aures Mountains (Djebel Lizou-rès) running from SW towards NE and Wadi Seba which results from the confluence of two wadis: Wadi Khanguetel-Akra and Wadi Foum Toub. Wadi Reboa suddenly changes direction (sandstone rock) to the northwest where it receives Wadi Morri on its left bank and then resumes its SW-NE direction to meet Wadi Soultez after 3 km (Fig. 1).

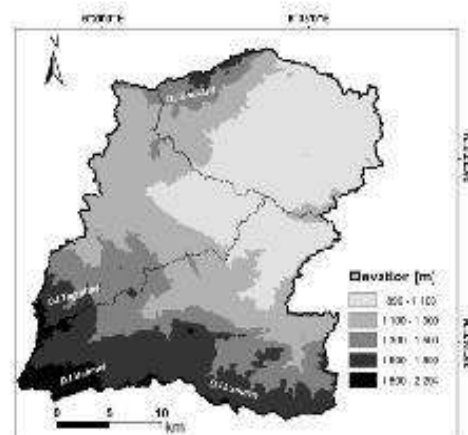


Fig. 2. Elevation map of Wadi Reboa and Wadi Soultez catchments; source: own elaboration

Wadi Soultez is also the result of two wadis junction: Feid Tlouidi which originates from the northwest of Tagratine Mountain and Wadi and Enguesdira that arises from the confluence of Wadi El-Kriane and Wadi Abdel Achir that unite in the Tagratine before meeting Wadi Reboa (Fig. 1).

According to Table 2, Wadi Reboa catchment has a 2.73 km² drainage density which is lower especially in the mountains and high reliefs (Djebel Lizou-rès, Djebel Madjeba and Temagoult) where the soil is permeable. Wadi Soultez catchment's density is 2.84

Table 2. Morphometric characteristics of the study catchments

Morphometric parameters	Wadi Soultez	Wadi Reboa
Area, km ²	207	328
Perimeter, km	108	128
Minimum elevation, m	976	975
Maximum elevation, m	1 913	2 290
Average elevation, m	1 242	1 417
Drainage density, km·km ⁻²	2.84	2.73
Concentration time, h	6.50	6.00
Compactness coefficient	2.12	1.99
Talweg frequencies, km ⁻²	5.36	3.42
Orographic coefficient	1 605	1 907
Average slope, %	9.00	15.00

Source: own elaboration.

km·km⁻², which is higher than Wadi Reboa catchment especially at the elevations of Djebel Tgratine characterized by steep slopes. The rest of the catchment is known with smooth slopes and a less dense drainage network. Comparing the orographic coefficients of the two basins, we have noticed that Wadi Reboa's coefficient has higher reliefs with steeper slopes compared to Wadi Soultez catchment (Fig. 2).

LITHOLOGY

The lithology of the study catchments has been done using geological maps of 1:50,000 in scale. The lithological analysis of the two basins has revealed the existence of several rocks whose surface formations can be distinguished as quaternary formations which are divided in the form of polygenic glaze generating gentle slope surfaces at the plain but highly fragmented, showing gully erosion and causing pebble deposits. They are very limited in areas covered with vegetation.

The sandstone and clay of Miocene age outcrop from the center to the east of Wadi Soultez catchment and scatter towards the edges of Wadi Reboa catchment by hills of less than 1600 m high. These rocks include the reliefs of Djebel Amrane, Timagoult, Koudiat Safia el Djebel Faoum which are home to large landslides. Moreover, Cretaceous clays are found to the northeast of the two basins on the foothills along with sandstones. They form hills stretching between 1000 m to 1400 m and represent the most ploughed lands of the area. These are homes to gully erosion phenomenon.

The formations of average resistance to degradation are marl, limestone and Miocene conglomerates found at the high hills and high mountains with slopes of >25%. These rocks are found in northern Djebel Asker. For the calcareous marl of Cretaceous age, the rocks represent the major part of Djebel Lizourès reliefs.

The limestone of Eocene age outcrops on the north side of Wadi Soultez catchment and at the center of Wadi Reboa catchment at Djebel El Mahmel. These less spread formations have a mechanical disintegration and chemical weathering in producing clay soils.

Table 3. Lithology of the Wadi Soultez (BV1) and Wadi Reboa (BV2) catchments

Types	Age	BV1		BV2	
		km ²	%	km ²	%
Quaternary formation	Quaternary	115	56	110	34
Sandstone and clay	Tortonian	45	22	58	18
	Miocene				
Clay	Tortonian	18	9	24	7
	Miocene				
Marl, conglomerate and limestone	Tortonian	4	2	5	2
Marly limestone	Higher	23	11	114	35
	Cretaceous				
Limestone	Lower	2	1	17	5
	Eocene				

Source: own elaboration.

SLOPES AND VEGETATION COVER

Both slopes and vegetation cover have a significantly complex and contradictory role affecting the variation of erosion intensity. The slopes distribution obtained by the geographic information system (GIS) in the two catchments is shown in Figure 4. The use of DEM and Arcgis 10.1 have permitted the creation of the slope map; while the land use map has been realized using Google Earth Professional images at high resolution with Arcgis, aerial photographs and terrain verification.

Wadi Soultez catchment has shown a significant distribution of slopes (from 3 to 10%), which have spread over 41% of the catchment's surface; while the steep slopes (>25%) have been rare and have covered only 6%. However, Wadi Reboa catchment has much steeper slopes with values ranging between 15% and 25% and representing 30% of the total area. In addition 20% of this area is composed of high relief with slopes higher than 25%. The low slopes found in plains (0–3%) are rare and have not exceeded 8%, unlike Soultez catchment where the plain has been extended over 25% of the surface.

Table 4. Slope classes of the Wadi Soultez and Wadi Reboa catchments

Slope, %	Wadi Soultez		Wadi Reboa	
	km ²	%	km ²	%
0–3	51.85	25.04	25.71	7.84
3–10	84.33	40.76	89.50	27.29
10–15	31.42	15.17	50.67	15.45
15–25	26.65	12.87	97.34	29.67
>25	12.75	6.16	64.78	19.75

Source: own elaboration.

The predominant land use in the Wadi Soultez and Wadi Reboa catchments is for agricultural land and forests. In Soultez catchment, 50% of the catchment area is cultivated with wheat and barley (Tab. 5 and Fig. 5). More than 60% of Wadi Reboa catchment lands are agricultural and known by cereal growing and few villages are found. However, no villages are found in Wadi Soultez catchment. Forests cover 42%

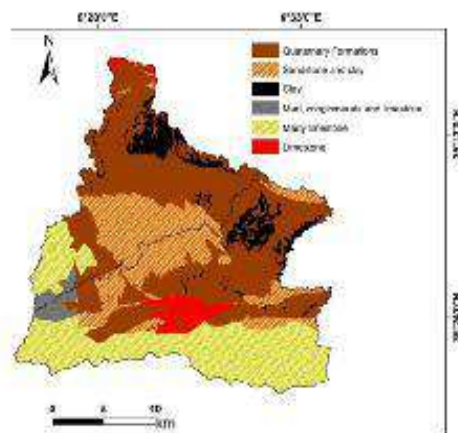


Fig. 3. Lithology map of Wadi Reboa and Wadi Soultez catchments; source: own elaboration

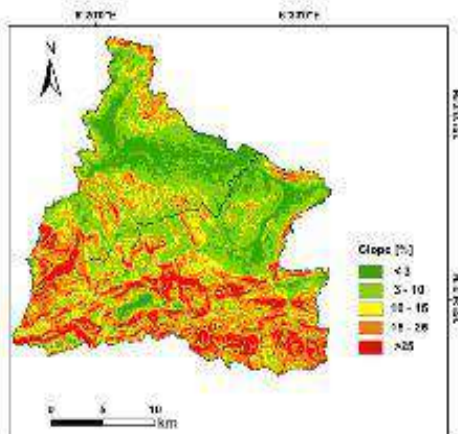


Fig. 4. Slope map of the Wadi Reboa and Wadi Soultez catchments; source: own elaboration

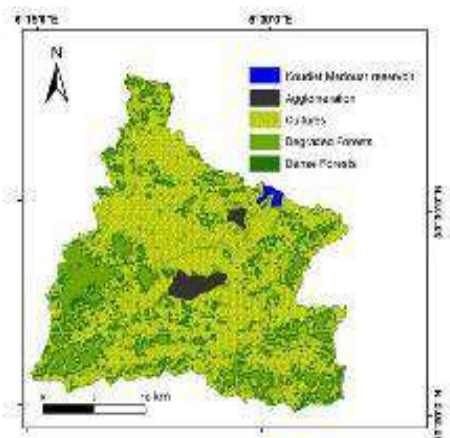


Fig. 5. Land use map of Wadi Reboa and Wadi Soultez catchments; source: own elaboration

Table 5. Distribution of the vegetation cover for the Wadi Soultez and Wadi Reboa catchments

Type	Wadi Soultez		Wadi Reboa	
	km ²	%	km ²	%
Koudiet Medouar reservoir	1,20	0,60	1,10	0,30
Agglomeration	2,50	1,20	10	3
Degraded Forests	52,30	25,30	82,90	25,30
Dense Forests	20	9,70	37	11,50
Cultures	131	63,30	197	60,10

Source: own elaboration.

of Wadi Soultez catchment (Fig. 5); they are found mainly on poorly developed soils of sandstone and marl limestone on slopes higher than 15%.

Wadi Soultez catchment area has been damaged by livestock and fires during summer season, and overgrazing has been observed in pastures and open shrub lands while in Wadi Soultez region, dense forests have been rare in the Wadi Reboa catchment because of the climatic system of the area and the frequent fires in summer. The forest areas were generally more open with bare soils exposed to erosion. This sub-catchment, similarly to the main catchment was characterized by overgrazing, degraded forest cover and undulating topography coupled with erratic and intense rainstorms.

DATA AND METHOD

The data used in this study came from the National Agency of Water Resources [KHANBOUL 2001]. They were mainly measured in hydrometric stations used by ANRH upstream of Koudiet Medouar Dam at the hydrometric station Tingad (coordinate geographic; the longitude 6°27'29" E and the latitude 35°30'25" N) in Wadi Soultez and Reboa hydrometric station (coordinate geographic; the longitude 6°31'30" E and the latitude 35°29'43" N) in Wadi Reboa over a period of 27 years (1985–2012).

Instantaneous water discharges, estimated from the rating curve $Q = f(H)$ using the water level read on a gauging ruler with a float gage, were converted into water discharge rates. Sediment samples were taken in the edge using one-liter bottles in Wadi Soultez and Reboa according to a measurement protocol by the ANRH department.

Water samples taken in different flow conditions have been filtered in a Laurent type filter ($\phi = 32$ cm). The sludge contained therein is weighed after drying in a special oven for 30 min at a temperature of 110°C. This method was conducted to determine the sediment concentrations in a standard procedure established in the national territory and by many world agencies [ACHITE, OULLON 2007; KHANBOUL *et al.* 2007].

For a better representation of the erosive dynamics of the two studied rivers, a regression analysis was performed between instantaneous sediment concentrations C ($\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$) and water discharge Q ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$). Among the trend curves used generally to represent

the relationship $C = f(Q)$: (power: $y = ax^b$; exponential: $y = ae^{bx}$). In this study, we opted a power type function giving the best determination coefficient R^2 which is written as follows:

$$C = aQ^b \quad (1)$$

where: C = the measured suspended sediment concentration ($\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$), Q = the water discharge ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), a and b = the regression constants.

RELATIONSHIPS BETWEEN SEDIMENT CONCENTRATION AND WATER DISCHARGE

Instantaneous values for which a reasonable and representative number of samples were carried out. They have allowed a good reconstruction of sediment rating curves. Selected value pairs are shown on a log-log scale (Fig. 6).

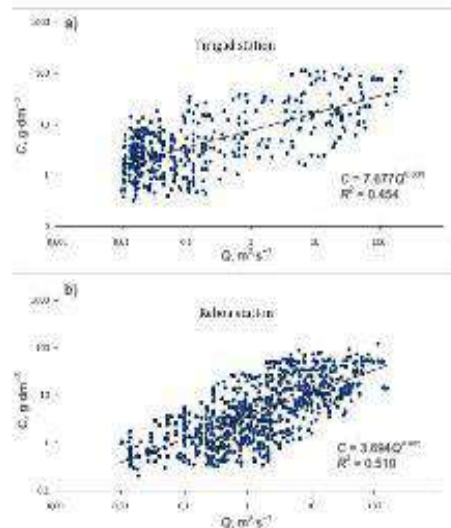


Fig. 6. Suspended sediment concentration C versus water discharge Q (1985–2012) in: a) Wadi Reboa, b) Wadi Soultez; source: own elaboration

The relationship $C = f(Q)$ was used on the basis of collected instantaneous water discharges and sediment concentrations using 427 pairs of measurements for Wadi Soultez and 812 for Wadi Reboa. The models have not shown strong coefficients of correlation (0.45–0.51). They have revealed the wide divergence between the models based on measured and estimated concentration data for both stations of Tingad and Reboa (Fig. 6). To adjust the regression relationships, the water discharge class method has been used by dividing flows into classes and calculating the arithmetic means of the concentration values (C) for each discharge class [COHN *et al.* 1992; DUAN 1983; JANSOHN 1985, 1997; NEYMAN, SCOTT 1960]. The

scatter plots have shown a trend with a changing of the direction of the regression line and by applying the division of datasets into two regression lines; we could have an improvement of the coefficients of correlation (R). This method was applied in Algeria by various authors such as KHANCHOUL *et al.* [2007], ACHITE and OULLON [2007], YAHIAOUI *et al.* [2011].

However in all regression models, there was a bias as responsible for the error [DUAN 1983; JANSOHN 1985, 1996; NEWMAN 1960; WALLING *et al.* 1988]. To overcome this bias, MILLER [1984] has proposed a statistical technique (logarithmic retransformation) which has allowed developing a logarithmic correction factor CF , determined by the following formula:

$$CF = \exp(0.5\delta^2) \delta^2 = \frac{1}{(N-1) \sum (\ln C_{obs} - \ln C_{est})^2} \quad (2)$$

where: CF = correction factor, δ = standard error, N = size of the series, C_{obs} = observed concentration, C_{est} = concentration calculated by regression.

After applying the correction coefficient, we used the equation:

$$C = CF \cdot aQ^b \quad (3)$$

The sediment discharge (Q_s) was calculated by the following equation:

$$Q_s = QC \quad (4)$$

where: Q_s = sediment discharge ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), Q = water discharge ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), C = measured suspended sediment concentration ($\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$).

The correction factor was successfully applied in several works to improve the estimation of sediment discharge (Q_s). According to ASSELMAN [2000] the use of the power function after the logarithmic retransformation tends to underestimate the sediment load from 10% to 50%. Ferguson found an improvement of less than 10% in studies on Rhine catchment.

In most cases the relationship between concentration or load and water discharge will exhibit considerable scatter. It is difficult to isolate the precise causes of scatter on a rating plot, because of the interrelated nature of the controls and because the rating plot is essentially a univariate expression of a complex multivariate system [WALLING 1988]. If due consideration is given to the problems associated with combining the flow record and the sediment rating curve, an indication of the inherent inaccuracy of using a sediment rating curve to summarize the sediment transport characteristics of a river could be obtained by comparing estimated loads with loads predicted. Therefore, the observed and predicted sediment discharges have been compared with the load values obtained from the continuous concentration record and errors have been expressed as a percentage of these measured values as:

$$Error = \left[\frac{\text{estim. sediment discharge value}}{\text{meas. sediment discharge value}} - 1 \right] \cdot 100\% \quad (5)$$

Then the responses of each catchment might be studied by quantifying sediment transport at an annual and seasonal scale.

CALCULATION OF SEDIMENT LOAD

Sediment load (SL) in the outlets of the two Wadis Soultez and Reboa was calculated by the following formula:

$$SL = \sum QCT \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

where: SL = sediment load (t), Q = water discharge ($m^3 \cdot s^{-1}$), C = suspended sediment concentration ($g \cdot dm^{-3}$), T = the duration between concentration values, measured or computed (s).

Consequently, the computation of the sediment yield was calculated by the following formula:

$$SY = \frac{SL}{A \cdot N} \quad (7)$$

where: SY = average annual sediment yield ($t \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$), SL = the annual sediment load (t), A = the area of the catchment (km^2), N = the number of years.

RESULTS AND DISCUSSION

Regarding the data of the two hydrometric stations under study (Timgad and Reboa), an analysis of water discharges and sediment concentrations was performed to explain the hydro-sedimentary response on an annual and seasonal scale during three seasons, autumn, winter and spring for the period 1985–2012.

The graphs in Figure 7 and 8 have illustrated the relationships $C = f(Q)$ for annual and seasonal data.

The results of instantaneous sediment concentration – instantaneous water discharge models have been significant, where the coefficients of correlation have ranged between 0.62 and 0.83 for the Timgad catchment and between 0.70 and 0.87 in Reboa basin. The relationships have given best goodness of fit using the mean water discharge class technique. According to the water discharge class method; these regressions have given acceptable results (Tab. 6 and 7).

In Tables 6 and 7, the best regression models for the two catchments were found by considering the annual series. It was improved by using the factor correction where the calculated error has overestimated value by 4.21% and 8.80% respectively. The error rate obtained was small; it was of the same order as that obtained by JANSSON [1996]. However, the sub-series that represent the seasons (autumn, winter and spring) have given an overestimation of 14.08% and 27.80% for both Wadi Timgad and Reboa catchments respectively, and that despite the correction made using the correction factor (Tab. 6 and 7). Moreover, the

fall season in Wadi Soultez might be considered as the period whose overestimation in sediment discharge was the highest with almost 42%.

ANNUAL VARIATION OF SEDIMENT LOAD

The years which were the most productive in sediments for a period of 27 years starting from 1985 to 2012 are represented in Figure 9. It has illustrated water discharge and sediment yield for both study catchments. An unequal contribution was observed during years regarding the amount of sediment yield, and the highest annual water volume and sediment load amounts have been noticed during 1989/1990, 1999/2000, 2008/2009 and 2011/2012 in Wadi Reboa catchment. These four years have contributed 57% of the total sediment load. Meanwhile, the three years of 1989/1990, 2004/2005 and 2007/2008 observed in Wadi Soultez catchment have a contribution of 48%. The results of sediment loads in both catchments have shown a discordance of sediment supply relative to years. This is due the irregularity in rainfall distribution from one basin to another.

The average annual contribution of sediments recorded in the outlet of Wadi Soultez catchment was estimated to be $114.69 \cdot 10^3$ tonnes, which corresponded to a mean annual sediment yield of $575 t \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$. This value was low compared to the value in the Wadi Reboa catchment whose amount was equal to $222.50 \cdot 10^3$ tonnes, corresponding to a mean annual sediment yield of $678 t \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$. The later basin is distinguished by a fairly higher sediment supply which is due to its specific geomorphic conditions that are favourable to accelerate soil erosion such as more extended weak rocks, rainfall and topography.

Concerning the annual variation of the sediments loads, it is seen from the graphs that both catchments present high variability or dispersion of their values. By computing the coefficient of variation (CV) which is the standard deviation divided by the mean, we have remarked that the Timgad catchment has the highest variation with a CV equal to 173% compared to the Reboa basin with a CV equal to 134%. Contrary to the Reboa catchment, the Timgad one has shown a deviation of the sediment loads and water volumes to the right, which means that the high sediment production has started from the year 2000. We have here the mass of the distribution is concentrated on the right of the figure; the distribution is skewed to the left.

SEASONAL VARIATION OF SEDIMENT LOAD

The sediment load was noted to be highly variable from one season to another. During the study period, it was noted that the monthly values of the transported sediments in the two Wadis were very high during the autumn and spring seasons. In fact, these high monthly values were more abundant in autumn in the Wadi Reboa catchment, whose sediment load in September represented almost 32% of the annual sed-

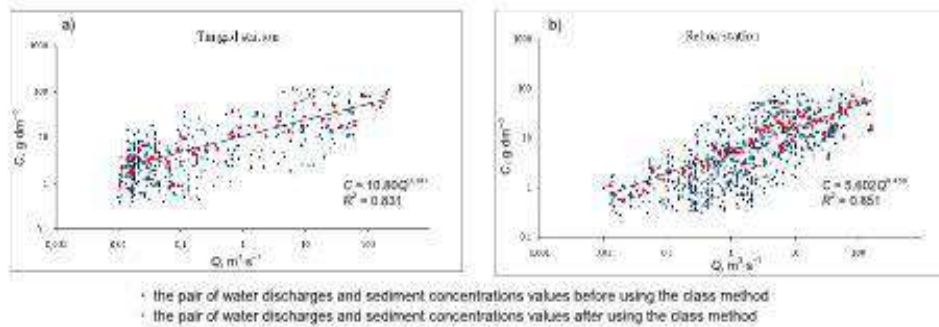


Fig. 7. Sediment concentration versus water discharge according to water discharge classes (1985–2012) in: a) Wadi Reboa, b) Wadi Souttez; source: own study

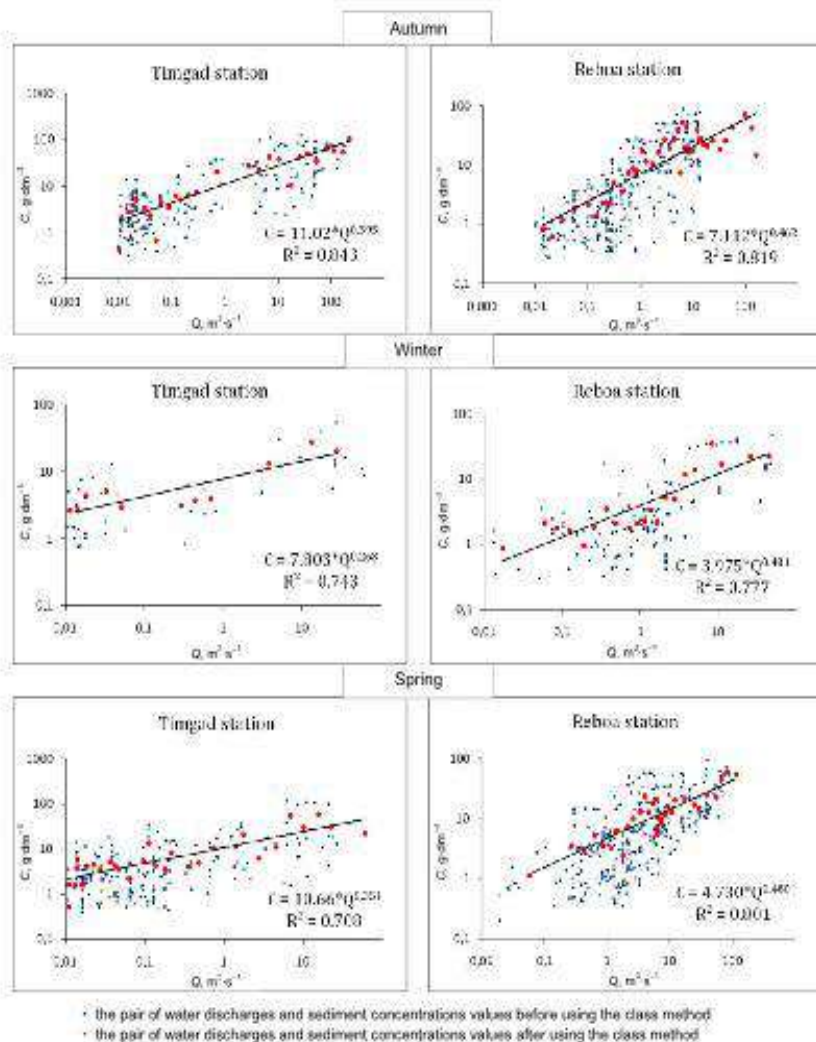


Fig. 8. Seasonal models of sediment concentration versus water discharge according to water discharge classes (1985–2012) in wadis Reboa and Souttez; source: own study

Table 6. Seasonal models of suspended sediment concentration versus water discharge in Wadi Reboa catchment

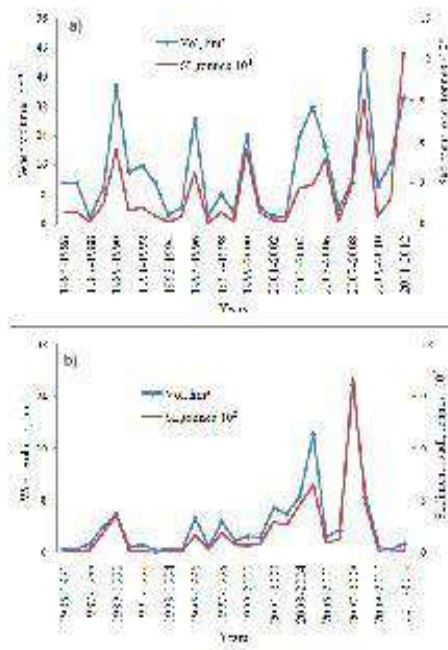
Specification	Periods	Number of data	β	CF	R^2	Corrected equation	Sediment discharge $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^3$		Error %	Total error %
							observed	calculated		
All data	annual	427	–	–	0.83	$C = 10.80Q^{0.547}$	149.18	142.89	4.21	4.21
	autumn	186	–	–	0.84	$C = 11.02Q^{0.545}$	133.09	154.29	15.93	14.08
Sub-series	winter	42	–	–	0.74	$C = 7.80Q^{0.535}$	4.98	5.82	16.90	
	spring	199	0.34	1.19	0.75	$C = 10.66Q^{0.551}$	11.11	11.98	7.85	

Source: own study.

Table 7. Seasonal models of suspended sediment concentration versus water discharge in Wadi Soultez catchment

Specification	Periods	Number of data	β	CF	R^2	Corrected equation	Sediment discharge $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^3$		Error %	Total error %
							observed	calculated		
All data	annual	812	–	–	0.83	$C = 5.602Q^{0.438}$	243.69	265.14	8.80	8.80
	autumn	381	–	–	0.82	$C = 7.112Q^{0.442}$	151.35	214.29	41.58	27.80
Sub-series	winter	125	0.27	1.15	0.78	$C = 5.975Q^{0.591}$	9.34	10.58	13.32	
	spring	306	0.17	1.09	0.81	$C = 4.730Q^{0.480}$	83.00	87.07	4.91	

Source: own study.

**Fig. 9.** Annual variation of water volumes and sediment loads in the study catchments: a) Wadi Reboa, b) Wadi Soultez; source: own study

iment load; while in the Wadi Soultez catchment 25% of the annual sediment load was found during the month of October. The floods of both catchments were mainly characterized by three types of hysteresis: simultaneous, positive and negative loops.

The autumn rainfall in semi-arid areas are often of high intensity generating higher floods than that of winter with a mean monthly runoff coefficient ranging from 10 to 20% in the Wadi Reboa catchment and from 4 to 15% in Wadi Soultez catchment.

Moreover, in September the mean sediment yield was estimated at $183 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ with a concentration of $28.71 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ in the Wadi Soultez catchment, whereas it was at $150 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ with a concentration of $32.96 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ in October in the Wadi Reboa catchment. This could be explained by the fact that after a long dry season (summer), the first autumn rains might meet a dry and hard soil, which could be easily eroded. Torrential rains have generated rain splash process on unprotected soils. This situation has allowed the storm events to leach the soil by ripping out large amounts of fine matters, which would be then moved in suspension by the streams. Also, runoff was very high in the Wadi Reboa catchment that occurred on more steep slopes.

In the winter season, sediment transport was lower compared to the autumn season. Nevertheless, the sediment yield remained higher in the Wadi Reboa catchment ($90 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$) than in the Wadi Soultez catchment with only $57 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ (Fig. 10, Tab. 8). These

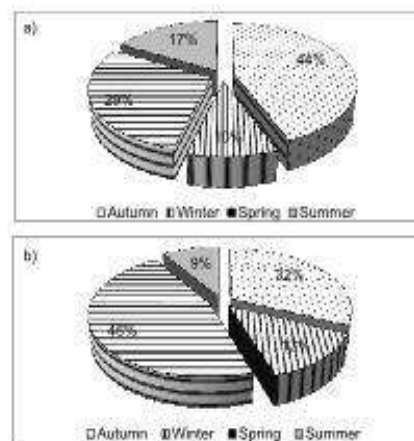
**Fig. 10.** Seasonal distribution of sediment yield in catchments (period from 1985 to 2012): a) Wadi Reboa, b) Wadi Soultez; source: own study

Table 8. Seasonal distribution of water volume, sediment yield and of sediment yield, runoff coefficient, mean concentration in Wadi Reboa, Reboa Hydrometric Station and Wadi Soultez, Tingad Hydrometric Station; period from 1985–1986 to 2010–2012

Catchment	Parameter	Seasons				
		autumn	winter	spring	summer	year
Wadi Reboa	runoff coefficient, %	11.49	8.38	19.14	9.74	12.19
	water volume, hm ³	2.75	2.82	6.88	1.55	14.00
	sediment yield, t·10 ³	0.65	0.32	1.18	0.10	2.25
	mean concentration, g·dm ⁻³	23.80	11.18	27.43	9.59	18.00
	sediment yield, t·km ⁻² ·yr ⁻¹	218.62	89.56	313.72	56.47	678.34
Wadi Soultez	runoff coefficient, %	9.14	4.23	6.44	5.53	6.54
	water volume, hm ³	1.69	0.82	1.25	0.63	4.39
	sediment yield, t·10 ³	0.52	0.15	0.33	0.25	1.25
	mean concentration, g·dm ⁻³	15.01	6.31	14.54	11.82	12.78
	sediment yield, t·km ⁻² ·yr ⁻¹	249.78	57.13	166.56	101.13	575.60

Source: own study.

low values are due mainly to the small amounts of rainfall in the two catchments during this season.

In the spring season, from March to May, it was observed that the mean sediment yield was 2 times higher in the Wadi Reboa catchment 314 t·km⁻² than in the Wadi Soultez catchment 167 t·km⁻². These high sediment values were observed mainly in May for the two catchments. Suspended sediment concentrations varied between 20 and 37 g·dm⁻³·s⁻¹ in the first catchment and between 12 and 20 g·dm⁻³·s⁻¹. In the Wadi Reboa catchment, high concentrations during the spring could be explained by many factors that have favoured the erosion process, such as steep slopes and poor vegetation cover like cultures. The most representative floods of this season were illustrated in the flood of 8 April 1990.

This flood was a major event in terms of sediment transport in the Wadi Reboa catchment which has occurred after the high winter flood. The total rainfall of 64 mm has produced runoff of 39 mm. The morphological impact of this flood event was certainly influenced by the saturation of the highly erodible soils poorly covered by vegetation. The high peak of water discharge (17 m³·s⁻¹) obtained after seven hours and half did not coincide with the peak of the sediment concentration (42 g·dm⁻³). This should be a positive hysteresis where the sediment concentration

peak came before the water discharge peak (Fig. 11a). There was more sediment ready to be transported by runoff over slopes or because of bank erosion. The suspended sediment load of this flood has been estimated to 22·10³ tonnes. This high concentration might be produced on saturated soils giving unusual high overland flow. The nature of these soils was distinguished by loamy and clayey material that was easily eroded.

For the same flood in Wadi Soultez catchment, we noticed a decrease in the intensity and magnitude of this storm event. First of all, the rainfall and runoff were half the values compared to the Reboa basin; there were 49.20 mm and 45 mm respectively. Second, the flood was characterized by a simultaneous increase in sediment concentration and water discharge. The sediment concentration and water discharge peaks were equal to 5 m³·s⁻¹ and 36 g·dm⁻³ (Fig. 11b). It is believed that this smaller amount sediment load of 5.76 tonnes in Wadi Soultez could be caused by less supply of sediments due to a more vegetation cover and less steep slopes and unfavourable climatic conditions.

In the summer season, the climatic conditions are unfavorable for sediment transport since rainfall are often non-existent or too low to generate a runoff able to erode and transport significant quantities of sedi-

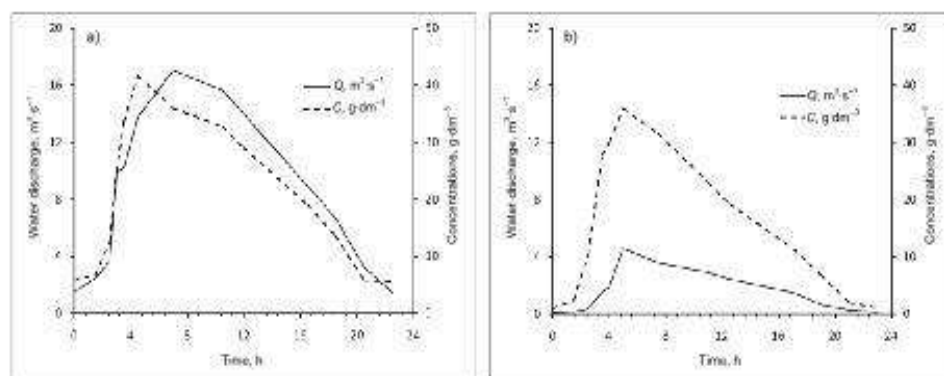


Fig. 11. Floods of 8 April 1990 in: a) Wadi Reboa catchment, b) Wadi Soultez catchment; source: own study

ments. This season was characterised by a sediment yield of $56.5 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ in the Wadi Soultez catchment and $101 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ in the Wadi Reboa basin (Tab. 8). The latter has a higher runoff coefficient of 15% in July compared to the Wadi Soultez catchment which has a coefficient of only 9%. This should be certainly related to the fact that torrential rains are less frequent in the Wadi Soultez catchment than in the Wadi Reboa one.

Overall, it should be noticed that a significant relationship might exist between the runoff coefficient and sediment yield whose topographic and lithological factors could promote soil erosion that might vary according to the presence or absence of vegetation cover and cultural practices.

CONCLUSIONS

The suspended sediment transport was calculated for Wadi Reboa with a catchment area of 328 km^2 and for Wadi Soultez with an area of 207 km^2 . The valorisation of water discharge and the sediment concentration data have been made possible by the application of a power-type statistical model along with the application of the mean water discharge class technique.

The sediment rating curve method has provided a mean to estimate sediment loads in the two study catchments. The amounts of suspended sediments recorded during the period between 1985 and 2012 have been evaluated to $32\cdot 10^5$ tonnes or $575 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ and $60\cdot 10^5$ tonnes or $678 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ in Wadi Soultez and Wadi Reboa respectively. The difference in values is providing information on the intensity of soil erosion in each basin and therefore the disparity has resulted mainly from the geomorphic conditions such as lithology, slopes and vegetation cover.

Interannual variability is even more intensely influenced by the hydroclimatic parameters, which involves a higher suspended sediment transport, due to the high rainfall intensities in autumn and spring which can generate heavy floods. The Wadi Reboa catchment is characterized by more aggressive flow conditions.

During the 27-years study period, four years contributed to 57% of the sediment transport in the Wadi Reboa catchment. On the contrary, the contribution in sediment production in the Wadi Soultez catchment was a little inferior; it was only 48% in four years.

Suspended sediment yield was highest in the fall and spring seasons. The differences in erosion between the two catchments were especially more or less great during the spring. During the high magnitude of storm events in both previous seasons, the basins have highly peaked discharge and concentration graphs with a slight advantage for the Reboa basin, which implies surface runoff with high erosion because of extended cultivated overgrazing areas on slopes greater than 10% on clayey soils.

Hopefully, these findings will help soil conservationists in these two basins to prevent the risk of sedimentation in the Koudiet Medouar reservoir.

REFERENCES

- ACHITE M., MEDDI M. 2004. Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien) [Estimation of sediment transport in the basin Oued Haddad (North West Algeria)]. *Science et changements planétaires/Sécheresse*. Vol. 15. Iss. 4 p. 367-373.
- ACHITE M., OUILLOU S. 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd. Algeria (1973-1995). *Journal of Hydrology*. Vol. 343. Iss. 3 p. 187-202.
- ANBT 2005. Etude de lèves bathymétriques des barrages en exploitation (rapport technique), groupement d'entreprises Hydrodragage-C.T.Systems en vue de la protection du barrage Koudiet Medaour (W. Batna). [Study of the bathymetric lifts of dams in operation (Technical report), Hydrodragage-C.T.Systems for the protection of the Koudiet Medaour (W. Batna)]. Alger. Agence Nationale des Barrages et Transferts.
- ANRH 2001. Inventaire des ressources en sols d'Algérie 1963-2001. Atlas cartographique. Agence Nationale des Ressources Hydraulique. Alger [Inventory of Algeria's Soil Resources 1963-2001. National Agency of Water Resources. Algiers].
- ASSELMAN N.E.M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*. Vol. 234. Iss. 3 p. 228-248.
- BENBLIDIA M., SALEM A., DEMMAK A. 2001. Extraction des sédiments dans les retenues [Extraction of sediments in reservoirs]. *La Houille Blanche*. No. 6-7 p. 76-78.
- BERGAOUI M., CAMUS H., NOUVELOT J.F. 1998. Essai de modélisation du transport solide sur les microbassins versants de Tebaga (Tunisie centrale) [Modeling test of sediment transport on micro watersheds of Tebaga (Central Tunisia)]. *Science et changements planétaires et Sécheresse*. Vol. 9. Iss. 1 p. 51-57.
- BERGHOUT A., MEDDI M. 2016. Sediment transport modelling in wadi Chemora during flood flow events. *Journal of Water and Land Development*. Vol. 31. Iss. 1 p. 23-31.
- BOUROUBA M. 1998. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides de l'Oued Medjerda supérieur (Algérie orientale) [Contribution to the study of water erosion and sediment transport in the upper Wadi Medjerda (Eastern Algeria)]. *Bulletin ORSTOM*. Vol. 18 p. 76-97.
- CHERIF E.A., ERRIH M., CHERIF H.M. 2009. Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne [Statistical modelling of hydro sedimentary flow in the basin Wadi Mekerra (Algeria) in a semi-arid Mediterranean area]. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 54. Iss. 2 p. 338-348.
- COHN T.A., CAULDER D.L., GILROY E.J., ZYNIUK 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*. Vol. 28. Iss. 9 p. 2353-2363.
- DUAN N. 1983. Smearing estimate: a nonparametric retransformation method. *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 78. Iss. 383 p. 605-610.
- EL-MAHI A., MEDDI M., BRAVARD J.P. 2012. Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord) [Analysis of the transportation of suspended solids in the basin Oued El Hammam (Northern Algeria)]. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 57. Iss. 8 p. 1642-1661.
- GHENIM A., SEDDINI A., TERFOUS A. 2008. Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (nord-ouest Algérie) [Temporal

- variation of the specific sediment yield of the Wadi Mouilah basin (Northwest Algeria). *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 53, Iss. 2 p. 448–456.
- HASBAJA M., HEDIAZI A., BENAYADA L. 2012. Variabilité de l'érosion hydrique dans le bassin du Hodna: Cas du sous-bassin versant de l'oued elham [Variability of water erosion in the Hodna basin: Case of the sub-basin Oued Elham]. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, Vol. 1, Iss. 1 p. 28–32.
- JANSSON M.B. 1985. Sediment rating curves of the Ljusnan at Funäsdalen. In: *Problems in regional hydrology*, Eds. H.E. Müller, K.-R. Nippes. Beiträge zur Hydrologie, Sonderheft 5 (1) p. 219–233.
- JANSSON M.B. 1996. Estimating a sediment rating curve of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. *Journal of Hydrology*, Vol. 183 p. 227–241.
- JANSSON M.B. 1997. Comparison of sediment rating curves developed on load and on concentration. *Hydrology Research*, Vol. 28, Iss. 3 p. 189–200.
- KHANCHOUL K., ALTSCHUL R., ASSASSI F. 2009. Estimating suspended sediment yield, sedimentation controls and impacts in the Mellah Catchment of Northern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 2, Iss. 3 p. 257–271.
- KHANCHOUL K., BOUKHRISZA Z., ACTI A., ALTSCHUL R. 2012. Estimation of suspended sediment transport in the Kebir drainage basin, Algeria. *Quaternary International*, Vol. 262 p. 25–31.
- KHANCHOUL K., JANSSON M.B., LANGE J. 2007. Comparison of suspended sediment yield in two catchments, north-east Algeria. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 51, Iss. 1 p. 63–94.
- MILLER D.M. 1984. Reducing transformation bias in curve fitting. *The American Statistician*, Vol. 38, Iss. 2 p. 124–126.
- MILLIMAN J.D., MEADE R.H. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, Vol. 91, No. 1 p. 1–21.
- NEYMAN J., SCOTT E.L. 1960. Correction for bias introduced by a transformation of variables. *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 31, Iss. 3 p. 643–655.
- PROBST J.L., AMIOTTE SUCHET P. 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 37, Iss. 6 p. 621–637.
- SIBARI H., HAIDE S., FORA A. 2001. Typologie des crues et érosion mécanique dans un bassin versant de zone semi-aride: Bassin versant de l'Inaouène, Maroc [Typology of floods and mechanical erosion in a catchment of a semiarid area: Catchment of Inaouène, Morocco]. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, Vol. 12, Iss. 3 p. 187–193.
- SNOUSSI M., JOUANNEAU J. M., LATOUCHE C. 1990. Flux de matières issues de bassins versants de zones semi-arides (Bassins du Sebou et du Souss, Maroc) [Flows of sediments from watersheds in semi-arid areas (Basins of Sebou and Souss, Morocco)]. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 11, Iss. 1 p. 43–54.
- TUBBI F.Z., DRID H., MORRIS G.L. 2012. Optimization of cumulative trapped sediment curve for an arid zone reservoir: Foum El Kherza (Biskra, Algeria). *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 57, Iss. 7 p. 1368–1377.
- TERFOUS A., MEGNOUNIF A., BOUANANI A. 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien) [Study of suspended sediment transport in the basin Oued Mouilah (Northwest Algeria)]. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, Vol. 14, Iss. 2 p. 173–185.
- WALLING D.E. 1988. Erosion and sediment yield research—some recent perspectives. *Journal of Hydrology*, Vol. 100, Iss. 1–3 p. 113–141.
- YAHIAOUI A., TOUABIA B., BOUVIER C. 2011. Modélisation du régime de crue en Débit-Durée-Fréquence du bassin de l'oued Mekerra dans l'Ouest Algérien [Flood condition modelling by Flow-Duration-Frequency in the Oued Mekerra basin Western Algeria]. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, Vol. 24, Iss. 2 p. 103–115.

Faiza BALLA, Nabil KABOUCHE, Kamel KHANCHOUL, Hamza BOUGUERRA

Modelowanie hydrologicznego przepływu i transportu osadu w wybranych zlewniach wyżyny Konstantyny, przykład epizodycznych rzek Soultet i Reboa (Algeria)

STRESZCZENIE

Erozja jest głównym czynnikiem, który nie tylko przynosi szkody w rolnictwie (ubytki gleb), ale także obniża jakość wód powierzchniowych wskutek transportu wielkiej ilości materii niesionych rocznie w skali całego świata. Zjawisko to przykuwało uwagę badaczy, którzy pragnęli poznać mechanizm erozji oraz jej przyczyny i skutki. Przedstawiona praca jest porównawczym studium erozji wodnej półpustynnych zlewni dwóch epizodycznych rzek – Soultet i Reboa w północno-wschodniej Algierii. Podejście do ilościowego ujęcia transportu osadów polegało na znalezieniu najlepszego modelu regresji między transportem osadu a mierzonym odpływem wody w skali rocznej, sezonowej i miesięcznej. Dostępne dane obejmują 27 lat – od 1985 do 2012. Najlepszy współczynnik korelacji uzyskano, stosując model potęgowy. Wyniki wskazują, że Reboa transportowała średnio 14,66 hm³ wody i 0,25 mln t osadu rocznie, podczas gdy transport rzeki Soultet wynosił 4,2 hm³ wody i 0,11 mln t osadu rocznie. W ciągu roku największe ilości osadu rzeka Soultet transportowała jesienią (44%) i wiosną (29%), natomiast największy transport osadu w rzece Reboa odnotowano wiosną (46%), a mniejszy jesienią (32%). Na podstawie uzyskanych danych o transporcie osadów stwierdzono, że czynniki fizyczne, takie jak głęboka rzeźba terenu, litologiczny charakter skał podatnych na erozję i uboga pokrywa roślinna przyczyniają się znacząco do zwiększonej erozji gleb.

Słowa kluczowe: erozja wodna, model regresji, natężenie przepływu, odpływ wody, rzeka Reboa, rzeka Soultet, transport osadów.