

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE



DOMAINE : HYDRAULIQUE
FILIERE : HYDRAULIQUE
OPTION : OUVRAGE HYDRAULIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: BOUGUERRA RIYADH

Intitulé

Estimation de l'apport solide et cartographie de
l'érosion hydrique dans le sous bassin versant
du Soubella dans la région du Hodna

Dirigé par:
Pr. HASBAIA MAHMOUD

Année universitaire : 2018 /2019

Remerciements

Tout d'abord, tout louange à dieu qui m'a fourni le courage, la capacité et la patience pour réaliser ce modeste travail avec toutes ses difficultés et ses obstacles.

*Je tiens à remercier Monsieur **HASBAIA Mahmoud** Professeur à l'université de M'sila, qui n'a jamais compté les heures afin que mon travail puisse avancer le plus rapidement possible, également avec un grand dévouement, ils m'a consacré tout leur temps à suivre de près l'évolution de cette thèse à orienter les différentes étapes et à palier toutes les difficultés aux quelles j'avais à faire face. Merci pour l'enrichissement scientifique que vous m'avez apporté et pour la confiance que vous m'avez accordée.*

*J'exprime aussi mes vives reconnaissances à Monsieur **MEZALI Farouk** pour leur qualité de collaboration, notamment dans la finalisation des cartes.*

Mon respect s'adresse aux membres de jury. Qui me feront l'honneur d'apprécier ce travail.

*Un remerciement aux doctorants qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire et spécialement **Deneche Imene** , **Zeroual Sara**.*

*Un remerciement aux docteur **Hamrit Fareh** qui m'ont aidé à la réalisation de ce mémoire.*

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail en signe de
reconnaissance et de respect.*

- *A mes parents pour les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard*
- *A mes frères **Souhaib – Aya - Ahmed***
- *A toute ma famille*
- *A mes amis sans exception*

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des figures.....	

INTRODUCTION GENERAL.....01

Chapitre I : Généralités sur le bassin versant du Hodna

I.1 introduction	02
I.2 Situation géographique.....	02
I.2.1 Relief.....	03
I.1.2Géologie.....	04
a-Le trais.....	04
b- Le jurassique et le carbonate.....	04
c- Le crétacé.....	04
d- Le Paléocène.....	04
e- Le néogène.....	05
f- Le quaternaire.....	05
I.2.3 Réseau hydrographique.....	05
I.2.4 Climat.....	06
a-Pluviométrie.....	06
b-Température.....	06
c- Vent.....	07
d- Humidité.....	07
I.2.5 Couvert végétal.....	07
I.3 Conclusion.....	08

Chapitre II : Description du bassin versant de Soubella

II.1 Introduction.....	09
II .2 Généralité sur le Bassin v de Soubella.....	09
II.2.1 La situation géographique.....	09
II.2.2 Relief.....	10
II.2.3 Aperçu général sur la géologie.....	11

a- Tectonique.....	11
II.2.4 Lithologie de bassin versant de l'oued Soubella.....	12
II.2.5 Le couvert végétal.....	14
II.3 Conclusion.....	15

Chapitre III Caractéristiques morphométriques du bassin-versant de Soubella

III.1 Introduction.....	16
III.2 Caractéristiques de la disposition dans le plan.....	16
III.2.1 Surface.....	16
III.2.2 Longueur.....	16
III.2.2.1 Périmètre.....	16
III.2.2.2 Longueur du bassin versant.....	16
III.2.2.3 Longueur du talweg principal.....	16
III.2.2.4 Largeur du bassin-versant.....	17
III.2.2.5 Indice de compacité de Gravelius.....	17
III.3 Caractéristiques des altitudes (hypsométrie).....	17
III.3.1 Altitudes maximales et minimales.....	17
III.3.2 Courbe hypsométrique.....	18
III.3.3 Dénivelée simple.....	20
III.3.4 Rectangle équivalent.....	21
III.4 Indice de pentes.....	22
III.4.1 Pente moyenne.....	22
III.4.2 Indice de pente globale I_g	23
III.4.3 Dénivelée spécifique.....	23
III.5 Caractéristiques du réseau hydrographique.....	24
III.5.1 Réseau hydrographique du bassin-versant du Soubella.....	24
III.5.2 Profil longitudinal d'un cours d'eau principal.....	25
III.5.3 Degré de développement du réseau hydrographique.....	26
III.5.4 Rapports de confluence et de longueur.....	26
a- Le coefficient d'élanement.....	27
b- Coefficient de torrentialité.....	28
c- Temps de concentration.....	28
III.5.5 Vitesse d'écoulement de l'eau.....	28

III.6 Conclusion.....	30
-----------------------	----

Chapitre IV : Etude climatologique du bassin versant du Soubella

IV.1 Caractéristiques climatologiques du bassin.....	31
IV.2 Etude de la précipitation du bassin.....	34
IV.2.1 Introduction.....	34
IV.2.2 Homogénéité et comblement des données pluviométriques.....	34
IV.3 Etude des précipitations annuelles.....	37
IV.3.1 Introduction.....	37
IV.3.2 Variabilité annuelle des précipitations des stations de Sidi Ouadah et Bordj Ghdir.....	38
IV.3.3 Ajustement à la loi de Gauss.....	42
IV.4 Etude des précipitations mensuelles.....	47
IV.4.1 Introduction.....	47
IV.4.2 Variabilité mensuelles des précipitations des deux stations.....	47
IV.4.3 Diagramme Ombrothermique.....	50
IV.5 La variabilité saisonnière des précipitations.....	52
IV.6 Etude de la pluie maximale journalière.....	54
IV.6.1 Variabilité de la pluie maximale journalière.....	54
IV.6.2 Ajustement de la pluie maximale journalière à la loi de GUMBEL.....	55
IV.6.3 Conclusion.....	55

Chapitre V : Généralité sur l'érosion hydrique

V.1 Introduction.....	60
V.2 Définitions.....	60
V.2.1 Erosion éolienne.....	60
V.2.2 Erosion hydrique.....	60
V.3 Effets néfastes de l'érosion.....	61
V.3.1 Dans leur zone de production.....	61
V.3.2 En d'hors des zones de production.....	61
V.4 Procédures de l'érosion.....	62
V.5 Mécanismes d'érosion hydrique.....	63
V.5.1 Erosion par rejaillissement.....	64
V.5.2 Erosion en nappe.....	65

V.5.3 Erosion en rigoles.....	66
V.6 Principaux facteurs d'érosion.....	67
a) Agressivité des pluies.....	68
b) Topographie.....	68
c) Occupation du sol.....	69
V.7 Conséquence de l'érosion hydrique.....	69
V.7.1 L'envasement des barrages.....	69
V.7.2 Dégradation du bilan hydrique.....	69
V.7.3 Appauvrissement du sol.....	70
V.7.4 Autres conséquences.....	70
V.8 Conclusion.....	71

Chapitre VI : Cartographie des paramètres de l'érosion

VI.1 Introduction.....	72
VI.2 Application de l'Equation universelle de perte en sol 'USLE'.....	72
VI.2.1 Indice d'agressivité des pluies (facteur R).....	73
VI.2.2 Pente et longueur de pente (facteur LS).....	75
VI.2.3 Occupation des sols (C).....	77
VI.2.4 Indice d'érodibilité des sols (facteur K).....	78
VI.2.5 Pratiques anti-érosives, (facteur P).....	80
VI.3 Resultats et discussion.....	80
VI.4 Conclusion.....	83

Chapitre VII : Moyens de lutte contre l'érosion

VII.1 Introduction.....	84
VII.2 Conséquences de l'érosion hydrique en Algérie sont dramatiques.....	84
VII.3 Lutte contre l'érosion hydrique.....	84
VII.4 Stratégies traditionnelles de lutte anti-érosive.....	85
VII.5 Stratégies modernes d'équipement hydraulique.....	86
VII.6 Les mesures de lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols.....	88
VII.6.1 Création d'obstacles au ruissellement.....	88
VII.6.2 Terrasses soutenues par des murs en pierres sèches.....	89
VII.7 Protection des pentes contre l'érosion.....	90

VII.8 Moyens de luttés utilisées en Algérie.....	91
CONCLUSION GENERALE.....	92

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.01	Répartition des surfaces partielles par rapport aux altitudes pour le bassin du Soubella	31
Tableau III.02	Détermination de l'altitude moyenne du bassin-versant du Soubella	20
Tableau III.03	Répartition des surfaces partielles dans rectangle équivalent du Soubella	22
Tableau III.04	Deuxième classification d'après Office de la recherche scientifique et technique outre-mer 'O.R.S.T.O.M'	24
Tableau III.05	Caractéristiques morphométriques du bassin-versant de Soubella	29
Tableau IV.01	Paramètres climatiques mensuelle enregistrés à la station de M'sila	31
Tableau IV.02	Paramètres climatiques moyens mensuels enregistrés à la station de Batna	32
Tableau IV.03	Caractéristiques des stations pluviométriques.	34
Tableau IV.04	La régression linéaire entre les deux stations	36
Tableau IV.05	Répartition annuelle des précipitations (1973	39
Tableau IV.06	Ecart des pluies a la moyenne interannuelle	44
Tableau IV.07	Ajustement de la pluie annuelle à une loi de Gauss (station de Sidi Ouadah).	44
Tableau IV.08	Ajustement de la pluie annuelle à une loi de Gauss (station de Bordj El Ghdir).	45
Tableau IV.09	Paramètres statistiques des précipitations mensuelles entre 1973-2004 (SidiOuadah).	47
Tableau IV.10	Paramètres statistiques des précipitations mensuelles	48
Tableau IV.11	Les précipitations et les températures mensuelles interannuelles.	51
Tableau IV.12	Les saisons humides et sèches des deux stations.	52
Tableau IV.13	Les précipitations maximales journalières.	54
Tableau IV.14	Pluies maximales journalières de la station Sidi Ouadah	56
Tableau IV.15	Pluies maximales journalières de la station Bordj El Ghdir	57
Tableau V.01	Dégradation spécifique du sol (E_s) dans le Maghreb.	62
Tableau IV.01	Précipitations moyennes mensuelles (mm), annuelles (mm) et la valeur du facteur R moyen pour la période 1973-2004	74
Tableau IV.02	Les valeurs du facteur C par type d'occupation du sol	77
Tableau IV.03	Répartition d'érodibilité de sol dans le bassin de Soubella	79
Tableau IV.04	Les classes de risque d'érosion	82
Tableau IV.05	Répartition des pertes de sol dans le bassin de l'Oued de Soubella	82

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	La situation du bassin versant du Hodna	03
Figure I.2.	Le relief du bassin versant du Hodna	04
FigureI.3.	La carte géologie du bassin versant du Hodna (Adoui,2013)	05
FigureI.4	Pluviométrie dans le bassin versant du Hodna.	06
Figure II.1	Situation de bassin versant de Soubella	10
Figure II.2	Carte géologique du bassin de Soubella.	11
Figure III.1	Carte topographique du bassin-versant de Soubella	18
Figure III.2	Courbe hypsométrique et digramme de fréquence	19
Figure III.3	Carte du réseau hydrographique du bassin-versant de Soubella.	24
Figure IV.1	Régime thermique de la station météorologie de M'sila.	32
Figure IV.2	Carte des températures moyennes annuelles du Nord de l'Algérie.	33
Figure IV.3	La courbe double masse.	35
Figure IV.4	Moyennes des précipitations annuelles (1974–2004).	40
Figure IV.5	Les écarts des pluies annuelles à la moyenne interannuelle.	42
Figure IV.6	Ajustement des précipitations annuelles à une loi Normale (station de Sidi Ouadah).	
Figure IV.7	Ajustement des précipitations annuelles à une loi Normale	46
Figure IV.8	Les précipitations mensuelles interannuelles (1973-2004) de station de Sidi Ouadah.	
Figure IV.9	Les précipitations mensuelles interannuelle (1973-2004) de la station de Bordj El Ghdir.	49
Figure IV.10	Les précipitations mensuelles interannuelles des deux stations (1973-2004)	.49
Figure IV.11	Variabilité interannuelles des coefficients mensuels pour les deux stations.	50
Figure IV.12	Diagramme Ombrothermique (1973-2004) pour les deux stations (Sidi Ouadah et Bordj El Ghdir).	51
Figure IV.13	Répartition saisonnière des précipitations à la Station de Sidi Ouadah (1973-2007)	52
Figure IV.14	Répartition saisonnière des précipitations à la Station de Bordj El Ghdir(1973-2007)	53

Figure IV.15	Variabilité des pluies maximales journalières selon la station de Sidi Ouadah (1973-2004).	54
Figure IV.16	Ajustement statistique des précipitations maximales journalières à une loi de Gumbel(Station Sidi Ouadah).	58
Figure V.1	Distribution des formes d'érosion sur un versant (Souter & al., 1978)	64
Figure V.2	Effet de rejaillissement ou effet « Splash » (Souter et al., 1978)	65
Figure V.3	Accumulation de sol et de débris de culture à l'extrémité basse de ce champ est un indice d'érosion en nappe.	66
Figure V.4	Tracé distinct formé par les eaux de ruissellement est un signe d'érosion en rigoles ayant emporté le sol.	67
Figure V.5	Dépôts de vase dans le barrage sur la rive gauche (photo à gauche) et dépôts de vase à l'entrée de l'Oued Bougous au barrage (photo à droite) (Tourki, 2010)	70
Figure V.6	Destruction des ouvrages (pont du quartier commando Mejdoub wilaya de Saida en (2013)	71
Figure VI.1	Organigramme de la cartographie de l'érosion par le modèle USLE	73
Figure VI.2	Carte du facteur R du bassin versant de l'oued Soubella	74
Figure VI.3	Modèle numérique du terrain (MNT) du bassin versant de l'oued Soubella	76
Figure VI.4	Carte du facteur LS du bassin versant de l'oued Soubella.	77
Figure VI.5	Indice de couverture végétale et de pratiques culturales du bassin versant de l'oued Soubella (Facteur C)	78
Figure VI.6	Carte de distribution des classes d'érodibilité (K) dans le bassin versant de l'Oued Soubella	80
Figure VI.7	Carte de pertes en sol du bassin versant de l'oued Soubella	81
Figure VI.8	Répartition des pertes de sol dans le bassin de l'Oued Soubella	83
Figure VII .1	Une vue de versants aménagés par des terrasses soutenues par a-des talus et par des murs en pierre.	86
Figure VII.2	Vue sur des billons.	86
Figure VII.3	DRS en pente sur bassin versant.	87
Figure VII.4	Végétalisation de badlands par Eucalyptus et pin d'Alep sur banquettes au Maroc	88
Figure VII.5	Rideaux d'arbres	89

Figure VII.6	Schéma descriptif d'une terrasse irriguée.	89
Figure VII.7	Aménagement en terrasse associé à un système d'irrigation.	90
Figure VII.8	Cultures parallèles aux courbes de niveau	90

Introduction

Introduction générale

L'érosion, est un phénomène très complexe et lié à des facteurs naturels et anthropiques difficilement maîtrisables, elle affecte beaucoup les terres arables et menace la capacité d'emménagement des barrages. En Algérie, l'érosion hydrique est très sévère, elle est favorisée par des conditions topographiques, physiques, géomorphologiques et climatiques très défavorables. La perte de capacité des barrages à cause de l'envasement (soit, 32 millions de m³/an de sédiments) est considérée comme un problème crucial dans la limitation de la disponibilité de l'eau à l'échelle nationale. D'ici à la fin du siècle, selon les différents types de projections et types de modèles utilisés, on estime des baisses des totaux pluviométriques annuels de l'ordre de 15% à 30% (Christensen et al 2007). La récupération de la capacité perdue par envasement des barrages existants en utilisant des techniques de dragage, de succion ou de chasse des sédiments, représente une solution parfois indispensable, mais toujours chère et parfois temporaire puisqu'elle ne s'attaque pas à la véritable source du problème. L'érosion des bassins-versants en amont des barrages, sous toutes ses formes, est à l'origine de l'envasement des barrages. Elle englobe non seulement le détachement ou l'ablation des particules de sol, mais aussi leur déplacement d'un point à un autre du bassin versant. Les conséquences de l'érosion ne se limitent pas à l'envasement des barrages. L'érosion contribue aussi à la perte de la couche arable, la plus fertile du sol, en diminuant sa productivité et dégradant la qualité des eaux de surface. L'objectif de cette étude est de quantifier et d'évaluer la nature et l'ampleur du degré d'érosion dans toute la surface du bassin versant de l'Oued Soubella en utilisant l'équation universelle de perte en sol 'USLE'(Universal Soil Loss Equation) sous un environnement SIG. Cette équation est largement utilisée dans les différentes régions du monde. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs principaux qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et l'effet des pratiques anti-érosives.

Tous ces facteurs vont être cartographiés sur toute la surface du bassin versant de l'oued Soubella en utilisant un système d'information géographique SIG. Ces cartes seront élaborées en tenant compte des données physiques et climatiques du bassin. La superposition des cartes des différents facteurs permet d'avoir la carte de perte en sol sur toute la surface du bassin ce qui permettra l'identification des zones les plus productrices de sédiments.

Pour atteindre l'objectif de notre étude, nous commençons par une première partie consacrée à : un aperçu général sur la zone d'étude suivie par une étude morphométrique et climatique détaillée du BV de l'oued Soubella. La deuxième partie est consacrée à l'étude bibliographique sur l'érosion hydrique dans les zones semi-arides généralement, et en Algérie particulièrement. La troisième partie présente la cartographie des différents facteurs de l'érosion à l'aide d'un SIG et l'élaboration de la carte du potentiel érosif du bassin de l'oued Soubella en se basant sur le model USLE. La dernière section sera réservée à la présentation des moyens de lutte contre l'érosion utilisés dans le monde et en Algérie.

Chapitre I

Généralités sur le bassin versant du Hodna

Chapitre I : Généralités sur le bassin versant du Hodna

I.1 Introduction

Le chapitre est consacré à une description générale du bassin versant étudié afin de déterminer les caractéristiques géographiques, physiographiques et géologiques, bases indispensables à la compréhension future des mécanismes hydrologiques des cours d'eau.

I.2 La situation géographique :

Le bassin versant du Hodna est le 5^{ème} grand bassin Algérien, il est situé au centre de l'Algérie à 150 km à vol d'oiseau au sud de la côte méditerranéenne (Golf de Bejaia) (FigureI.1). Avec une superficie de 26000 km² il touche les 7 wilayas, à savoir : la wilaya de M'sila, Batna, BBA, Djelfa et Médéa, Bouira et Sétif.

Il est limité au nord par les montages de Bibans et le plateau Sétifien, à l'Ouest par les hautes plaines algéroises, tandis qu'au sud et à l'Est, il est limité par l'Atlas saharien. Le relief du bassin est caractérisé par des séries de montagnes au nord et au sud autour d'une dépression naturelle dite Chott El Hodna presque plate d'une altitude de 400 m et d'une superficie de 1150 km² (Kebiche, 1993).

L'altitude des sommets des monts du Hodna diminuant de l'Est à l'Ouest avec une altitude qui oscille entre 1900 et 1000 m, tandis qu'au Sud quelques sommets seulement dans l'atlas Saharien atteignent 1200 m.

Selon l'agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH), le bassin du Hodna peut être divisé en 24 sous bassins.

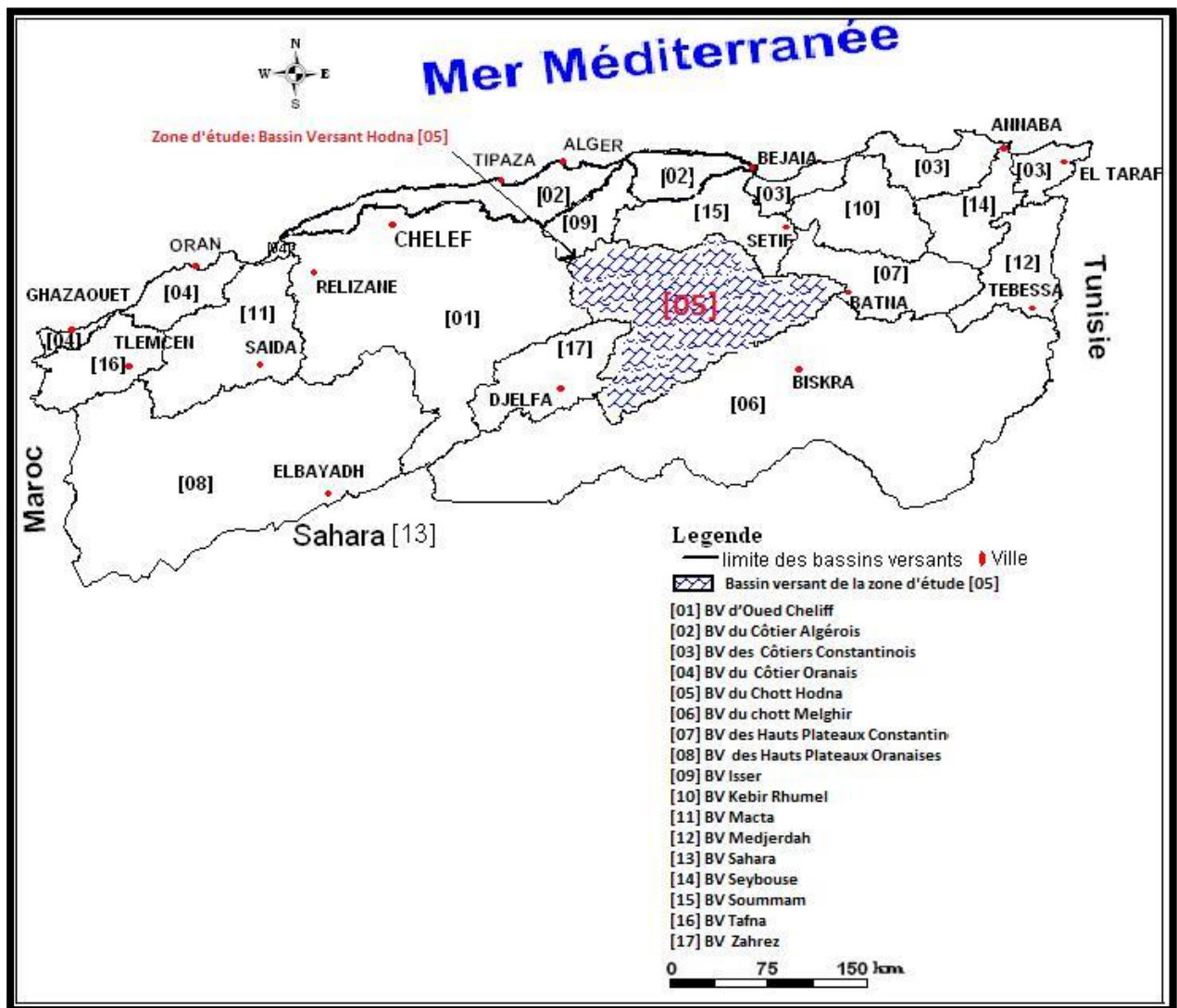


Figure I.1 La situation du bassin versant du Hodna

I.2.1 Relief :

Le relief est l'ensemble des irrégularités du sol qui se mesurent par rapport au niveau de la mer. Ces reliefs forment une barrière naturelle qui joue un rôle climatique et hydrologique important. Le bassin du Hodna est divisé en quatre unités géomorphologique :

La région montagneuse, la plaine du Hodna, le Chott Sebkhia et la région du R'mel. D'une altitude variable de 1400 à 1800 m qui relie l'atlastalien à l'atlas saharien, le Chott Sebkhia occupe une superficie 100 km². S'étire de Boussaada à M'doukal, la région du R'mel présente un paysage de dunes et de steppes sableuse.

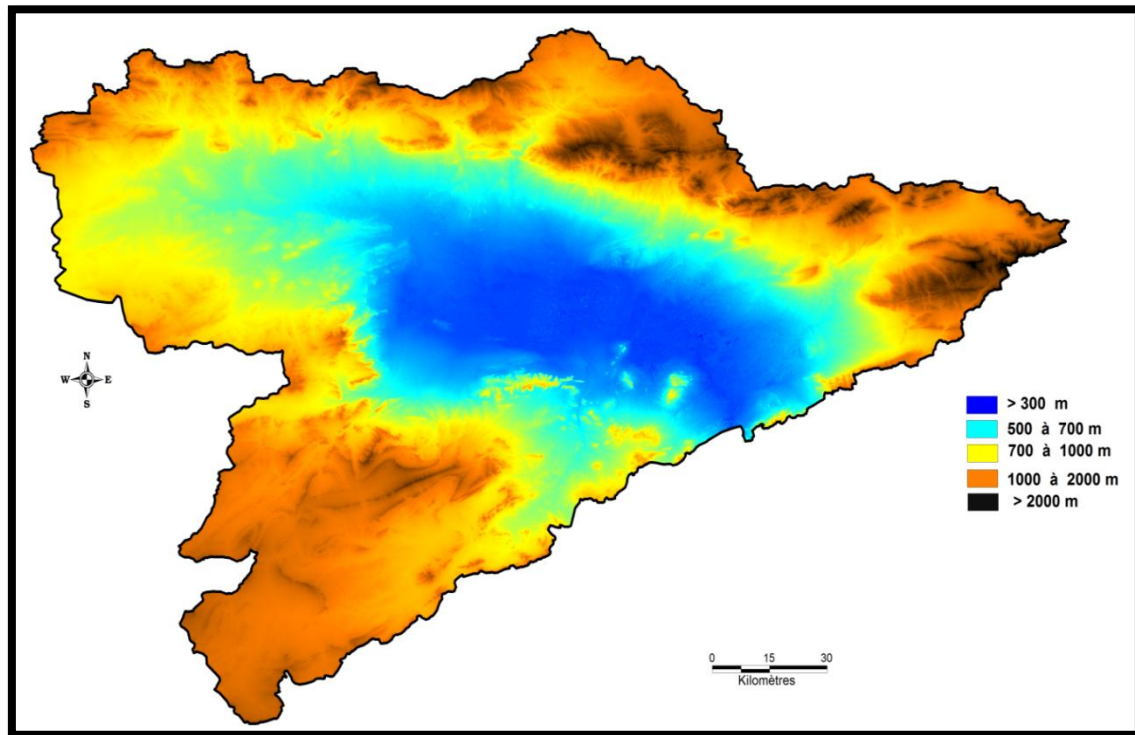


Figure I.2. Le relief du bassin versant du Hodna

I.2.2 Géologie :

La géologie du Hodna est assez complexe en raison de la position de la cuvette au contact des atlas tellien et Saharien.

Le substratum géologique, outre son importance dans le façonnement du relief, joue un rôle essentiel dans la distribution des sols comme matériaux originaux des sols (roche mer).

Le bâti géologique du Hodna comporte des formations d'âge secondaire, tertiaire et quaternaire.

La description lithologique du Hodna est obtenue essentiellement des travaux de Savorin (1920) et d'Emberger (1964) où on distingue :

- a. **Le trias :** dans les régions qui entourent la dépression du Hodna où les affleurements triasique sont assez nombreux mais n'apparaît qu'en certains points du bassin ; ils sont présentés principalement par des argiles, marnes et minéraux de néoformation, des lambeaux calcaro-dolomique, ainsi que des roches volcaniques.
- b. **Le jurassique et le carbonate :** occupants des surfaces réduites du bassin.
- c. **Le crétacé :** le crétacé inférieur présente une alternance de faciès marno-gréseux et argilo-gréseux de fortes épaisseurs.
- d. **Le Paléocène:** il présente en deux types de formation :

- **Formation autochtones** : représentées par l'éocène de faciès marnes et gypses à passées jaunâtre due à l'alternance de la pyrite.
 - **Formations allochtones** : qui sont les terrains argilo-marne-gypseux d'âge éocène et oligocène emballées de façon anarchique au miocène.
- e. **Le néogène** : il occupe une grande superficie du Hodna d'âge miocène inférieur et moyenne (marnes gris) et pliocène (plaine de M'sila).
- f. **Le quaternaire** : c'est l'âge pendant lequel ont été formés les chotts salés des hauts plateaux et de Sahara. Le quaternaire ancien est présenté par des dalles calcaires conglomératique surmontant localement des argiles sableuse roses.

La structure tectonique actuelle des monts du Hodna c'est formée au cours de diverses phases tectonique du système alpin de l'aire anticlinale de Meharga (sud de chott), avec orientation Est-West (épandages dépassant rarement 30°).

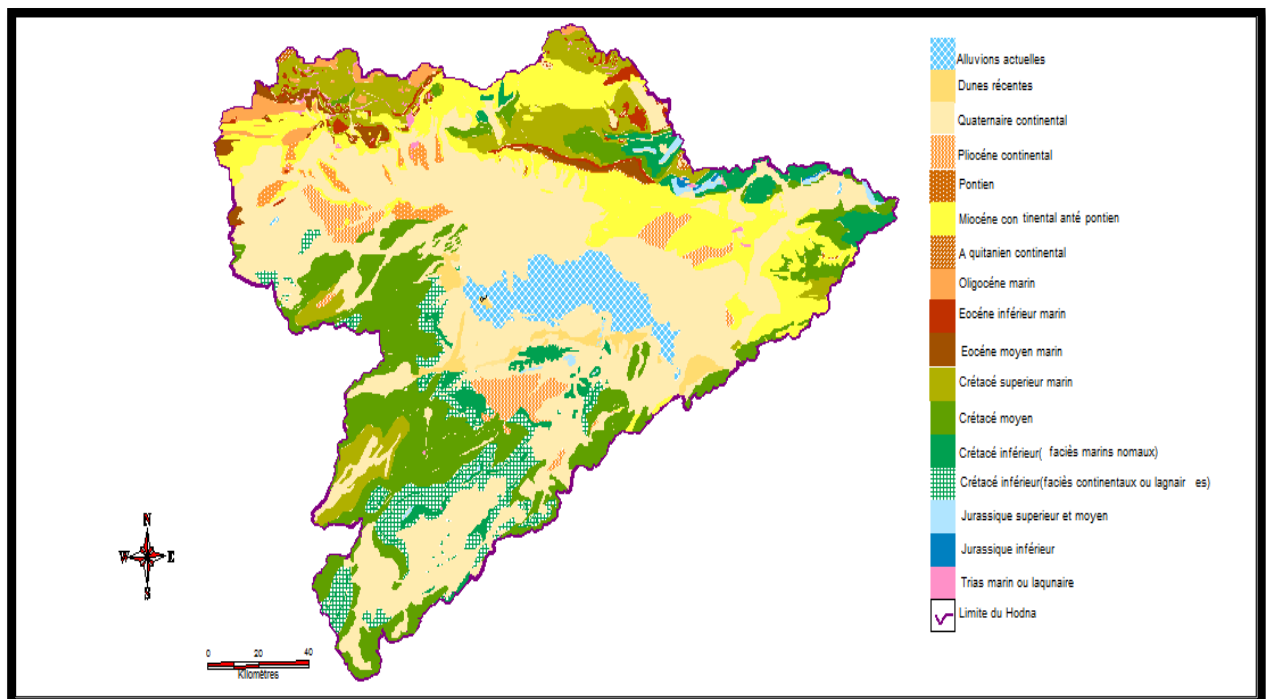


Figure I.3. La carte géologique du bassin versant du Hodna (Adoui, 2013)

I.2.3 Réseau hydrographique :

D'après ROCHE (1963) : le réseau hydrographique est l'ensemble des canaux de drainage naturels ou s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par des nappes souterraines soit sous forme de source, soit par restitution continue le long du lit du cours d'eau.

Le régime hydrologique du bassin du Hodna est lié au régime pluviométrique caractérisé par de fortes irrégularités. La pérennité des écoulements de surface (oueds) est très relative.

Oued El Ham à l'ouest, Oued Ksob au Nord, Oued Barika à l'Est et Oued M'sif au Sud sont des oueds pérennes ont des crues secondaires et fortes, les eaux se déversant dans le chotte du Hodna sont estimées à 150 hm^3 par an pour une année moyennement pluvieuse.

I.2.4 Climat :

C'est l'ensemble des conditions météorologiques d'une région, caractérisé par plusieurs paramètres climatiques qui sont les éléments déterminants de l'écoulement : la pluviométrie, la température, le vent et l'humidité.

- a. Pluviométrie :** est le facteur générateur de l'écoulement, son analyse nécessite tout d'abord la connaissance de l'état du réseau de mesure et de collecte de données.

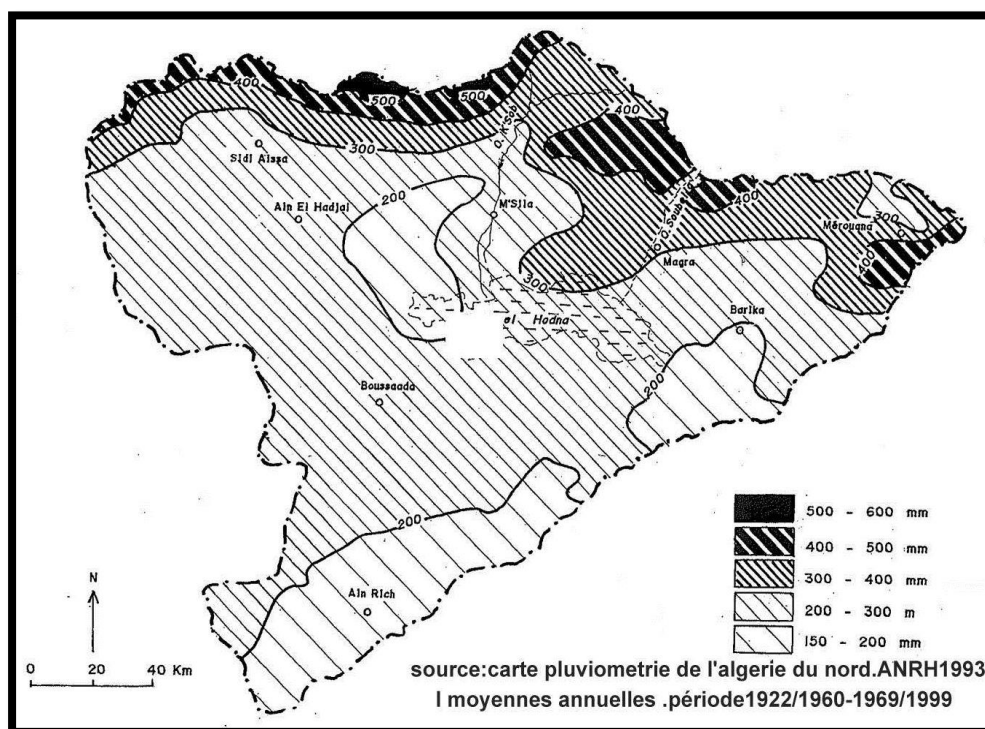


Figure I.4 Pluviométrie dans le bassin versant du Hodna.

- b. Température :** C'est une grandeur physique liée à la notion immédiate de chaud et froid. Il est lié essentiellement à l'altitude et les conditions locales. Dans le bassin de Hodna les températures maximales moyennes suivent en général une répartition géographique : en plaine entre 24°C et 27°C , dans les hauts plateaux et dans les zones d'altitude entre 19°C et 21°C . Les températures minimales moyennes varient entre 9°C et 12°C et entre 6°C et 9°C en plaine et en altitude respectivement.

Le gradient thermique annuelle en fonction de l'altitude est de $0,75^{\circ}\text{C}$ pour une augmentation de 100 m d'altitude, comparé au gradient moyen admis en Algérie qui est de $0,55^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (**Bouthelja, 2005**).

- c. **Le vent** : C'est un facteur favorisant l'évaporation, il transporte les couches d'air saturées qui sont près des surfaces de l'eau ou des sols pour être remplacées par des couches d'air plus au moins sec.

Les vents dominant sont ceux de l'ouest et du nord-ouest, ils sont fréquents pendant la période hivernale, et relayés par les vents du sud (sirocco) pendant la saison estivale (juin, juillet, août) avec un nombre de jours variant entre 25 et 34 par ans (**Bouthelja, 2005**).

D'après les données des deux stations climatiques de l'Office Nationale de Météorologie, à Ghezal (M'sila) et à Bordj Bou Arreridj, c'est dans la période allant d'avril à août que les moyennes mensuelles sont les plus élevées, avec des valeurs supérieures à $4,5\text{ m/s}$ à M'sila et 3 m/s à BBA. Les écarts entre les vitesses moyennes mensuelles, en plus de la moyenne annuelle (4.32 et 2.95 m/s) à M'sila sont plus importants qu'à BBA (**Grine, 2009**).

- d. **Humidité** : L'humidité de l'air joue un rôle dans l'évaporation. Plus l'air n'est moins humide, il est apte à absorber de l'humidité supplémentaire. Le bassin du Hodna est caractérisé par un climat méditerranéen semi-aride. Une pluviométrie d'automne, d'hiver et de printemps avec une fréquence d'averses printanières qui engendrent des crues violentes quelquefois accompagnées de grêle. Une sécheresse d'été marquée avec une irrégularité des précipitations dans l'espace et dans le temps Bouteldja(2005).

La pluviométrie moyenne annuelle est de 400 mm au Nord et de 200 mm au Sud.

Les températures maximales moyennes oscillent entre 24°C et 27°C en plaine, 19°C et 21°C dans les hauts plateaux et dans les zones d'altitude.

Les températures minimales moyennes varient entre 9°C et 12°C en plaine, 6°C et 9°C dans les zones d'altitude.

L'évapotranspiration potentielle annuelle calculée d'après la formule de Turc varie entre 1085 et 1362 mm ; pour la majeure partie du bassin elle est de 1250 mm environ.

L'évaporation moyenne annuelle mesurée à la station M'Sila (bac classe A américain) après sa correction pour l'évaporation sur de grande surface libre est de 2120 mm (**Hedjazi 2009**).

I.2.5 Couvert végétal :

Le couvert végétal influe beaucoup sur les quantités d'eau disponibles pour l'écoulement de surface. En effet, l'évapotranspiration par les végétaux est très importante, elle varie selon la nature des végétaux (forêts, cultures, prairies).

La répartition du couvert végétal et la part de chaque type de couvert dans chaque sous bassin versant dépend des caractéristiques physico-géographiques de chaque bassin, des caractéristiques climatiques qui en dérivent et de l'influence de l'action anthropique.

Pour le bassin du Hodna on distingue:

- ✓ Des superficies forestières dominantes Djebels Messaad (33 814ha), Medjedel (16 321ha), Slim (14 916ha), Maadhid (6 448ha), Hammam El Dalaa (16 819ha), Boussaâda (3 739ha) à base de Pin d'Alep et Genévrier de Phénicie.
- ✓ Des superficies agricoles dans la plaine de M'sila qui propice aux cultures maraîchères (15 125ha), aux céréales (741 945ha) et les arbres fruitiers (14 170ha) (**Bourenane, 2008**).

I.3 Conclusion :

La disposition des reliefs montagneux du nord et du sud organisent le bassin versant du Hodna autour d'une cuvette fermée, située à 400 m d'altitude, et qui reçoit l'écoulement des eaux superficielles et souterraines de cette région. Au fond de la cuvette, le chott El Hodna a une superficie de 1150 km².

Le réseau hydrographique du Hodna est irrégulier lié à son régime pluviométrique, ses oueds les plus principaux sont : El Ham, K'sob, Barika, Soubella, LougmaneSelmane et Berhoum ».

Le bassin versant du Hodna fait partie d'un vaste ensemble géologique et hydrogéologique qui va de l'Atlas Tellien au nord jusqu'au Grand Erg Oriental au sud.

La couverture végétale est pauvre, en exception de quelques régions limitées, les zones d'irrigation au niveau de la plaine de M'sila et au niveau des monts de Messaad, Maadhid, Hourane.

Les précipitations moyennes annuelles du bassin sont comprises entre 200 mm et 400 mm, et un volume d'ETP important.

Chapitre II

Description du bassin versant de Soubella

Chapitre II : Description du bassin versant de Soubella**II.1 Introduction :**

Après avoir défini le contexte géographique et géomorphologique du grand bassin de Hodna, nous définirons dans ce chapitre le contexte du sous bassin-versant Soubella

II.2 Généralité sur le Bassin versant de Soubella :**II.2.1 La situation géographique :**

Le site du barrage de Soubella est situé sur l'oued du même nom dans la commune de Magra (Wilaya de M'Sila), à environ 60 km à l'est de la ville de M'Sila et à 4 km au nord de la ville de Magra. Il est approximativement à la même distance au Sud de la ville de Sétif.

Le site du barrage est caractérisé par un verrou topographique très étroit à l'amont d'une zone habitée. Les rives calcaires sont particulièrement abruptes voire subverticales au droit du défilé. Cette gorge étroite s'ouvre sur une vaste plaine que l'oued Soubella traverse avant de se jeter dans le chott El Hodna.

La route nationale RN28 qui relie Magra à Setif permet d'accéder facilement au site. Le site est situé à l'amont immédiat du pont permettant à la RN28 de franchir l'oued Soubella, 3 à 4 km au nord de la ville de Magra.

Le site du barrage de Soubella a pour coordonnées UTM :

X = 694 499 m

Y = 3 952 558 m

Z = 725 m (fond de vallée)

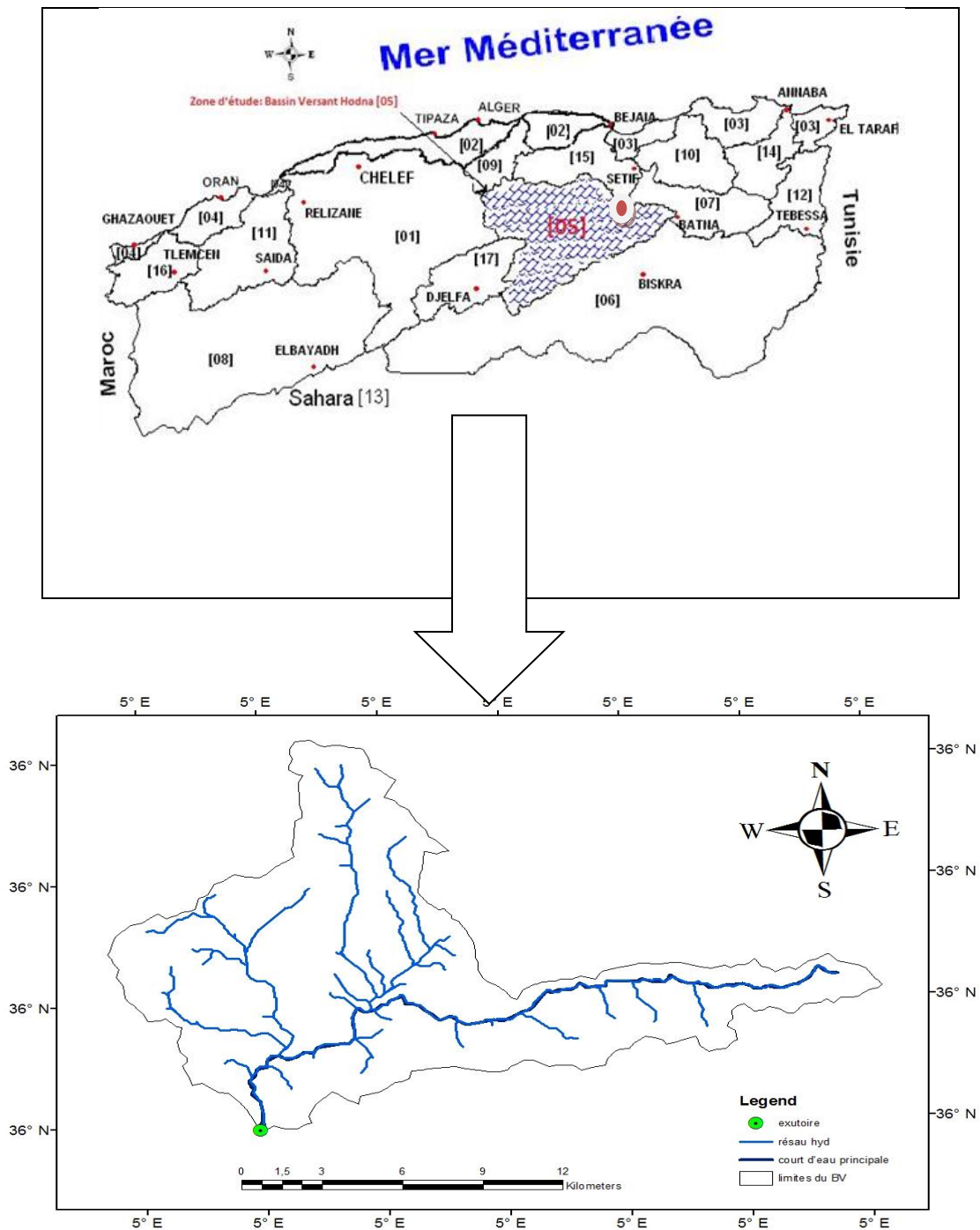


Figure II.1 Situation de bassin versant de Soubella

II.2.2 Relief :

Le relief est en général peu marqué dans la cuvette de la retenue. A l’amont du site du barrage, l’oued Soubella a entaillé son lit dans les sédiments marno - gréseux du Crétacé inférieur. A 2 km environ du site du barrage, à la cote 725 m, le fond de la vallée se situe à la cote 775 m. La vallée est bordée par les djebels Menadjel, en rive gauche, et Riba, en rive droite.

Allongés parallèlement à l’oued, les deux djebels culminent à 1000 - 1100 m. Le profil transversal de la vallée est dissymétrique et variable, au gré des variations lithologiques et des

structures géologiques. A l'aval du site du barrage, le lit de l'oued Soubella s'élargit. Dans la partie basse, les versants ont des pentes douces, légèrement plus fortes en rive droite par rapport à la rive gauche. Le haut des versants est dominé par des falaises calcaires.

II.2.3 Aperçu général sur la géologie :

La lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les matériaux géologiques se distinguent en formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grés, calcaires, dolomies, ...).

La nature des affleurements a une influence sur l'hydrologie de surface et le type du dépôt alluvionnaire. L'aspect actuel de notre région d'étude est d'une longue évolution géologie que où le rôle prépondérant des monts du Bou Taleb est apparu très tôt.

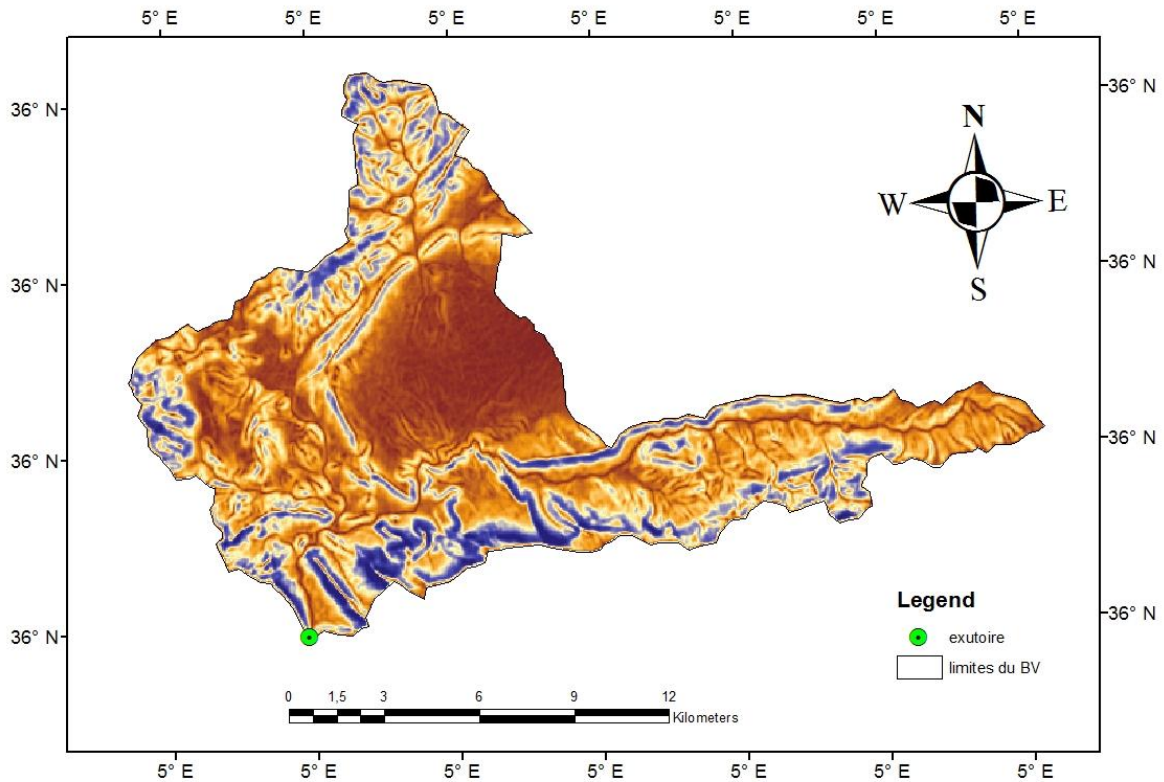


Figure II.2 Carte géologique du bassin de Soubella.

a. Tectonique:

Au Sud, sur les structures du chott el Hammam, la partie centrale correspond à un vaste synclinal qui s'ouvre largement vers l'ouest où il forme le bassin de M'sila, et qui se raccorde à l'Est au synclinorium de Barika par l'intermédiaire du synclinal de Magra.

La structure anticlinale du chott el Hammam présente également un grand intérêt. En surface l'anticlinal qui s'amortie vers l'Est est flanquée au sud par un deuxième anticlinal d'extension plus réduite.

On note ainsi une très nette disharmonie entre la structure miocène et son substratum qui prend l'allure d'un véritable horst, l'ensemble ressemblent beaucoup à ce que l'on peut observer sur le massif voisin du Bou Taleb.

Un accident très important limite à l'est le Djebel EL Hammam. En surface il se traduit par une série de décrochement affectant le Miocène supérieur à proximité de Djebel Ras Tannar, les niveaux de base du Miocène. Les failles limitant à l'Ouest l'extrusion du Djebel Soubella appartiennent à la même famille.

Il faut signaler enfin la faille inverse du l'oued Soubella, qui bien que présentant un faible rejet, n'en est pas moins très importante puisqu'elle démontre l'existence de poussées dirigées du sud vers le nord. Si on rencontre ailleurs dans les Monts du Hodna quelques autres failles de ce type, les effets des poussées Nord -Sud sont tout de même dominants.

II.2.4 Lithologie de bassin versant de l'oued Soubella :

- **La stratigraphie :**

- **Le TRIAS -t :**

A l'El Hama on observe un vaste affleurement d'argiles à gypse gris, à passées bariolées.

Ces argiles ne représentent aucune trace de stratification et elles renferment quelques blocs de dolomie.

Certains sont volumineux et brunâtres, probablement arrachés au crétacé inférieur, d'autres beaucoup plus réduits et noirâtres, doivent appartenir à l'infralias.

Il s'agit là d'un nouveau « complexe triasique » analogue à ceux décrits ailleurs dans les monts du Hodna ou le plein de Barika.

- **LE JURASSIQUE ET LE CARBONATE :**

Occupants des surfaces réduites du bassin.

- **DOGER - j^{1-4b} :**

Sur le flanc sud du Djebel Soubella, on observe au-dessus des marnes du toarcien moyen un gros banc de calcaire à silex puis une alternance de marnes et de calcaires gris, à silex

également deux couches rouges noduleuses, s'intercalent dans cette série qui se termine par un niveau bréchi que calcaire.

A l'oued de El Hammam, le jurassique moyen débute par quelques gros bancs de calcaire gris -bleuté à nodules et lits siliceux.

Les bancs supérieurs renferment des Ammonites et des Bélemnites.

Enfin, nous avons rattaché à ces niveaux un petit affleurement de calcaire à silex situé à proximité de Tebouda et probablement emballé dans l'extrusion triasique d'El Hama.

➤ **TITHONIQUE, BERRIASIEN - j⁶ - n¹ :**

Dans le massif Bou Taleb -Soubella, le Berriasien débiterait par des calcaires sublithographiques.

• **LA CRETACE :**

Le crétacé supérieur représenté par :

➤ **VALANGINIEN -n²:**

Dans la vallée de l'Oued Soubella cet étage est également épais, il lui correspond de marnes gris -verdâtre à petites passées gréseuses.

➤ **LE CRETACE INFÉRIEUR -n^d:**

Nous avons rapporté à la crétacée inférieure des bancs discontinus dolomitiques dans l'extrusion triasique d'el Hama ; il ne nous a pas été possible de préciser s'il s'agissait d'Hauterivien ou plus probablement d'Aptien supérieur.

➤ **CENOANIEN SUPERIEUR, TURONIEN -c²**

Les calcaires, souvent dolomitisés, qui forment une crête topographique nette et assez constante au -dessus de la dépression cénomanienn e ont été attribués au cénomanienn supérieur et au turonien par suite de leur position stratigraphie que car ils ne renferment pas de faune caractéristique.

Mais il est possible que le Turonien soit réduit à sa partie inférieure ou même qu'il ne soit pas représenté comme c'est le cas sur le massif voisin du Bou Taleb.

• **TERTIAIRE :**

➤ **Pliocène inférieur_ m3b**

La limite inférieure du villafranchien est souvent difficile à fixer avec précision car des horizons conglomératiques apparaissent au sommet de la série marno - gréseuse pliocènes. En particulier, il est possible que les premiers niveaux gréseux à galets abondants que l'on observe de la base de l'oued Soubella.

• **LE QUATERNAIRE :**

L'important soulèvement de la partie centrale des monts du Hodna au Moi - pliocène s'est accompagné d'une violente érosion qui a continué durant le Quaternaire. Le matériel détritique ainsi formé a été entraîné par les oueds vers la dépression du Chott el Hodna.

➤ **MOULOUYEN_q¹:**

Dans le secteur montagneux de la partie nord -orientale de la carte. Les oueds Soubella et El Hammam sont encaissés dans de glaciaires -terrasses.

➤ **LES TRAVERTINS_T :**

Des formations de travertins s'observent à divers niveaux à l'aval de Oued Hammam. De même que quelques affleurements témoignent de l'existence de sources maintenant disparues dans la vallée de l'oued Soubella.

L'oued Soubella et son affluent, l'oued el Hammam, présente un écoulement superficiel pérenne qui diminue de l'amont vers l'aval.

Quelques sources prennent naissance en montagne à la base des talus d'éboulis provenant des falaises calcaires -dolomitiques, mais leur débit est très faible.

Les sources qui fournissent des eaux thermales, à l'Ain Skhouna, qui donne naissance à l'oued el Hammam, provient des calcaires du Dogger, ses eaux très chaudes (65°C environ), légèrement sulfureuses et ferrugineuses, ont été sommairement captées pour alimenter des bains primitifs. L'oued Soubella est issue des calcaires de base du Miocène, affectés ici par une faille inverse qui a permis une remontée d'eaux tièdes et un peu sulfureuses.

Sur les piémonts, on observe fréquemment des points d'eau à la base des glaciaires, en particulier lorsque des niveaux gréseux s'intercalent dans les marnes miocènes, mais les débits sont très faibles et les eaux sont chargées (sulfatées magnésiennes).

II.2.5 Le couvert végétal :

La répartition du couvert végétal dépend des caractéristiques physico-géographiques du bassin, des caractéristiques climatiques et de l'influence de l'action anthropique.

Le bassin versant de Soubella, présente une couverture végétale floristique plus importante, soit 60% de la surface bassin.

Cette prédominance s'explique par la présence de reliefs montagneux importants (Djebel Soubella, djebel Menadjel, djebel el Ketaf.....).

D'autre part, les terres cultivables représentent 24% et le reste soit 16% de la surface du bassin représente les surfaces mal protégées car les terrains sont très limités et les conditions

pédoclimatiques (pente et épaisseur des sols, précipitation et températures) sont encore favorables aux pratiques de la céréaliculture traditionnelle.

II.3 Conclusion :

Nous pouvons déduire comme résumé qu'il y a une grande complexité dans la structure géologique et une distinction claire dans l'alimentation en eau, la lithologie et dans la répartition de la couverture végétale, ce qui présente un domaine où la dynamique prend un comportement distingué.

Chapitre III

**Caractéristiques
morphométriques du
bassin-versant de Soubella**

Chapitre III : Caractéristiques morphométriques du bassin-versant de Soubella

III.1 Introduction

La réponse hydrologique peut être le résultat de l'interaction de plusieurs facteurs. La pente favorise le ruissèlement et le déclenchement des phénomènes érosif. L'hypsométrie joue un rôle très important dans l'érosion, lorsque l'altitude augmente la pluie s'élève d'une façon générale en fonction de l'exposition, ce qui donne à notre bassin une pluviosité et un écoulement importants. Ainsi la forme du bassin aide à la réponse rapide de l'écoulement. Dans ce chapitre ces caractéristiques seront déterminées dans le bassin-versant de Soubella.

III.2 Caractéristiques de la disposition dans le plan

III.2.1 Surface

La surface du bassin-versant est la caractéristique la plus importante, elle s'obtient par planimétrage sur une carte topographique après que l'on y ait tracé les limites topographiques. Dans notre cas, la surface du bassin-versant de Soubella a été mesurée grâce au logiciel Arc Gis, Elle est de l'ordre : **A= 184,96 Km²**.

III.2.2 Longueur

On utilise différentes caractéristiques de longueur ; Parmi ces dernières on cite :

III.2.2.1 Périmètre

Le périmètre du bassin-versant est la longueur de la ligne de partage des eaux. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels de dessin cités précédemment.

Dans notre étude, le périmètre du B.V de Soubella mesuré par Arc Gis est de **P= 90,93Km**.

III.2.2.2 Longueur du bassin versant

C'est la ligne droite qui relie l'exutoire et le point le plus éloigné situé à l'amont du bassin. Pour le Bassin de Soubella elle est : **L_{BV} =24.32 Km**.

III.2.2.3 Longueur du talweg principal

On admet qu'il faut poursuivre le thalweg indiqué sur les cartes topographiques, vers l'amont jusqu'à la limite du bassin. De même, si la partie avale présente des méandres, on curvimètre généralement tous les méandres.

La longueur du talweg principal du B.V Soubella en utilisant Arc Gis est de **L=30.37Km**.

III.2.2.4 Largeur du bassin-versant

Elle se définit comme la plus grande largeur (l) perpendiculaire à la plus grande longueur (L). Elle peut être également calculée par la relation suivante :

$$l = \frac{S}{L_{BV}} \dots \dots \dots (III.01)$$

S : superficie du bassin-versant en Km².

L_{BV} : longueur du bassin-versant en Km.

Pour le B.V de Soubella, elle est égale : l=7.61 km.

III.2.2.5 Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité (K_G) renseigne sur la forme du bassin-versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout, sur l'allure de l'Hydrogramme à l'exutoire du bassin. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle ayant la même surface du bassin.

Il s'exprime comme suit :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{A}\pi} \approx 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots \dots \dots (III.02)$$

Avec :

K_G: Indice de compacité de Gravelius

P : Périmètre du bassin-versant en km.

A: Superficie du bassin-versant en km².

* Lorsque K_G est proche de 1 le bassin-versant est de forme quasiment circulaire

* Lorsque le K_G supérieur à 1 bassin-versant est de forme allongée.

Un bassin-versant circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé.

Le coefficient de du B.V de soubella est : **K_G=1,87**.

Alors la forme du bassin-versant de soubella est bassin allongé.

III.3 Caractéristiques des altitudes (hypsométrie)

III.3.1 Altitudes maximales et minimales

Elles sont obtenues directement à partir des cartes topographiques.

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin : **Z_{MAX}=1884 m**

L'altitude minimale considère le point le plus bas : $Z_{MIN}=722$ m

III.3.2 Courbe hypsométrique

L'étude statistique permet de tracer la 'courbe hypsométrique'. Cette courbe donne la surface du bassin-versant (en km² ou en % de la surface totale) où les altitudes sont supérieures à une côte donnée 'h'. Cette courbe est établie en planimétrant pour différentes altitudes les surfaces situées au-dessus de la courbe de niveau correspondante.

Pour déterminer les altitudes et les courbes de niveau, les surfaces entre chaque deux courbe de niveaux successives du bassin-versant ont été mesurées par digitalisation en utilisant le logiciel Arc Gis. Les résultats des surfaces partielles du bassin-versant de Soubella sont présentés dans la figure III.1 et le tableau III.1.

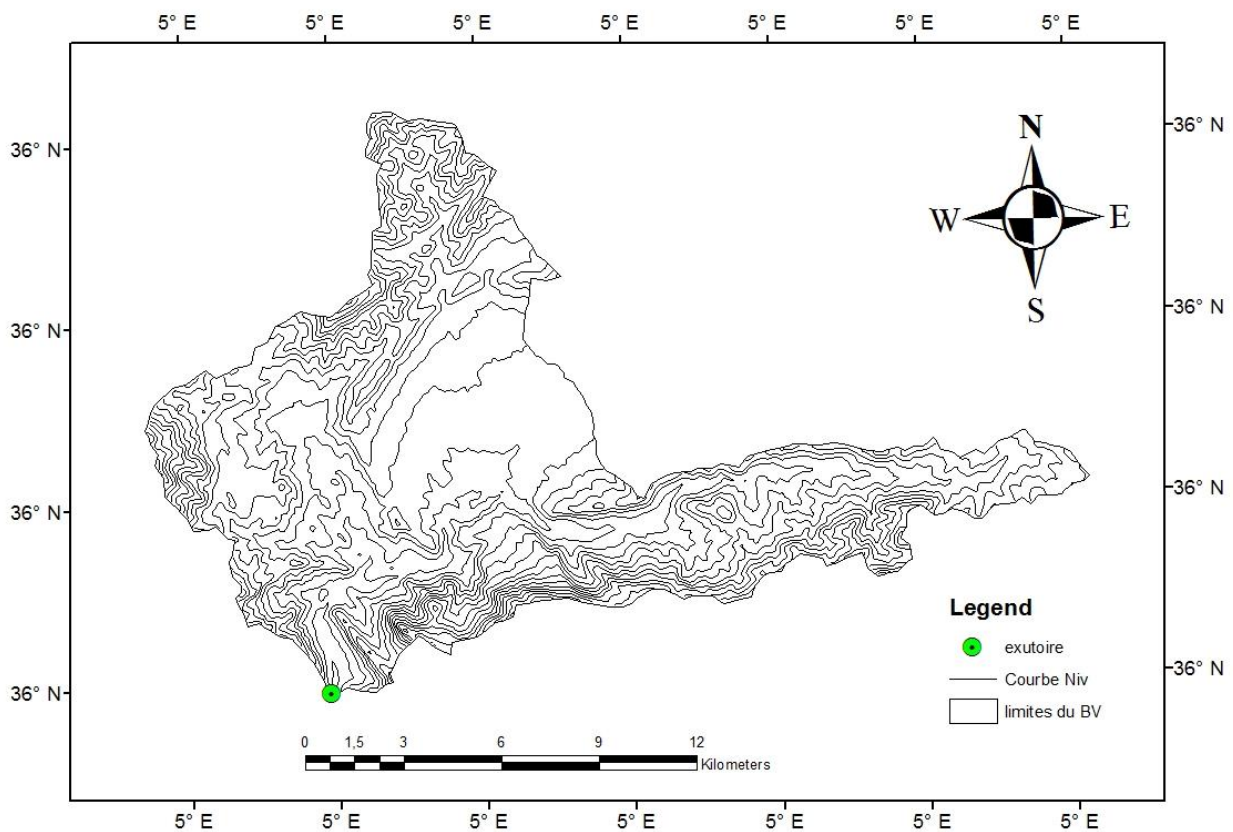


Figure III.1 Carte topographique du bassin-versant de Soubella

Tableau III.1 Répartition des surfaces partielles par rapport aux altitudes pour le bassin de l'oued de Soubella

Altitude 'm'	Born supérieur en 'm'	Surfaces partielle		Surfaces cumulée	
		en km ²	en %	en km ²	en %
1884-1800	1884	1,25	0,6758218	1,25	0,6758218
1800-1700	1800	2,3	1,24351211	3,55	1,9193339
1700-1600	1700	2,9	1,56790657	6,45	3,4872405
1600-1500	1600	13,4	7,24480969	19,85	10,73205
1500-1400	1500	13,8	7,46107266	33,65	18,193123
1400-1300	1400	20,1	10,8672145	53,75	29,060337
1300-1200	1300	26,6	14,3814879	80,35	43,441825
1200-1100	1200	38,2	20,6531142	118,55	64,094939
1100-1000	1100	51,3	27,7357266	169,85	91,830666
1000-900	1000	6,6	3,5683391	176,45	95,399005
900-800	900	4,7	2,54108997	181,15	97,940095
800-722	800	3,81	2,05990484	184,96	100

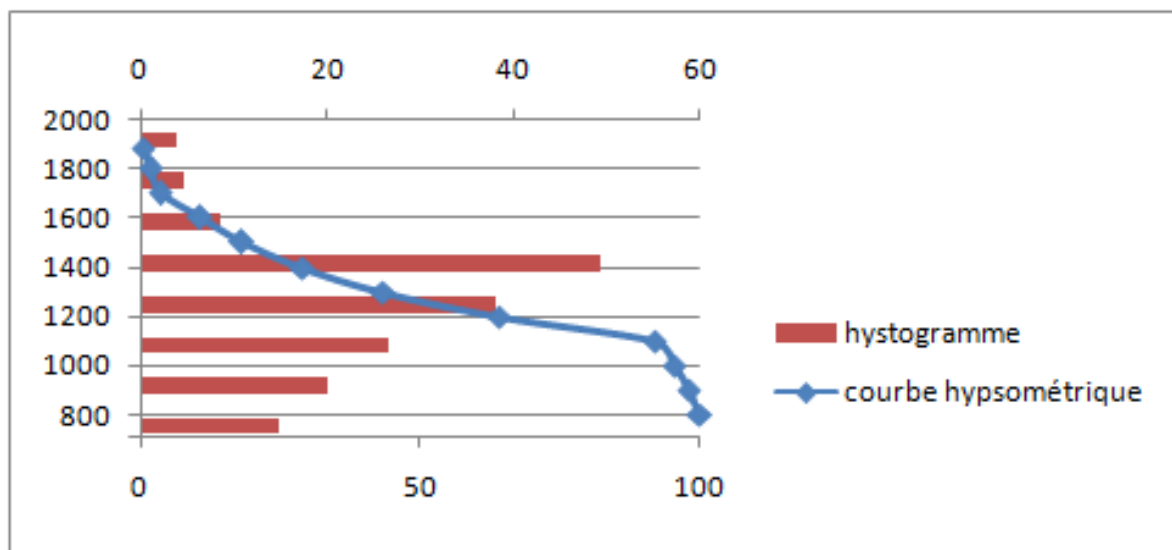


Figure III.2 Courbe hypsométrique et digramme de fréquence

Apartir de cette courbe, on détermine :

- ✓ l'altitude à 95% de la surface $Z_{95\%} = 1020 \text{ m}$
- ✓ l'altitude médiane $Z_{50\%} = 1200 \text{ m}$
- ✓ l'altitude à 5% de la surface $Z_{5\%} = 1670 \text{ m}$.

L'altitude moyenne est définie aussi par la formule suivante :

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{S_i \cdot H_i}{S_{\text{BV}}} \dots \dots \dots \text{(III.03)}$$

D'où :

A : surface totale du bassin-versant ;

A_i : surface partielle ;

H_i : L'altitude moyenne entre deux courbes de niveau.

Tableau III.2 Détermination de l'altitude moyenne du bassin-versant de l'oued de Soubella

Altitude (m)	H moy (m)	Si (Km2)	(SI*Hmoy)/S
1884-1800	1842	1,25	12,448
1800-1700	1750	2,3	21,761
1700-1600	1650	4,9	43,712
1600-1500	1550	10,4	87,153
1500-1400	1450	14,8	116,025
1400-1300	1350	20,1	146,707
1300-1200	1250	26,6	179,768
1200-1100	1150	38,2	237,510
1100-1000	1050	49,3	279,871
1000-900	950	8,6	44,171
900-800	850	4,7	21,599
800-722	761	3,81	15,675
Somme		184,96	1206
		H moy	1206

On prend: $H_{\text{moy}}=1206$

III.3.3 Dénivelée simple

On définit la « dénivelée D » comme étant la différence de cote entre $Z_{5\%}$ et $Z_{95\%}$;

Celles-ci sont lues sur la courbe hypsométrique.

$$D = Z_{5\%} - Z_{95\%} \dots \dots \dots \text{(III.04)}$$

Pour le bassin-versant de soubella on trouve : $D = 650\text{m}$;

III.3.4 Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et par conséquent la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux côtés du rectangle équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau.

Plus un rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes:

✓ **Démonstration (Roche, 1963)**

$$K = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots \dots \dots (III.05)$$

Dans ce cas pour le bassin de Soubella : **k=1,87**

$$2(L + l) = P = \frac{K\sqrt{A}}{0.28}$$

$$L.l = A$$

D'où
$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right]$$

$$l = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right]$$

On aura:

La longueur :

$$L_{\text{rec}} = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right] \dots \dots \dots (III.06)$$

Pour le bassin de Soubella, la longueur du rectangle équivalent est égale: **L_{rec}=37.27km**

La largeur :

$$l = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right] \dots \dots \dots (III.07)$$

La largeur du rectangle équivalent du Bassin Soubella est égale : **l=13.37Km** ;

Tableau III.3 Répartition des surfaces partielles dans rectangle équivalent de l'oued de Soubella.

Surface partielle(A _i) en km ²	Longueur partielle L _i en km	Larguer 'l'en km
1,25	0,2520	4.96
2,3	0,4637	
4,9	0,9879	
10,4	2,0968	
14,8	2,9839	
20,1	4,0524	
26,6	5,3629	
38,2	7,7016	
49,3	9,9395	
8,6	1,7339	
4,7	0,9476	
3,81	0,7681	

III.4 Indice de pentes

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin-versant et de comparer les bassins versant entre eux. La carte des pentes est l'instrument qui permet de visualiser les nuances topographiques à l'intérieur de l'espace étudié; elle peut être établie à partir des cartes topographiques d'échelle > 1/100000.

III.4.1 Pente moyenne

C'est une caractéristique importante des bassins versants qui renseigne sur la topographie du bassin. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Elles influent sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant.

En effet, plus la pente est forte, plus la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible, par conséquent, le bassin réagira d'une façon rapide aux averses. Les pentes fortes à très fortes peuvent produire des écoulements de nature torrentielle qui sont à l'origine des crues dévastatrices.

La pente moyenne du bassin-versant est donnée par Roche(1963)comme étant la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires pour lesquelles on peut considérer que la ligne de plus grande pente est constante. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$i_m = \frac{D.L}{A} \dots \dots \dots (III.08)$$

Avec :

i_m : Pente moyenne du bassin-versant en [m /Km]

L : longueur totale des courbes de niveau en [km]

$L=335\text{km}$

D : équidistance entre deux courbes consécutives en [m]

$D= 1000-900=100\text{ m}$

A : Surface totale en [km²]

$A=184.96\text{ km}^2$

La pente moyenne du bassin-versant de l'oued de Soubella est : $i_m = \frac{100 \cdot 10^{-3} \cdot 335}{184.96}$, ***im 18.21%***

III.4.2 Indice de pente globale I_g

$$I_g = D/L = (H5\% - H95\%) / L$$

$H5\%$ et $H95\%$ sont les altitudes correspondantes à 5% et à 95% de la surface du bassin-versant ; respectivement

$H5\% = 1670\text{m}$

$H95\% = 1020\text{m}$

L_r : longueur du rectangle équivalent

$$I_g = 1.74\%$$

III.4.3 Dénivelée spécifique

L'indice I_g décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes. La dénivelée spécifique D_s ne présente pas cet inconvénient :

$$D_s = I_g \sqrt{A} = \frac{D}{L} \sqrt{L \cdot l} = D \sqrt{\frac{l}{L}} \dots \dots \dots (III.10)$$

La dénivelée spécifique ne dépend donc que de l'hypsométrie ($D = Z_{5\%} - Z_{95\%}$) et de la forme du bassin (l/L).

Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M, indépendante des surfaces des bassins :

Tableau III.4 Deuxième classification d'après Office de la recherche scientifique et technique outre-mer 'O.R.S.T.O.M'

R 1	Relief très faible	$D_s < 10 \text{ m}$
R 2	Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$
R 3	Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$
R 4	Relief modéré	$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$
R 5	Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$
R 6	Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$
R 7	Relief très fort	$500 \text{ m} < D_s$

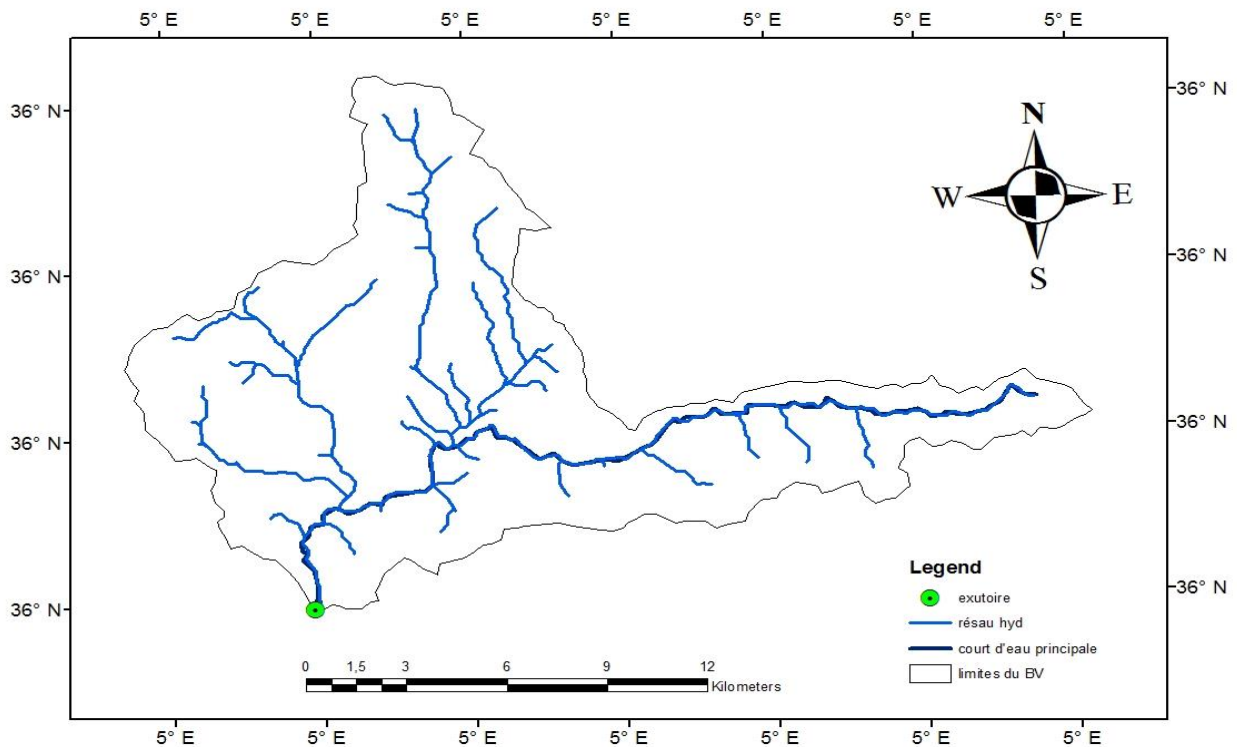
Pour le B.V de l'oued Soubella la dénivelée spécifique est : $D_s=23.66 \text{ m}$. D'après la classification de l'O.R.S.T.O.M, notre bassin-versant présente un **Relief faible (R₂)**, car : $10\text{m} < D_s < 25 \text{ m}$

III.5 Caractéristiques du réseau hydrographique

III.5.1 Réseau hydrographique du bassin-versant de l'oued Soubella :

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin, Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes.

$n + n = n + 1$ et $n + m = \max (n.m)$. À l'aide du Logiciel **ArcGis** on a trouvé que le bassin-versant de l'oued de Soubella est de l'ordre 4

**Figure III.3** Carte du réseau hydrographique du bassin-versant de Soubella.

III.5.2 Profil longitudinal d'un cours d'eau principal

Ce profil est établi en portant en abscisses les longueurs développées du lit de la rivière à partir d'un point de référence (exutoire) et en ordonnées les cotes de l'eau dans le cours d'eau principal et de ces affluents (parfois, on donne la cote du font). Ce relevé se fait, soit par nivellement sur le terrain, soit plus sommairement à partir des cartes topographiques.

Le profil en long d'un cours d'eau est un graphique représentant les différentes élévations du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'exutoire.

Les profils en long permettent d'estimer la pente moyenne du cours d'eau qui sert surtout à évaluer les temps de concentration d'un bassin versant, ce dernier étant lié à la vitesse de propagation des particules fines ; elle-même proportionnelle à \sqrt{I} .

On calcule généralement la pente moyenne I d'un cours d'eau par la formule suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{I}} = \frac{1}{L_{cp}} \sum_{j=1}^n \frac{l_j}{\sqrt{i_j}} \dots\dots\dots(III.11)$$

I : pente moyenne du cours d'eau principal

L_{cp} : longueur totale du cours d'eau principal

l_j : longueur d'un tronçon j du cours d'eau principal

i_j : différence d'altitude du tronçon j

Pour notre cas, on mesure la longueur totale et des tronçons par des techniques digitalisations « ArcGis »; la pente moyenne du cours d'eau principal du B.V de Soubella est égale : $I=0.25\%$

Indice de pente brute

$$I = \left(\frac{H_{Maxcp} - H_{MIN}}{L_{CP}} \right)$$

H_{maxcp} : Altitude maximale du cours d'eau principal (m NGA)

H_{min} : Altitude minimale du bassin-versant (m NGA).

AN: $H_{maxcp} = 1800m$ $H_{min} = 722m$

$$I = \left(\frac{1800 - 722}{37.27} \right) = 28.92 \%$$

III.5.3 Degré de développement du réseau hydrographique

➤ Densité de drainage

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle se définit pour un bassin-versant donné, de superficie A, comme étant le rapport de la longueur totale des cours d'eau d'ordre quelconque sur la superficie totale A du bassin versant. La densité de drainage est exprimée en km/km² ou en km⁻¹.

Soit :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \dots \dots \dots (III.12)$$

Avec :

L_i : Longueur totale des cours d'eau en km ;

A : Superficie du bassin-versant en km² ;

La longueur totale des cours d'eau du B.V de l'oued de Soubella est de : $\sum L_i = 116,93 \text{ Km}$;

Et leur surface A = 184.96 Km² ;

Donc : **$D_d = 0.63 \text{ Km}^{-1}$** .

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin-versant dans une certaine mesure et des conditions climatiques et atmosphériques. En effet, les secteurs situés en zones de roches perméables ont en général des densités de drainage faibles, alors que les secteurs de roches imperméables ont des densités plus élevées.

Selon Schumm, la valeur inverse de la densité de drainage, $C = 1/D_d$ s'appelle «**constante de stabilité du cours d'eau**». Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire section du réseau). Ce paramètre est lié à la dynamique du bassin versant, à la stabilité du réseau hydrographique et au type de ruissellement de surface. Pour notre cas est : **$C = 1.59 \text{ Km}$** .

III.5.4 Rapports de confluence et de longueur

Sur la base de la classification des cours d'eau, Horton(1932) et Schumm (1956) ont établi différentes lois. Ces « lois » empiriques relient le nombre, la longueur moyenne et l'ordre des cours d'eau :

- ✓ Loi des nombres : $R_c = \frac{N_i}{N_{i+1}}$
- ✓ Loi des longueurs : $R_L = \frac{L_i}{L_{i+1}}$

R_c : rapport de confluence des cours d'eau ;

R_L : rapport des longueurs des cours d'eau ;

i : ordre d'un cours d'eau i qui varie entre 1 et n (n est l'ordre du cours d'eau principal classification selon Strahler)

N_i : nombre du cours d'eau d'ordre i

N_{i+1} : nombre du cours d'eau suivant

L_i : longueur moyenne des cours d'eau d'ordre i

L_{i+1} : longueur moyenne de cours d'eau d'ordre $i+1$

Le rapport de confluence est un nombre sans dimension exprimant le développement du réseau de drainage, il varie suivant l'ordre considéré. C'est un élément établi des corrélations d'une région à une autre. Selon HORTON (1945) portant à considérer pour, le RB varie de 3 à 5 pour une région où la géologie n'a aucune influence. Pour le bassin de Soubella ces rapports sont donnés comme suit:

$$R_c=4.66 \quad R_L=2.11$$

a) Coefficient d'élanement

$$C_E = \frac{2\sqrt{A/\pi}}{L_{\max}} \dots\dots\dots(III.14)$$

Où :

L_{\max} : longueur maximale du bassin versant. Elle s'obtient en prolongeant le cours d'eau principal au point le plus éloigné possible du bassin-versant et on mesure la longueur de l'exutoire jusqu'à ce point, $L_{\max} = 44.47\text{Km}$.

A : surface du bassin-versant

C_E : c'est un coefficient variable : pour un bassin-versant plat $C_E=1$

Et $C_E= 0.6$ pour un bassin à relief accentué

Pour le bassin de l'oued de Soubella: $C_E = 0.6$

Alors le bassin-versant de **Soubella est à relief accentué.**

b) Coefficient de torrentialité

Ce coefficient donne une idée sur la densité des drains d'ordre 1. Donc il prend en considération la densité de drainage et la densité des talwegs élémentaires (ordre 1). Le coefficient de torrentialité peut être déterminé par la formule suivante :

$$C_t = F_1 \times D_d \dots\dots\dots(III.15)$$

$$F_1 = 1.567$$

Pour le bassin de Soubella, $C_t = 1.567 \times 1.87 = 0.29 \text{ Km}^{-1}$.

c) Temps de concentration

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau tombée à un point élevé du bassin versant, pour atteindre l'exutoire, il est exprimé par plusieurs formules, Parmi ces plusieurs formules proposées dans la littérature, on utilise **la formule de GIANDOTTI** :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L_p}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \dots\dots\dots(III.16)$$

Avec :

L_p : longueur du talweg principal (Km).

A : surface du bassin versant (km^2).

H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant (m).

H_{min} : altitude minimale du bassin versant (m).

Après une application numérique on trouve: $T_c = 5.87$ Heur

III.5.5 Vitesse d'écoulement de l'eau

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_e = \frac{L}{T_c} \dots\dots\dots(III.20)$$

Avec :

V_e : Vitesse d'écoulement de l'eau [m /s].

L : longueur de talwegs principale en [m] ou bien la longueur des cours d'eau principale.

T_c : temps de concentration en [s].

Donc : La vitesse d'écoulement du bassin de Soubella est égale : $V_e = 5.17 \text{Km/h}$

Nous récapitulons les caractéristiques morphométriques du bassin-versant de Soubella dans le tableau suivant :

Tableau III.5 Caractéristiques morphométriques du bassin-versant de Soubella.

Caractéristiques morphométriques et hydrographiques	Résultat	Unité	Observation
Surface	184.96	Km ²	-----
Périmètre	90.93	Km	-----
Longueur du bassin-versant : "L _{BV}	24.32	Km	-----
Longueur du talweg principal : " L _{CP}	30.37	Km	-----
Longueur maximale L _{max}	44.47	Km	-----
Largeur du bassin versant	4.16	Km	-----
Indice de compacité de Gravelius	1.87	m	forme allongée
L'altitude maximale	1884	m	-----
L'altitude minimale	722	m	-----
l'altitude à 95%	1020	m	-----
l'altitude à 50%	1200	m	-----
l'altitude à 5%	1670	m	-----
L'altitude moyenne	1206	m	-----
La dénivelée simple D	650	m	-----
Longueur du rectangle équivalent	37.27	Km	-----
Largeur du rectangle équivalent	4.96	Km	-----
Pente moyenne	18.21	%	-----
Dénivelée spécifique D _s	23.66	---	Relief faible
pente moyenne d'un cours d'eau principal	0.25	%	-----
Densité de drainage D _d	0.63	Km ⁻¹	Moins dense
La densité hydrographique : F	1.567	Km ⁻²	-----
rapport de confluence des cours d'eau	4.66	---	-----
rapport des longueurs des cours d'eau	2.11	---	-----
Le coefficient d'élancement : CE	0.6	---	Relief accentuée
Coefficient de torrencialité : Ct	0.29	Km ⁻¹	-----
Temps de concentration	5.87	heure	-----
Vitesse de l'écoulement de l'eau : V _e	5.17	Km/h	-----

III.6 Conclusion

Notre bassin de l'oued de Soubella s'étale sur une superficie de 184.96km², avec un périmètre de 90.93 km, le B.V de Soubella et de forme allongée exprimée par l'indice de compacité (KG=1.87), l'altitude varie entre 722m et 1884m avec une altitude moyenne de 1206m. Le B.V du Soubella est de relief faible exprimé par Dénivelée spécifique qui est de DS=23.66 m. Le réseau hydrographique est caractérisé par un cours d'eau principal de 30.37km et l'ordre du bassin versant est de 4, avec un temps de concentration de 5.87 Heure, et une vitesse de ruissèlement de 5.17 km/h.

Chapitre IV

Etude climatologique du bassin versant de Soubella

Chapitre IV : Etude climatologique du bassin versant de Soubella

IV.1 Caractéristiques climatologiques du bassin :

Le climat de l'Algérie varie du type méditerranéen au type saharien. Au nord, les hivers sont pluvieux et froids, les étés chauds et secs. Le climat, le long de la côte, est adouci par la présence de la mer. Au sud le climat est marqué par des températures élevées et une faible pluviométrie.

Les températures maximales moyennes dans le bassin du Hodna varient de 24 à 27 °C en plaine et de 19 à 21 °C dans sur les zones d'altitude. De même pour les températures minimales moyennes, elles varient de 9° à 12°C en plaine, et de 19 à 21°C sur les zones d'altitude. Le gradient thermique annuel en fonction de l'altitude est de 0.75 °C pour chaque 100 m d'altitude Boutheldja (2005), il est relativement élevé par rapport à celui de l'Algérie (0.55 °C /100m).

Le bassin de Soubella se situe dans la zone Nord du Hodna, il se situe entre les deux stations météorologique de Batna et de M'sila. Pour décrire la climatologie du bassin nous récapitulons les paramètres climatologiques dans les tableaux (IV.1 et 2).

Le tableau (IV.1) récapitule les données de la station météorologique De M'sila (Lat.: 35° 40' -Long.: 04°30'-Altitude: 441m)pour unedurée d'observationde1988à 2006 pour les températures, de 1990 à 2006 pour l'insolation et de 1996-2006 pour les vitesses du vent et l'humidité.

Tableau IV.1 Paramètres climatiques mensuelle enregistrés à la station de M'sila.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anné e	
Température e (°C)	T _{max}	21.4	25.4	32.8	36.8	43.6	44.2	46.2	44.7	42.2	39.3	30.8	23.3	46,2
	T _{moy}	6.65	8.3	14	19.7	24.8	29	31.7	30.7	24.4	22.5	14.6	9.6	19.7
	T _{min}	-7.1	-3.8	-3.2	2.3	3	7.7	15	14	10	4.4	-2	-3	-7.1
Humidité (%)	76	66.4	59.5	56.3	51.1	43.3	38.8	42.2	55.4	61.1	71.9	75.4	58	
Vitesse du vent (m/s)	4.02	3.98	4.35	5.37	4.72	4.59	4.61	4.22	3.78	3.78	3.94	4.05	4.28	
Insolation (h)	6,08	7,95	8,29	9,06	10,0	10,7	11,1	10,1	8,85	8,15	6,66	5,52	8,56	

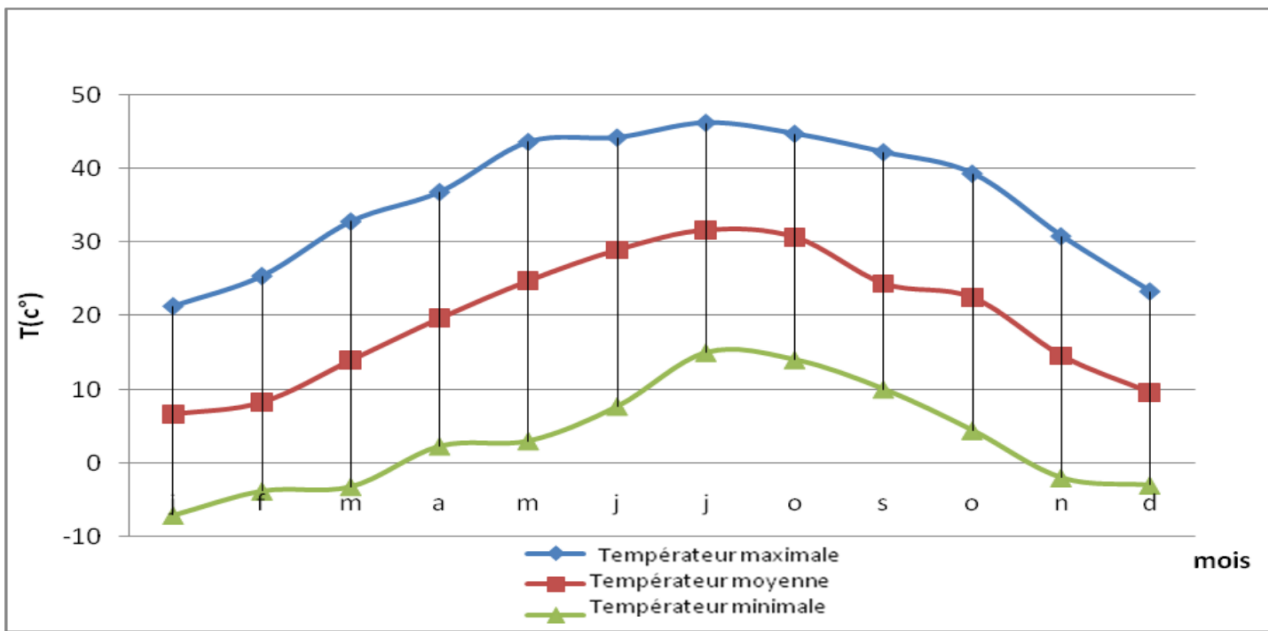


Figure IV.1 Régime thermique de la station météorologique de M'sila.

Le tableau(IV.2) récapitule les données climatiques de la station météorologique de Batna (lat. = 35,55 N, long. = 09,18 E, alt. = 1051,9 m) fournies par l'office Nationale de la Météorologie (O.N.M) pour une période d'observation allant de 1967 jusqu'au 1998.

Tableau IV.2 Paramètres climatiques moyens mensuels enregistrés à la station de Batna.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Température (°C)	5,1	6,3	8,6	11,7	16,6	22,1	25,4	24,6	20,2	14,8	9,4	6,0	14,2
Humidité (%)	75	70	65	62	57	50	42	46	57	65	70	76	61
Vitesse du vent (m/s)	3,8	3,9	4,1	4,3	4,0	3,8	3,6	3,5	3,3	3,2	3,3	3,9	3,7
Insolation (h)	5,7	6,5	7,1	8,0	9,4	10	11,4	10,3	8,5	7,4	6,4	5,8	8,1

L'analyse de ces paramètres climatiques permet de mettre en évidence les fluctuations les plus significatives qui ont affecté le climat au cours de la période observée dans la zone d'étude.

- Les deux stations donnent des températures moyennes entre 14.2°C-17.6 °C selon la station de Batna et de 29°C°-31.7°C° selon la station de M'sila, les mois les plus chauds sont juin, juillet et août, où la température moyenne varie entre 22,1 °C - 25,4 °C selon la station de Batna.

Et 29C°-31.7C° selon la station de M’sila.

Les mois les plus froids sont décembre, janvier et février, où la température moyenne varie entre 5.1 °C - 6.3°C selon la station de Batna et 6.65C°-9.6C° selon la station de M’sila.

- L’humidité relative moyenne annuelle selon la station de Batna est de 61 %. Ses valeurs extrêmes sont atteintes en décembre (76 %) et juillet (42 %).
L’humidité relative moyenne annuelle selon la station de M’sila est de 58 %. Ses valeurs extrêmes sont atteintes en janvier (76.1 %) et juillet (38.8 %).

- On trouve selon la station de Batna que La vitesse moyenne annuelle du vent est de 3,7 m/s, elle n’est pas trop variable pendant l’année, elle est de 4,3 m/s au maximum et de 3,2 m/s au minimum.

D’autre part, la station de M’sila enregistre que La vitesse moyenne annuelle du vent est de 4.28 m/s, elle n’est pas trop variable pendant l’année, elle est de 5.37 m/s au maximum et de 3.78 m/s au minimum.

- L’analyse de ces tableaux met en valeur l’importance de l’insolation dans cette zone environ (3000 heures /an jour) = 8,1 heures / jour et 3124 heures /an = 8.56 heures/

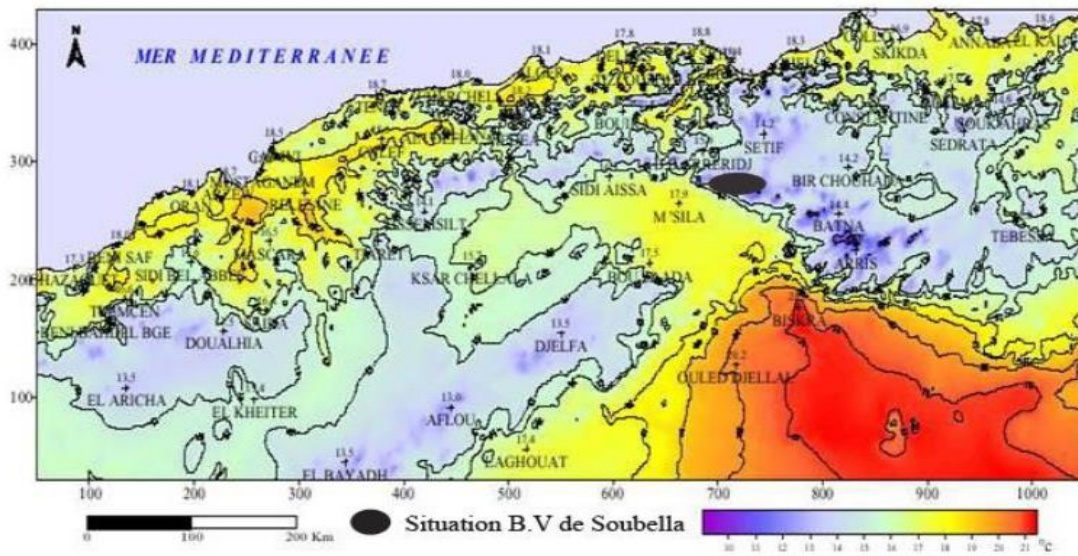


Figure IV.2 Carte des températures moyennes annuelles du Nord de l’Algérie.

IV.2 Etude de la précipitation du bassin :

IV.2.1 Introduction :

La pluviométrie moyenne pour l'ensemble de l'Algérie est de 68 mm/an, avec une forte variabilité spatio-temporelle. Elle varie de quelques dizaines de mm/an au Sud du pays à 1500 mm/an dans la région côtière du Nord-Est. Cependant, elle varie aussi de l'ouest vers l'est, elle augmente de 350 mm/an à 1000 mm/an en moyenne. Tout comme pour la majorité des bassins en Algérie, le bassin versant du Hodna est souffrant d'un mauvais réseau pluviométrique à cause du nombre et de la distribution des postes pluviométriques. Il est contrôlé par 38 postes avec une densité de 1 poste/700 km²Bouthelfja (2005). Pour notre sous bassin de Soubella nous n'avons pu avoir que les données des deux postes pluviométriques de Sidi Ouadah et Bordj Ghdir dont les caractéristiques sont récapitulées dans le tableau (IV.3).

Tableau IV.3 Caractéristiques des stations pluviométriques.

Stations	Coordonnées				Altitude	
	codeANR H	X	Y	Z	Période de fonctionnement	Nombre d'années
Sidi Ouadah	051101	721,5	268,75	720	1973-2004	30
Bordj Ghdir	050904	698,4	292,2	1054	1973-2004	30

IV.2.2 Homogénéité et comblement des données pluviométriques:

Cette opération consiste à corriger s'il y a lieu à corriger les erreurs systématiques commises lors de prise des données, parmi ces erreurs on peut citer :

- ✓ La graduation de l'éprouvette ne correspond pas à l'ouverture du pluviomètre.
- ✓ Le changement de l'exploitation du pluviomètre dû à son déplacement, à la modification de son environnement, ou au changement d'observateur ...

- **Méthode du double cumule :**

Nous avons adopté la méthode du double cumule, elle permet de détecter l'hétérogénéité probable d'une série de mesures et de la corriger.

La méthode consiste à comparer les pluies cumulés d'une station A dont on soulève des doutes on les comparant avec des pluies cumulées d'une station B dont les mesures sont jugées homogènes.

L'application de cette méthode sur les données de la station de Bordj El Gdir, permet de remarquer les points suivants en se basant sur la station de Batna comme référence.

Les données de la station ne présentent aucune cassure ce qui donne à la série une sorte d'homogénéité.

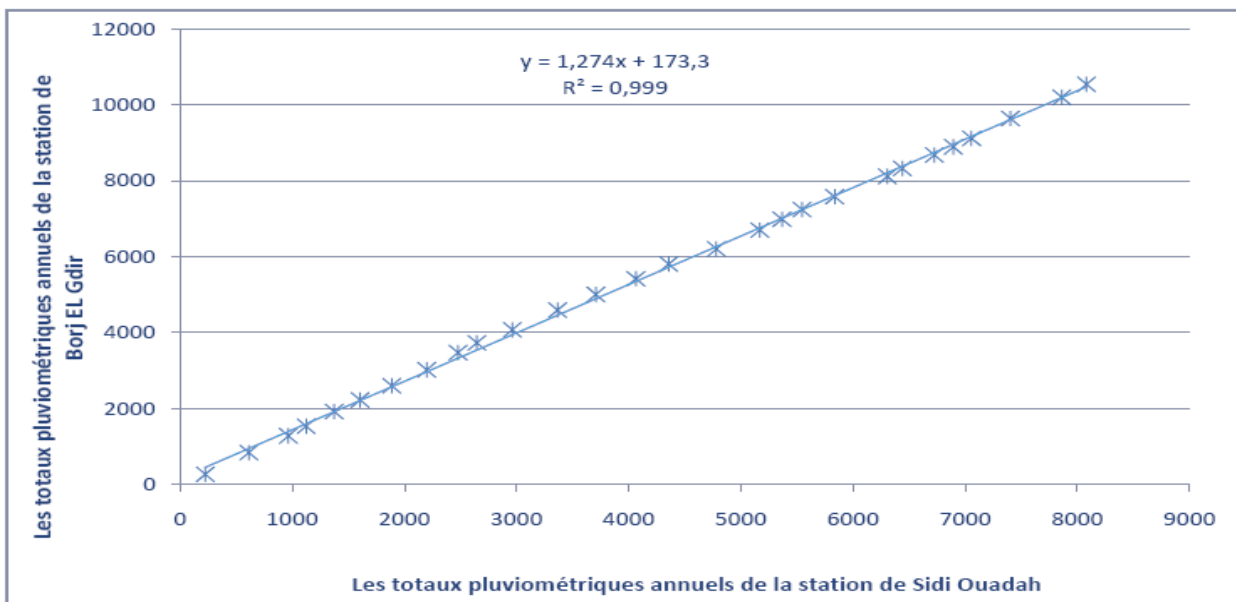


Figure IV.3 La courbe double masse.

- **Méthode d'extension des données :**

- **Comblement des lacunes par la régression linéaire :**

Le comblement des données manquantes se fait souvent par la méthode de régression linéaire, cette dernière consiste à estimer les variables pluviométriques inconnues de certaines stations à partir des observations d'autres stations avoisinantes prises comme référence.

Après avoir collecté les données disponibles auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), Il a été nécessaire de procéder au comblement de lacunes et extension des séries sur une période commune de 30 ans (1973 - 2004) et cela a été établi par corrélation linéaire entre les séries pluviométriques.

L'exposé de cette méthode est comme suit :

$$y_x = \bar{y} + r \frac{\delta y}{\delta x} (x - \bar{x}) \dots\dots(13) \qquad r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{(k-1)\delta_x \delta_y} \dots\dots(14)$$

y_x : Moyenne conditionnelle des précipitations (la station qui présente beaucoup de lacunes).

y : Moyenne interannuelle des précipitations à la station à combler pendant la période d'observation commun.

x : Moyenne interannuelle des précipitations a la station de référence.

δx : Ecart type des observations à la station d'ont la série chronologique présente des lacunes.

δy : Ecart type des observations à la station de référence

r : le coefficient de corrélation entre x et y .

Nous prenons la station de Sidi Ouadah comme station de référence, pour compléter les lacunes de la station de Bordj El Ghdir.

Les résultats obtenus de la méthode de la régression linéaire sont Présentés dans le tableau (IV.4).

Tableau IV.4 La régression linéaire entre les deux stations.

Station	Coef de corrélation (r)	Equation obtenue
Bordj Ghdir	0,84	$Y_x = 0,713 * x + 1,506$

Le jugement de la corrélation en hydrologie est exprimé comme suit : (Adoui, 2013)

- $r = 1$ \Longrightarrow dépendance fonctionnelle direct.
- $0.8 < r < 1$ \Longrightarrow très bonne corrélation directe.
- $0.6 < r < 0.8$ \Longrightarrow bonne corrélation directe.
- $0.5 < r < 0.6$ \Longrightarrow corrélation directe insuffisante.
- $0 < r < 0.5$ \Longrightarrow mauvaise corrélation directe.
- $r = 0$ \Longrightarrow aucune corrélation.
- $-0.5 < r < 0$ \Longrightarrow mauvaise corrélation réciproque.
- $-0.6 < r < -0.5$ \Longrightarrow corrélation réciproque insuffisante.
- $-0.8 < r < -0.6$ \Longrightarrow bonne corrélation réciproque.
- $-1 < r < -0.8$ \Longrightarrow dépendance fonctionnelle réciproque.

Nous avons utilisé la relation (13) pour combler les précipitations mensuelles de la station de Bordj El Ghdir pour les mois oct pour compléter l'année 1976, et octobre, novembre, décembre pour combler l'année 1984. Toutes les données des deux stations ont été complétées pour toutes les années sauf pour les années 1990,1996 et 1997 car on ne dispose pas des données dans les deux stations. Un comblement de ces deux années demande une étude plus globale sur toute la partie nord ou éventuellement tout le bassin du Hodna, ainsi que l'acquisition de toutes les données des autres stations de la région.

IV.3 Etude des précipitations annuelles :

IV.3.1 Introduction :

Les précipitations représentent le facteur déterminant du régime hydrologique, pour le cas de l'oued Soubella elles représentent la source principale de l'approvisionnement en eau.

A l'échelle annuelle la précipitation annuelle est la somme de toutes les précipitations mensuelles mesurées dans le poste pluviométrique. Dans ce paragraphe, nous étudions les précipitations annuelles des deux stations Sidi Ouadah et Bordj El Ghdir, ainsi que leurs variabilités dans le temps.

IV.3.2 Variabilité annuelle des précipitations des stations de Sidi Ouadah et Bordj Ghdir:

➤ Sidi Ouadah :

Dans cette station, nous disposons (après comblement des lacunes) d'une série d'observations d'une période de 31 ans (1973-2004) tableau (IV.5). La hauteur annuelle des précipitations varie de 133.7 à 469.8 mm, avec un caractère général de la pluviosité annuelle irrégulière. La valeur maximale des précipitations annuelles est observée pendant l'année 1994/1995 avec 469.8mm, la valeur minimale annuelle est enregistrée en 1997-1998 avec 133.7mm. Un coefficient de variation de 0,33 est estimé sur toute la période, ce qui explique une dispersion totale de 30% par rapport à la moyenne interannuelle.

➤ Bordj El Ghdir :

Tout comme la station de Sidi Ouadah, Cette station dispose d'une série de même taille soit 31 ans 1973-2004 (tableau IV.5), La hauteur annuelle des précipitations varie d'une valeur maximale de 570.9 en 1974/1975 à une valeur minimale de 208.4 mm en 1997/1998, avec un coefficient de variation estimé 0,28 relativement moins que à la station de Si Ouadah.

Tableau IV.5 Répartition annuelle des précipitations (1973-2004).

Année	SIDI OUADAH	BORDJ GHDIR
	P (mm)	P (mm)
73-74	222	269.9
74-75	388.7	570.9
75-76	352.1	440.81
76-77	158.6	256.6
77-78	250.3	378.1
78-79	231.2	308.6
79-80	281.7	375.8
80-81	312.7	418.6
81-82	278.7	454.5
82-83	167.1	257.6
83-84	317	339.92
84-85	403.5	520
85-86	341.4	411
86-87	356.8	413.1
87-88	293.1	388.2
88-89	425	396.5
90-91	387.4	496.9
91-92	197.1	287.5
92-93	178.2	252.2
93-94	291.3	340
94-95	469.8	533.3
97-98	133.7	208.4
98-99	286.3	355.2
99-00	170.2	213.2
00-01	161.8	222
01-02	346.6	525.8
02-03	457.8	555.2
03-04	218.9	342.8
P Max (mm)	469.8	570.9
P min (mm)	133.7	208.4
P_{moy}	288.53	376.16
Ecart-type	96.190	108.46
Le coef de variation (Cv)	0.33	0.28

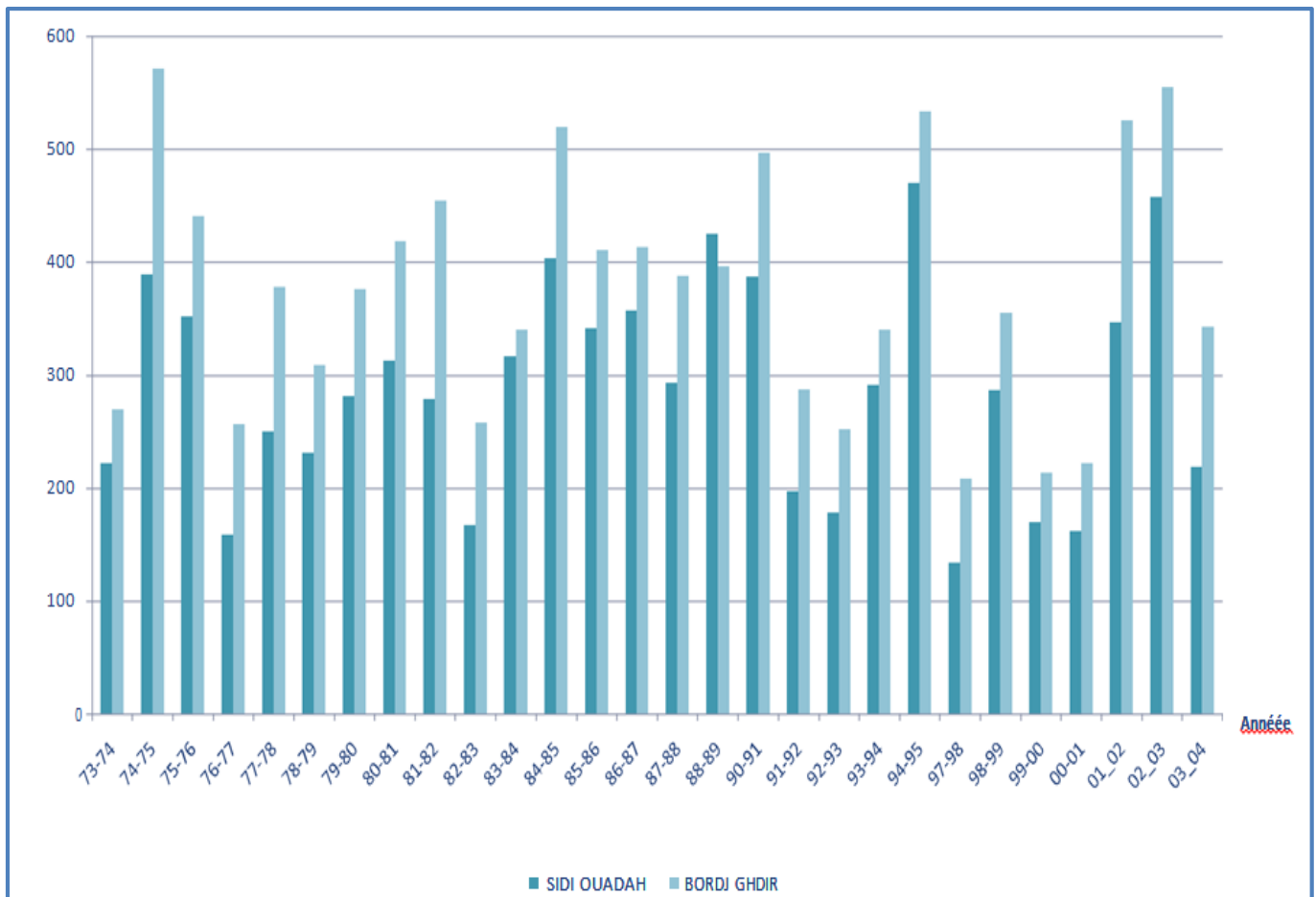


Figure IV.4 Moyennes des précipitations annuelles (1974–2004).

La variabilité des précipitations annuelles, définie comme la déviation moyenne par rapport à la moyenne interannuelle, peut s’étudier par l’écart de la pluie annuelle à la moyenne interannuelle.

Tableau IV.6 Ecart des pluies a la moyenne interannuelle.

station	Sidi Ouadah		Bordj El Ghdir	
Années	Pn=288.53 mm		Pn=376.16 mm	
	pt(mm)	e(%)	pt(mm)	e(%)
73-74	222	-23.06	269.9	-28.25
74-75	388.7	34.72	570.9	51.77
75-76	352.1	22.03	440.81	17.19
76-77	158.6	-45.03	256.6	-31.78
77-78	250.3	-13.25	378.1	0.52
78-79	231.2	-19.87	308.6	-17.96
79-80	281.7	-2.37	375.8	-0.10
80-81	312.7	8.38	418.6	11.28
81-82	278.7	-3.41	454.5	20.83
82-83	167.1	-42.09	257.6	-31.52
83-84	317	9.87	339.92	-9.63
84-85	403.5	39.85	520	38.24
85-86	341.4	18.32	411	9.26
86-87	356.8	23.66	413.1	9.82
87-88	293.1	1.58	388.2	3.20
88-89	425	47.30	396.5	5.41
90-91	387.4	34.27	496.9	32.10
91-92	197.1	-31.69	287.5	-23.57
92-93	178.2	-38.24	252.2	-32.95
93-94	291.3	0.96	340	-9.61
94-95	469.8	62.83	533.3	41.77
97-98	133.7	-53.66	208.4	-44.60
98-99	286.3	-0.77	355.2	-5.57
99-00	170.2	-41.01	213.2	-43.32
00-01	161.8	-43.92	222	-40.98
01_02	346.6	20.13	525.8	39.78
02_03	457.8	58.67	555.2	47.60
03_04	218.9	-24.13	342.8	-8.87

Les écarts et la moyenne des deux séries sont représentés dans le tableau (IV.6). Les années présentant des écarts négatifs sont dites sèches et celles qui présentent des écarts positifs sont dites humides. Les résultats présentés dans la figure (IV.5) montrent que la

station de Sidi Ouadah présente l'année la plus humide (1994-1995) avec un écart de 62.83% et l'année la plus sèche (1997-1998) avec un écart de -53.66%.

En ce qui concerne la station de Bordj El Ghdir, les écarts sont compris entre 51.77% et -44.60%. Le nombre des années humides est égale à celui des années sèches, ce résultat est valable pour les deux stations et le nombre est de 14 années.

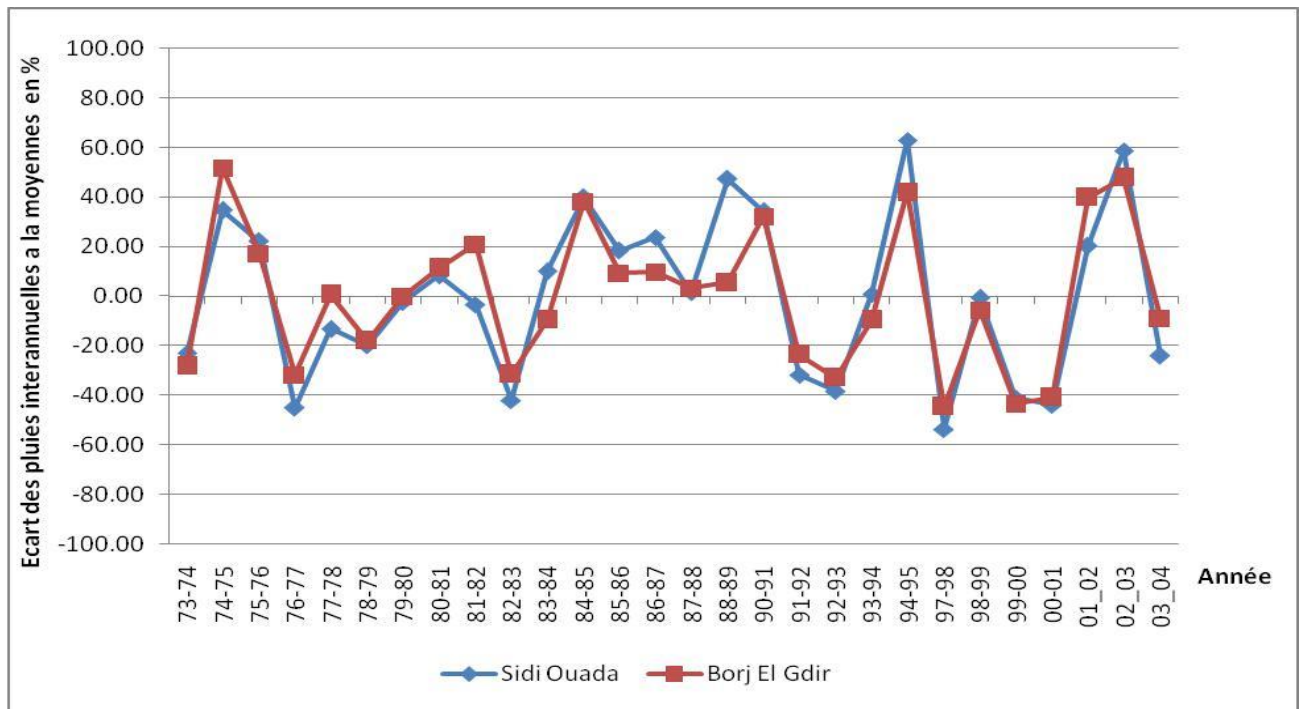


Figure IV.5 Les écarts des pluies annuelles à la moyenne interannuelle.

IV.3.3 Ajustement à la loi de Gauss :

➤ **La Loi de Gauss :**

Une analyse fréquentielle des pluies annuelles contribue également à cerner leurs irrégularités, elle permet même de déterminer les pluies annuelles correspondantes pour chaque fréquences (période de retour), la loi de Gauss est applicable si le coefficient de variation $Cv < 0.5$.

En général, les pluies annuelles s'ajustent à la loi normale de Gauss ou la loi log normale. Pour les deux stations SidiOuadahet Bordj El Ghdir les Figure (IV.6 et IV7) montrent qu'elles s'ajustent bien à la loi de Gauss.

La loi théorique de Gauss s'écrit comme suit $x = \bar{x} + \delta U \dots(16)$
 Avec ;

U : variable de GAUSS

x : Valeur ajustée.

\bar{x} : Moyenne des P moy annuelle.

δ : Ecart type

L'ajustement de nos séries de pluies à la loi de Gauss est réalisé par le logiciel HYDROLAB.

Les paramètres statistiques des deux séries sont :

- La moyenne $\bar{P} = 288.53\text{mm}$
 - L'écart type $\sigma = 96.19\text{mm}$
 - Coefficient de variation $Cv = 0.33$
- } Station Sidi Ouadah
- La moyenne $\bar{P} = 376.16\text{mm}$
 - L'écart type $\sigma = 108.46\text{mm}$
 - Coefficient de variation $Cv = 0.28$
- } Station Bordj El Ghdir

Les précipitations annuelles pour différentes périodes de retour (10, 20, 50, et 100 ans) sont présentées dans les tableaux (IV.7 et IV.8) pour les deux stations :

Tableau IV.7 Ajustement de la pluie annuelle à une loi de Gauss (station de Sidi Ouadah).

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
222	133,7	1	0,0179	-2,101	133,7	86,4773149	3,07565054	140,101861
388,7	158,6	2	0,0536	-1,612	158,6	133,523375	64,0924968	180,11026
352,1	161,8	3	0,0893	-1,345	161,8	159,122689	96,7760254	202,3979
158,6	167,1	4	0,1250	-1,150	167,1	177,874787	120,397038	219,044559
250,3	170,2	5	0,1607	-0,991	170,2	193,164032	139,407423	232,865824
231,2	178,2	6	0,1964	-0,854	178,2	206,36081	155,603997	245,0076
281,7	197,1	7	0,2321	-0,732	197,1	218,167358	169,903699	256,060912
312,7	218,9	8	0,2679	-0,619	218,9	228,997084	182,843227	266,3768
278,7	222	9	0,3036	-0,514	222	239,117648	194,767272	276,185338
167,1	231,2	10	0,3393	-0,414	231,2	248,715356	205,913113	285,649318
317	250,3	11	0,3750	-0,318	250,3	257,927924	216,453547	294,891666
403,5	278,7	12	0,4107	-0,225	278,7	266,862778	226,520769	304,010871
341,4	281,7	13	0,4464	-0,134	281,7	275,608136	236,2207	313,09045
356,8	286,3	14	0,4821	-0,045	286,3	284,240262	245,642197	322,205312
293,1	291,3	15	0,5179	0,045	291,3	292,831166	254,866117	331,429232
425	293,1	16	0,5536	0,134	293,1	301,463292	263,980979	340,850728
387,4	312,7	17	0,5893	0,225	312,7	310,208651	273,060558	350,550659
197,1	317	18	0,6250	0,318	317	319,143504	282,179762	360,617882
178,2	341,4	19	0,6607	0,414	341,4	328,356072	291,42211	371,158316
291,3	346,6	20	0,6964	0,514	346,6	337,953781	300,88609	382,304157
469,8	352,1	21	0,7321	0,619	352,1	348,074344	310,694628	394,228201
133,7	356,8	22	0,7679	0,732	356,8	358,90407	321,010517	407,167729
286,3	387,4	23	0,8036	0,854	387,4	370,710619	332,063829	421,467432
170,2	388,7	24	0,8393	0,991	388,7	383,907397	344,205605	437,664006
161,8	403,5	25	0,8750	1,150	403,5	399,196642	358,02687	456,67439
346,6	425	26	0,9107	1,345	425	417,94874	374,673528	480,295403
457,8	457,8	27	0,9464	1,612	457,8	443,548053	396,961168	512,978932
218,9	469,8	28	0,9821	2,101	469,8	490,594114	436,969568	573,995778

Fréquence	U.Gauss	Val.théo.	Borne inf.	Borne sup.	Valeur	Fréq. théo.	Pér. Ret.
0,9	1,282	411,825788	369,271378	472,549317	411,825788	0,900	10,0
0,95	1,645	446,789353	399,75298	517,147387	446,789353	0,950	20,0
0,98	2,054	486,129052	433,213652	568,163559	486,129052	0,980	50,0
0,99	2,327	512,350257	455,173302	602,510509	512,350257	0,990	100,0

(Moyenne=288,54 écart-type=96,19 taille 28 et I.C. à 95%)

Équations d'Ajustement obtenues

Stations	Loi de GAUSS
Sidi Ouadah	$X=96.16U+288.54$

Où : U : variable réduite de GAUSS

Tableau IV.8 Ajustement de la pluie annuelle à une loi de Gauss (station de Bordj El Ghdir).

Valeurs de départ	Valeurs Classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
269,9	208,4	1	0,0179	-2,101	208,4	148,317066	54,2703612	208,786025
570,9	213,2	2	0,0536	-1,612	213,2	201,36789	123,075143	253,90093
440,81	222	3	0,0893	-1,345	222	230,234593	159,930261	279,033272
256,6	252,2	4	0,1250	-1,150	252,2	251,38013	186,566162	297,80464
378,1	256,6	5	0,1607	-0,991	256,6	268,620831	208,002952	313,389994
308,6	257,6	6	0,1964	-0,854	257,6	283,50199	226,266789	327,081496
375,8	269,9	7	0,2321	-0,732	269,9	296,815478	242,391647	339,545606
418,6	287,5	8	0,2679	-0,619	287,5	309,027465	256,982722	351,178172
454,5	308,6	9	0,3036	-0,514	308,6	320,439775	270,428702	362,238631
257,6	339,92	10	0,3393	-0,414	339,92	331,262495	282,997151	372,910554
339,92	340	11	0,3750	-0,318	340	341,650917	294,882922	383,332557
520	342,8	12	0,4107	-0,225	342,8	351,726178	306,235083	393,615698
411	355,2	13	0,4464	-0,134	355,2	361,587757	317,173073	403,854156
413,1	375,8	14	0,4821	-0,045	375,8	371,321651	327,79709	414,132401
388,2	378,1	15	0,5179	0,045	378,1	381,009063	338,198313	424,533624
396,5	388,2	16	0,5536	0,134	388,2	390,742957	348,476558	435,157641
496,9	396,5	17	0,5893	0,225	396,5	400,604537	358,715017	446,095631
287,5	411	18	0,6250	0,318	411	410,679798	368,998158	457,447792
252,2	413,1	19	0,6607	0,414	413,1	421,06822	379,420161	469,333563
340	418,6	20	0,6964	0,514	418,6	431,89094	390,092084	481,902012
533,3	440,81	21	0,7321	0,619	440,81	443,30325	401,152542	495,347992
208,4	454,5	22	0,7679	0,732	454,5	455,515237	412,785108	509,939068
355,2	496,9	23	0,8036	0,854	496,9	468,828724	425,249219	526,063925
213,2	520	24	0,8393	0,991	520	483,709883	438,940721	544,327762
222	525,8	25	0,8750	1,150	525,8	500,950584	454,526074	565,764553
525,8	533,3	26	0,9107	1,345	533,3	522,096122	473,297443	592,400453
555,2	555,2	27	0,9464	1,612	555,2	550,962825	498,429784	629,255571
342,8	570,9	28	0,9821	2,101	570,9	604,013648	543,544689	698,060353

Fréquence	U.Gauss	Val.théo.	Borne inf.	Borne sup.	Valeur	Fréq. théo.	Pér. Ret.
0,9	1,282	515,191662	467,205785	583,665689	515,191662	0,900	10,0
0,95	1,645	554,617831	501,577931	633,95607	554,617831	0,950	20,0
0,98	2,054	598,978684	539,309384	691,483734	598,978684	0,980	50,0
0,99	2,327	628,546655	564,071872	730,214585	628,546655	0,990	100,0

(Moyenne=376,17 écart-type=108,47 taille 28 et I.C. à 95%)

Équations d'Ajustement obtenues

Stations	Loi de GAUSS
Bordj El Ghdir	$X=108.47U+376.17$

Où : U : variable réduite de GAUSS

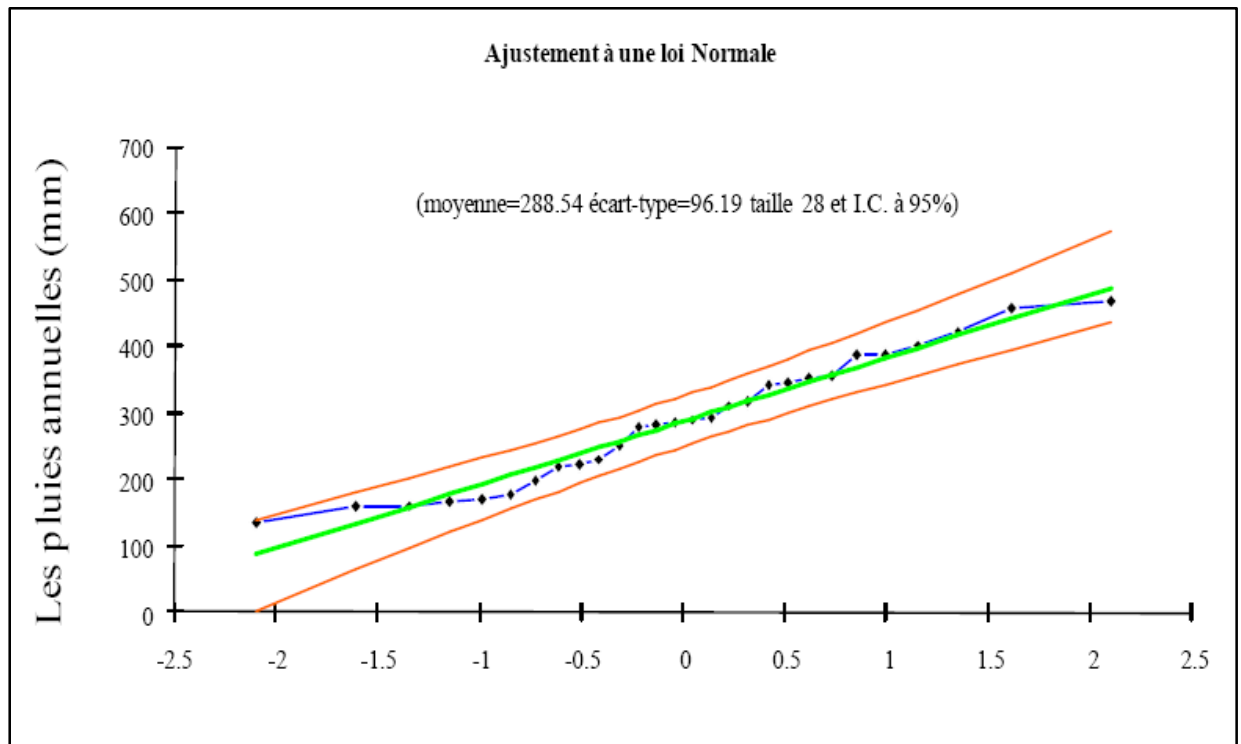


Figure IV.6 Ajustement des précipitations annuelles à une loi Normale (station de Sidi Ouadah).

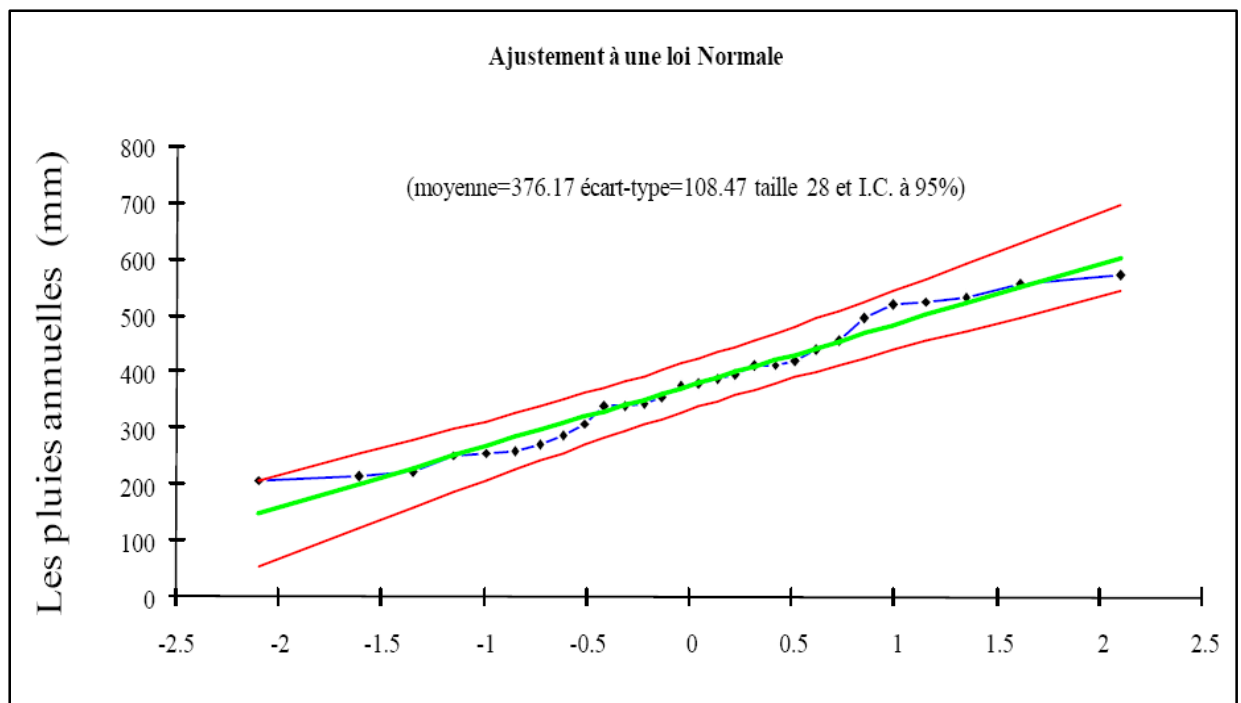


Figure IV.7 Ajustement des précipitations annuelles à une loi Normale (station de Bordj El Ghdir).

IV.4 Etude des précipitations mensuelles:

IV.4.1 Introduction :

An plus de sa variabilité d'une année à l'autre, la précipitation présente une forte variabilité d'un mois à l'autre. Dans le paragraphe suivant, nous étudierons cette variabilité pour les deux stations de Sidi Ouadah et Bordj El Ghdir.

IV.4.2 Variabilité mensuelles des précipitations des deux stations de Sidi Ouadah et Bordj Ghdir :

➤ Station de Sidi Ouadah :

La moyenne des précipitations mensuelles varie d'une valeur maximale de 33.9 mm observée en mois de décembre, jusqu'à une minimale de 8.2mm observée en mois d'août. Sur tous les mois, le coefficient de variation moyen est estimé à 1.04, avec une valeur maximale de 2.11 (juillet), ces chiffres montrent la forte variabilité des précipitations mensuelle dans cette station.

➤ Station de Bordj El Ghdir :

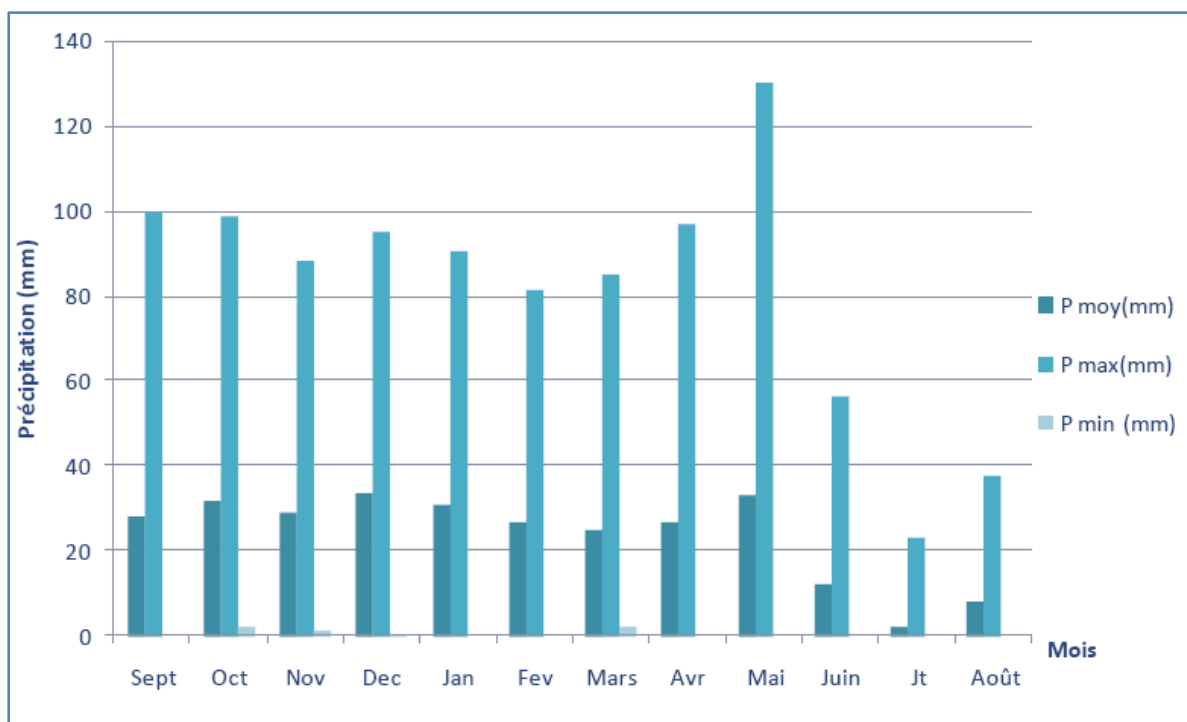
De même que pour la station de Sidi Ouadah, la moyenne des précipitations mensuelles dans la station de Bordj El Ghdir varie entre 43.01 mm (avril) et 6.81mm (juillet). La variabilité est aussi importante, le coefficient de variation moyen sur toute la période 1973-2004 est estimé à 0.87, il est relativement inférieur à celui de Sidi Ouadah, mais, il reste grand exprimant une forte variabilité.

Tableau IV.9 Paramètres statistiques des précipitations mensuelles entre 1973-2004 (SidiOuadah).

Mois	P max (mm)	P min (mm)	P moy (mm)	σ	CV	%
S	99.5	0	28.33	25.22	0.89	9.06
O	98.5	2.1	31.81	28.57	0.90	10.18
N	88.1	1	29.10	22.50	0.77	9.31
D	95	0.3	33.75	27.18	0.81	10.80
J	90.5	0	31.13	27.97	0.90	9.96
F	81.4	0	26.70	22.91	0.86	8.54
M	85.2	2	24.99	21.84	0.87	8.00
A	96.9	0	27.00	24.43	0.90	8.64
M	130.2	0	33.15	29.65	0.89	10.61
J	56.4	0	12.19	14.05	1.15	3.90
Jt	23	0	2.19	4.62	2.11	0.70
A	37.6	0	8.20	11.23	1.37	2.62
		Moyenne	24.04	21.68	1.04	

Tableau IV.10 Paramètres statistiques des précipitations mensuelles entre 1973-2004 (Bordj El Ghdir).

Mois	P max(mm)	P min (mm)	P moy(mm)	σ	CV	%
S	96.2	0	34.50	26.88	0.78	8.47
O	134.3	3	35.94	29.46	0.82	8.82
N	108.4	1.5	39.70	27.26	0.69	9.74
D	109.5	3.5	41.21	29.88	0.73	10.11
J	185.3	0	41.27	41.65	1.01	10.13
F	76.4	0	31.50	20.94	0.66	7.73
M	109.9	3.1	32.50	23.13	0.71	7.97
A	110.2	9	43.54	30.01	0.69	10.68
M	99.6	0	41.89	33.76	0.81	10.28
J	57.3	0	17.05	16.20	0.95	4.18
Jt	45	0	7.04	10.48	1.49	1.73
A	40.8	0	10.03	11.30	1.13	2.46
		Moyenne	31.35	25.08	0.87	

**Figure IV.8** Les précipitations mensuelles interannuelles (1973-2004) de station de Sidi Ouadah.

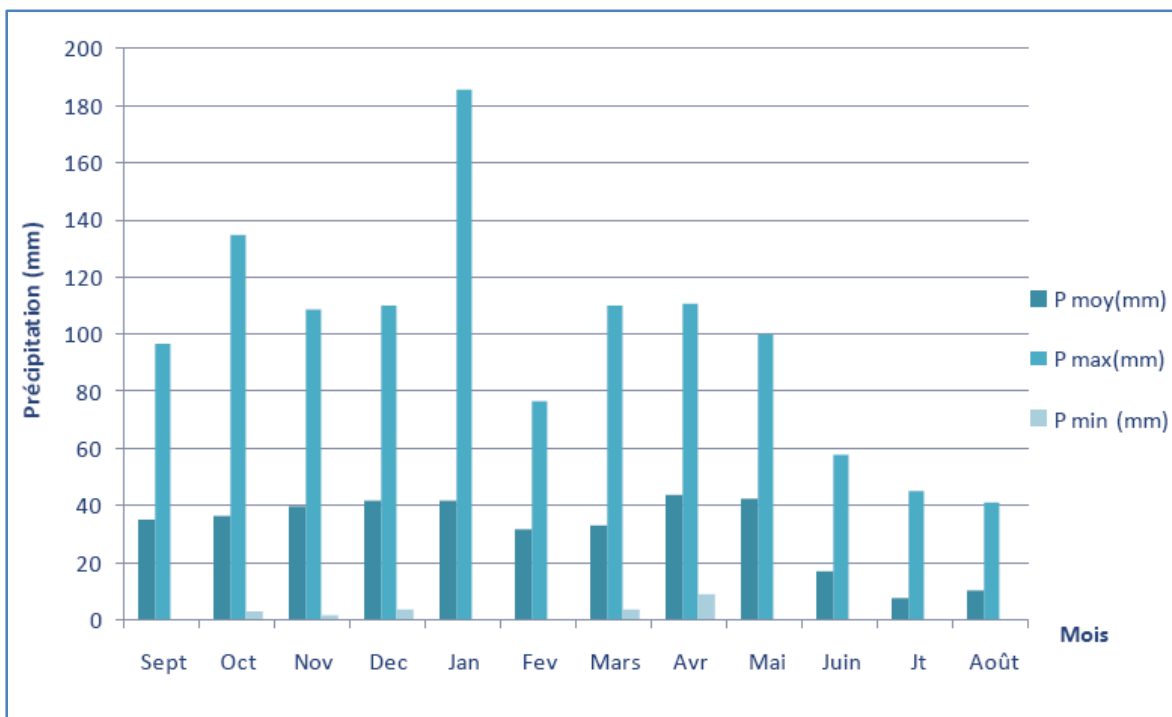


Figure IV.9 les précipitations mensuelles interannuelle (1973-2004) de la station de Bordj El Ghdir.

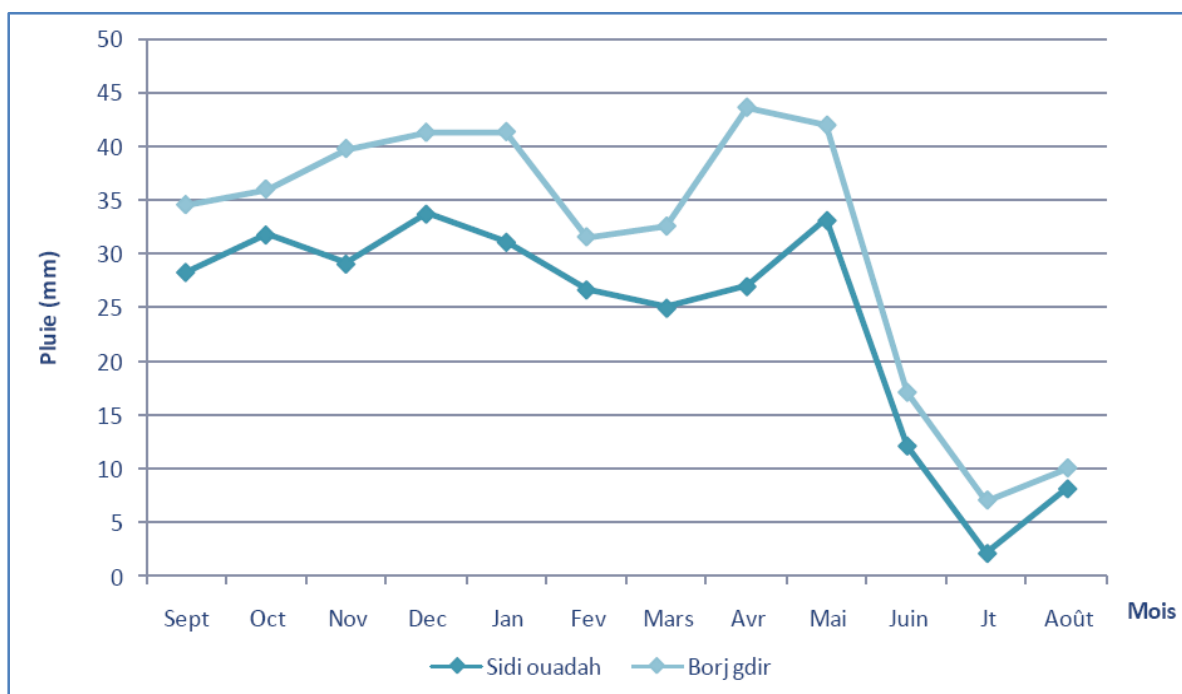


Figure IV.10 Les précipitations mensuelles interannuelles des deux stations (1973-2004).

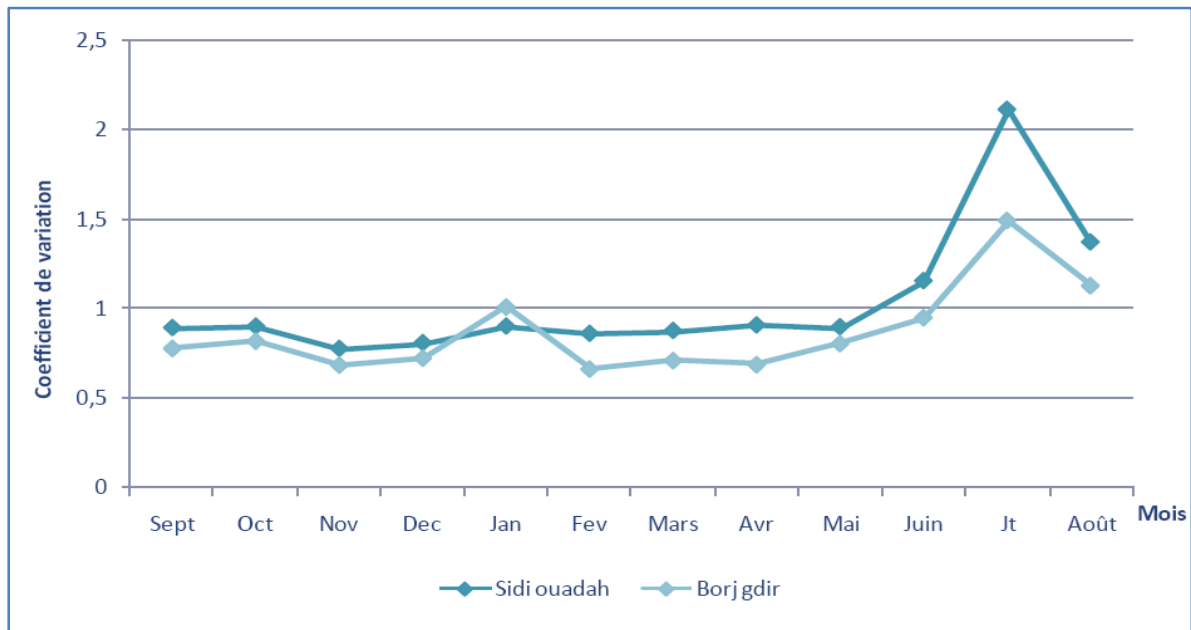


Figure IV.11 Variabilité interannuelles des coefficients mensuels pour les deux stations.

L'analyse des données pluviométriques mensuelles interannuelles pour les deux stations, montre que la variabilité est relativement très forte dans les mois de juin, juillet et août avec des coefficients de variation supérieur à 1, et des pluies très faibles dans ces mois par rapport aux autres mois de l'année

IV.4.3 Diagramme Ombrothermique :

Un diagramme ombrothermique est un diagramme climatique représentant les variations mensuelles sur une année, des températures et des précipitations selon des gradations standardisées : une gradation de l'échelle des températures qui correspond à deux gradations de l'échelle des précipitations ($P = 2T$). Ce diagramme permet de déterminer les périodes de sécheresses définies par une courbe des précipitations se situant en dessous de la courbe des températures.

Dans notre cas on a choisi les températures moyennes de la station de Batna, qui est la station la plus représentative du climat du bassin parmi celles de la région. Les courbes ombrothermiques des deux stations Sidi Ouadah et Bordj El Ghdid dans la figure (IV.12).

Tableau IV.11 Les précipitations et les températures mensuelles interannuelles.

Mois	Précipitation	Précipitation	Température
	Sidi Ouadah (mm)	Bordj El Ghdir (mm)	Batna(°C)
S	28.33	34.50	11.70
O	31.81	35.94	16.60
N	29.10	39.70	22.10
D	33.75	41.21	25.40
J	31.13	41.27	24.60
F	26.70	31.50	20.20
M	24.99	32.50	14.80
A	27.00	43.54	9.40
M	33.15	41.89	6.00
J	12.19	17.05	5.10
JUI	2.19	7.04	6.30
AU	8.20	10.03	8.60

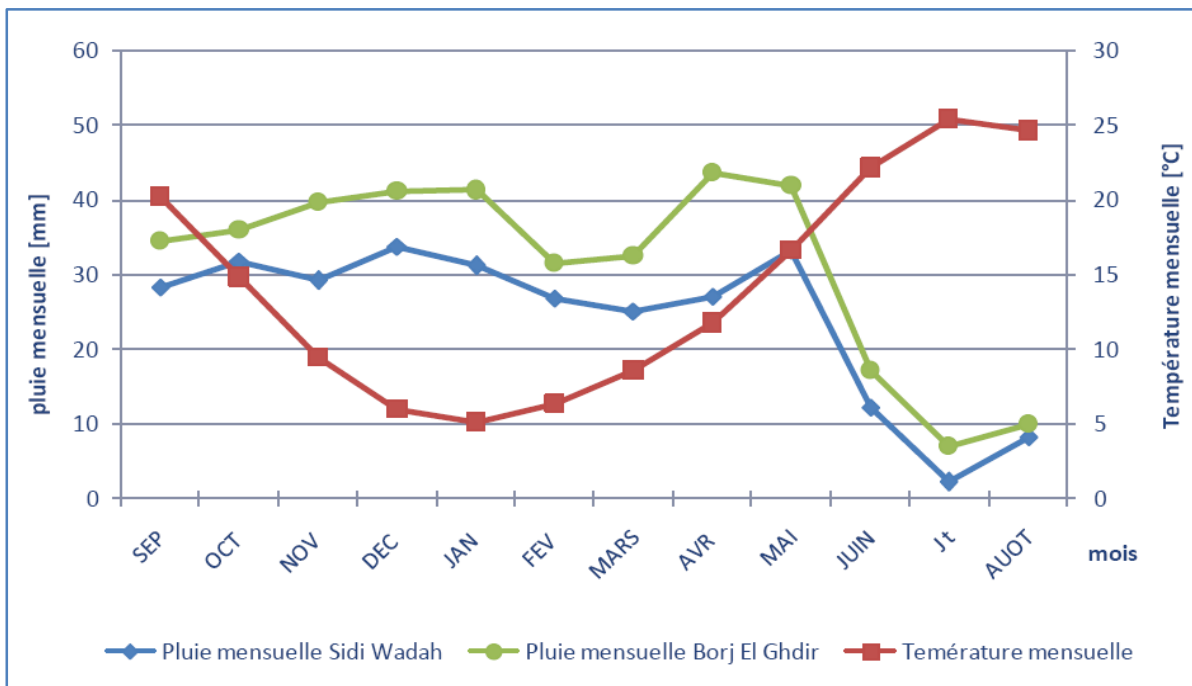


Figure IV.12 Diagramme Ombrothermique (1973-2004) pour les deux stations (Sidi Ouadah et Bordj El Ghdir).

➤ **Saisons humide et sèche :**

Le graphe ombrothermique mis en évidence deux saisons, une humide et l'autre sèche :

- ✓ Une saison humide commence à la fin du mois de septembre jusqu'au mois de mai. Caractérisée par des valeurs de précipitations supérieures à la valeur moyenne mensuelle annuelle.
- ✓ Une saison sèche commence du mois de juin jusqu'au mois d'août. Caractérisée par des valeurs de précipitations inférieures à la valeur moyenne mensuelle annuelle.

La présentation des pluies en pourcentage des deux stations durant les deux saisons montre que la période humide représente plus de (90%) de la pluie totale annuelle.

Tableau IV.12 Les saisons humides et sèches des deux stations.

Station	Saison humide %	Saison sèche %
Sidi Ouadah	92.18	7.82
Bordj El Ghdir	90.93	9.07

IV.5 La variabilité saisonnière des précipitations:

A l'échelle saisonnière, la pluie se répartie moyennement durant la période d'étude (1973-2004) pour les deux stations comme la représente la figure (IV.13).

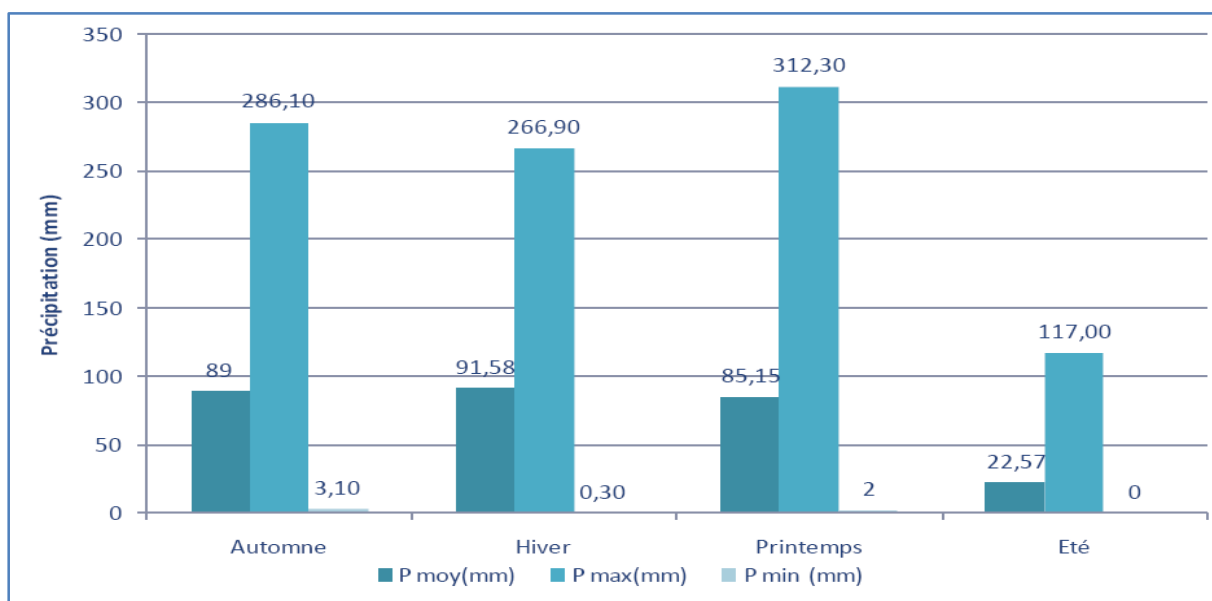


Figure IV.13 Répartition saisonnière des précipitations à la Station de Sidi Ouadah (1973-2007).

La station de Sidi Ouadah et durant la période d'étude 1973-2004, le maximum des pluies maximales soit 312.30 mm est observé en printemps, les pluies maximales des deux saisons d'hiver et d'automne sont aussi du même ordre de grandeur, nous enregistrons 299.90, 286.10 mmpour les deux saisons respectivement. Pour la saison d'été ce maximum ne dépasse pas les 117 mm. Cette même tendance est remarquée pour les pluies moyennes dans les quatre saisons.

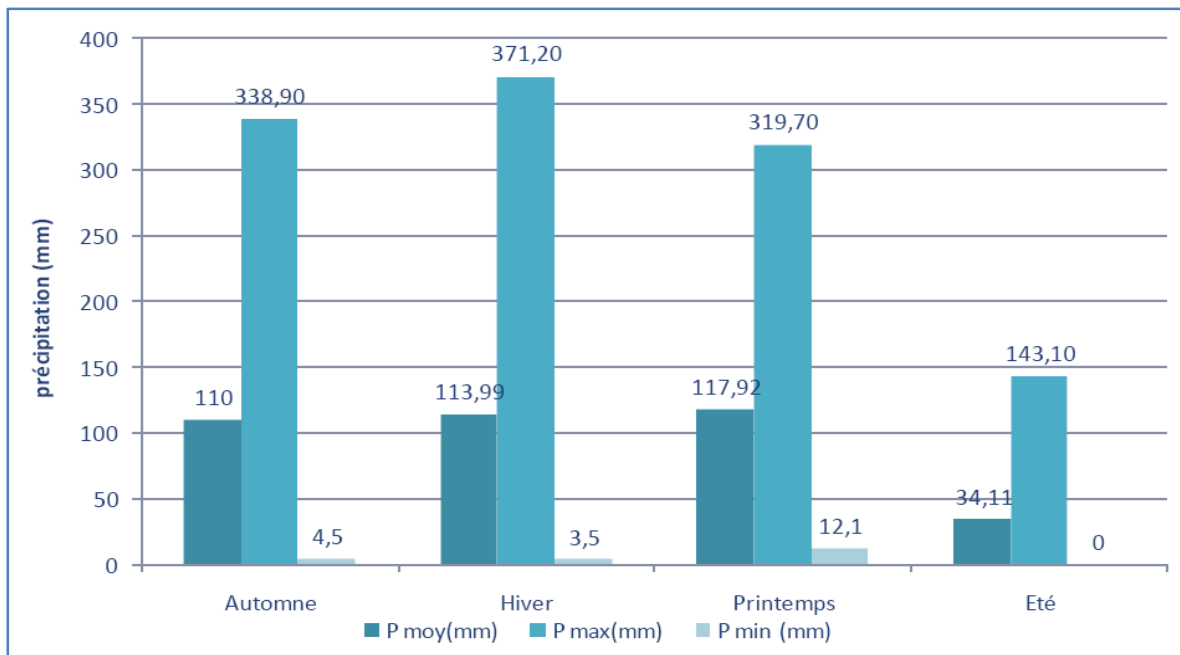


Figure IV.14 Répartition saisonnière des précipitations à la Station de Bordj El Ghdir (1973-2007).

En ce qui concerne la station de Bordj El Ghdir, des valeurs plus importantes des pluies maximales sont enregistrées pour les trois saisons d'automne, d'hiver et de printemps, soit, 338.90, 371.20, et 319.70 mm respectivement. Pour l'été la pluie maximale est de 143.10 pour toute la saison. Les pluies moyennes suivent la même tendance.

IV.6 Etude de la pluie maximale journalière:

IV.6.1 Variabilité de la pluie maximale journalière:

L'analyse de variabilité des pluies maximales journalières de la station de Sidi Ouadah (1973-2004), consiste à déterminer leurs caractéristiques statistiques qui définissent l'étendue et la dispersion de l'échantillon. Ces derniers sont récapitulés dans le tableau (IV.13) et la figure (IV.15).

Tableau IV.13 Les précipitations maximales journalières.

	Pjmaxmax(mm)	Pjmaxmoy(mm)	écart type	coef de variation
Sept	56.2	14.10	12.70	0.90
Oct	43	13.90	10.62	0.76
Nov	51.6	14.05	12.11	0.86
Dec	42.2	14.00	11.28	0.81
Jan	22.6	10.40	7.56	0.73
Fev	38.9	11.57	9.86	0.85
Mars	41.2	11.24	8.95	0.80
Avr	74.2	15.47	15.92	1.03
Mai	44.7	15.79	12.13	0.77
Juin	23.6	6.29	6.05	0.96
Jt	16.4	1.69	3.40	2.02
Août	37	5.29	8.12	1.54

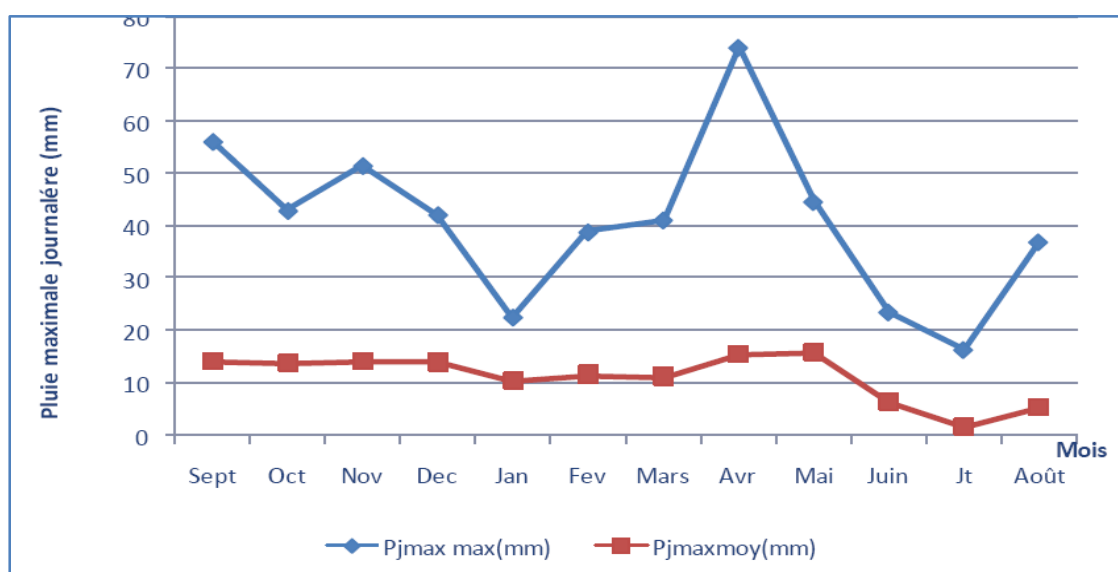


Figure IV.15 Variabilité des pluies maximales journalières selon la station de Sidi Ouadah (1973-2004).

IV.6.2 Ajustement de la pluie maximale journalière à la loi de GUMBEL :

La précipitation maximale journalière est très variable dans le temps, les coefficients de variation mensuels interannuels sont tous supérieurs à 0.73 avec un maximum de 2.02 observé en mois de Juillet. Pour pouvoir estimer les pluies maximales journalières pour n'importe quelle période de retour, nous procédons à son analyse fréquentielle pour l'ajuster à une loi de probabilité. La précipitation maximale journalière est ajustée souvent à la loi Gumbel, dans le paragraphe suivant nous réaliserons un test sur cet ajustement pour les stations de Sidi Ouadah et de Bordj El Ghdir.

➤ **La Loi de GUMBEL :**

Loi de GUMBEL est formulée comme suit:

$$F(x_i) = e^{-e^{-\alpha(x-x_0)}} \dots\dots(17) \qquad X = \frac{1}{\alpha}Y + X_0 \dots\dots(18)$$

α, X_0 : coefficients d'ajustement

Avec :

$$X_0 = \bar{X} - \frac{0.577}{\alpha} \dots\dots(19) \qquad \frac{1}{\alpha} = 0.78\delta_x \dots\dots(20)$$

\bar{X} : Les moyennes de la série des P_{maxj}

δ_x : Ecart type de la série des P_{maxj} étudiée

X : pluie journalière maximale.

Y : variable de GUMBEL

L'ajustement de nos séries de pluies à la loi de GUMBEL est réalisé par le logiciel HYDROLAB.

Les paramètres statistiques de l'échantillon :

- La moyenne $\bar{P}_{maxj} = 33.40\text{mm}$
 - L'écart type $\sigma = 13.24\text{mm}$
 - Coefficient de variation $Cv = 0.40$
- } Station Sidi Ouadah
- La moyenne $\bar{P}_{maxj} = 35.19\text{mm}$
 - L'écart type $\sigma = 12.95\text{mm}$
 - Coefficient de variation $Cv = 0.37$
- } Station Bordj El Ghdir

Les résultats obtenus pour différentes périodes de retour (10, 20,50 et100 ans) sont présentés dans les tableaux (IV.13 et IV.14)

L’ajustement graphique à la loi de Gumbel des deux séries pour les deux stations est représenté dans les figures (IV.16 et IV.17).

Tableau IV.14 Pluies maximales journalières de la station Sidi Ouadah (1974-2004).

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
38.9	15.7	1	0.018	-1.393	15.7	12.68548	2.2044	18.27404
35.8	17.2	2	0.054	-1.074	17.2	16.03751	7.29677	21.0793
41.6	18.2	3	0.089	-0.882	18.2	18.0548	10.2802	22.84874
25.9	19.5	4	0.125	-0.732	19.5	19.63213	12.555	24.29028
36.2	19.6	5	0.161	-0.603	19.6	20.9868	14.4583	25.57865
18.2	20.2	6	0.196	-0.487	20.2	22.20966	16.1294	26.78873
23.5	22.6	7	0.232	-0.379	22.6	23.34872	17.6403	27.96157
41.2	23.5	8	0.268	-0.276	23.5	24.43331	19.0337	29.12346
37	23.8	9	0.304	-0.176	23.8	25.4833	20.3379	30.29319
20.2	25.6	10	0.339	-0.078	25.6	26.51337	21.5725	31.48545
23.8	25.8	11	0.375	0.019	25.8	27.53524	22.753	32.71253
25.6	25.9	12	0.411	0.117	25.9	28.55894	23.892	33.98546
56.2	29.5	13	0.446	0.215	29.5	29.59368	25.0006	35.31478
51.6	31.5	14	0.482	0.315	31.5	30.64848	26.0894	36.71125
29.5	35	15	0.518	0.418	35	31.73268	27.1686	38.18651
43.5	35.8	16	0.554	0.525	35.8	32.85651	28.249	39.75391
43	36.2	17	0.589	0.637	36.2	34.03167	29.3422	41.42947
25.8	37	18	0.625	0.755	37	35.27219	30.4612	43.23318
35	37.7	19	0.661	0.881	37.7	36.59552	31.6214	45.19085
31.5	38.9	20	0.696	1.017	38.9	38.02426	32.8416	47.33685
37.7	41.2	21	0.732	1.165	41.2	39.58885	34.1462	49.71858
15.7	41.6	22	0.768	1.331	41.6	41.3323	35.5685	52.40398
44.7	43	23	0.804	1.520	43	43.31867	37.1571	55.49543
19.5	43.5	24	0.839	1.742	43.5	45.65031	38.9883	59.15767
17.2	44.7	25	0.875	2.013	44.7	48.5069	41.195	63.68131
22.6	51.6	26	0.911	2.370	51.6	52.25198	44.0441	69.65599
74.2	56.2	27	0.946	2.899	56.2	57.82414	48.2216	78.60686
19.6	74.2	28	0.982	4.016	74.2	69.5719	56.896	97.61107

Fréquence	U.Gumbel	Val.théo.	Borne inf.	Borne sup.	Valeur	Fréq. théo.	Pér. Ret.
0.9	2.250	50.999	43.095	67.652	50.9989	0.90	10.00
0.95	2.970	58.569	48.776	79.808	58.56937	0.95	20.00
0.98	3.902	68.369	56.013	95.659	68.36857	0.98	50.00
0.99	4.600	75.712	61.390	107.583	75.71169	0.99	100.00

(Moyenne=33.4 écart-type=13.24 taille 28 et I.C. à 95%)

Équations d'Ajustement obtenues :

Stations	Loi de GUMBEL
Sidi Ouadah	X=10.32Y+27.44

Où Y : variable de GUMBEL

Tableau IV.15 Pluies maximales journalières de la station Bordj El Ghdir (1974-2004).

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de Classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
18.9	12	1	0.018	-1.393	12	14.9335	4.68309	20.39907
48.7	14	2	0.054	-1.074	14	18.21176	9.66339	23.14259
36.9	18.4	3	0.089	-0.882	18.4	20.18466	12.5812	24.87309
25.7	18.9	4	0.125	-0.732	18.9	21.72727	14.8059	26.28291
37.3	21.68	5	0.161	-0.603	21.68	23.05213	16.6673	27.54292
26.9	23.2	6	0.196	-0.487	23.2	24.24808	18.3016	28.72637
23.2	24	7	0.232	-0.379	24	25.36207	19.7792	29.8734
47.2	24.9	8	0.268	-0.276	24.9	26.42279	21.1421	31.00972
48	25.7	9	0.304	-0.176	25.7	27.44967	22.4175	32.15371
30.6	26.9	10	0.339	-0.078	26.9	28.45707	23.625	33.31973
21.68	27.4	11	0.375	0.019	27.4	29.45645	24.7795	34.5198
47.4	30	12	0.411	0.117	30	30.45762	25.8934	35.76471
24.9	30.6	13	0.446	0.215	30.6	31.46959	26.9776	37.06478
46.5	33.5	14	0.482	0.315	33.5	32.50118	28.0424	38.43052
52	36.9	15	0.518	0.418	36.9	33.56152	29.0978	39.87331
27.4	37.3	16	0.554	0.525	37.3	34.66061	30.1545	41.40621
43	42	17	0.589	0.637	42	35.80991	31.2236	43.0449
30	43	18	0.625	0.755	43	37.02313	32.318	44.80892
24	44.7	19	0.661	0.881	44.7	38.31734	33.4527	46.7235
42	46.5	20	0.696	1.017	46.5	39.71463	34.6461	48.82228
55	46.9	21	0.732	1.165	46.9	41.24479	35.9219	51.15159
18.4	47.2	22	0.768	1.331	47.2	42.94987	37.3129	53.77788
58.6	47.4	23	0.804	1.520	47.4	44.89253	38.8665	56.8013
12	48	24	0.839	1.742	48	47.17285	40.6575	60.38294
14	48.7	25	0.875	2.013	48.7	49.96657	42.8156	64.80702
44.7	52	26	0.911	2.370	52	53.62923	45.6019	70.65021
46.9	55	27	0.946	2.899	55	59.07875	49.6875	79.4041
33.5	58.6	28	0.982	4.016	58.6	70.56797	58.171	97.99006

Fréquence	U.Gumbel	Val.théo.	Borne inf.	Borne sup.	Valeur	Fréq. théo.	Pér. Ret.
0.9	2.250	52.404	44.674	68.691	52.40373	0.90	10.00
0.95	2.970	59.808	50.230	80.579	59.80759	0.95	20.00
0.98	3.902	69.391	57.307	96.081	69.39112	0.98	50.00
0.99	4.600	76.573	62.566	107.743	76.57264	0.99	100.00

(Moyenne=35.19 écart-type=12.95 taille 28 et I.C. à 95%)

Équations d'Ajustement obtenues :

Stations	Loi de GUMBEL
Bordj El Ghdir	X=10.10Y+29.36

Où Y : variable de GUMBEL

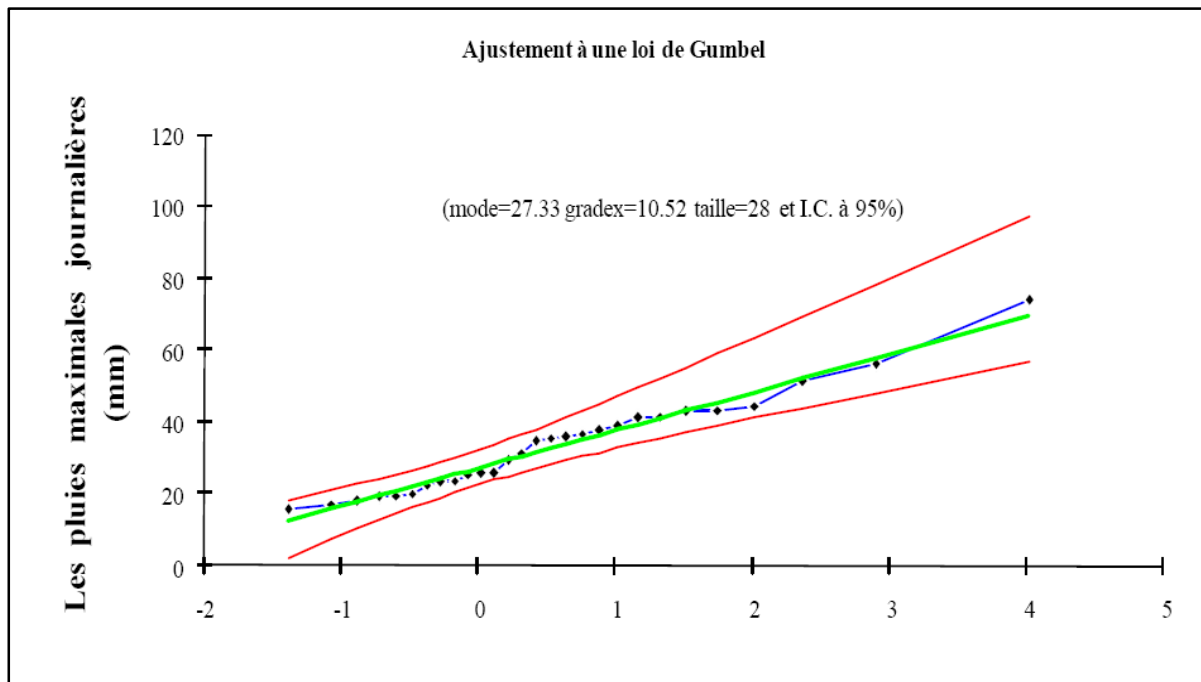


Figure IV.16 Ajustement statistique des précipitations maximales journalières à une loi de Gumbel(Station Sidi Ouadah).

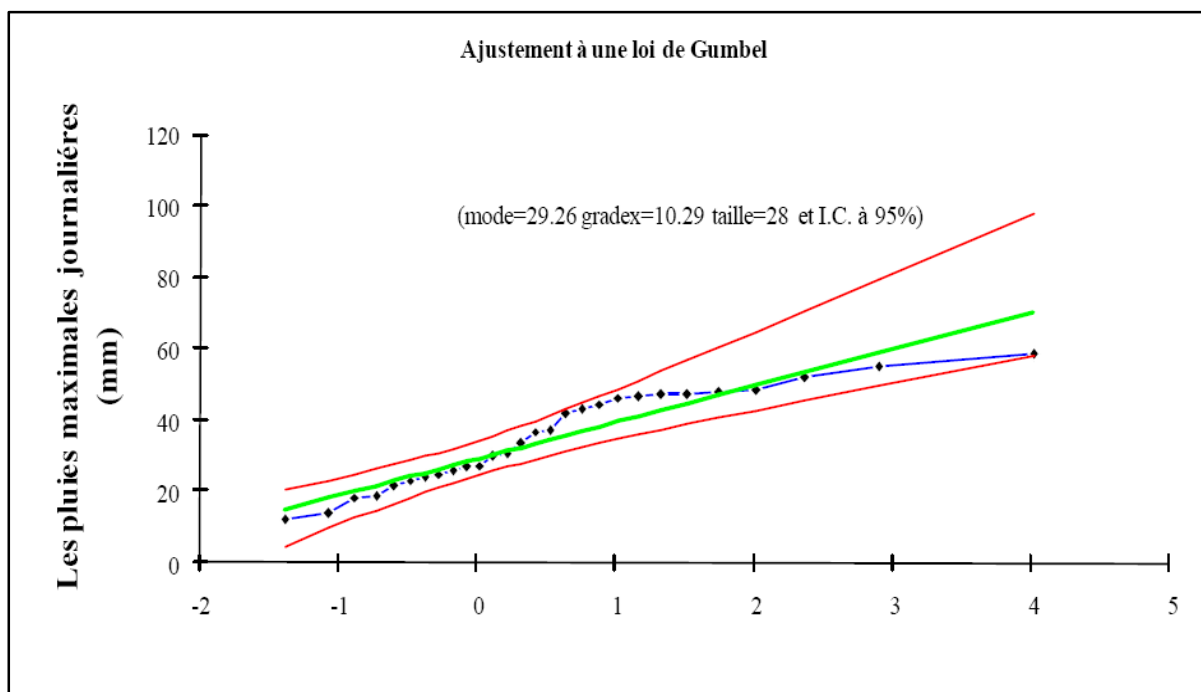


Figure IV.17 Ajustement statistique des précipitations maximales journalières à une loi de Gumbel(Station Bordj El Ghdir).

IV.6.3 Conclusion :

L'analyse des précipitations de bassin versant de l'oued de Soubella est faite sur la base des données de 5 stations pluviométriques couvrant une période de 1973 au 2014. Le comblement des lacunes des séries pluviométriques est réalisé entre les stations en utilisant la régression linéaire, le coefficient de corrélation dans toutes les stations est jugé significatif. Le choix de la méthode d'ajustement des données pluviométriques dépend de la loi de probabilités, la taille et certaines caractéristiques de l'échantillon. Dans notre étude, on ajuste les pluies annuelles à la loi de Gauss et les pluies maximales journalières à la loi de Gumbel. La pluviométrie et son rôle dans l'écoulement ont été amplement analysés, on a été amené à distinguer une série longue et homogène

Chapitre V
Généralité sur
l'érosion hydrique

Chapitre V : Généralité sur l'érosion hydrique

V.1 Introduction

L'érosion hydrique constitue en Algérie un phénomène très grave qui affecte durement le patrimoine foncier. Elle touche 45% des zones telliennes soit 12 millions d'hectares cultivables.

Ce phénomène devient encore plus grave si l'on sait que 85% des surfaces cultivables, sont situées dans les zones les plus sensibles à l'érosion.

Les deux agents principaux de l'érosion hydrique sont les précipitations et le ruissellement superficiel. Toutefois, un grand nombre de facteurs comme l'intensité et agressivité des précipitations, caractéristiques du sol, pentes et longueur de pente, le couvert végétal et l'état hydrique initial affectent la relation "chute de pluie –détachement de particules, ruissellement avec entraînement des terres".

V.2 Définitions

L'érosion est l'ensemble des actions physiques chimiques et organiques qui aboutissent à la destruction des roches et au nivellement progressif du terrain. Plus simplement l'érosion est l'usure de la partie superficielle de l'écorce terrestre ; l'eau et le vent sont les principaux agents naturels (Greco, 1966).

L'érosion est un phénomène naturel qui affecte l'ensemble de la couverture terrestre géo-pédologique et c'est l'un des facteurs importants de formation et d'évolution des milieux naturels (Dutil, 1984).

L'érosion se manifeste sous deux formes, érosion éolienne ou hydrique.

V.2.1 Erosion éolienne

Se traduit par l'ablation et le transport des particules de sol (sables et limons surtout) détachées des agrégats auparavant, suite à l'absence de liant, argile ou matières organiques. Elle concerne essentiellement les sols sableux ou sablo-limoneux, à faible teneur en matières organique.

V.2.2 Erosion hydrique

L'érosion hydrique concerne pratiquement tous les sols. Elle commence avec la chute des gouttes de pluie sur les agrégats du sol, qui provoque un certain détachement de particules élémentaires du sol (sables et limons). Ce choc de la goutte d'eau avec détachement de particules effet « splach » est plus ou moins intense selon l'état structural du sol au moment

de la pluie. Signalons qu'il ne concerne qu'une redistribution sur place des particules. Ensuite, l'action peut se poursuivre avec l'entraînement des particules détachées, d'abord en petites nappes à l'intérieur de la parcelle, puis hors de la parcelle, mais avec des intensités très variables, selon :

- ✓ La nature des sols.
- ✓ La pente.
- ✓ Les systèmes culturaux.
- ✓ L'intensité de la pluie.
- ✓ L'état d'humidité du sol au moment où il reçoit la pluie.

V.3 Effets néfastes de l'érosion

V.3.1 Dans leur zone de production

Les répercussions de l'érosion des sols vont au-delà de la perte du sol de la couche arable. La levée des plantes, leur croissance et leur rendement sont directement affectés par la perte d'éléments nutritifs du sol et des engrais qui y sont appliqués. La semence et les plantes peut-être dérangées ou totalement transportées hors du lieu où se produit l'érosion. La matière organique du sol, les résidus ainsi que le fumier épandu sont relativement légers et peuvent être facilement transportés à l'extérieur du champ, particulièrement à la fonte des neiges.

V.3.2 En d'hors des zones de production

L'impact de l'érosion des sols sur les sites plus éloignés n'est pas toujours aussi apparent que celui sur le site même de l'érosion. Le sol érodé, déposé au bas des pentes, peut empêcher ou retarder l'émergence de la semence. Les sédiments peuvent se déposer sur les propriétés en aval et occasionner des dommages aux routes.

Les sédiments qui atteignent les cours d'eau peuvent accélérer l'érosion des talus, en sabler les fossés de drainage et les cours d'eau, envaser les réservoirs, couvrir les zones de fertile et réduire la qualité de l'eau. Les pesticides et engrais fréquemment transportés avec les particules de sol peuvent contaminer ou polluer les sources d'eau et les sites récréatifs (Zaibak, 2008).

L'Algérie comme les autres pays de l'Afrique du Nord (Maghreb arabe) est parmi les régions les plus érodables dans le monde (Probest & Suchet, 1992), plusieurs travaux ont été consacrés à l'évaluation de la dégradation des terres dans cette région (Tableau V.1) (Hasbaia & al. 2012).

Pour l'Algérie, les premières mesures de l'érosion hydrique et du transport solide ont débuté en 1946 à la station hydrométrique de la Traille qui contrôle le haut bassin de l'Oued Isser (Medinger, 1960; Demmak, 1982). Au fur et à mesure de l'installation d'autres stations, plusieurs études ont été menées pour la quantification et l'étude de l'érosion hydrique et le transport solide (Medinger, 1960 ; Tixeront, 1960 ; Capolini, 1967 ; Capolini & *al.*, 1969)

Le Tableau V.1 donne l'Ordre de grandeur de l'érosion spécifique dans les pays de Maghreb selon Hasbaia & *al.*, (2012).

Tableau V.1 Dégradation spécifique du sol (E_s) dans le Maghreb (**Hasbaia & *al.*, 2012**)

Source	E_s (t/km ² /an)
Fourier (1960)	60-600
Strakhov (1967)	10-50
Heusch and Milliés-lacroix (1971)	265-2569
Dedkov and Mozzherin (1984)	100-250
Walling (1984)	1000-5000
Walling and webb(1987)	> 500
Snoussi (1988) (Maroc)	750
Probest and suchet (1992)	504

Ces exemples montrent l'enjeu majeur de l'érosion hydrique non seulement pour l'Algérie, mais aussi pour les pays semi-arides. Au Maroc, près de 10% du volume des barrages est comblé par les sédiments. En Tunisie, la proportion est plus forte, soit 25% de la gravité de l'érosion hydrique réside à la fois dans les taux importants en plus de la variabilité spatio-temporelle du phénomène (**Hasbaia & *al.*, 2012**).

V.4 Procédures de l'érosion

L'érosion se manifeste par l'enlèvement, l'arrachement, la mise en solution, puis le dépôt, de particules détachées de la surface du sol et des roches. Le résultat est une ablation qui se traduit par un modèle d'érosion (par exemple le ravin ou l'auge). Sous l'action de la pesanteur, seule (éboulis, éboulement) ou assistée par les agents d'érosion que sont l'eau, la glace, les vagues et le vent, les débris sont déplacés. Ce transport à plus ou moins longue

distance aboutit à des accumulations créatrices de modelés construits (cône de déjection, cordon littoral, dune, moraine) ou fournit la matière première des sédiments lorsque ceux-ci se déposent au fond d'un lac ou d'un océan. L'érosion implique que les constituants des substrats rocheux puissent être mobiles. Son action s'exerce immédiatement sur tous les matériaux meubles (sable, argile, limon, sol, dépôt caillouteux) dès l'instant qu'ils sont exposés à l'air libre, sans protection du couvert végétal. Il n'en est pas de même pour les roches mécaniquement dures (granite, calcaire, grès) pour lesquelles une transformation préalable, la météorisation, s'impose.

V.5 Mécanismes d'érosion hydrique

Bien que des phénomènes tels que les alternances d'humectation et de dessiccation, le gel, les pratiques culturales, la circulation d'engins et/ou de bétail, des agents biologiques ou des réactions chimiques puissent contribuer notablement à l'affaiblissement de la structure d'un sol, les principaux agents de désagrégation des sols impliqués dans les phénomènes érosifs sont l'impact des gouttes d'eau lors de précipitations et les forces de cisaillement exercées par l'écoulement des eaux de ruissellement.

Cet écoulement constitue également le principal agent du transport des particules, bien que l'effet de rejaillissement lié à la force d'impact des gouttes d'eau puisse ne pas être négligeable (érosion par rejaillissement). Le ruissellement peut prendre la forme d'un écoulement infiniment large d'une hauteur relativement uniforme (érosion en nappe), d'écoulements préférentiels dans des structures peu profondes, susceptibles d'être éliminées par les intempéries ou le travail du sol (érosion en rigoles), ou dans des structures plus marquées et plus durables (érosion en ravines). En général, sur un versant, la zone supérieure, proche de la crête, ne montre que peu ou pas de traces d'érosion. Vers l'aval, le ruissellement prend davantage d'importance, donnant lieu à une érosion, d'abord en nappe puis progressivement également en rigoles, voire en ravines. (L'intensité des phénomènes érosifs est limitée soit par leur capacité de détachement, soit par leur capacité de transport.



Figure V.1 Distribution des formes d'érosion sur un versant (Souter & al., 1978)

Les mouvements de masse par solifluxion (glissements de terrain), reptation (alternances dessiccation-humidification) ou écoulement (coulées de boue) peuvent également être considérés comme des formes particulières d'érosion hydrique dans la mesure où leur cause réside en un affaiblissement, d'origine hydrique, de la cohésion ou de la structure interne du sol. Ces phénomènes, qui peuvent entraîner des pertes en terre considérables, ne seront toutefois pas pris en considération ici.

V.5.1 Erosion par rejaillissement

Les gouttes d'eau qui tombent soit directement sur le sol, soit, après interception par le couvert végétal, du feuillage sur le sol, constituent les agents de l'érosion par rejaillissement. La force exercée par l'impact d'une goutte d'eau sur la surface du sol possède des composantes normale et tangentielle à cette surface. La composante normale contribue à compacter le sol, mais comme celui-ci est peu déformable, seule une faible partie de la quantité de mouvement est absorbée, si bien que l'impact provoque, par réaction, un rejaillissement latéral de gouttelettes d'eau, fragments de la goutte initiale. Les vitesses locales de ces jets latéraux sont à peu près doubles de la vitesse d'impact et suffisantes pour entraîner des particules de sol (fig. V.5). La composante tangentielle à la surface du sol de la force d'impact est plus faible et entièrement transmise au sol (cisaillement).

Le détachement de particules de sol lors de l'impact de gouttes d'eau affecte de façon privilégiée les silts et les sables fins. Les particules plus grossières sont en effet plus résistantes en raison de leur poids, alors que les argiles, plus fines, sont liées par des forces de nature électrostatique dont la rupture requiert davantage d'énergie.

Les effets de la force d'impact d'une précipitation dépendent de son intensité et de la taille des gouttes d'eau, mais également de l'état structural du sol et de son humidité. Une distinction est habituellement faite entre deux formes de ruissellement.

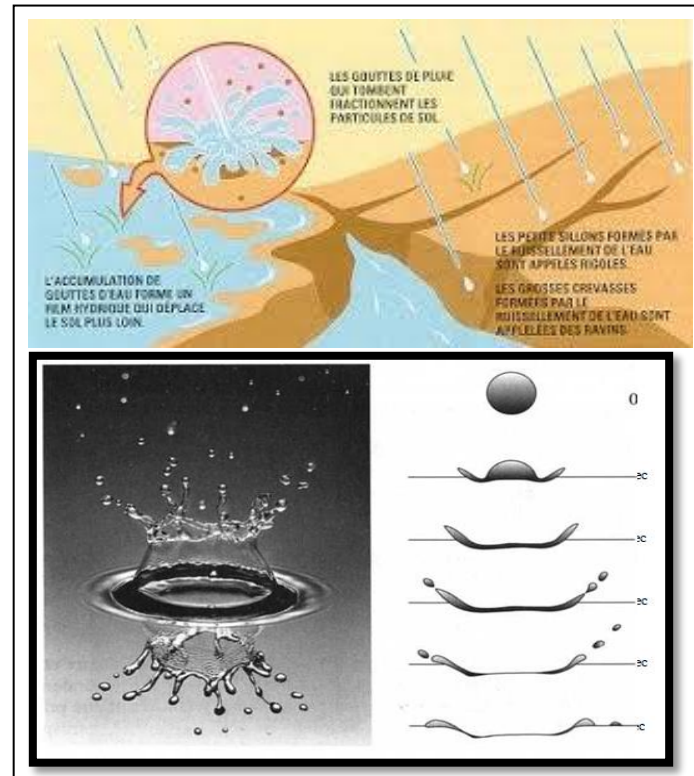


Figure V.2 Effet de rejaillissement ou effet « Splash » (Souter et al., 1978)

V.5.2 Erosion en nappe

L'érosion en nappe, également dénommée *érosion diffuse* par opposition à l'érosion linéaire caractéristique de l'érosion en rigoles ou en ravines, est produite par l'écoulement d'une lame de ruissellement de hauteur relativement uniforme sur la surface du sol (fig. V.6). Cet écoulement n'est en général pas homogène mais plutôt constitué d'un entrelacs d'écoulements dont les débits et les directions varient constamment, sans cheminements particulièrement marqués et parsemés d'obstacles divers tels que pierres, troncs ou tiges, touffes d'herbes, etc. Du point de vue hydraulique, ces écoulements se caractérisent en général par des nombres de REYNOLDS et de FROUDE ; plutôt faibles ($Re < 500$, $Fr < 0,5$), ce qui correspond à un écoulement laminaire subcritique.



Figure V.3 Accumulation de sol et de débris de culture à l'extrémité basse de ce champ est un indice d'érosion en nappe.

La capacité de détachement de ces écoulements dépend de leur vitesse, pour autant que celle-ci dépasse le seuil critique qui voit les forces de cisaillement engendrées par l'écoulement surmonter les forces liant les particules entre-elle. Cette vitesse peut s'exprimer par l'équation de Manning (Souter & al., 1978).

V.5.3 Erosion en rigoles

L'érosion en rigoles commence à se manifester à une certaine distance de la crête d'un versant, distance critique qui voit l'écoulement en nappe commencer à suivre des chenaux préférentiels (l'érosion en nappe est également parfois dénommée érosion inter-rigoles, car entre les rigoles cette forme d'érosion se poursuit). Cette transition semble être principalement due à une modification des conditions d'écoulement les divagations latérales de l'écoulement en nappe conduisent à des concentrations locales de débit, accompagnées de petits vortex qui se développent en turbulences localisées. L'augmentation de la vitesse de frottement liée à l'augmentation de débit et l'apparition de tourbillons provoque un affouillement qui crée une rupture dans la pente, à partir de laquelle se développe une rigole. Au point de rupture et à mesure que l'affouillement prend de l'ampleur, l'écoulement devient progressivement supercritique ou torrentiel (les forces d'inertie deviennent supérieures au forces de pesanteur et le nombre de **FROUDE** (Fr supérieur à 1).

Le développement de la rigole s'effectue alors à la fois vers l'amont et vers l'aval. Le rythme du retrait vers l'amont du point de rupture dépend de la cohésion du sol, de la pente et de la longueur de la zone de rupture ainsi que du débit et de la vitesse d'écoulement. Le développement vers l'aval est quand à lui contrôlé par les efforts de cisaillement exercés par l'écoulement et par la résistance que leur oppose le sol. La

tendance à la formation de rigoles d'érosion est toutefois contrebalancée dans une certaine mesure par le détachement de particules sous l'effet des précipitations, particules qui peuvent venir combler les ébauches de rigoles aussi vite que celles-ci se forment (**Souter & al., 1978**).



Figure V.4 Tracé distinct formé par les eaux de ruissellement est un signe d'érosion en rigoles ayant emporté le sol.

V.5.4 Principaux facteurs d'érosion

Afin de réaliser une cartographie des zones potentiellement productrices de matériel Sédimentaire, il convient de fournir un aperçu sur les facteurs qui conditionnent les modalités et les rythmes de l'érosion. L'agressivité des pluies, l'érodibilité des sols et des roches, la topographie et le couvert végétal.

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant pas s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur les versants en entraînant les particules de terre. Ceci apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol, soit lorsque la pluie touche une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe. Ces deux types de ruissellement peuvent donner, d'une part, une érosion aréolaire par ruissellement diffus et/ou en rigoles et, d'autre part, une érosion linéaire par ruissellement concentré (Tourki, 2010)

a)- Agressivité des pluies

C'est l'énergie des gouttes des pluies qui déclenche le processus de destruction des agrégats et le ruissellement assure leur transport (Roose et Lelong 1976). Le facteur R est estimé par la formule (Wischmeier & Smith 1978) $R = ME_c I^{30}$ où M est un coefficient dépendant du système d'unités de mesure, et E est l'énergie cinétique de l'intensité moyenne sur 30 minutes (I_c) des gouttes de pluie de chaque averse. Les seules données disponibles concernant les précipitations dans les stations qui se trouvent dans le bassin ou à sa proximité sont des moyennes mensuelles et annuelles. Certains auteurs (Seddiki & al. 2004) ont utilisé des formules alternatives qui n'impliquent que les précipitations mensuelles (p_i) et annuelles pour déterminer le facteur R (Toumi & al., 2013).

$$\log R = 1.74 \log \sum_{i=1}^{12} (p_i^2 / p) + 1.29$$

L'érosivité du climat dépend essentiellement des caractéristiques des précipitations, car elles conditionnent les modalités de l'érosion Saisonnalité des pluies, fréquence et intensité des orages. En effet, les pluies déclenchent les phénomènes de destruction des agrégats du sol nu sur les versants et le ruissellement assure le transport des particules détachées (Ellison, 1945). Ainsi, les précipitations jouent manifestement un rôle important dans le déclenchement des processus géomorphologiques relevant de l'érosion hydrique.

Il n'y a ruissellement que lorsque la vitesse avec laquelle la pluie arrive au sol est plus importante que la vitesse avec laquelle l'eau entre dans le sol. Autrement dit, le ruissellement est la différence entre l'intensité de la pluie et le taux d'infiltration d'eau dans le sol ($R = P - I$, en mm h^{-1}) (Tourki, 2010)

b) Topographie

La topographie influence l'énergie du ruissellement superficiel et le développement de l'érosion, du moins lorsque le sol est nu ou peu couvert par la végétation. Les terrains montagneux avec une altitude et un relief excessifs sont connus comme étant des régions pouvant produire anormalement des quantités élevées de transports solides, particulièrement là où les roches sont vulnérables (Hadley & Schumm, 1961 ; Ahnert, 1970) ou récemment affectées par une perturbation tectonique (Li, 1976).

Les principaux éléments topographiques qui interviennent dans les phénomènes de l'érosion sont l'inclinaison et la longueur de la pente. L'inclinaison de la pente est sûrement l'aspect

topographique le plus important. Elle joue moins sur des pentes très courtes (quelques mètres) que sur des pentes plus longues puisque le ruissellement a besoin d'une certaine distance pour atteindre sa vitesse d'écoulement maximale. Le débit, et surtout la vitesse d'écoulement, détermine à quel moment une rigole va se creuser. La vitesse dépend d'une part, de la rugosité du sol et, d'autre part, de l'inclinaison de la pente, comme le montrent les équations de Chezy (1769) et Manning (1889). La transition entre érosion diffuse et érosion linéaire est donc en partie déterminée par l'inclinaison de la pente

c)- Occupation du sol

Elle est, de loin, le facteur le plus important. La végétation vivante protège la surface du sol de l'impact des gouttes de pluie, et donc du détachement par le Splash. Les tiges et les troncs forment des obstacles qui ralentissent la vitesse du ruissellement, ce qui réduit le détachement par le ruissellement ainsi que sa capacité de transport. Les racines forment un réseau près de la surface qui tient le sol en place, augmentant ainsi sa résistance au détachement. Les feuilles mortes et débris végétaux protègent la surface de l'impact des gouttes, ralentissent le ruissellement, et ajoutent de la matière organique au sol, ce qui le rend plus résistant à l'érosion.

La relation entre végétation et érosion n'est pas simple

- Elle dépend, d'une part, de la densité du couvert végétal. L'effet protecteur d'une culture agricole n'est souvent pas efficace avant environ 40-50% de couvert végétal et il y a peu de différence au-delà de 80-90%.
- Elle dépend, d'autre part, du type de végétation. Des plantes à feuillage haut sont moins efficaces parce que les gouttes d'eau qui tombent des feuilles ont le temps d'atteindre une vitesse presque égale à celle de la pluie. Même la forme de la feuille peut jouer en altérant la taille de la goutte qui tombe au sol (l'énergie cinétique d'une goutte qui tombe à la surface est approximativement proportionnelle à mv^2 où m = masse et v = vitesse). Des feuilles qui concentrent l'eau à leur surface pour agrandir la taille des gouttes peuvent en effet provoquer une érosion sous la couronne si le sol est nu.

V.6 Conséquence de l'érosion hydrique

V.6.1 L'envasement des barrages

Le processus de l'envasement influe sur le volume d'eau utile emmagasiné dans les barrages entraînant une diminution de capacité de stockage de ce dernier. Ce problème de

sédimentation est liée aux phénomènes de l'érosion hydrique dans le bassin versant qui lui-même est conditionné par certains paramètres tels que la nature du sol, la couverture végétale, la pente du versant, la quantité de précipitation et leur intensité.



Figure V.5 Dépôts de vase dans le barrage sur la rive gauche (photo à gauche) et dépôts de vase à l'entrée de l'Oued Bougous au barrage (photo à droite) (Tourki, 2010)

V.6.2 Dégradation du bilan hydrique

Il s'agit de l'effet le plus important. Une culture pluviale soumise à l'érosion voit son déficit hydrique s'accroître suite à la réduction de la pluie efficace. En effet, une fraction importante de la pluie ruisselle et n'est plus utilisable par la plante. La réduction du volume de sol exploitable pour les racines et donc de la réserve utile du sol (Remmas, 2014)

V.6.3 Appauvrissement du sol

L'appauvrissement du sol se manifeste de la manière suivante

- ✓ La teneur en humus et en éléments nutritifs du sol décroît.
- ✓ La capacité de rétention en eau du sol diminue.
- ✓ La stabilité structurale du sol décroît.

Cet appauvrissement est lié au double effet de décapage des horizons supérieurs habituellement les plus fertiles et de sélectivité de l'érosion. (Remmas, 2014)

V.6.4 Autres conséquences

Les autres conséquences de l'érosion hydrique sont récapitulées :
 Déchaussements, des plantes emportées ou recouvrement de la culture
 Hétérogénéité croissante des parcelles diminution du drainage profond induisant une moindre réalimentation des nappes.
 Destruction des routes et infrastructure hydraulique (Fig.13) (Remmas, 2014)



Figure V.6 Destruction des ouvrages (pont du quartier commando Mejdoub wilaya de Saida en (2013)

V.7 Conclusion

Les phénomènes de ruissellement et d'érosion prennent différentes formes et leurs effets ne sont pas toujours spectaculaires. Le ruissellement peut se limiter à la parcelle sous une forme diffuse très discrète. Mais s'il prend de l'ampleur, c'est à l'échelle du bassin versant que ses dégâts se font sentir.

Aussi, pour être efficaces, les actions doivent être menées à ces deux échelles. Certaines solutions proposées peuvent être appliquées de façon ponctuelle, d'autres seront d'autant plus efficaces qu'elles seront réfléchies et mises en œuvre de façon collective et concertée sur le territoire.

Infiltrer l'eau le plus en amont possible, freiner le ruissellement et permettre un stockage temporaire sont les principaux objectifs pour limiter les phénomènes d'érosion.

Pour répondre à ces objectifs, une multitude de solutions existent. Deux types de solutions peuvent être mis en œuvre : améliorer les pratiques agricoles et viticoles (approche globale sur le système cultural) et réaliser des aménagements de régulation des eaux.

Chapitre VI
Cartographie des
paramètres de
l'érosion

Chapitre VI : Cartographie des paramètres de l'érosion

VI.1 Introduction

Le sous bassin versant de l'oued de Soubella est un petit sous bassin dans le nord du Hodna. Le présent chapitre a pour but l'évaluation et la cartographie de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Soubella, en fonction de chaque paramètre et en tenant compte de l'ensemble des paramètres mises en équation USLE à la fois.

Parmi plusieurs modèle de quantification de l'érosion hydrique, on a opté dans le cadre de cette étude pour le modèle USLE (Universal Soil Loss Equation Wischmeier and Smith (1978)) afin d'élaborer la carte de sensibilité du bassin versant de l'oued Soubella à l'érosion par rapport à chaque paramètre pour arriver à la fin, à une carte globale de sensibilité quantitative à l'érosion en superposant et en multipliant les cartes obtenues pour chaque paramètre.

VI.2 Application de l'Equation universelle de perte en sol 'USLE'

L'équation universelle de pertes en sol (Wischmeier & Smith, 1978) permet la quantification des pertes en sol par l'érosion en nappes. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs principaux qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique R, érodibilité des sols K, inclinaison et longueur de pente LS, occupation des sols C et l'effet des pratiques anti-érosives P :

$$A = R.K.LS.C.P \dots\dots\dots(VI.1)$$

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 ; il est exprimé en MJ .mm / ha .hr. an.

K : l'érodibilité des sols ; il dépend de la granularité, de la quantité de matière organique de la perméabilité et de la structure du sol ; il est exprimé en t.h / MJ .mm.

L : facteur de longueur de la pente ;

S : facteur de d'inclinaison de la pente ;

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

P : facteur des pratiques antiérosives.

L'équation (VI.1) de l'USLE est utilisée pour la cartographie de la quantité de l'érosion dans la bassin versant de l'oued Soubella, en superposant, à l'aide du logiciel ArcGis, les différentes cartes thématiques obtenue pour chaque facteur. Au préalable, la base de données

véhiculée par chaque carte thématique a été adaptée en attribuant une valeur précise au facteur concerné en se basant sur le contenu thématique du polygone cartographique. La méthodologie appliquée pour cartographier les différents paramètres, sera résumé dans l'organigramme suivant et décrite en détail dans les sections ci-dessous.

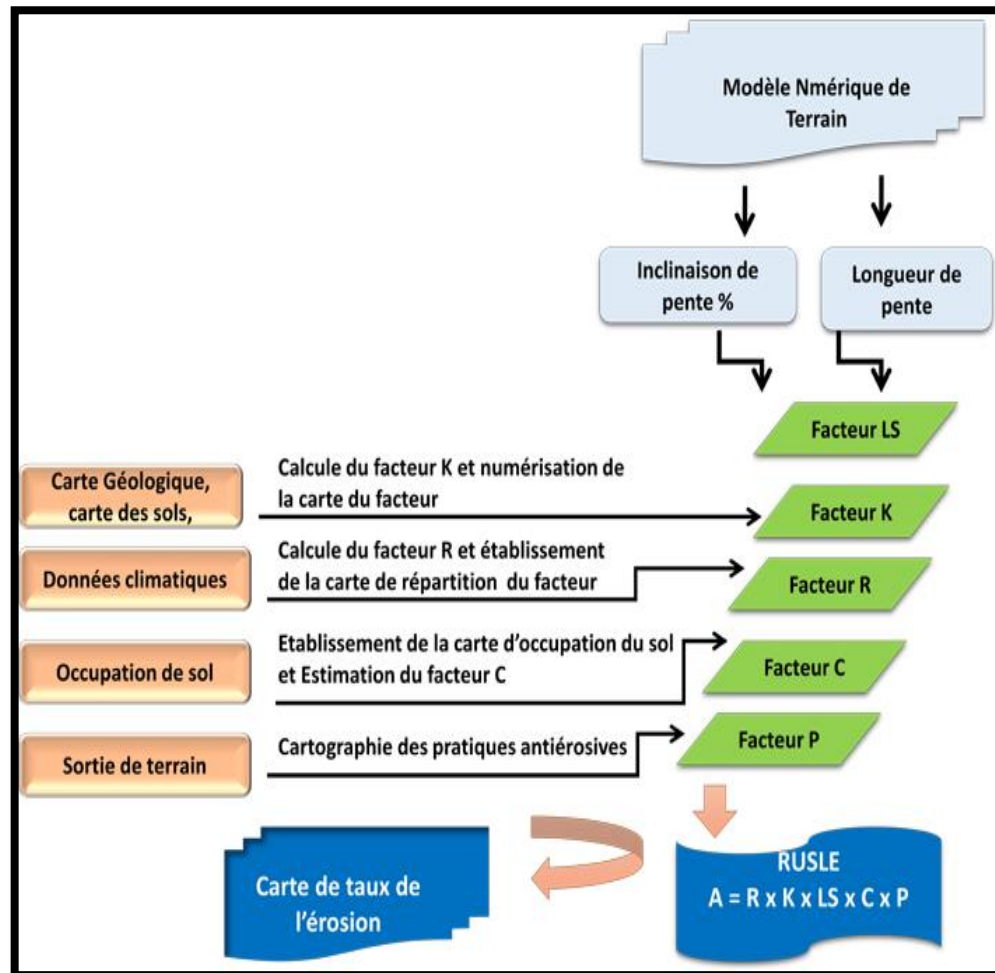


Figure VI.1 Organigramme de la cartographie de l'érosion par le modèle USLE

VI.2.1 Indice d'agressivité des pluies (facteur R)

La pluie est l'un des principaux facteurs de l'érosion des sols, ceci se produit lorsque les eaux pluviales ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol et arrachent les particules du sol en emportant des particules. Ainsi, le rôle du facteur R est de caractériser la force érosive des précipitations sur le sol. Il considère les différences régionales du climat selon le type, l'intensité et la fréquence des précipitations. Dans notre cas R est calculé par la formule (VI-2), en utilisant données disponibles (les pluies mensuelles et annuelles), cette formule est utilisée dans plusieurs études régionales et nationales (Toumi et al.2013)

Les précipitations annuelles et mensuelles des 05 stations utilisées ainsi que les résultats des calculs du facteur R sont reportés dans le tableau VI.1.

$$\log R = 1.74 \log \sum_{i=1}^{12} (p_i^2 / p) + 1.29 \dots \dots \dots (VI.2)$$

Où P_i et P sont respectivement les précipitations mensuelles et annuelles en mm.

Tableau IV.1 Précipitations moyennes mensuelles (mm), annuelles (mm) et les valeurs du facteur R moyennes (1973-2004).

Station	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel	R
BourjGhdir	35,11	33,7	42,87	45,29	37,93	31,82	37,49	45,1	41,29	15,41	6,47	9,12	377,54	60,68
Sidi Ouadah	27,53	30,83	30	35,35	29,55	23,96	28,31	26,53	33,46	11,1	2,038	6,86	282,12	45,95
M'sila	29,16	28,46	22,86	17,8	17,15	19,3	18,84	29,82	25,79	8,69	5,643	6,73	230,24	38,47
BBA	39,52	26,49	33,26	36,47	34,55	26,64	29,72	42	38,28	19,51	6,32	11,94	342,44	50,94
ngaous	28,87	31,16	19,33	24,52	22,56	18,66	17,32	30,47	25,1	14,1	4,22	7,32	243,63	42,46

Après la détermination de la valeur moyenne du facteur R dans les 5 stations pluviométriques disponibles dans et autour du bassin, les facteurs du R ont été repartie progressivement dans toute la zone d'étude du bassin versant. La répartition des iso-érodent dans le bassin versant de Soubella est représenté dans la figure V.2.

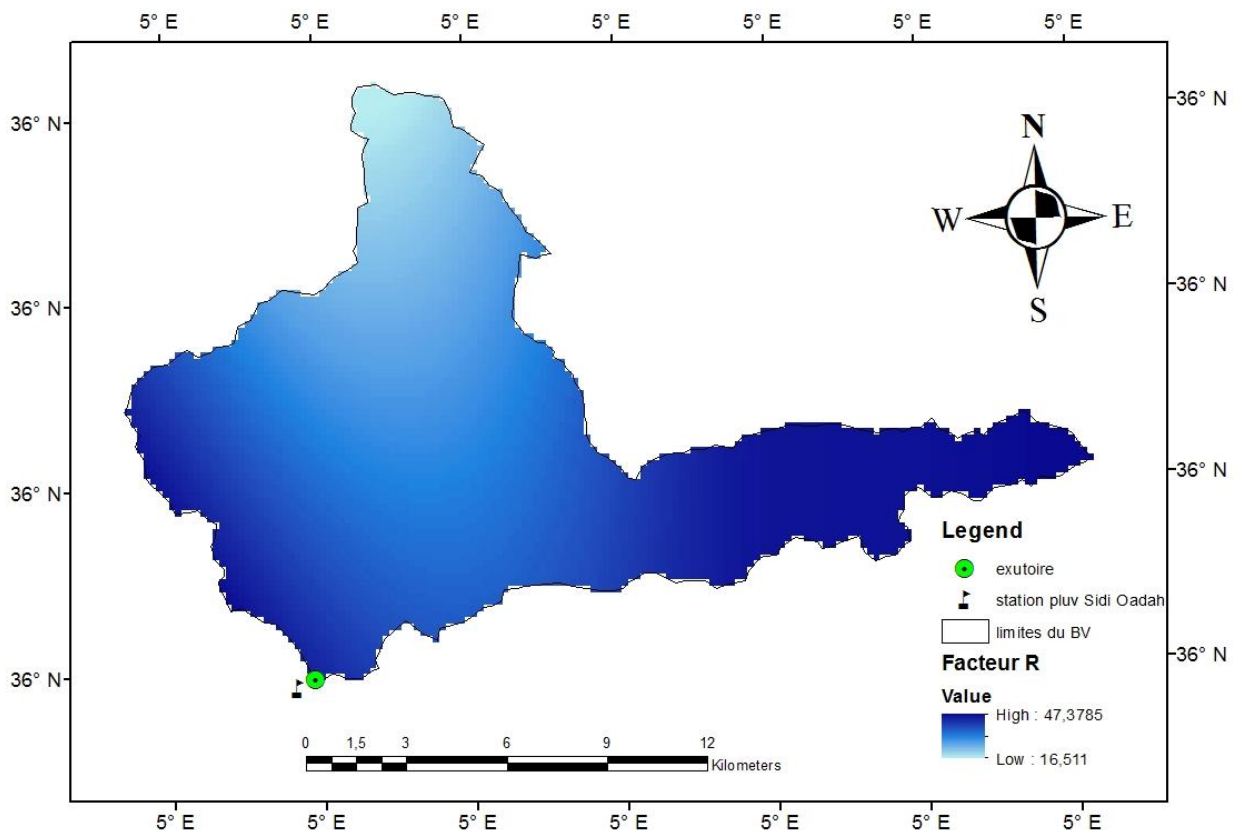


Figure VI.2 Carte du facteur R du bassin versant de l'oued Soubella

Le facteur R varie de 16 à 47 MJ mm (ha h an)⁻¹ dans tout le bassin de Soubella (Figure VI.2). Les valeurs les plus faibles de ce paramètre se localisent légèrement dans l'haut du bassin, tandis que les min sont atteints au sommet des massifs montagneux qui bordent le bassin près des montagne Bou Taleb (Nord Ouest) . les valeurs max sont observées dans les parties est et ouste du bassin

VI.2.2 Pente et longueur de pente (facteur LS)

La longueur, la forme et surtout l'inclinaison de pente sont des paramètres qui influencent considérablement l'érosion des sols. La longueur de pente conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules croît en fonction de la longueur de la parcelle. De même, les transports solides croissent de façon exponentielle avec le pourcentage de pente. Ces processus ont pour effet de former des rigoles et des creusements à la surface du sol. Les facteurs L (longueur de pente) et S (angle de la pente en %) sont le plus souvent combinés en un facteur unique adimensionnel LS afin de définir l'effet de l'érosion. Dans le cadre de notre étude, on a utilisé la formule développée par Wischmeier & Smith (1978) et utilisée par plusieurs auteurs (e.g. Khosrowpanah et al. 2007, García Rodríguez & Giménez Suárez, 2010, et Toumi et al.2013).

Les facteurs L et S peuvent être estimés séparément à partir des modèles numériques de terrain MNT. Concernant la longueur de pente, la technique consiste à déterminer la délimitation des sous-bassins versants où

l'écoulement ne rencontre aucun obstacle Toumi et al.2013

$$LS = \left(\frac{L}{22.13} \right)^m (0.065 + 0.045S + 0.065S^2) \dots \dots \dots (VI.3)$$

Après avoir généré l'MNT du bassin versant par Global-Maper (figure VI. 2) et transférée vers le logiciel ArcGis qui a été utilisé pour déterminer des cartes de L et de S séparément. A partir de ces dernières cartes de L et S , on génère la carte de LS en utilisant l'équation (VI.3)

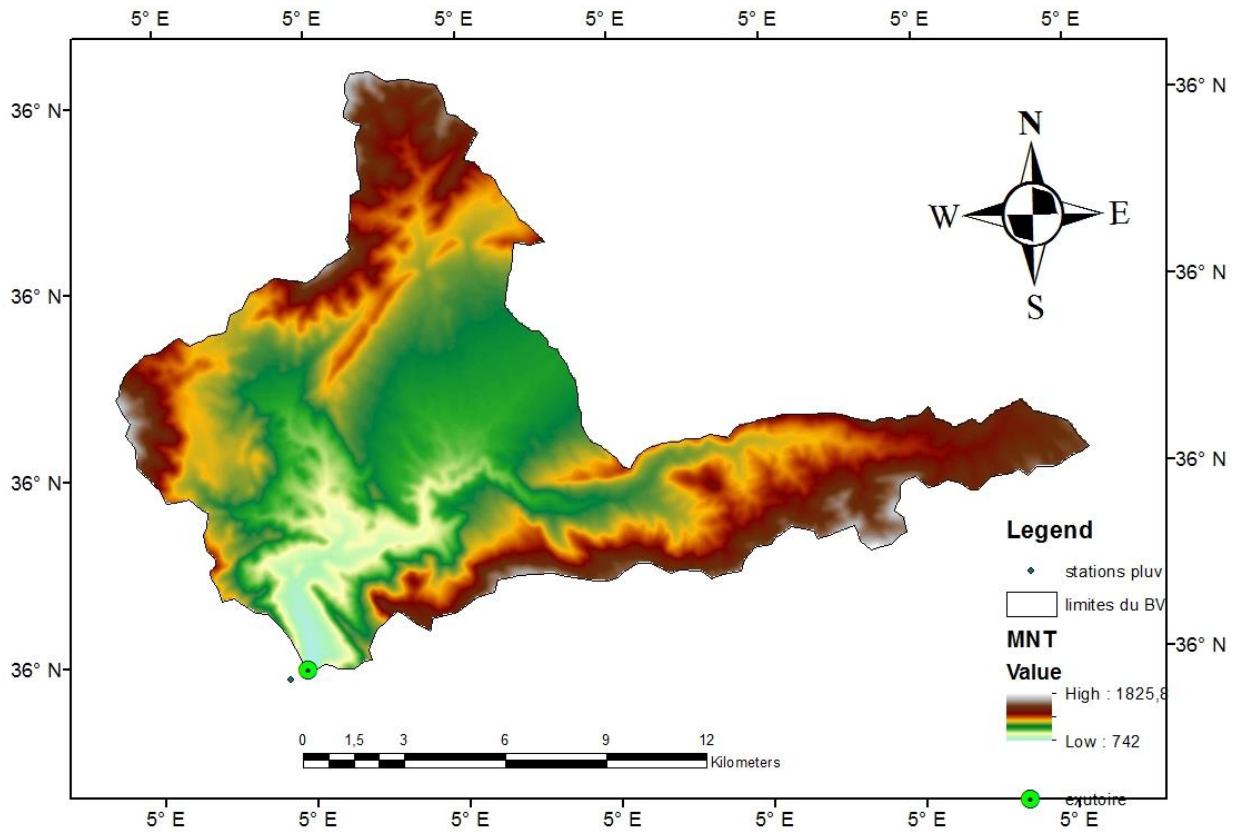


Figure VI.3 Modèle numérique du terrain (MNT) du bassin versant de l'oued Soubella

Le facteur LS varie de 0,018 à 49.15 dans le bassin de l'oued Soubella (**Figure VI.4**). Les valeurs les plus élevées se concentrent principalement dans les frontières Sud et Nord-Ouest du bassin. Cette région correspond au massif montagneux constitué de calcaires marneux et de formations marno-calcaires.

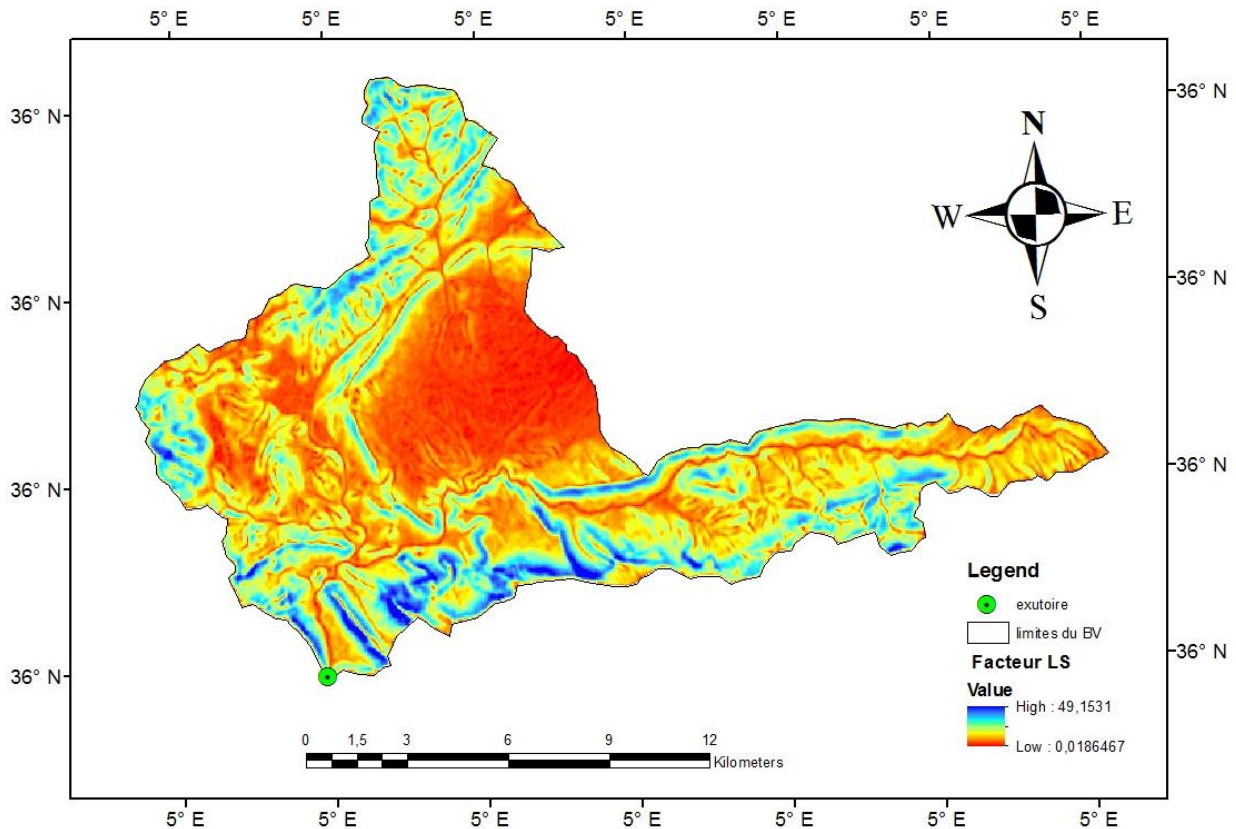


Figure VI.4 Carte du facteur *LS* du bassin versant de l'oued Soubella.

VI.2.3 Occupation des sols (C)

Le couvert végétal protège les sols et assure l'amortissement des gouttes de pluie, le ralentissement du ruissellement et de l'infiltration. Ainsi, pour une végétation basse, les pertes de sols diminuent avec l'augmentation du couvert végétal (Soutter *et al.*, 2007). Le facteur C est défini comme le rapport entre les pertes en sols nus sous des conditions spécifiques et les pertes en sols correspondants aux sols sous système d'exploitation (Wischmeier et Smith, 1978 *in* El Garouani *et al.*, 2008). On confond dans le même facteur C, à la fois le couvert végétal, son niveau de production et les techniques culturales.

Dans notre cas j'ai utilisé les photos satellitaires pour l'NDVI, et la carte du facteur C parmi la carte d'NDVI.

Tableau IV.2 Les valeurs du facteur C par type d'occupation du sol

Types d'occupation du sol	Facteur C
Arboricultures/ céréaliculture	0.32
Cultures intensives	0.1
Matorral à couvert clair	0.34
Cultures et matorral	0.29

Arboriculture aléatoires	0.34
Arboriculture diffuse	0.34
Cultures en sec	0.36
Reboisement clair sur matorral clair	0.37
Reboisement dense	0.29
Matorral dense	0.21
Foret naturelle claire	0.34
Arboriculture sur sols décapé par l'érosion	0.5
Arboriculture, banquettes	0.33
Cultures en sec	0.36
Sol nu	1

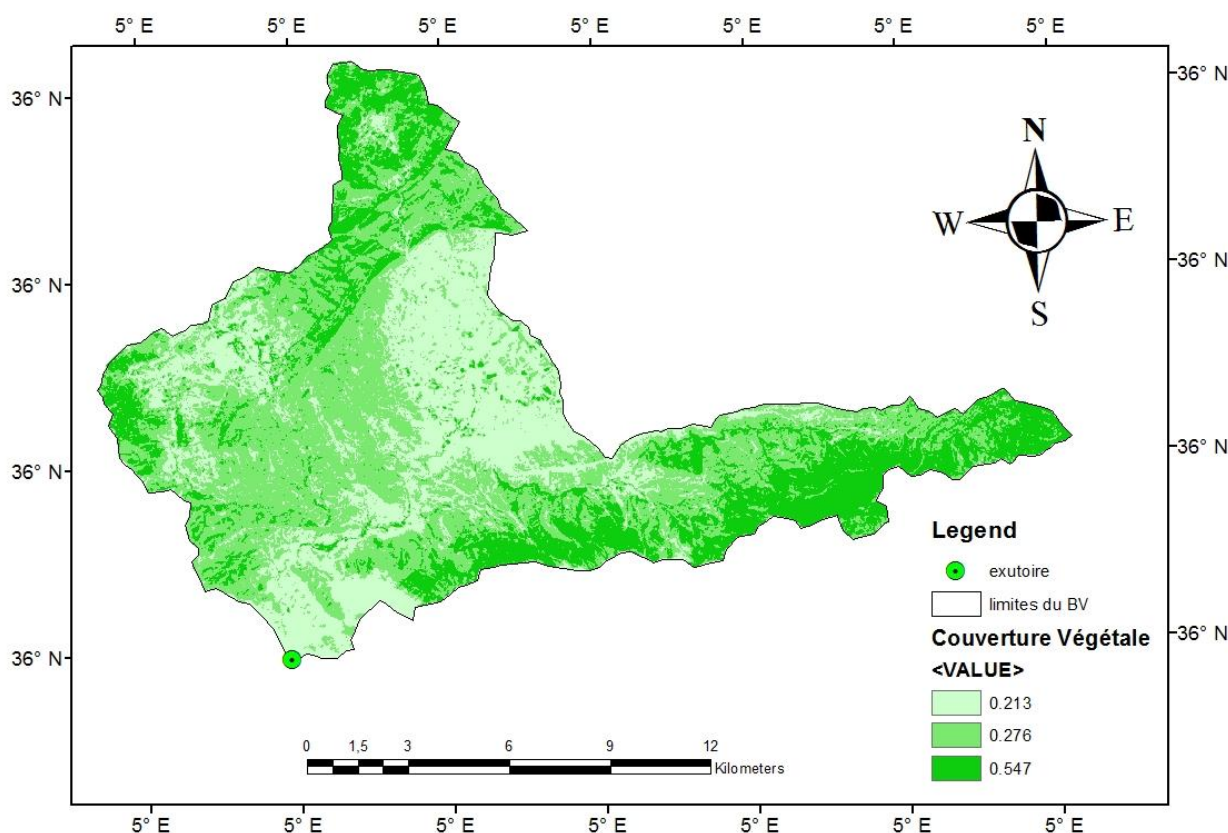


Figure VI.5 Indice de couverture végétale et de pratiques culturales du bassin versant de l'oued Soubella (Facteur C)

La distribution géographique du facteur C sur le bassin de Soubella reflète indirectement la dynamique d'utilisation des terres selon les unités physiographiques : les valeurs les plus élevées se concentrent surtout dans la grande plaine centrale du bassin où dominent les activités agricoles, tandis que les valeurs les plus faibles se localisent dans les massifs montagneux, compte tenu de la présence de forêts.

VI.2.4 Indice d'érodibilité des sols (facteur K)

L'érodibilité d'un sol se traduit par la résistance inhérente au détachement et au transport des particules par l'eau. Les paramètres intrinsèques du sol (stabilité structurale, croûte de battance, état dispersé, matière organique, texture) contribuent largement à influencer la sensibilité des sols à l'érosion. Le facteur K est fonction de la texture, la teneur du sol en matière organique, et la perméabilité du sol.

Le facteur érodibilité des sols témoigne la cohésion et la résistance du sol vis-à-vis de l'érosion. Wischmeier et Smith (1978) ont mesuré expérimentalement le taux d'érosion de différents sols sous des conditions standard. Sous ces conditions, tous les facteurs sont égaux à 1 sauf l'agressivité climatique et le facteur K. Les pertes dépendent dans ce cas seulement de R et K. La répétition des expérimentations sur différents types de sols a permis à Wischmeier & Smith(1978) de développer statistiquement une équation pour le calcul de l'érodibilité des sols :

$$100K = 2,1 M^{1,14} 10^{-4} (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2,5 (c - 3) \dots \dots \dots (VI.4)$$

Où M est calculé par la formule $M = (\% \text{ sable fin} + \text{ limon}) \cdot (100 - \% \text{ argile})$.

a : est le pourcentage de matière organique ;

b : est le code de la perméabilité ;

c : est le code de la structure.

Dans notre cas, la nature du sol est générée en utilisant une carte numérique de types de sols développée par la FAO pour tout le monde. A partir de cette carte, la surface de BV de Soubella est divisée en trois zones dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau IV.3

Soil sample	ms (sand) Top soil %	msilt (silt) Top soil %	mc (clay) Topsoil)%	orgC oraganic carbon %	Fcsand	F cl-si	F orgc	F hisand	K usle	K
XH	54,8	52,4	21,5	8,2	0,2003776	0,901999	0,75	0,9975091	0,13521764	0,017808163
I	58,9	-1	-1	-1	0,2000001	0,8122524	1,0003175	0,9942353	0,161565345	0,021278156
ZO	43,2	37,2	24,5	9,5	0,200289	0,8591665	0,75	0,9997795	0,129032734	0,016993611

Tableau IV.3 Répartition d'érodibilité de sol dans le bassin de Soubella

La figure VI.6 montre que K varie entre 0,017 et 0,0213 suivant les types pédologiques. La limite supérieure 0.0213 a été attribuée aux sols de l'unité complexe de sols peu évolués ; il s'agit des formations très tendres et facilement érodables développées sur des marnes miocènes, et constamment rajeunis par l'érosion. La limite inférieure 0,017 a été attribuée aux sols brunifiés et moyennement érodables se développant sur des grès et des calcaires de crétaé.

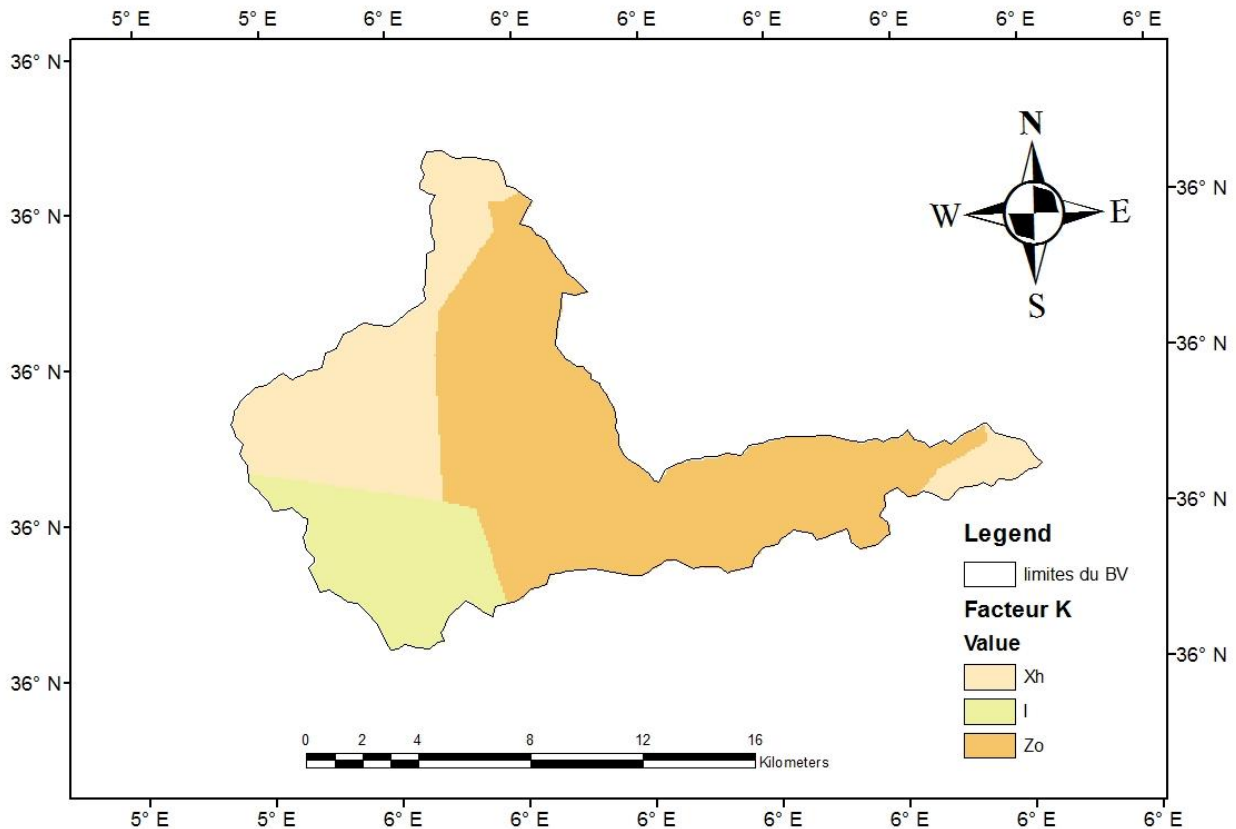


Figure VI.6 Carte de distribution des classes d'érodibilité (K) dans le bassin versant de l'Oued Soubella

VI.2.5 Pratiques anti-érosives, facteur P

Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols. Les valeurs d'indice d'aménagement antiérosif (Facteur P) sont inférieures ou égales à 1. La valeur 1 est attribuée aux terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée. Les valeurs de P varient selon la pratique adoptée et aussi selon la pente. Dans tout le bassin versant de l'oued Soubella, il n'y a pas d'aménagements anti-érosifs, et les agriculteurs n'utilisent pas de pratiques culturales anti-érosives. Dans ce contexte, la valeur $P = 1$ a été attribuée à toute la superficie du bassin.

VI.3 Résultats et discussion

Estimation des pertes en terre

Le taux de l'érosion résulte de la combinaison des tous les facteurs du modèle USLE, notamment l'agressivité climatique R (ou érosivité des précipitations), l'érodibilité des sols K et l'effet combiné du degré et de la longueur de la pente LS, la couverture végétale C et les pratiques antiérosives P. Sa détermination permet de connaître la répartition du risque érosif dû

aux seuls effets des facteurs naturels. La combinaison et le traitement sous SIG de ces facteurs présentés dans les sections précédentes ont permis d'élaborer à l'échelle du bassin de Soubella la carte de l'érosion potentielle (Figure VI.7).

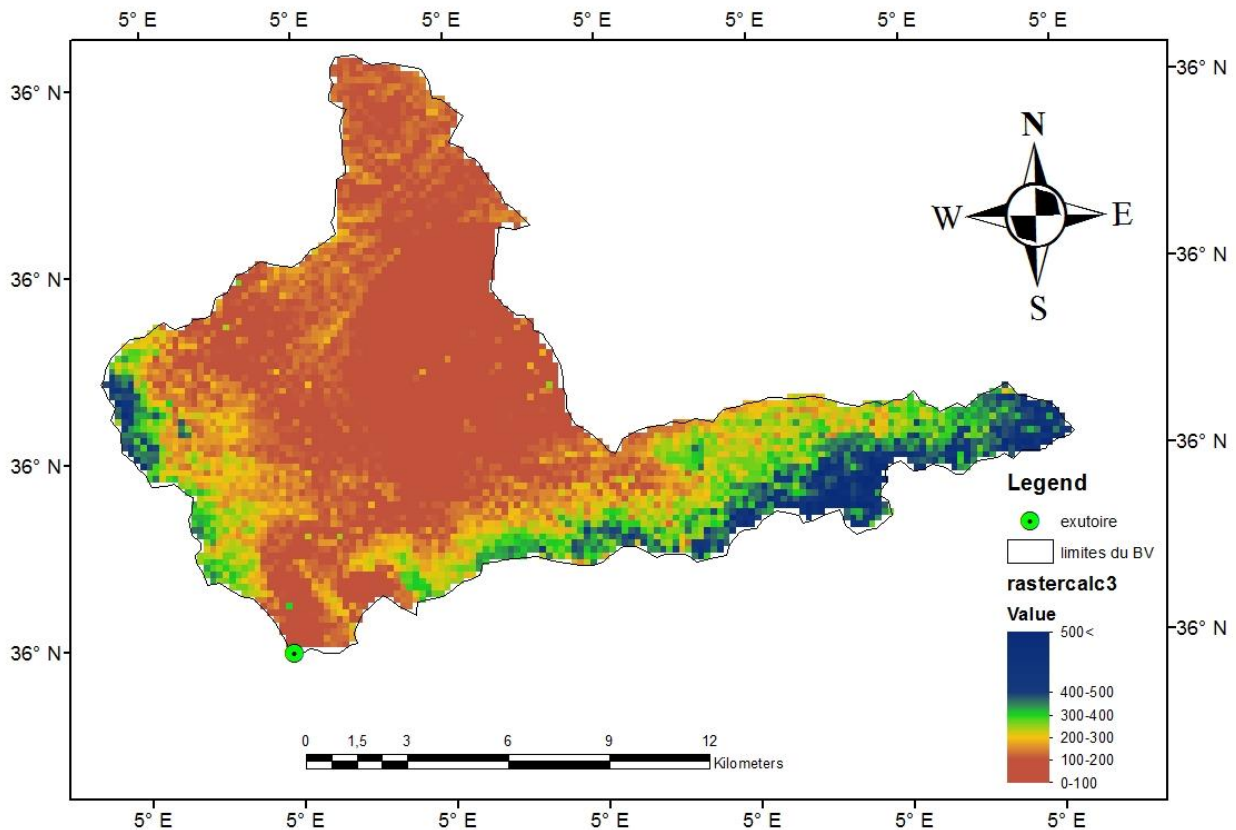


Figure VI.7 Carte de pertes en sol du bassin versant de l'oued Soubella

De cette figure, on constate que le taux d'érosion dans le bassin de Soubella se diffère d'une zone à l'autre selon l'influence des différents facteurs qui contrôlent l'érosion, ce taux varie est de 0.018 à 500 t/ha/an. Si on adopte la classification établie aux Etats Unis fondée sur la tolérance des sols aux pertes, s classes ont été distinguées sur le bassin de l'oued de Soubella (Tableau IV.4 et figure VI.7), à savoir :

1. Une première classe qui regroupe les zones avec une érosion potentielle faible inférieure à 11 t/ha/an. Elle constitue 18% de la superficie du bassin étudié et couvre principalement les frontière du bassin et une partie près de l'exutoire du bassin.
2. Une deuxième classe qui regroupe les zones avec une érosion potentielle modérée comprise entre 5 et 15 t/ha/an. Elle constitue 25% de la superficie du bassin étudié, se focalise principalement sur la plaine en milieu et au Nord du bassin versant.

3. une troisième classe qui regroupe les zones avec une érosion potentielle élevée comprise entre 15 et 30 t/ha/an. Elle représente 20% de la superficie du bassin étudié.
4. La quatrième classe regroupe les zones avec une érosion potentielle grave supérieure à 30 t/ha/an. Cette classe représente 37% de la superficie de l'oued de Soubella, elles se localisent dans les zones montagneuses au Sud-Ouest du bassin près Sidi Ouadah et au nord-Ouest près de montagne Bou Taleb

Tableau IV.4 Les classes de risque d'érosion du sol.

Classes	Érosion des sols	Perte en sol en tonnes/hectare/année
1	Faible	0-5
2	Modérée	5 - 15
3	Élevée	15- 30
4	Grave	> 30

Tableau IV.5 Répartition des pertes de sol dans le bassin de l'oued Soubella

Classes pertes (t/ha/an)	Surface (ha)	% surface du bassin	% surface/bassin	Érosion des sols
< 5	4400	23,79	18	Faible
5-100	2540	13,73		
100-200	1103	5,96	25	Modérée
200-300	3520	19,03	20	Élevée
300-400	2707	14,64	37	Grave
400-500	2470	13,35		
>500	1756	9,49		

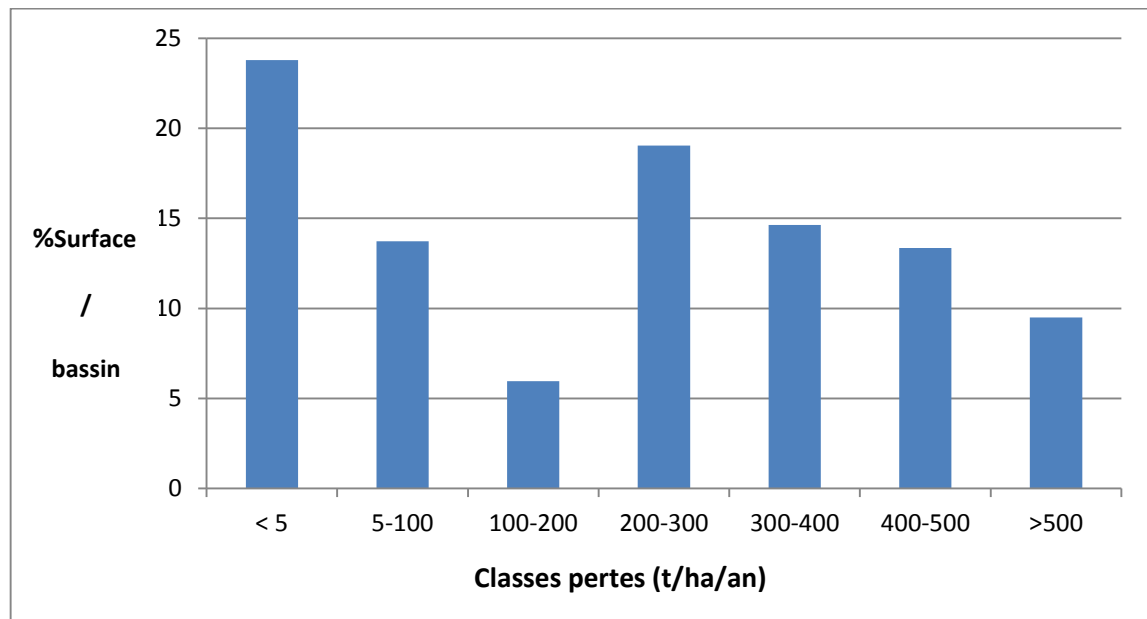


Figure VI.7 Répartition des pertes de sol dans le bassin de l'Oued Soubella

VI.4 Conclusion

La carte d'érosion du bassin versant fournit de nombreuses informations concernant le potentiel de production de sédiments par l'érosion des versants et la localisation des zones sources. Les valeurs du taux de l'érosion potentielle en (t/ha/an) obtenues à l'échelle du bassin ont été regroupées suivant quatre classes adoptées aux Etats Unis. L'analyse des résultats obtenus pour le bassin versant de l'oued Soubella montre que le taux d'érosion sur tout le bassin est en moyenne de 5.58 t/ha/an.

Chapitre VII
Moyens de lutte
contre l'érosion

Chapitre VII : Moyens de lutte contre l'érosion

VII.1 Introduction

Sur le long terme, la perte en productivité du sol est le problème le plus grave. La ressource ne se remplace pas et les gains dans d'autres domaines ne remplacent pas la superficie perdue chaque année. Ce problème est particulièrement grave dans les pays pauvres qui n'ont pas les moyens de mettre en place des systèmes de gestion à la hauteur des défis. Que vaut la perte d'1 cm de terre sur 10 ans. Il est aujourd'hui très difficile de chiffrer la valeur de la perte en terre. De plus, conserver le sol représente un gain sur le long terme, alors que dresser la liste des problèmes hors-sites représente un gain immédiat. Dans ce chapitre, les moyens de lutte contre l'érosion seront présentés.

VII.2 Conséquences de l'érosion hydrique en Algérie sont dramatiques

Les conséquences de l'érosion hydrique en Algérie sont dramatiques, nous pouvons citer parmi eux:

1. Réduction de la production agricole (pertes en sol agricole) ;
2. Une dégradation spécifique dépassant les 5000 t/km²/an ;
3. Une quantité de 120 millions de tonnes de sédiments rejeté en mer chaque année par les bassins tributaires de la méditerranée (Demmak, 1982) ;
4. Un exode rural important ;
5. Un rehaussement des lits des oueds provoquant par la suite des inondations, menace les voies de communication et les ouvrages d'arts,...
6. L'envasement précoce des barrages en exploitation.

VII.3 Lutte contre l'érosion hydrique

Devant ces problèmes préoccupants d'érosion, les populations développent, en générale, deux types d'attitude:

- Les paysans sont principalement concernés par la dégradation de la productivité de leurs champs : ils cherchent à adapter leur système de production pour optimiser la productivité de leur terre et de leur travail. La formation de rigoles (griffes d'érosion linéaire décimétriques) et de ravines (rigoles profondes de plus de 50 cm que les façons culturales ne peuvent effacer) est un indicateur d'un mauvais fonctionnement du système de production. Les paysans tentent de reboucher les rigoles et les ravines par le travail de la surface du sol, mais ils maîtrisent rarement les problèmes techniques posés par la réhabilitation des ravines. La plupart des études sur l'érosion dans les champs cultivés concernent l'érosion en nappe et en rigoles et leur spatialisation est basée sur l'équation

universelle des pertes en terre (USLE de Wischmeier et Smith, 1978) laquelle tente de prévoir à long terme (> 20 ans) l'érosion en nappe et rigoles en fonction de l'érosivité des pluies, du sol, de la pente et du système de culture.

- En revanche, les populations urbaines et les consommateurs d'eau sont plus intéressés par la qualité des eaux, les problèmes de transfert de boues lors des orages, de pollutions des nappes d'eau en aval et les inondations par les effluents en provenance des champs cultivés dans les rivières poissonneuses et les lacs. En générale, l'État charge les ingénieurs des services publics de surveiller les forêts et les eaux douces contre toutes ces pollutions.

VII.4 Stratégies traditionnelles de lutte anti-érosive

- **Culture itinérante sur brûlis** est probablement la plus ancienne stratégie utilisée sur tous les continents pour maintenir la productivité de la terre. Cette stratégie ne s'applique que sur des terres peu peuplées (moins de 20 à 40 habitants au kilomètre carré).
- **Les terrasses en gradins et les terrasses méditerranéennes sur murettes en pierres:** se sont développées 2 000 ans avant J.-C., en Asie. Ces terrasses sont apparues là où la population est dense, les terres cultivables rares et le travail bon marché. Comme ces aménagements exigent un gros effort pour la construction des terrasses (700 à 1 200 hommes.jours/ha), pour l'entretien des talus et la restauration de la fertilité des sols remués, il faut que la production soit rentable ou vitale. Ces améliorations foncières ne sont acceptées que là où les paysans n'ont plus d'autre choix pour subsister (pressions foncières, militaires, religieuses ou économiques) ou pour produire des cultures particulièrement rentables. Ce sont les aménagements les plus connues et les plus utilisées par les agriculteurs. Ce sont des constructions qui arrivent à casser la pente. On distingue, parmi ces terrasses, celles qui sont soutenues par un mur et celles qui sont soutenues par un talus (figure VII .1).



Figure VII .1 Une vue de versants aménagés par des terrasses soutenues par a-des talus et par b-des murs en pierre.

- **les billons, les cultures associées et l'agroforesterie** sont illustrés dans la photo de la figure suivante. Il y a divers types de billons : des billons simples et des billons cloisonnés. Les billons cloisonnés sont des petites cuvettes de 2 à 10 m² entourées par des billons de terre. Les billons peuvent également être consolidés en pierres quand la parcelle se situe dans le lit d'un oued.



Figure VII.2 Vue sur des billons.

VII.5 Stratégies modernes d'équipement hydraulique

VII.5.1 La restauration des terrains en montagne (RTM) : Développée en France à partir des années 1850. Elle a pour but de reboiser les terres dégradées de montagne et de corriger les torrents, de protéger les vallées et les voies de communication des masses de terre mobilisées par l'érosion et des crues dévastatrices.

VII.5.2 La conservation de l'eau et des sols (CES) : Elle a été créée aux Etats-Unis lors de la crise de 1930. Cette stratégie vise à conseiller les paysans et à leur fournir un appui technique et financier pour lutter contre la dégradation spectaculaire des terres des grandes plaines agricoles (des nuages de poussière, provoqués par l'érosion éolienne, étaient capables d'obscurcir le ciel en plein jour). La CES vise à maintenir en plus de la capacité de production des terres, aussi la protection de la qualité des eaux si indispensable aux citoyens. Les nuisances à l'aval coûtent bien plus cher et forcent l'Etat à réagir. Cela justifie les efforts considérables de l'Etat pour aider techniquement et financièrement les paysans (plus ou moins volontaires selon les régions) à aménager leurs terres.

VII.5.3 La défense et restauration des sols (DRS) : qui consiste entre autres à revégétaliser l'amont des bassins-versants, stabiliser les ravines, restaurer la productivité des terres et protéger les barrages de l'envasement. Cette stratégie a été développée par les forestiers dans les années 1940-1980 autour du bassin méditerranéen pour faire face à de graves pénuries d'eau, à l'envasement rapide des barrages (en 30 à 50 ans) et à la dégradation des équipements et des terres. La DRS est née d'un mariage de raison entre la RTM des forestiers (reboisement des hautes vallées, correction torrentielle) et la CES des agronomes (banquettes plantées d'arbres fruitiers). Pour les forestiers, il s'agissait avant tout de mise en défens des terres dégradées par la culture et le surpâturage, de reboiser les hautes vallées pour restaurer par les arbres la capacité d'infiltration des sols dégradés.



Figure VII .3 DRS en pente sur bassin versant.

VII.6 Les mesures de lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols

Les méthodes antiérosives sont des techniques qui agissent en modifiant le trajet de l'agent d'érosion et en réduisant sa force. En voici quelques exemples de mesures de lutte les plus utilisées et qui vont être traités dans cette partie :

VII.6.1 Création d'obstacles au ruissellement

La végétation protège le sol de l'impact des gouttes de pluies, elle ralentit les filets d'eau superficiels et favorise ainsi l'infiltration. La couverture végétale peut être faite de végétaux vivants ou morts.

- Couverture vivante: les cultures d'hiver évitent de laisser le sol à nu après le labour; il peut s'agir de culture dont le cycle végétatif commence à la fin de l'automne (blé d'hiver) ou de cultures spécifiques qui seront labourées au printemps et enfouies comme engrais vert (ray grass). En zone montagnarde, on peut procéder à la végétalisation des badlands pour les sols sensibles à l'érosion par ravinement généralisé. L'installation d'une végétation à croissance rapide tels que *Eucalyptus*, *Acacia*, pins, *Atriplex*, laurier rose, cactus, etc. assure une amélioration de la couverture du sol et son enrichissement en matière organique (figure VII.3).



Figure VII.4 Végétalisation de badlands par Eucalyptus et pin d'Alep sur banquettes au Maroc

- Rideaux : un rideau se forme à la limite d'un champ en pente quand le labour est fait parallèlement à cette limite. Des broussailles, puis des arbres y poussent et s'opposent au ruissellement et à l'entraînement du sol.



Figure VII.5 Rideaux d'arbres

VII.6.2 Terrasses soutenues par des murs en pierres sèches

Cette technique s'applique aux pentes moyennes à fortes, où la charge caillouteuse est importante.

- Les murs sont alignés suivant les courbes de niveau et dont l'espacement augmente quand la pente diminue.

- Les dimensions des murs:

Hauteur: de 1 à 3 m

Base: de 0,4 m à 0,8 m

Longueur peut dépasser plusieurs dizaines de mètres.

- La dimension de la terrasse entre deux murs: Largeur: de 3 m à 15 m;

- Souvent, cette technique est couplée à un système d'irrigation (figure .

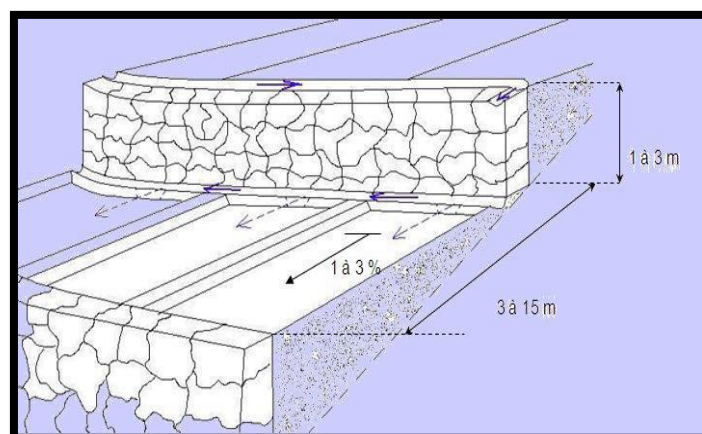


Figure VII .6 Schéma descriptif d'une terrasse irriguée.

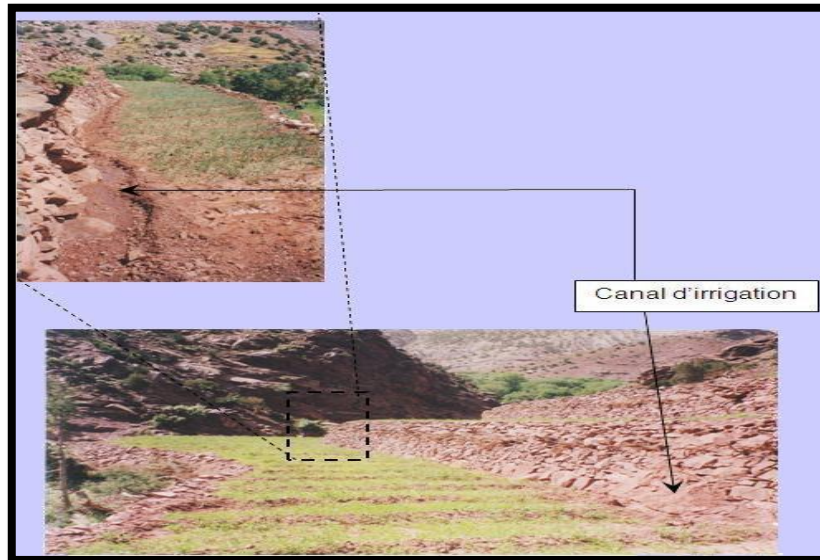


Figure VII .7 Aménagement en terrasse associé à un système d'irrigation.

VII.7 Protection des pentes contre l'érosion

- Travaux selon courbes de niveau (**figure VII .8**): culture en courbes de niveau (action de cultiver la terre en suivant le relief plutôt que la pente). En ce faisant, on oriente la rugosité du sol due aux mottes et aux petits creux, on les oriente perpendiculairement à la pente de telle sorte que l'on ralentit au maximum la nappe d'eau qui pourrait ruisseler. Ce procédé utilisé comme moyen de conservation des sols et de l'eau, n'est efficace que sur les pentes faibles ne dépassant pas 4%. Sur ces pentes, les travaux selon les courbes de niveau suffisent pour contrecarrer l'érosion en nappe (sheet erosion) que l'on ne perçoit pas toujours dans ses débuts.



Figure VII .8 Cultures parallèles aux courbes de niveau

- Culture en bandes alternantes: C'est un procédé de culture en bandes parallèles (le plus souvent parallèles aux courbes de niveau) qui est utilisé lorsque la pente augmente et que le labour selon les courbes de niveau ne suffit pas pour arrêter l'érosion. On peut distinguer deux types de bandes alternantes : les bandes alternantes

VII.8 Moyens de lutte utilisés en Algérie

Le reboisement, la restauration des sols, l'implantation des banquettes, la création des petit barrages (retenues collinaires), la plantation des cultures suivant les lignes de niveau, la plantation des végétations à longue tiges dans les oueds (Bendjedou, 2013).

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce présent travail a permis de faire le point sur l'ampleur du degré d'érosion dans toute la surface du bassin versant de l'Oued Soubella en utilisant l'équation universelle de perte en sol 'USLE' (Universal Soil Loss Equation). Tout au long des chapitres de ce travail, nous avons défini l'ensemble des paramètres, géomorphologiques, climatiques et géologiques qui permettent de déterminer les cinq facteurs principaux qui composent l'équation 'USLE' et contrôler l'érosion hydrique dans le bassin versant, à savoir : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et l'effet des pratiques anti-érosives. Afin de bien comprendre un tel phénomène et vue la grandeur et la complexité des facteurs qui le gouvernent, nous étions amenés à suivre les étapes ci-dessous :
Présenter les caractéristiques morphométriques du bassin-versant de Soubella ;

Présenter la climatologie générale du bassin versant de Soubella en basant sur 5 stations pluviométriques ;

Détermination et cartographie de toute la surface du bassin versant de l'oued Soubella en utilisant un système d'information géographique SIG (ArcGis) des facteurs qui régissent l'équation universelle de perte en sol 'USLE'. Il s'agit de la carte d'agressivité climatique, d'érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente et la carte d'occupation des sols. La superposition des cartes de ces facteurs permet d'avoir la carte de perte en sol sur toute la surface du bassin ce qui va permettre à l'identification des zones les plus productrices de sédiments.

Cette carte nous a permis aussi d'estimer le taux d'érosion sur tout le bassin de l'oued Soubella, qui est en moyenne de 5.58 t/ha/an.

Enfin, nous espérons, que cette étude fera l'objet d'autres travaux qui vont servir à mieux comprendre le phénomène d'érosion dans le bassin versant de Soubella en utilisant des données plus fiables et des photos satellitaires à une résolution très fine. L'installation des points de mesure sur des bassins expérimentaux peut améliorer considérablement les études de ce genre.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- Adoui H., 2013.** Etude de la vulnérabilité du bassin versant du Hodna aux inondations, Mémoire soutenu a l'université de M'sila pour obtenir le diplôme de Master, p 17.
- Belfeges H., 2012.** Analyse de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique Cas du bassin versant de Ksob, Mémoire soutenu à l'université de M'sila pour obtenir le diplôme Master, p.120
- Bouteldja N., 2005.** Contribution à la modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Hodna sous bassins versants du Ksob et de Soubella (Algérie), Thèse de doctorat en Géographie à l'université de la Provence Aix-Marseille, p180.
- Bourenane A & Mechri S., 2008.** Contribution a l'étude du transport solide dans le sous bassin versant de Soubella (Hodna).Mémoire d'ingénieur d'état en hydraulique, Université de m'sila.
- Charabi A, Blissag B., 2011.** Etude critique des apportes liquides et solides cas de sous bassin versant du ksob dans le bassin du hodna, mémoire de fin d'étude pour l'obtention diplôme d'ingénieur d'état, université de M'sila, p110.
- Capolini J., Piens S.et Ramana R., 1969** Bassin versant du Cheleff : Oued Rhiou, Sly, Fodda, Deurdeur,
- Dutil P., 1984.** L'érosion en grande culture, revue technique des agriculteurs dynamique, N°169, France.
- Demmak A., 1982.** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale (Doctoral dissertation).
- Tixeront, J., 1960.** Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. IAHS Publ, 53, 26-42.
- Hattab a. et Delaladja h. 2007.** Modélisation des écoulements du bassin versant du K'sob par l'analyse corrélatoire et spectrale (ACS) et les ondelettes des pluies et débits. Mémoire de l'ingénieur d'état en hydraulique : Université de M'Sila.
- Hasbaia M., Hedjazi A., & Benayada L., 2012.** Variabilite de l'érosion hydrique dans le bassin du Hodna: cas du sous-bassin versant de l'Oued elham.Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 1(1), 28-32.
- Hedjazi A., 2009 .** Quantification des apports liquides et solides de l'Oued El-ham. Mémoire d'ingénieur d'état en hydraulique : option hydraulique urbaine, Université de M'Sila.
- Hasbaia M., Benayada L. & Bournane A. 2010.** Estimation and analysis of suspended sediment transport in an interior semi-arid watershed of Algeria, case of wadi Soubella in

Hodna basin, Congrès Water2010 . Hydrology, Hydraulics and Water Resources in an Uncertain Environment, Quebec City, July 5-7 2010. Canada.

Hadley, R. F., & Schumm, S. A., 1961. Sediment sources and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River basin. US Geological Survey Water-Supply Paper, 1531, 198.

Greco J., 1966 . L'érosion , la défense et la restauration des sols , le reboisement en Algérie. MARA.

Greco J., 1966. L'érosion, la defense et la restauration des sols, le reboisement en Algérie. Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire.

Khosrowpanah S., Wen, Y. & Heitz, L., 2007. Development of a digital watershed atlas for Guam. Technical Report 116, Water and Environmental Research Institute of the Western Pacific, University of Guam.

Kalman R., 1967. Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou, Maroc. Projet Sebou.

Medinger, J. M., 1960. Transport solide des oueds algériens. Annuaire hydrologique de l'Algérie (années 50-59), Alger.

Remmas H., 2014. contribution à l'étude et à la cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique de sous bassin versant de oued saida,mémoire soutenu à l'université de tlemcen pour obtenir le diplôme de master

REMMAS H., 2014. Contribution {l'étude et {la cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique du sous bassin versant de Oued Saida, Thèse de Doctorat, P 35.

Roche M., 1963. Hydrologie de surface- office de la recherche scientifique et technique outre-mer - (paris). GAUTHIER - VILLARS ÉDITEUR – PARIS.

ANRH, (1993). Carte pluviométrique de l'Algérie du nord, a l'echelle 1: 500.000 et notice explicative. ANRH, Algérie.

Roose E., & Lelong, F., 1976. Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique Tropicale. Études sur petites parcelles expérimentales de sol. Revue de géographie physique et de géologie dynamique, 18(4), 365-374.

Rango A., & Arnoldus, H. M. J. 1987. Aménagement des bassins versants.Cahiers techniques de la FAO.

Soutter M.,Mermoud A.et Musy A. 1978.Ingénierie des eaux et du sol, presse Poily, p.294

Salhi C., Touaibia B. & Zeroual A., 2013. Les réseaux de neurones et la régression multiple en prédiction de l'érosion spécifique: cas du bassin hydrographique Algérois-Hodna-Soummam (Algérie). Hydrological Sciences Journal, 58(7), 1573-1580.

Toumi S., Meddi M., Mahé G., & Brou, Y. T. 2013. Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. Hydrological Sciences Journal, 58(7), 1542-1558. Touaibia B. ,2003.Manuel pratique d'hydrologie,presnes madani frères,p.166

ZAIBAK I., 2008. Contribution a une approche cartographique de l'érosion spécifique dans le bassin versant de l'oued Cheliff. Mémoire de Magister. ENSH Blida.

ZAROUAL S., 2016. Etude de la sensibilité du sous bassin versant de Ksob a l'érosion hydrique par une approche quantitative. Mémoire de Master. Univ de M'sila

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم طبيعة ومدى درجة تآكل التربة في حوض وادي سوبلة باستعمال المعادلة الشاملة لضياع التربة 'USLE' لتطبيق هذه المعادلة قمنا بتحديد جميع الخصائص الجيومورفولوجية والمناخية بالإضافة إلى دراسة تحليلية للطابع الجيولوجي والهيدرولوجي لهذا الحوض. هذا ما سمح لنا بإنشاء خرائط ثنائية الأبعاد تحت نظام المعلومات الجغرافية لعوامل هذه المعادلة. بعد دمج هذه الخرائط تمكنا من الحصول على خريطة نهائية تبين ضياع قيمة التربة في جميع مناطق حوض وادي سوبلة.

Résumé

Le présent travail vise à évaluer le degré de l'érosion hydrique dans toute la surface du bassin versant de l'oued Soubella en utilisant l'équation universelle de perte en sol 'USLE' sous un environnement SIG. Pour ce faire, il fallait définir l'ensemble des paramètres, géomorphologiques et climatiques du bassin versant, suivi d'une analyse géologiques et hydrologique du bassin. Ceci nous a permis d'établir des cartes de sensibilité à l'érosion de quatre paramètres. La carte de pertes en sol du bassin de Soubella a été obtenue après superposition des cartes des quatre paramètres.

Abstract

The objective of this study is to evaluate of the water erosion degree in the whole surface of Soubella catchment using the universal soil loss equation 'USLE' under GIS environment. The work aims to define all the parameters, geomorphologic and climatic of the Soubella watershed, followed by a geological and hydrological analysis. This allowed us to establish maps of erosion sensitivity versus four parameters. The soil loss map of Soubella watershed was obtained after superposition of the four parameters maps.