

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université de Batna-2-
Faculté de Technologie
Département d'hydraulique**



THÈSE

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

THEME

Evaluation du transport solide au niveau du bassin versant de
Oued Bounamoussa et ses incidences sur l'envasement du
barrage de Cheffia (Nord-Est algérien)

Présentée par :
BOUHADEB CHEMSSEDDINE

Directeur de thèse
MENANI MOHAMED REDHA

Année universitaire 2018/2019

Devant le jury composé de :

DRIAS Tarek	MCA, Université de Batna 2	Président
MENANI Mohamed redha	Professeur, Université de Batna 2	Rapporteur
TIRI Amar	MCA, Université de Batna 2	Examineur
DJEMILI Lakhdar	Professeur, Université d'Annaba	Examineur
OUERDACHI Lahbassi	Professeur, Université d'Annaba	Examineur

Résumé

Le bassin versant de Bounamoussa est caractérisé par un climat Sub-humide. Les sols sont de plus en plus dégradés et les sédiments issus de l'érosion contribuent à l'envasement de la retenue du Barrage Cheffia.

Le présent travail a pour objet d'évaluer les pertes annuelles des terres dans le bassin versant de Bounamoussa et de développer un ensemble d'éléments et d'outils de prise de décisions pour une gestion durable du barrage Cheffia. Une description de l'ensemble des paramètres morphométrique, géologiques, hydroclimatiques du bassin versant a été réalisée. L'évaluation a été abordée par l'application de deux modèles ; l'équation universelle des pertes en sol avec sa version révisée (RUSLE) intégrée dans un Système d'Information Géographique (SIG), et le modèle Previsioni dell'Interimento nei Serbatoi Artificiali (PISA).

L'intégration des cartes thématiques des différents facteurs de l'Equation universelle de pertes en sol RUSEL a permis la quantification et la cartographie des zones fragiles exposées au risque érosif. L'application de ce modèle dans différents milieux et à toutes les échelles tient compte de six facteurs essentiels: l'agressivité des pluies, l'érodibilité des sols, l'inclinaison et la longueur des pentes, ainsi que le couvert végétal et les pratiques antiérosives.

La représentation cartographique de ces facteurs (cartes thématiques) et leur croisement a abouti à l'élaboration d'une carte synthèse faisant ressortir quatre classes de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique, découlant d'un taux d'érosion moyen de 7,8 t/ha/an: les zones à vulnérabilité très faible à faible (40 %), moyenne (34.48 %), forte (22.59%) et très forte (6.93 %). Les zones à vulnérabilité moyenne, forte et très forte à l'érosion occupent plus de la moitié de la superficie du bassin versant et correspondent aux sols à érodibilité élevée, à forte pente et à faible couvert végétal. Les programmes de défense anti-érosion doivent cibler en priorité ces zones afin de réduire le taux d'envasement dans le réservoir de Cheffia. L'application du modèle PISA au barrage de Cheffia durant la période (1965-2004) a amené un taux de sédimentation de 17.709 hm³, Ce résultat est surestimé de 1,35 fois de celui trouvé avec le levé bathymétrique évalué à 13.095 hm³.

La confrontation de résultats fournis par ces deux modèles avec ceux issus des levés bathymétriques des fonds du barrage étudié, qui permettent la quantification effective de l'envasement, a permis de valider d'une part le modèle RUSLE comme un outil d'estimation de l'érosion au niveau du bassin de Bounamoussa et d'autre part de proposer le modèle PISA comme un modèle d'estimation de l'envasement du barrage Cheffia.

Mots clés : Bassin versant de Bounamoussa, SIG, RUSLE, PISA, Envasement, Erosion des sols.

Abstract

The Bounamoussa watershed is characterized by a sub-humid climate. The soils are more and more degraded and sediments resulting from erosion contribute to the siltation of the dam Cheffia.

This study aims to assess the annual losses of land in the Bounamoussa watershed and to develop a set of elements and decision-making tools for sustainable management of the Cheffia dam. A description of all the morphometric, geological and hydroclimatic parameters of the watershed has been completed. The evaluation was addressed by the application of two models; the universal soil loss equation with its revised version (RUSLE) integrated into a Geographical Information System (GIS), and the Previsioni dell'Interimento nei Serbatoi Artificiali (PISA).

The integration of the thematic maps of the various factors of the universal soil loss equation RUSLE allowed the quantification and mapping of fragile areas exposed to erosive risk. The application of this model in different environments and at all scales takes into account five essential factors: the aggressivity of the rains, the erodibility of the soils, the inclination and the length of the slopes, as well as the vegetation cover and the practices erosion control.

The application of the RUSLE model in different natural environments and on every scale takes into account five key factors namely: the rainfall erosivity, the soil erodibility, the steepness and length of slopes, the vegetation cover and the conservation support practices. Each of these factors was generated in GIS as a raster layer, their combination, resulted in the development of a soil loss map indicating an average erosion rate of 7.8 t·ha⁻¹·y⁻¹. The obtained soil loss map was classified into four erosion severity classes; low, moderate, high and very high severity representing respectively 40, 30.48, 22.59 and 6.89% of the total surface. The areas, showing moderate, high and very high erosion rates which represent more than half of the basin area were found generally located in regions having high erodibility soils, steep slopes and low vegetation cover. These areas should be considered as priorities in future erosion control programs in order to decrease the siltation rate in the Cheffia reservoir. The application of the PISA model to the Cheffia dam during the period (1965-2004) brought a sedimentation rate of 17.709 hm³. This result is overestimated by 1.35 times that found with the bathymetric survey evaluated at 13.095 hm³.

The comparison of the results provided by these two models with those obtained from the bathymetric surveys of the studied dam bottoms, which allow the effective quantification of siltation, made it possible to validate on the one hand the RUSLE model as a tool for estimating the erosion in the Bounamoussa basin and on the other hand to propose the PISA model as a model for estimating the siltation of the Cheffia dam.

Key words: Bounamoussa catchment, GIS, RUSLE, PISA, Siltation, Soil erosion.

ملخص

يتميز الحوض الصباب لمنطقة بوناموسة بمناخ شبه رطب. التربة أكثر تدهوراً والرواسب الناتجة عن التآكل تساهم في تراكم الطمي في خزان المائي لسد الشافية.

يهدف هذا العمل إلى تقييم معدل السنوي لفقدان التربة بالنسبة للحوض الصباب بوناموسة من أجل التطرق الى مجموعة من العناصر والأدوات و من أجل اتخاذ قرارات لتسيير مستدام لسد الشافية. تم إجراء وصف لجميع المعطيات الجيومورفولوجية والجيولوجية والهيدرولوجية والمناخية لهذا الحوض. لقد تم تقييم هذه النتائج من خلال تطبيق نموذجين. المعادلة العالمية لفقدان التربة مع نسختها المنقحة (RUSLE) مدمجة في نظام المعلومات الجغرافية (GIS) ، و نموذج Previsioni dell'Interimento nei Serbatoi Artificiali (PISA) هذا الاخير كما اختيراه لمعرفة نسبة تراكم الطمي في خزان سد الشافية.

دمج هذه الخرائط الموضوعية للعوامل المختلفة لمعادلة العالمية لفقدان التربة RUSLE، يسمح لنا بتحديد حجم المناطق الهشة المعرضة لخطر التآكل. ويأخذ تطبيق هذا النموذج في بيئات مختلفة وعلى جميع المستويات باستعمال خمسة عوامل أساسية : تأثير الأمطار، قابلية التعرية للتربة، طول و ميل المنحدرات، فضلاً عن الغطاء النباتي والاساليب المستخدمة ضدا تآكل التربة.

أدى رسم الخرائط لهذه العوامل (خرائط موضوعية) ومعايرها من حيث التآكل إلى وضع خريطة موجزة تبين أربعة أصناف من قابلية تأثر التربة الناتجة عن معدل متوسط التعرية 7.8 طن / هكتار / سنة : المناطق ذات القابلية الضعيف جداً إلى الضعيفة (40%)، المتوسط (34.48%)، القوي (22.59%) والقوي جداً (6.93%). تمثل المناطق التي تعاني من التعرية المتوسطة والعالية والمرتفعة أكثر من نصف مساحة مستجمعات المياه وتتوافق مع التربة ذات القابلية العالية للانجراف والانحدار العالي والغطاء النباتي المنخفض. يجب أن تقوم برامج حماية التربة من التعرية بإعطاء الأولوية لهذه المناطق من أجل تقليل معدل الطمي في خزان سد الشافية.

وتمت مقارنة النتائج التي قدمها هذان النموذجان مع تلك الناتجة عن المسوحات الباثيمترية للسد التي تسمح بالقياس الكمي الفعلي لطي، إمكانية التحقق من صحة RUSLE من جهة كأداة لتقدير تآكل التربة في الحوض الصباب بوناموسة، وعلى الجانب الآخر، لاقتراح نموذج PISA كنموذج لتقدير الطمي في سد الشافية

كلمات مفتاحية : حوض الصباب بوناموسة، GIS، RUSLE، PISA، طمي، تآكل التربة

Dédicaces

Je dédie cette thèse à

Mon très cher père et ma très chère mère

A mes frères
A toute ma famille
A mes amis

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie ﷻ tout puissant qui m'a guidé tout au long de ma vie, qui m'a donné la force pour survivre, qui m'a donné courage et patience pour passer tous les moments difficiles, et qui m'a permis d'achever ce travail.

À l'issue de cette thèse, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.

Je tiens à remercier en premier lieu le Pr. Menai Mohamed Redha qui a réalisé le suivi temporel de mon travail. Je le remercie pour tout ce qu'il m'a appris avec patience, pour son soutien et sa disponibilité, ainsi pour la confiance qu'il m'a accordée en m'intégrant au sein de son laboratoire.

Mes sincères remerciements vont aussi à Mr. DRIAS Tarek pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider ce jury ainsi qu'à Messieurs DJEMILI Lakhdar, professeur à l'université d'Annaba, TIRI Amar, maître de conférences à l'université de batna, et OUERDACHI Lahbassi professeur à l'université d'Annaba, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en participant à ce jury en tant qu'examineurs.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui m'ont facilité le long travail nécessité par cette étude à savoir :

Mes sincères remerciements vont à mes confrères Messieurs Bouguerra H, Dardous O., Bouchahed H., Bouzeria H, Balla F, Pour leurs services et encouragements.

Personnages de l'A.N.R.H d'Annaba et de Alger qui ont accepté volontiers de me fournir les documents que je convoitais.

Mes remerciements les plus sincères vont également à ma famille pour son soutien moral et sa patience pendant les moments difficiles dans la réalisation de ce travail.

Sommaire

Résumé.....	I
Abstract.....	II
ملخص	III
Dédicace.....	IV
Remerciements.....	V
Sommaire.....	VI
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XIV
Liste des photos.....	XVII
Liste des abréviations.....	XVIII
Introduction générale	1

Chapitre 1: Les processus d'érosion et d'envasement dans les bassins versants

1.1. Introduction	5
1.2. L'origine et mécanisme de l'érosion hydrique.....	6
1.2.1 Détachement des particules de sol.....	7
1.2.2 Transport des particules.....	7
1.2.3 Dépôt.....	8
1.3. Les différentes formes d'érosion hydrique.....	8
1.3.1. Erosion en nappe.....	9
1.3.2. Érosion linéaire, en griffes ou en rigoles.....	9
1.3.3. Erosion par ravinement.....	10
1.4. les conséquences de l'érosion hydrique.....	11
1.4.1. Conséquences de l'érosion hydrique en zones érodées.....	11
1.4.2. Conséquences de l'érosion hydrique en zones de dépôts.....	11
1.5. Facteurs influençant l'érosion hydrique.....	12
1.5.1. Facteurs climatiques.....	12
1.5.2. Facteurs topographiques	12
1.5.3. Les facteurs pédologiques.....	13
1.5.4. Couvert végétal	13
1.5.5. Les activités humaines.....	13
1.6. Causes d'érosion hydrique et facteurs de résistance du milieu.....	13
1.7. Quantification de l'érosion.....	14
1.7.1. Formule de Henin 1950.....	14
1.7.2. Formule de Gravičovic 1960.....	15
1.7.3. Formule de Tixeront 1960.....	16
1.7.4. Formule de Fournier 1960.....	16
1.7.5. Formule de poliakov.....	17
1.7.6. Formule de l'A.N.R.H 1970.....	17
1.7.7. Mesures de débits liquides et solides à l'exutoire des bassins versants.....	17
1.7.8. Utilisation de la télédétection et le système d'information géographique SIG.....	19

1.7.9. Modélisation d'érosion hydrique.....	20
1.8. L'érosion hydrique en Algérie.....	22
1.9. L'envasement des barrages.....	23
1.9.1. Définition de l'envasement	23
1.9.2. Problèmes posés par l'envasement.....	23
1.9.3. Les moyens de lutte contre l'envasement.....	26
1.9.4.1. La conservation des sols.....	26
1.9.4.2. Le soutirage des courants de densité.....	27
1.9.4.3. la surélévation des digues.....	27
1.9.4.4. Dragage des barrages.....	27
1.10. Conclusion.....	28

Chapitre 2: Description de la zone d'étude

2.1. Présentation de la zone d'étude.....	29
2.2. Situation géographique de la région d'étude.....	29
2.3. Caractéristiques morphométriques du bassin	30
2.3.1. Forme du bassin	30
2.3.1.1. Indice de compacité de Gravelius (Kc)	30
2.3.1.2. Rectangle équivalent.....	30
2.3.2. Étude du relief	31
2.3.2.1. Courbe hypsométrique	31
2.3.2.2. Indice de pente	34
a. Indice de pente (Ip).....	35
b. Indice de pente global (Ig)	36
c. Dénivelée spécifique (Ds)	36
d. Indice de pente moyenne (Im)	37
2.3.3. Caractéristiques hydrographiques	38
2.3.3.1. Rapport de confluence.....	39
2.3.3.2. Rapport des longueurs.....	40
2.3.3.3. Densité de drainage	40
2.3.3.4. Coefficient de torrencialité.....	41
2.3.3.5. Temps de concentration.....	41
2.4. Sol et végétation.....	42
2.5. Géologie du bassin.....	44
2.5.1. Formation Quaternaire.....	45
2.5.2. Le Miocène.....	45
2.5.3. Les formations de l'Oligocène et de l'Eocène.....	45
2.5.4. Le Crétacé.....	46
2.5.5. Le Trias.....	46
2.6. Pédologie du bassin	47
2.7. Conclusion.....	48

Chapitre 3: Hydroclimatologie

3.1. Introduction	49
3.2. Station de mesure	49
3.3. Facteurs climatiques.....	50
3.3.1. Précipitations.....	50
3.3.2. Contrôle de la Fiabilité des Séries	50
3.3.3. Comblement des Lacunes d'Observation.....	53
3.3.4. Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières	54
3.3.4.1. Répartition moyenne mensuelle.....	54
3.3.4.2. Répartition saisonnière des précipitations.....	55
3.3.5. Les précipitations annuelles.....	55
3.3.5.1. Répartition interannuelle des précipitations.....	55
3.3.5.2. Etude statistique des précipitations.....	58
3.3.6. Analyse des pluies sur l'ensemble du bassin versant.....	58
3.3.6.1. Méthode de la moyenne arithmétique.....	58
3.3.6.2. la méthode des polygones de Thiessen.....	59
3.3.6.3. Méthode des isohyètes.....	60
3.3.7. Coefficient pluviométrique.....	61
3.3.8. Les Facteurs Thermiques.....	63
3.3.8.1. Températures moyennes mensuelles.....	63
3.3.9. Les Diagrammes Ombrothermiques.....	64
3.3.10. Caractéristiques climatiques d'aridité.....	65
3.3.10.1. Indice d'aridité annuel de " DE MARTONNE ".....	65
3.3.10.2. Indice d'aridité mensuelle.....	66
3.3.10.3. Indice de " L.EMBERGER".....	67
3.4. Les Vents.....	68
3.5. Bilan hydrique.....	69
3.5.1. L'évapotranspiration.....	69
3.5.1.1.L'évapotranspiration potentielle (ETP).....	69
3.5.1.2.L'évapotranspiration réelle (ETR).....	70
3.5.2. Le ruissellement (R).....	71
3.5.3. L'infiltration (I).....	72
3.5.4. Représentation graphique du bilan hydrique.....	72
3.6. Conclusion	74

Chapitre 4 : Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique

4.1. Introduction	76
4.2. Méthode utilisée pour l'évaluation de l'érosion hydrique.....	76
4.3. Détermination des paramètres d'érosion.....	79
4.3.1. Facteur d'érosivité des pluies (R).....	79
4.3.2. Facteur d'érodibilité du sol (K).....	80

4.3.3. Facteur topographique (LS).....	81
4.3.4. Facteur d'exploitation du couvert (C).....	83
4.3.5. Facteur de pratique anti-érosive (P)	85
4.4. Résultats et discussion.....	86
4.4.1. Calcul du facteur d'érosivité des précipitations (R).....	86
4.4.2. Facteur d'érodibilité du sol (K).....	88
4.4.2.1. Détermination Les caractéristiques physiques des sols.....	89
4.4.2.2. Détermination de la texture des sols.....	89
4.4.3. Facteur topographique (LS).....	91
4.4.4. Les valeurs du facteur de la couverture végétale (C).....	94
4.4.5. La valeur du facteur de pratique anti-érosive (P).....	97
4.4.6. Evaluation des pertes en sol dans le bassin versant.....	97
4.4.7. Le risque érosif par sous bassin versant.....	99
4.4.8. Validation.....	104
4.5. Conclusion.....	105

Chapitre 5 : Envasement du barrage de Cheffia - moyens de lutte contre l'érosion hydrique

5.1. Introduction.....	107
5.2. Présentation du barrage Cheffia.....	108
5.2.1. Situation géographique du barrage.....	108
5.2.2. Bref historique sur le déroulement des travaux du barrage.....	109
5.2.3. Description de l'ouvrage.....	110
5.2.4. Caractéristiques techniques du barrage.....	110
5.3. Evolution du volume de vase en fonction du temps.....	112
5.4. Estimation de l'envasement du barrage Cheffia par le modèle PISA.....	114
5.4.1. Le modèle PISA.....	114
5.4.2. Application du Modèle au barrage Cheffia PISA.....	115
5.4.3. Résultats et interprétation.....	116
5.4.4. Envasement annuelle.....	116
5.4.5. Validation des résultats du modèle.....	118
5.4.5.1. par rapport au levé bathymétrique.....	118
5.4.5.2. Par rapport au volume global de l'apport solide arrivé à la retenue du barrage (1965/2004).....	119
5.5. La durée de vie du barrage Cheffia.....	123
5.6. Les moyens actuels de lutte contre l'envasement du barrage Cheffia.....	123
5.7. Moyens utilisés de lutte contre l'érosion et l'envasement des barrages en Algérie.....	124
5.7.1. Actions palliatives.....	124
5.7.2. Actions curatives.....	125
5.7.3. Actions préventives.....	125
5.8. Conclusion.....	125

Conclusion générale.....	127
Références bibliographiques.....	130

Liste des figures

Chapitre 1: Les processus d'érosion et d'envasement dans les bassins versants

Figure 1.1. Processus de l'érosion hydrique (<i>Cheggour, 2008</i>).....	6
Figure 1.2.Effet des gouttes de pluies (effet splash).....	7
Figure 1.3.Mode de transport des particules dans les cours d'eau (<i>Serbah, 2011</i>).....	8
Figure 1.4. Processus d'envasement (<i>Remini, 2009</i>).....	23
Figure 1.5. Dépôt de vase (<i>Remini, 2003</i>).....	24
Figure 1.6.Envasement moyen au Maghreb (<i>Remini, 2003</i>).....	25
Figure 1.7.Sensibilité à l'envasement des barrages (<i>Remini, 2005</i>).....	26

Chapitre 2: Description de la zone d'étude

Figure 2.1. Localisation du bassin versant de Bounamoussa.....	29
Figure 2.2. Carte d'altitude du bassin versant.....	32
Figure 2.3.Courbe hypsométrique du bassin versant de Bounamoussa.....	33
Figure 2.4. Histogramme de fréquences altimétriques du bassin versant de Bounamoussa...33	
Figure 2.5. Carte des pentes du bassin versant de Bounamoussa.....	35
Figure 2.6. Réseau hydrographique de la zone d'étude.....	38
Figure 2.7. Modèle numérique de terrain (MNT) du BV de Bounamoussa.....	39
Figure 2.8. Droite représentative du nombre de cours d'eau en fonction de l'ordre.....	40
Figure 2.9. Occupation du sol du BV de Bounamoussa.....	44
Figure 2.10. Sol du bassin versant de Bounamoussa. Réalisée à partir de la carte du sol de l'algerie coté Constantinois (<i>Durand, Barbut in 1948</i>).....	48

Chapitre 3: Hydroclimatologie

Figure 3.1. Carte de positionnement des stations pluviométriques.....	50
Figure 3.2.Corrélation des données pluviométriques par la méthode des doubles- cumuls station Bouhadjar période: (1970/71-2011/12).....	51

Figure 3.3. Corrélation des données pluviométriques par la méthode des doubles- cumuls station Ain El karma période: (1970/71-2011/12).....	52
Figure 3.4. Corrélation des données pluviométriques par la méthode des doubles- cumuls station Asfour période : (1970/71-2011/12).....	52
Figure 3.5. Corrélation des données pluviométriques par la méthode des doubles- cumuls station Mechroha période : (1970/71-2011/12).....	52
Figure 3.6. Corrélation des données pluviométriques par la méthode des doubles- cumuls station Ain Seynour période: (1970/71-2011/12).....	53
Figure 3.7. Comblement de lacune du mois de Novembre 2002 à la station de Bouhadjar..	53
Figure 3.8. Précipitations moyennes mensuelles en mm aux stations de la région étudiée (période 1970/2012).....	55
Figure 3.9. Le module pluviométrique interannuel (mm) durant la période (1970-2012).....	56
Figure 3.10. Le polygone de Thiessen du bassin versant de Bounamoussa.....	60
Figure 3.11. Carte des isohyètes pour le bassin de Bounamoussa.....	61
Figure 3.12. Variation des températures moyennes mensuelles (1970/2012).....	63
Figure 3.13. Variation mensuelle des T° moyennes, maximales et minimales.....	64
Figure 3.14. Diagrammes Ombrothermiques des stations d'étude - période (1970-2012)...	65
Figure 3.15. Diagramme bioclimatique d'Emberger pour le bassin Bounamoussa.....	68
Figure 3.16. Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite à la station de Cheffia (1970 -2012).....	74

Chapitre 4 : Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique

Figure 4.1. Schéma des procédures adoptées pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Bounamoussa.....	78
Figure 4.1. Perte en terre en fonction de la longueur de la pente et du type d'érosion (<i>d'après Roose, 1994</i>).....	82
Figure 4.3. Valeur du facteur du couvert végétal (<i>Roose, 1994</i>).....	84
Figure 4.4. Variation spatiale du facteur d'érosivité de pluie R en ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$)....	88
Figure 4.5. Distribution des classes du facteur R dans le bassin versant Bounamoussa.....	88
Figure 4.6. Le triangle des textures de sols USDA (United States Department of Agriculture).....	89
Figure 4.7. Distribution des classes du facteur k dans le bassin versant de Bounamoussa...	90
Figure 4.8. Répartition spatiale du facteur d'érodibilité du sol K en ($\text{t}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}/\text{ha}\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm}$).....	91

Figure 4.9. L'organigramme des étapes de calcul de LS (<i>Van Remortel, 2003</i>).....	93
Figure 4.10. Carte du facteur LS obtenue par superposition de la carte des longueurs de pentes (A) et celle de l'inclinaison des pentes (B) par le SIG.....	94
Figure 4.11. Carte de la classification de l'occupation du sol dans la région d'étude.....	95
Figure 4.12. Répartition spatiale du facteur du couvert végétal C.....	96
Figure 4.13. Distribution des classes du facteur C dans le bassin versant de Bounamoussa...	97
Figure 4.14. Carte des pertes en sols en ($t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) du bassin versant de Bounamoussa.....	98
Figure 4.15. Distribution des pertes en sol par rapport à la superficie.....	99
Figure 4.16. Répartition des sous bassin par SIG.....	100
Figure 4.17. Les valeurs moyennes du facteur d'érosivité des précipitations (R) en ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot an^{-1}$) par sous bassin versant.....	102
Figure 4.18. Les valeurs moyennes du facteur d'érodibilité du sol (K) en ($t \cdot ha \cdot h / ha \cdot MJ \cdot mm$) par sous bassin versant.....	102
Figure 4.19. Les valeurs moyennes du facteur topographique (LS) par sous bassin versant.....	103
Figure 4.20. Les valeurs moyennes du facteur de couverture végétale (C) par sous bassin versant.	103
Figure 4.21. Les valeurs moyennes du risque érosif en $t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ par sous bassin versant.....	104
Figure 4.22. Courbe capacité hauteur du barrage Cheffia.....	105

Chapitre 5 : Envasement du Barrage de Cheffia - Moyens de Lutte Contre l'Erosion Hydrique

Figure 5.1. Évolution du volume d'eau du barrage Cheffia (période 1965-2004).....	113
Figure 5.2. Schéma du réseau de points d'appui.....	113
Figure 5.3. Envasement interannuel du barrage Cheffia estimé par le modèle PISA.....	118
Figure 5.4. Comparaison entre l'envasement mesuré et estimé par le modèle PISA (1965-2004)	119
Figure 5.5. Comparaison entre l'envasement calculé par le modèle PISA et l'apport solide total au barrage Cheffia (1965-2004).....	120
Figure 5.6. Organigramme des principales étapes effectuées pour l'estimation du taux d'envasement du barrage CHEFFIA.....	122
Figure 5.7. L'évolution de l'envasement du barrage Cheffia dans le temps.....	123

Liste des tableaux

Chapitre 1: Les processus d'érosion dans les bassins versants

Tableau 1.1. Formes d'érosion hydrique.....	10
Tableau 1.2. Formes de dégradation et d'érosion, causes, facteurs de résistance du milieu (<i>Roose, 1994</i>).....	14
Tableau 1.3. Valeurs caractéristique des paramètres a et b d'après <i>Benkhaled et Remini</i> (<i>2003</i>).....	19
Tableau 1.4. Envasement des grands barrages en exploitation (ANBT).....	25

Chapitre 2: Description de la zone d'étude

Tableau 2.1. Répartition de surface en fonction de l'altitude du bassin versant.....	32
Tableau 2.2. Altitudes caractéristiques du bassin de Bounamoussa.....	33
Tableau 2.3. Classe des pentes et superficies correspondantes.....	34
Tableau 2.4. Classification du relief selon I_g par l'O.R.S.T.O.M.....	36
Tableau 2.5. Classification du relief selon D_s (O.R.S.T.O.M.).....	37
Tableau 2.6. Indices de pentes et de relief du bassin versant de Bounamoussa.....	37
Tableau 2.7. Paramètres morphométrique du bassin versant de Bounamoussa.....	42
Tableau 2.8. Occupation des sols du bassin versant du Bounamoussa.....	43
Tableau 2.9. Formation lithologique du bassin versant de Bounamoussa.....	46
Tableau 2.10. Les classes pédologiques du bassin versant de Bounamoussa.....	47

Chapitre 3: Hydroclimatologie

Tableau 3.1. Coordonnées géographiques des stations et périodes d'observation.....	49
Tableau 3.2. Les hauteurs moyennes mensuelles des précipitations en mm (1970-2012)...	54
Tableau 3.3. Répartition saisonnière des précipitations.....	55
Tableau 3.4. Régime des précipitations interannuel.....	56

Tableau 3.5. Précipitations annuelles (mm) aux différentes stations pluviométriques (42 ans).....	57
Tableau 3.6.Paramètres de position des précipitations aux différentes stations pluviométriques (1970-2012).....	58
Tableau 3.7.Estimation de la lame d'eau précipitée par la méthode arithmétique.....	59
Tableau 3.8.Pluie annuelle et la surface d'influence pour chaque station.....	59
Tableau 3.9.Précipitations en (mm) estimées par les trois méthodes.....	61
Tableau 3.10. Coefficient pluviométrique des stations pluviométrique (1970/2012).....	62
Tableau 3.11.Répartition des températures moyennes mensuelles en °C (1970/2012).....	63
Tableau 3.12. Indice d'aridité Selon DE.MARTONNE.....	66
Tableau 3.13.Indice d'aridité annuelle (D'après la formule DE.MARTONNE).....	66
Tableau 3.14.Indice d'aridité mensuel.....	67
Tableau 3.15. Indice de L.EMBERGER pour la région du bassin Bounamoussa.....	67
Tableau 3.16.Variation des moyennes mensuelles de la vitesse maximale instantanée (station Cheffia).....	68
Tableau 3.17. Détermination des paramètres de ruissellement.....	71
Tableau 3.18.Détermination des paramètres d'infiltration.....	72
Tableau 3.19. Bilan hydrique ; station de Cheffia période : (1970/2012).....	73

Chapitre 4 : Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique

Tableau 4.1.Variation de l'érodibilité du sol (K) en fonction du type de sol (<i>Stone et Hilborn, 2000</i>).....	81
Tableau 4.2. Variation de m en fonction de la pente.....	83
Tableau 4.3. la valeur de (C) pour différentes cultures et pratiques.....	84
Tableau 4.4. Valeur de C pour différents types de couvert végétal (<i>Sadiki et al., 2004</i>)...85	85
Tableau 4.5. Valeurs du facteur P (<i>Wischmeier & Smith, 1978</i>).....	86
Tableau 4.6. Les résultats du facteur R pour six stations.....	87
Tableau 4.7. Caractéristiques physiques des sols.....	89
Tableau 4.8. Détermination du facteur K pour chaque type de sol de la zone d'étude.....	90
Tableau 4.9. Classification de la résistance des sols à l'érosion selon <i>Bollinne et Rosseau (1978)</i>	91
Tableau 4.10. Distribution du facteur C dans le bassin versant de Bounamoussa.....	95

Tableau 4.11. Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant de Bounamoussa.....	96
Tableau 4.12. Répartition des pertes des sols dans le bassin versant de Bounamoussa.....	99
Tableau 4.13. Les valeurs moyennes du risque érosif et des facteurs R, K, LS et C par sous bassin versant.....	101

Chapitre 5 : Envasement du Barrage de Cheffia - Moyens de Lutte Contre l'Erosion Hydrique

Tableau 5.1. Caractéristiques techniques du barrage Cheffia.....	111
Tableau 5.2. Détermination de la surface érodable du bassin versant de Bounamoussa....	116
Tableau 5.3. Indice d'envasement pour le bassin versant de Bounamoussa.....	116
Tableau 5.4. L'envasement annuel du barrage Cheffia calculé par le modèle PISA (1970-2004).....	117
Tableau 5.5. Ecart entre le modèle PISA et le levé bathymétrique (2004).....	118
Tableau 5.6. Les apports solides totaux déversés et évacués entre (1965-2004).....	120
Tableau 5.7. Ecart entre le modèle PISA et le volume total du transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1965/2004).	120
Tableau 5.8. Les valeurs de l'envasement du barrage Cheffia dans le temps.....	120

Liste des photos

Chapitre 1: Les processus d'érosion dans les bassins versants

Photo 1.1. Erosion en nappe de Beni Chougrane, près de Mascara (Algérie). (<i>Morsli, 2006</i>).....	9
Photo 1.2. Erosion linéaire (Oued Bounamoussa 2017).....	10

Chapitre 2: Description de la zone d'étude

Photo 2.1. Chêne liège (Commune Cheffia).....	44
Photo 2.2. Chêne Zéen (Djebel M'Sid).....	44

Chapitre 5 : Envasement du Barrage de Cheffia - Moyens de Lutte Contre l'Erosion Hydrique

Photo 5.1. Réservoir du barrage CHEFFIA.....	108
Photo 5.2. Oued Bounamoussa (amont du barrage).....	108
Photo 5.3. La digue du Barrage Cheffia	110
Photo 5.4. Référence Hydrographique de la retenue.....	111
Photo 5.5. Evacuateur de crues.....	112
Photo 5.6. Vidange de fond.....	112

Liste des abréviations

ANBT : Agence Nationale des Barrages et transfert

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Refection

DMS: Distribution Management System; Degrees, minutes, seconds

FAO: Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

GPS : Global positioning system

MJ : Mégajoule

MNT : Modèle Numérique de Terrain

ORSTOM : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer

PISA : Previsione Interrimento Serbatoi Artificiali

RUSLE: Reserved Universal Soil Loss Equation

USLE: Universal Soil Loss Equation

SAB : Système Altimétrique du Barrage

SIG : Système d'Information Géographique

USDA: United States Department of Agriculture

UTM : Universal Transverse Mercator

Introduction générale

Introduction générale

Les environnements montagneux Algériens ont subi au cours du 20^{ème} siècle des dégradations importantes liées en premier lieu au développement des populations et à la pression qu'elles ont exercée sur les ressources naturelles. L'un des aspects de cette dégradation réside dans l'érosion hydrique des sols qui s'est accélérée d'une façon alarmante au cours des dernières décennies.

L'érosion hydrique est la principale cause de la dégradation des terres agricoles. Les pertes d'énormes quantités de sédiments contribuent d'une manière progressive dans la déformation du patrimoine agro-pédologique des bassins versants. Elle représente une grave menace pour la production agricole et les infrastructures en milieu rural.

L'accentuation de la dégradation des sols dépend de plusieurs facteurs naturels et anthropiques favorisant le déclenchement et le développement des processus d'érosion. Ces facteurs sont divisés en deux catégories, ceux qui sont de nature quasi-statique relative (infiltration, érodibilité et morphologie) et les autres qui ont une variabilité dans le temps tels que le couvert végétal, l'utilisation du sol, l'intensité des pluies et les pratiques agricoles (*Roose et Lelong 1976, Vrieling 2005, Boukheir et al. 2006*), entre autres, qui ont eu pour conséquence une augmentation de la quantité de matériaux perdus par les sols et qui se retrouvent dans les cours d'eau, les retenues de barrages, les lacs et les zones de sédimentation (*Sadiki, 2004*).

Les conséquences de l'érosion sont graves. Les plus notables sont :

- l'envasement des barrages et la diminution de leur capacité de stockage de l'eau,
- la dégradation de la qualité de l'eau et la pollution des points de captage,
- la dégradation du sol, capital essentiel de l'agriculture,
- les menaces qui pèsent sur les installations humaines par les crues exceptionnelles et les mouvements de terrains.

A l'échelle de l'Algérie, les zones exposées aux risques de dégradation dus à la désertification et à l'érosion hydrique sont estimées à $5 \cdot 10^5$ km² ce qui représente plus de 20 % de la surface totale du pays qui est de l'ordre de $28,3 \cdot 10^5$ km² (*Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, 2010*). En conséquence, $1,4 \cdot 10^5$ km² de zones de montagne au Nord sont touchés par l'érosion hydrique, $3,2 \cdot 10^5$ km² en zones steppiques sont directement menacés par la désertification et $4,1 \cdot 10^4$ km² de forêts soumises aux menaces induites par les

effets des changements climatiques (*Mostephaoui et al., 2013*). Les pertes annuelles en capacité des barrages sont estimées dans les environs de 20 hm³ sous l'effet de l'envasement (*Remini, 2000*).

Le bassin versant de Bounamoussa qui présente un relief accidenté fait partie des bassins versants fortement affectés par l'érosion hydrique en Algérie. La région est sous un climat humide et caractérisée par une pluviométrie à forte variation spatio-temporelle. La perte en sols au niveau de ce bassin au fil des années écoulées a augmenté le niveau d'envasement de la retenue du barrage Cheffia construit sur l'oued Bounamoussa. Les levés bathymétriques de ce barrage indiquent que le bassin versant est soumis à un envasement important et de plus en plus intense il est passé de 186 762 m³an⁻¹ entre 1965 et 1986 à 509 611,1 m³an⁻¹ entre 1986 et 2004.

Pour mieux lutter contre ce phénomène, il est nécessaire d'identifier ses causes et ses conséquences. Il s'agit d'élaborer une carte de perte de sol et de localiser les zones à risques nécessitant prioritairement la réalisation de travaux d'aménagement contre l'érosion hydrique.

Si les mesures des transports solides sur de grands bassins versants donnent une idée de la dégradation globale et montrent l'importance des caractéristiques de la lithologie (*Demmak, 1982*), elles ne permettent pas de déterminer les zones ou sous bassins nécessitant une intervention protectrice. Une cartographie hiérarchisée, typologique de l'érosion, de ses formes et de ses modalités est encore soit inexistante ou trop fragmentaire.

La combinaison des paramètres physiques des milieux, le type de couvert végétal, les systèmes de cultures et pratiques culturales entraînent des conditions, des modalités et des intensités érosives différentes à l'échelle de la parcelle, des versants et des petits bassins versants. Il faut tenir compte de ces éléments dans les interventions. Les effets de ces paramètres sont de deux types fondamentaux: dégradation des sols et production de sédiments. La maîtrise des processus hydriques en milieu montagneux telliens, à différentes échelles apparaît comme étant primordiale. Il n'y a pas de documents classant par ordre de priorité et selon des critères acceptés, aussi bien par les chercheurs que par les gestionnaires, les espaces à traiter selon les différents termes (*Roose, 1994*).

La cartographie de l'érosion est un outil fondamental pour connaître la répartition et l'ampleur géographique du phénomène, ainsi que pour sa caractérisation qualitative (*Boardman, 2006*). Grâce à la cartographie de l'érosion, il est possible d'incorporer ce phénomène comme facteur dans le processus d'aménagement du territoire, et plus

particulièrement dans le processus de la gestion intégrée (*Desmet et al. 1995*). La capacité d'intégrer les deux méthodologies ; la cartographie de l'érosion et la gestion intégrée dans les systèmes d'informations géographiques (SIG) facilite l'application de ces deux éléments comme outil perfectionné pour orienter les décisions en matière d'aménagement du territoire (*Okoth, 2003*).

L'objectif de cette thèse, consiste à tester la méthodologie du modèle RUSLE dans le bassin versant de Bounamoussa, dans le but d'élaborer un ensemble de cartes thématiques représentant les facteurs entrant dans le processus érosif, ainsi que l'établissement d'une carte synthèse d'expression de la perte en sol et de la vulnérabilité au risque d'érosion et de préciser la dynamique érosive dans notre bassin Ceci dans le but de tirer les conclusions les plus cohérentes quant à l'envasement des ouvrages et la perte en sol dans l'écosystème. Les résultats obtenus est une compilation de toutes les informations résumées en un document servant d'aide à la décision en termes de gestion et de protection des ressources naturelles.

Ce document comprend les chapitres suivants :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de la problématique et dresse, à partir de l'analyse de la littérature scientifique, un état des données et des méthodes permettant de quantifier l'érosion hydrique et de l'envasement dans les bassins versants et son impact. Ainsi, il traite de certaines méthodes utilisées dans la lutte contre l'envasement des retenues.

Le deuxième chapitre comprend la présentation du bassin d'étude, (la situation géographique, les caractéristiques morphométriques, l'occupation du sol, la géologie et la pédologie).

Le troisième chapitre, fait le point sur l'hydrologie de surface par un traitement des données hydroclimatiques et l'évaluation des termes du bilan hydrologique en s'appuyant essentiellement sur les relevés pluviométriques et de températures effectués en différents points du réseau de mesure.

Le quatrième chapitre concerne cartographie et estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Bounamoussa par le modèle RUSLE intégré dans le SIG et les résultats obtenus seront comparés avec des mesures bathymétriques qui ont été faites au niveau du barrage Cheffia.

Le cinquième chapitre porte sur la quantification de l'envasement du barrage Cheffia par le modèle PISA et sa validation par comparaison avec les différentes méthodes.

Enfin, la conclusion générale fait une synthèse des principaux résultats, et propose des solutions de protection contre l'érosion et des perspectives de recherche puisque l'ampleur de la thématique mérite encore bien d'autres développements.

Chapitre 1

Les processus d'érosion et d'envasement dans les bassins versants

Chapitre 1: Les processus d'érosion et d'envasement dans les bassins versants

1.1. Introduction

Les effets néfastes de l'érosion hydrique des sols ont été soulignés depuis longtemps par de nombreux auteurs, parmi lesquels et les plus récents (*Kirby & Morgan, 1980 ; Auzet, 1987 ; Boardman et al, 1990 ; DePloy, 1990 ; De Ploy, 1991 ; Le Bissonnais, 1998 et 1999, etc.*). L'érosion des sols qui n'épargne aucune région du globe est caractérisée par trois étapes, correspond d'abord au « détachement » de particules de sols puis au « transport », par différents agents (vent, eau, glace, gravité), de leur emplacement d'origine à un endroit de « dépôt ou accumulation » en aval, qui est l'ultime étape de l'érosion (*De Pina Tavares, 2012*).

D'une manière générale, l'érosion, le transport des matériaux arrachés au bassin d'alimentation et au réseau d'écoulement, leur dépôt dans les infrastructures hydrauliques, hydro-agricoles, portuaires et routières sont un ensemble de phénomènes dont la complexité à l'échelle du bassin reste difficile à mettre en équation vu la diversité des facteurs aussi bien naturels qu'anthropiques mis en jeu (*Touaibia, 2010*). L'érosion géologique (des fois appelée érosion naturelle ou normale) engendrée par l'eau de pluies sous forme liquide, solide, l'écoulement des eaux. L'autre est l'érosion accélérée, dont le principal responsable est l'activité anthropique, notamment la déforestation, l'agriculture, l'élevage des animaux, la construction (*El-Swaify et al., 1983*).

Comme le suggèrent ces définitions, l'érosion qui s'exerce souvent d'une manière spectaculaire sur les sols est due à l'action de plusieurs facteurs qui sont particulièrement le ruissellement de surface, le climat, la lithologie, la pente du sol, la couverture végétale et le mode d'exploitation du milieu naturel (*Wischmeier et al, 1978*).

Ce phénomène, est caractéristique dans la région du Maghreb dont les potentialités en eau et en sol sont sérieusement menacées (*Heush et al., 1971 ; Demmak, 1982 ; Lahlou, 1994 ; Touaibia et al., 2001 ; Meddi, 1992 ; Terfous et al., 2003 ; Achite et al., 2005*). Les quantités de sédiments transportés en suspension susceptibles de se déposer dans le littoral méditerranéen des côtes Algériennes sont estimées à 47 millions tonnes par an (*Probst et al., 1992*).

En général, l'érosion spécifique varie entre 2000 et 4000 t/km²/an (*Demmak, 1982*), L'Algérie est de ce fait l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion, L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une zone à l'autre. La partie Ouest, où l'érosion touche 47 % de

l'ensemble des terres, est la région la plus érodée du pays ; viennent ensuite les régions du Centre (27%) et de l'Est (26%) (*Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire, 2000*). Ceci a contribué à la diminution de la production agricole et la réduction de la capacité de stockage des barrages.

Devant la gravité de ces problèmes, des moyens importants ont été mobilisés pour lutter contre l'érosion. Ainsi, plus de 800 000 hectares ont été reboisés depuis l'indépendance (y compris le barrage vert), (*Ministère des ressources en eau, 1987*) et plus de 300 000 hectares traités par les techniques de DRS (*Heusch, 1986*), mais malgré 50 années de lutte anti-érosive, les terres continuent de se dégrader et les barrages à s'envaser rapidement (*Benaïcha 2011*).

1.2. L'origine et mécanisme de l'érosion hydrique

L'érosion est un processus selon lequel les particules de sol sont arrachées au bassin d'alimentation et au réseau d'écoulement, leur déposition dans les infrastructures hydraulique, hydro-agricole, portuaire, routière sont un ensemble de phénomènes dont la complexité à l'échelle du bassin reste difficile à mettre en équation vu les facteurs aussi bien naturels qu'anthropiques mis en jeu (*Poesen et Govers, 1994*). Ces processus résultent de trois phases : détachement, transport et dépôt (fig.1.1).

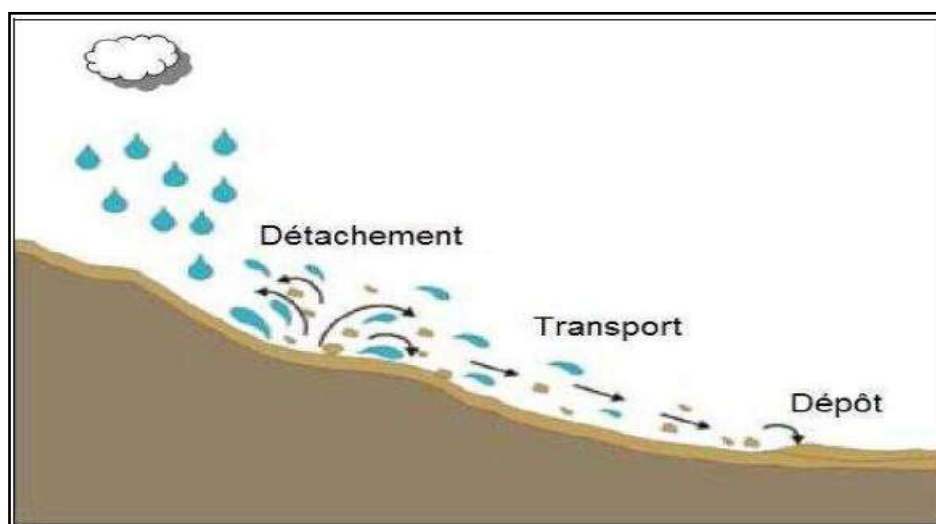


Figure 1.1. Processus de l'érosion hydrique (*Cheggour, 2008*)

Ce phénomène causés par l'action en général combinée de la pluie et du ruissellement, et dont l'expression varie en fonction de la résistance du milieu (sol, couvert végétal, techniques culturales) et de la topographie.

1.2.1. Détachement des particules de sol

Les mécanismes provoquant l'érosion sont liés à l'énergie de la pluie ou à l'énergie de l'écoulement de l'eau (*Ellison, 1944; Ekern, 1950 ; Leguédois, 2003*). La goutte de pluie qui arrive au sol entre en collision avec les agrégats du sol (fig.1.2) et forme un cratère (*Boiffin, 1976; Le Bissonnais, 1988*). L'énergie de cette goutte de pluie est absorbée par la projection de ces agrégats, par la déformation ou le bris de ceux-ci (cas le plus fréquent), ou par les deux en même temps (*Free, 1952; Bradford et Huang, 1996*).

Le détachement mobilisant les fines particules de la surface du sol peut être assuré de deux manières (*Boiffin, 1994*), due à la fois aux gouttes d'eau par rejaillissement (splash) et aux eaux de ruissellement.

L'impact des gouttes de pluie brise les agrégats du sol en éléments plus fins. Les premières gouttes s'infiltrent dans le sol d'autant plus aisément qu'il est meuble et que sa porosité est élevée. Cette première phase s'accompagne d'un déplacement des particules et d'un tassement du sol. Lorsque la couche superficielle s'humidifie, trois processus se développent simultanément:

- La dégradation de la structure
- La formation d'une pellicule de battance
- L'érosion par splash ou érosion par rejaillissement.

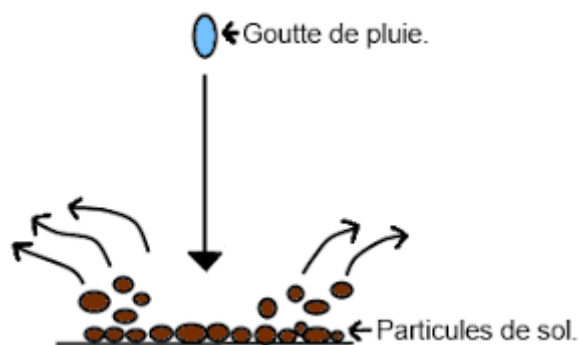


Figure 1.2.Effet des gouttes de pluies (effet splash)

1.2.2. Transport des particules

Comme les précipitations, le ruissellement agit sur le sol par des actions de détachement et de transport (fig.1.3). Les particules arrachées peuvent être transportées de trois manières par l'écoulement (*Yalin, 1980; Govers et al. 2000*) :

- **En suspension** : l'écoulement ou l'impact des gouttes de pluie sur la lame d'eau provoque une turbulence qui maintient les particules fines en suspension. Ces particules fines sont alors transportées sur de grandes distances.
- **Par roulement** : lorsque l'écoulement devient important, il peut arracher de plus grosses particules mais ne peut les mettre en suspension. La force de l'écoulement les roule sur le fond.
- **Par saltation** : lorsque les particules sont de grosseur moyenne, elles peuvent se déplacer par sauts successifs (saltation). Ce phénomène est surtout important avec le vent.

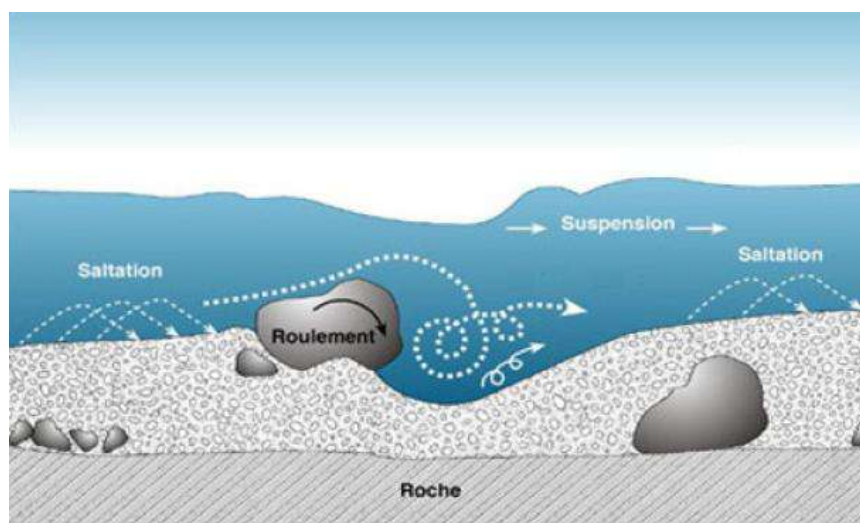


Figure 1.3. Mode de transport des particules dans les cours d'eau (Serbah, 2011)

1.2.3. Dépôt

Les particules, qu'elles soient arrachées au fond d'une rivière ou qu'elles proviennent du Ruissellement et de l'érosion des sols (Maneux, 1998). La vitesse de l'écoulement diminue, le poids des particules devient plus important que les forces de turbulence ou de roulement et les particules se déposent. Les plus grosses se déposent en premier et les plus petites par la suite.

1.3. Les différentes formes d'érosion hydrique

La pluie est l'élément déclencheur de ce type d'érosion, qui provoque le détachement des particules élémentaires du sol. Elle se définit comme la perte de sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt. Celle-ci existe en plusieurs formes :

1.3.1. Erosion en nappe

L'érosion en nappe est régie par deux processus :

- Les gouttes de pluie qui atteignent la surface du sol sont dotées d'une certaine énergie cinétique, fonction essentielle de leur diamètre. Leur choc sur les agrégats du sol détachent et font jaillir des particules de terre (l'effet splash) (*Sabir, 1986*).
- Le ruissellement lorsque l'intensité devient supérieure à la vitesse d'infiltration. Il se crée sur le sol une lame d'eau dont l'écoulement enlève les particules détachées et les transporte. La puissance du transport est fonction de l'épaisseur et de la vitesse du ruissellement.

Les signes qui permettent de caractériser l'érosion en nappe sont l'apparition de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés et la remontée de cailloux à la surface du sol, les conséquences de l'érosion en nappe sont:

- Le nivellement de la surface du sol.
- La squelettisation des horizons superficiels.
- Le décapage entraînant l'apparition de taches claires.



Photo 1.1. Erosion en nappe de Beni Chougrane, près de Mascara (Algérie).
(*Morsli, 2006*)

1.3.2. Erosion linéaire, en griffes ou en rigoles

Ce type d'érosion intervient à la suite du ruissellement. Dans un premier temps, des flaques se forment. En débordant, les flaques communiquent entre elles et des lignes d'écoulement limitées dans l'espace apparaissent selon la ligne de plus grande pente: selon la

profondeur de ces lignes, le vocabulaire employé est différent. Dans le tableau 1.1, nous donnons les différentes formes d'érosion hydrique.

Tableau 1.1. Formes d'érosion hydrique

Appellation des lignes d'écoulement (d'après Roose, 1994)	
Profondeur	Appellation
Quelques centimètres	Griffes
>10 cm	Rigoles
10 à 20 cm quelques mètres de large	Nappe Ravinante
>50 cm	Ravines



Photo 1.2. Erosion linéaire (Oued Bounamoussa). (cliché :CH.bouhadeb, 2017)

Tout comme l'érosion en nappe, il existe une méthode pour mesurer l'érosion linéaire. Cette méthode est basée sur la méthode des volumes (*Ludwig, 1992*).

1.3.3. L'érosion par ravinement

La ravine est une rigole approfondie où se concentrent les filets d'eau. La rigole se transforme en ravine lorsque sa profondeur interdit son nivellement par des simples instruments aratoires. Le ravinement constitue un stade avancé de l'érosion. Les ravines peuvent atteindre des dimensions considérables.

L'approfondissement des ravines remonte du bas vers le haut de la pente (érosion régressive). Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en "badlands" et explique également la sape d'ouvrages (ponts, radiers, digues filtrantes...).

1.4. Conséquences de l'érosion hydrique

Les conséquences de l'érosion hydrique des sols sont nombreuses tant en zones érodées qu'en zones de dépôts.

1.4.1. Conséquences d'érosion hydrique en zones érodées

L'érosion hydrique a des effets sur les zones érodées, parmi lesquels on cite :

- 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 ;
- la diminution du drainage profond induisant une moindre réalimentation des nappes ;

Cet appauvrissement est lié au double effet de décapage des horizons supérieurs, habituellement les plus fertiles, et de sélectivité de l'érosion qui entraîne les éléments les plus fertiles.

- la dégradation des terres agricoles et une désertification du milieu naturel (*FAO, 1980*) ;
- déchaussements, des plantes emportées ou recouvrement de la culture ;
- la baisse des rendements des cultures, une augmentation des coûts de production des aliments (*FAO, 1983*) ;

1.4.2. Conséquences de l'érosion hydrique en zones de dépôts

La sédimentation et les transports solides sont gênants pour une majorité d'aménagement. Ils se traduisent par :

- une réduction de la capacité des lits de rivières et un risque d'inondation des terres voisines ;
- envasement accéléré des fossés de drainage, des canaux d'irrigation et des réservoirs (bassins)
- une sédimentation des sols érodés dans des endroits non désirables (*FAO, 1977*) ;
- une augmentation du coût de traitement des eaux de consommation.
- La destruction de routes, chemins et ponts ;
- un transfert et répartition spatiale des polluants (pesticides, métaux lourds et nutriments en excès) dans l'environnement ;

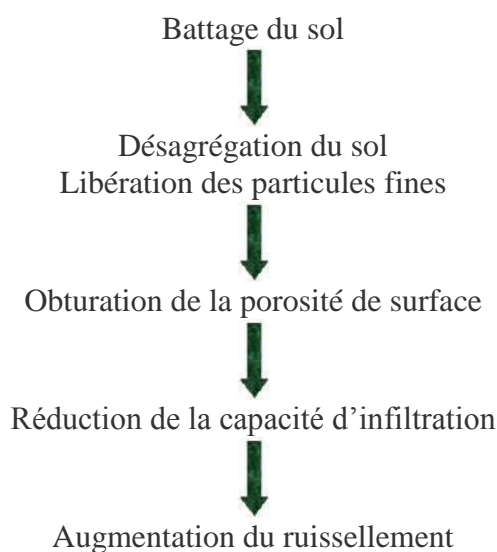
1.5. Facteurs influençant l'érosion hydrique

Plusieurs facteurs influent directement ou indirectement sur le processus de l'érosion du bassin versant, le climat et l'hydrologie, la morphologie du site, le sol, la végétation et Les activités humaines.

1.5.1. Facteurs climatiques

Les facteurs climatiques les plus actifs sur l'érosion hydrique restent les précipitations et, à un degré moindre, les températures et l'humidité ont des effets prépondérants sur l'altération mécanique des roches. Le volume de précipitation joue un rôle similaire. En général, un plus grand volume de précipitation provoque un plus grand volume de ruissellement et nécessairement une plus grande érosion. Les paramètres de pluie liés à l'érosion sont :

- la hauteur des précipitations est peu liée à l'importance de l'érosion
- L'intensité est le facteur principal de l'érosion. Plus l'intensité est grande, plus l'effet de battage du sol est prononcé :



- L'érosivité d'une pluie est donc fonction de ses caractéristiques physiques : le diamètre des gouttes et la vitesse d'impact des gouttes.

1.5.2. Facteurs topographiques :

Les facteurs topographiques essentiels sont la pente du bassin versant, le relief, la densité du drainage, l'importance des reliefs et des plaines d'inondation, l'orientation et la taille du bassin. L'influence première de la pente est l'augmentation des vitesses d'écoulement. Sur

des pentes plus grandes, l'infiltration est plus faible et le volume de ruissellement augmente. La longueur de la pente joue un rôle similaire. Elle augmente le volume de ruissellement et ainsi l'érosion.

1.5.3. Facteurs pédologiques :

Ce facteur le plus important est la résistance (stabilité) des agrégats à l'impact des gouttes de pluie. Cette résistance ou cette stabilité est influencée positivement par la présence d'agents liants tels que les argiles, la matière organique et le calcium. Ainsi, les sols de texture limoneuse sont généralement plus sensibles que les sols argileux à cause de leur faible stabilité structurale.

La structure et texture des sols, leur perméabilité, la présence de certains éléments chimiques et la teneur en matières organiques conditionnent l'érodibilité des sols.

1.5.4. Couvert végétal

Il s'agit du facteur primordial de protection du sol contre l'érosion. ce facteur est d'autant plus efficace qu'il absorbe l'énergie cinétique des pluies, qu'il recouvre une forte proportion du sol durant les périodes les plus agressives de l'année, qu'il ralentit l'écoulement du ruissellement et qu'il maintient une bonne porosité du sol et s'oppose à toutes les formes d'érosion.

L'occupation des terres est en rapport direct avec les activités humaines qui sont l'agriculture, l'élevage, les exploitations minières, l'abatage du bois, la construction des routes et l'urbanisation vu la suppression de la végétation, entourant sur les phénomènes d'érosion.

1.5.5. Les activités humaines

Diverses sortes d'activités humaines, pratiques agricoles, exploitations forestières, pâturages, constructions de routes et de bâtiments, etc ... tendent à modifier les phénomènes d'érosion, en accélérant souvent de façon considérable le rythme. Les phénomènes d'érosion dûs à l'Homme sont souvent désignés par le terme d'érosion accélérée ou d'érosion des sols.

1.6. Causes d'érosion hydrique et facteurs de résistance du milieu

Le tableau 1.2 présente les processus de dégradation, les causes ainsi que les facteurs de résistance du milieu.

Tableau 1.2. Formes de dégradation et d'érosion, causes, facteurs de résistance du milieu
(Roose, 1994)

Les processus de dégradation et d'érosion et leurs formes	Les causes : différentes sources d'énergie	Les facteurs de résistance du milieu
<p><u>Erosion en nappe</u> Forme: nappe de sable, pellicule de battance ou de sédimentation, "demoiselle coiffée", micro-falaise</p>	Battance des gouttes de pluie	<ul style="list-style-type: none"> ➤ le couvert végétal, ➤ la pente, ➤ le sol, ➤ les techniques et structures anti-érosives
<p><u>Erosion linéaire</u> Formes: griffes, rigoles, ravines</p>	L'énergie du ruissellement dépend du volume du ruissellement et de sa vitesse au carré $1/2MV^2 = 1/2MGH$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ la vitesse du ruissellement est fonction de la pente et de la rugosité, ➤ le volume ruisselé est fonction de la surface du bassin versant et de la capacité d'infiltration, ➤ résistance du profil du sol et des racines

1.7. Quantification de l'érosion

Les méthodes expérimentales de calcul des bilans d'érosion sont souvent difficiles à mettre en œuvre. L'aspect quantitatif de la désagrégation des sols, du fait de sa complexité, peut être effectuée selon deux approches. La première consiste à quantifier l'érosion par le biais de modèles impliquant des paramètres morphologiques, climatiques et hydrologiques. La seconde consiste à estimer les quantités de matières en suspension évacuées par les cours d'eau d'écoulement à l'exutoire du système étudié. La plupart des mesures de quantification de l'érosion sont faites sur des parcelles de taille standard (Wischmeier et al., 1971 ; Roose, 1967, 1998) tandis que, l'étude des transferts en suspension à l'échelle du bassin versant s'avère être un outil efficace pour comprendre et quantifier les processus d'érosion des sols.

Selon, Albergel et al. (2001, 2003), Il existe plusieurs formules et méthodes empiriques permettant de quantifier l'érosion hydrique. On citera quelques formules basées sur des paramètres physiques représentatifs. Ces modèles ont été appliqués dans les différentes régions maghrébines (Bouanani, 2005).

1.7.1. Formule de Henin "1950"

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

$$E_s = \frac{I_p \times I \times S}{K \times V_e} \quad (1.1)$$

Où

I_p : Intensité des précipitations;

I : Pente du bassin versant; Les facteurs " I_p " et " I " favorisent l'érosion

S : Susceptibilité des sols;

K : Perméabilité;

V_e : Végétation.

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

1.7.2. Formule de Grivilovic (1960):

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnelle à la température, à la pluie et à un coefficient d'érosion, l'équation est donnée par l'expression 1.2:

$$E_s = 3.14 \times T \times P_0 \sqrt{Z^3} \quad (1.2)$$

Avec

E_s : érosion spécifique dans le bassin versant ($T/ km^2.an$)

T : coefficient de température

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0.1 \quad (1.3)$$

Avec :

t_0 : température moyenne annuelle en $0c$.

P_0 : pluie annuelle en (mm).

Z : coefficient d'érosion.

$$Z = y \times [x \times a] \times (\delta + \sqrt{I_{moy}}) \quad (1.4)$$

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

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

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

Imoy : indice de pente moyenne du bassin versant.

1.7.3. Formule de Tixeront (1960) :

$$E_s = [S_1 \cdot Ta_1 + S_2 \cdot Ta_2 + S_3 \cdot Ta_3 + \dots \dots \dots S_n Ta_n] \quad (1.5)$$

Avec :

E_s : Erosion spécifique (t/ km².an).

Ta1, Ta2, Tan : Taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du sol dans les sous Bassin (T/ km²).

S : superficie totale du bassin (km²).

S1, S2, Sn : Superficie des sous bassins(km²).

Maintenant, si on suppose que la totalité du bassin possède une même perméabilité,

$$\text{On a } E_s = K \times L_e \quad (1.6)$$

L_e : Lamme d'eau ruisselée moyenne interannuelle (mm).

K : constante.

K : coefficient qui tient compte de la perméabilité des terrains.

K = 8,5 pour les terrains d'une perméabilité élevée.

K = 75 pour les terrains d'une perméabilité moyenne élevée.

K = 350 pour les terrains d'une perméabilité faible à moyenne.

K = 1400 pour les terrains d'une perméabilité faible.

K = 3200 pour les terrains perméables.

1.7.4. Formule de Fournier (1960)

$$Q_s = \frac{1}{36} \times \left[\frac{P^2}{P_a} \right]^{2.65} \left[\frac{H_{moy}^2}{S} \right]^{0.46} \quad (1.7)$$

Avec ;

Q_s : l'apport solide moyen inter annuel (en T/ km².an).

P : la pluviométrie du mois le plus arrosé (en mm).

H_{moy} : l'altitude moyenne (en mm).

P_a : la pluviométrie moyenne interannuelle (en mm).

S : superficie du bassin versant (en km²).

1.7.5. Formule de poliakov :

$$E_s = A \times K \times Q \times I^{1/2} \quad (1.8)$$

Q : Débit de ruissellement de surface.

K =104 : proportionnalité.

I = 0.16 : la pente moyenne du bassin versant

A =0,5-10 : Coefficient d'érosion variant en fonction des types de sol.

On prend : A= 2.

1.7.6. Formule de l'A.N.R.H 1970 :

$$T_{ss} = 26,62 I_e + 5,071 I_P + 9,77 C_t - 593,59 \quad (1.9)$$

Tss : transport solide spécifique moyen annuel (T/ km².an)

Ie: indice lithologique (%).

IP : indice des précipitations (%).

Ct : Coefficient de torrentialité :

$$C_t = D_d \times F_1 \quad (1.10)$$

$$D_d = \frac{\sum L_l}{A} \quad (1.11)$$

Dd : densité de drainage

LI : longueur de tous les cours d'eau d'ordre « 1 » (K m).

F1 = nombre de talweg/ surface fréquence des talwegs élémentaires

Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :

$$I_e > 10\%$$

$$I_P > 300$$

1.7.7. Mesures des débits liquides et solides à l'exutoire des bassins versants

L'évaluation des volumes de matériaux fins érodés et exportés d'un bassin versant se fait par des mesures conjointes de débits et de concentration en sédiments ou matières en suspension (MES). La méthode la plus rigoureuse pour obtenir la charge solide en suspension consiste à procéder, comme pour la mesure du débit, à une intégration de différentes concentrations et de vitesses sur plusieurs verticales, cette technique nécessite un matériel adapté. Le dispositif de prélèvement le plus simple est la bouteille d'échantillonnage. La mobilisation et le transport des matériaux solides par l'écoulement de l'eau représentent deux

phénomènes distincts, mais liés entre eux. Le transport solide en suspension peut s'exprimer par (Ammari, 2012):

$$Q_s = Q_l \cdot C_s \quad (1.12)$$

Sachant que :

Q_s : débit solide.

Q_l : débit liquide.

C_s : Concentration de sédiments.

La concentration des sédiments en suspension C_s et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance (Walling et al, 1981).

$$Y = a \cdot x^b \quad (1.13)$$

$$C_s = a \cdot Q_l^{b-1} \quad (1.14)$$

Une autre relation empirique communément appelée courbe du transport solide (Cambell et al, 1940 ; Crawford, 1991) lie le débit solide au débit liquide :

$$Q_s = a \cdot Q_l^b \quad (1.15)$$

Ce type de relation a été proposé dès 1895 par Kennedy, (Touaïbia, 2000). Depuis, plusieurs chercheurs ont essayé d'identifier surtout la valeur de l'exposant b . (Leopold et al, 1953) proposent pour les rivières de l'ouest des Etats Unis d'Amérique des valeurs de b variant entre 2 et 3, d'autres auteurs tels que Wood (1977), Walling et Webb (1981,1982), ainsi que Probst et Bazerabachi (1986) les limitent entre 1 et 2, en fonction des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques des bassins versants, ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau.

En Algérie beaucoup d'auteurs ont travaillé sur le développement de pareils models pour l'estimation du débit solide en fonction du débit liquide. Les modèles ont variés selon la zone d'étude, mais aussi selon une échelle temporelle, donc ces models dans l'espace et dans le temps, ce n'est en aucun cas des models intrinsèques (Ammari, 2012).

Tableau 1.3. Valeurs caractéristique des paramètres a et b d'après *Benkhaled et Remini (2003)*.

Equation	a	b	source
$Q_s = Q \cdot C_s$	4000 à 4446000	2à3	Leopold et al(1953)
		0.72 à 1.02	Fleming (1969)
		1.2	Dawdy (1967)
		1.63	Battala et al (1992)
$Q = a \cdot Q$	0.0004	2 à 3	Vononi (1977)

D'autre part, les mesures des exportations de matières grossières par charriage au fond de la rivière sont nettement plus complexes à mettre en œuvre et sont souvent ignorées par les expérimentateurs.

De manière générale, on ne peut pas se contenter seulement de la mesure des exportations à l'exutoire, car la seule connaissance de cette donnée ne permet ni de localiser les zones sources de sédiment, ni d'évaluer les pertes en terre que subissent les parcelles constituant ces zones sources (*Boiffin, 1994*).

1.7.8. Utilisation de la télédétection et le système d'information géographique SIG

Plusieurs études durant ces dernières années ont mis en évidence l'intérêt tout particulier d'un SIG en tant qu'outil informatisé dédié à la gestion de l'information géographique dans le suivi et la quantification de l'érosion hydrique. Les SIG sont des outils rapides d'exécution, flexibles et très puissants capables d'intégrer un grand nombre de facteurs et de les présenter sous une forme facilement interprétable (*Zurayket al., 1999, in Biko.M 2012*).

Un Système d'information géographique est, comme son nom l'indique, un outil informatisé dédié à la gestion de l'information géographique. Ce type de système permet d'apporter à chacun l'information dont il a besoin pour décider et agir au mieux. C'est un outil de représentation d'une réalité, de compréhension des phénomènes et des conditions dans lesquelles ils se réalisent, de simulation d'alternatives et de leurs effets. C'est aussi un outil de dialogue et de communication entre disciplines par un constant aller-retour entre observation, interprétation, hypothèse et validation. L'utilisation de ce genre de système offre un moyen simple, rapide et efficace à l'utilisateur, pour les études d'aménagement et de prise de décision (*Mokhtari, 2017*).

L'utilisation des techniques de télédétection associées aux SIG permet l'estimation quantitative de l'érosion ainsi que sa distribution spatiale à des moindres coûts et avec un

degré de précision appréciable pour de vastes superficies ; surtout que les décideurs politiques sont beaucoup plus intéressés par la distribution du risque d'érosion que par sa valeur absolue (*Lu et al., 2004, in Bassoglog 2012*). L'estimation quantitative de l'érosion se fait en appliquant des modèles empiriques ponctuels, qui nécessitent comme paramètres d'entrée, des données spatialisées (Pentes, texture du sol, hauteur de pluies, etc.) caractérisant les facteurs de l'érosion hydrique (topographie, érodibilité, l'érosivité, etc.) (*Le Bissonais et al, 2004, in Biko. M 2012*).

Les SIG permettent d'appliquer des modèles ponctuels cellule après cellule sur tout un espace géographiquement étendu (*Lu et al., 2004 ; in Biko.m 2012*). Les données spatialisées de chaque paramètre sont traitées séparément sous forme de couches d'informations et intégrées (superposition des couches) dans le SIG pour en ressortir la carte de distribution du risque d'érosion (*Mutua et al., 2005 ; in Biko.m 2012*).

1.7.9. Modélisation de l'érosion hydrique

Les phénomènes d'érosion hydrique sont le résultat d'interactions complexes, variables dans le temps et l'espace. Dans une optique d'évaluation des risques de ruissellement et d'érosion, le recours à la modélisation peut constituer un outil approprié (*Mokhtari, 2017*). Une large variété de modèles sont disponibles pour estimer le risque d'érosion des sols. Ces modèles peuvent être classés de nombreuses façons. Il est possible, par exemple, de faire une subdivision basée sur une échelle de temps sur laquelle un modèle peut être utilisé : certains modèles sont conçus pour prédire les pertes annuelles de sol (donc sur le long terme), tandis que d'autres prévoient les pertes pendant un orage (donc événementielles) (*Van der Knijff, 2000*).

Alternativement, une distinction peut être faite entre les modèles qui prédisent un phénomène d'érosion ponctuel et ceux qui s'intéressent à des phénomènes de plus grande amplitude. La différence entre les modèles empiriques et les modèles physiques est aussi intéressante à faire (*Van der Knijff, 2000*). Le choix d'un modèle particulier dépend largement du but recherché et des données et du temps disponibles. La plupart demande beaucoup de données pour leurs paramètres d'entrée si bien que leur application à l'échelle régionale devient difficile.

➤ **L'équation "Universal Soil Loss Equation" (USLE)**

Vingt ans après la mise en place des essais d'érosion en parcelles dans une bonne dizaine d'Etats d'Amérique du Nord, il existait une accumulation d'un grand nombre de données sur l'érosion dont il convenait de faire la synthèse. En 1958, **Wischmeier**, statisticien du Service de Conservation des Sols fut chargé de l'analyse et de la synthèse de plus de 10.000 mesures annuelles de l'érosion sur parcelles et sur petits bassins versants dans 46 stations de la Grande Plaine américaine. L'objectif de **Wischmeier et Smith (1978 ;1960)** était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosive de choisir le type d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en-dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production (*Mokhtari, 2017*).

➤ **Analyse des principes du modèle**

Selon ce modèle, l'érosion est une fonction multiplicative de l'action érosive des pluies (le facteur R qui est égal à l'énergie potentielle) que multiplie la résistance du milieu, laquelle comprend K (l'érodibilité du sol), Ls (le facteur topographique), C (le couvert végétal et les pratiques culturales) et P (les pratiques antiérosives). C'est une fonction multiplicative, de telle sorte que si un facteur tend vers zéro, l'érosion tend vers 0. Ce modèle de prévision de l'érosion est constitué d'un ensemble de cinq sous modèles:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1.16)$$

Avec ;

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

R : facteur d'agressivité climatique (MJ.mm/ha.h.an,)

K : facteur de sol (t.ha.h/ha.MJ.mm,)

LS : facteur de pente (adimensionnel)

C : facteur d'occupation de sol (adimensionnel)

P : facteur des aménagements antiérosifs (adimensionnel)

Cette équation a été appliquée dans l'Est de l'Algérie et a montré la gravité du problème de l'érosion et a permis de déterminer les périodes où l'érosion est intense. Les dégâts graves et intenses causés par l'érosion hydrique au fil des siècles a poussé l'homme par le biais de différentes formules empiriques à quantifier les pertes en sols, ces formules restent toujours à utiliser avec précaution du fait de leur limites d'application (*Benaicha 2011*).

1.8. L'érosion hydrique en Algérie

La zone méditerranéenne a la réputation d'être sujet des risques érosifs très élevés (*Hudson, 1987*). La partie sud de la méditerranée et plus particulièrement l'Algérie septentrionale, voit ses terres se dégrader et leur potentiel productif s'abaisser chaque année (*Dahmani, 2012*).

Les zones méditerranéennes sont en général fragiles pour plusieurs raisons : les précipitations irrégulières et souvent violentes favorisent l'érosion ; l'importance des pentes dans les nombreux secteurs de collines et de montagnes aggrave le phénomène ; les températures élevées accélèrent la minéralisation de la matière organique ; le couvert végétal est souvent réduit à cause de la dureté du climat et des actions anthropiques, et de ce fait, protège mal le sol. Les dégâts sont d'autant plus importants que les sols sont minces et pauvres en matière organique (*Mankouri, 2009*).

L'Algérie se classe parmi les pays les plus affectés dans le monde avec une érosion spécifique moyenne annuelle variant entre 2000 et 4000 T/ km²/an (*Touaibia et al, 1999*). L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une zone à l'autre. La partie Ouest, où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres, est la région la plus érodée du pays ; viennent ensuite les régions du Centre (27%) et de l'Est (26%) (*Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire, 2000*).

Bouraba, en 2002, dans une étude de synthèse a montré l'ampleur de ce fléau, tout en justifiant par la présentation des chiffres alarmants de dégradation spécifique dans le nord de l'Algérie. L'étude a porté sur plus de 35 bassins versants ; le calcul est établi sur des cycles hydrologiques différents, généralement, sur un cycle au moyen.

L'érosion spécifique varie annuellement de 307 à 5453 t/km² dans le bassin de Cheliff, de 1557 à 9397 t/km² dans le côtiers Algérois, 3990 t/km² dans l'Isser, 248 t/km² dans le Soummam, 252 à 10375 t/km² dans le côtiers Constantinois, 742 t/km² dans le Sybouse, 782 t/km² dans Kebir Rhumel, 164 à 5153 t/km² dans le Chott Hodna, 794 à 2621 t/km² dans le haut plaine Constantinois, 838 à 1260 t/km² dans le Chott Melrhir, 938 t/km² dans le Côtiers Oranais et de 301 à 406 t/km² dans la Tafna (*Dahmani, 2012*).

1.9. L'envasement des barrages

1.9.1. Définition de l'envasement

L'envasement est défini comme étant le dépôt de sédiments dans les retenues et barrages, réduisant ainsi leurs capacités de stockage.

La construction d'un barrage change les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement et la capacité de transport des sédiments (*Chow, 1964*), transportée par l'écoulement, la matière solide tend à se déposer à l'approche des plans d'eau, car en réduisant sa vitesse, l'écoulement perd petit à petit sa capacité de transport quand le cour d'eau s'approche et se jette dans le lac du réservoir, les particules grossières se déposent en premier ensuite les plus fines jusqu'à atteindre la digue (fig.1.4), n' ayant pas où s'échapper le dépôt se tasse et se consolide en réduisant ainsi la capacité de stockage du réservoir, sachant qu'en moyenne 90% des sédiments transportés par le cour d'eau sont piégés (*Chow, 1964*).

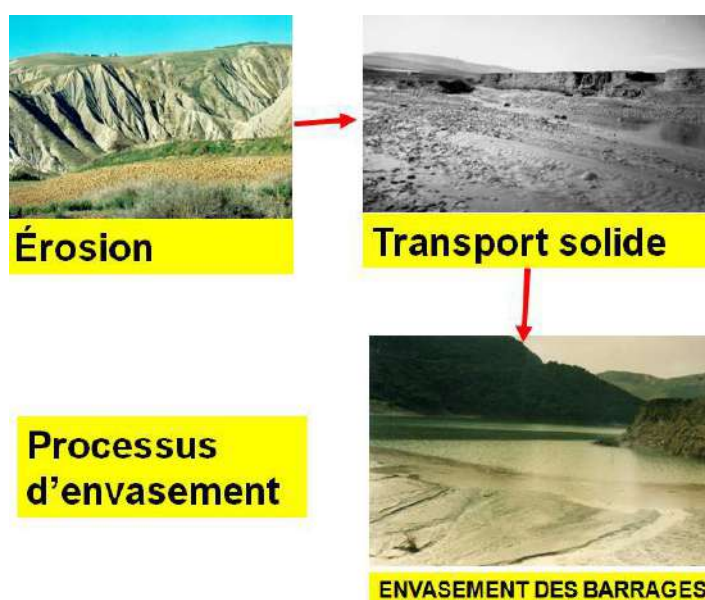


Figure 1.4. Processus d'envasement (*Remini, 2009*)

1.9.2. Problèmes posés par l'envasement

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans la retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui bien souvent exige que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les

pays arides et semi-arides. Dans l'un et l'autre cas, il en résulte des dommages considérables à l'environnement et une mise en péril de l'économie du projet (*Remini, 2003*).

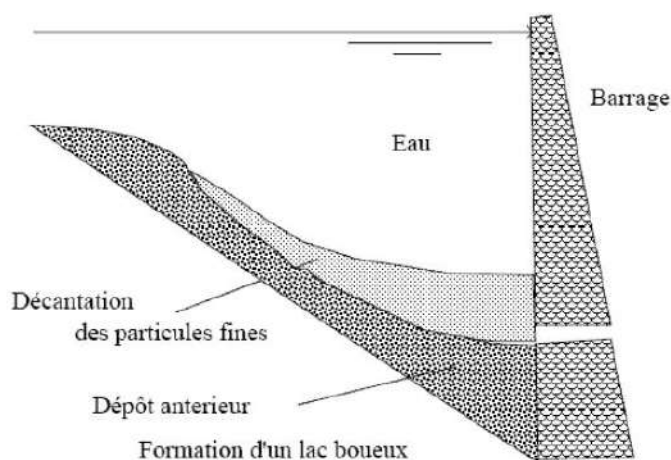


Figure 1.5. Dépôt de vase (*Remini, 2003*)

Le problème d'envasement des barrages n'est pas un problème propre à l'Algérie, beaucoup de pays dans le monde souffrent du problème surtout dans les zones arides et semi-arides, où le manque de ressources hydrique est accentué par l'érosion des sols qui peut atteindre les 5000 t/km²/an contre 30 à 50 t/km²/an en Europe (*Abdeli, 2007*).

En Australie *Chanson (1998)* a cité quelques exemples de petits barrages, comme celui de Moore Creek, où deux averses ont pu transporter 85000 m³ de vase, et le barrage été complètement envasé au bout de 26 ans de service, même chose pour le Korrumbyn Creek Dam, qui à été complètement envasé au bout de 20 ans de service.

En Afrique du Sud la moyenne d'envasement pour 170 barrages d'un volume allant de 0,5 à 5000 hm³ est de 0,35%, ce qui engendre une perte de capacité de 105 hm³ par an ce qui correspond à une perte économique de 21,2 Millions de Dollars (*Braune, 1989*).

Pour les USA, vu l'immensité du pays elle diffère d'une région à une autre avec une moyenne de 0,23%, sauf qu'elle varie de 0,07 à Prattsville jusqu'à 5% à Bennington qui enregistre une érosion record de 5311 tonnes/mil²/an (*Chow, 1964*).

Le Maghreb est considéré comme le plus touché par le problème d'érosion et d'envasement en Afrique, surtout si on se réfère aux travaux de *Walling (1984)* qui a lancé une fourchette de l'érosion spécifique de 1000 à 5000 t/km²/an. Les trois pays du Maghreb dispose de 230 barrages d'une capacité totale de 23 Milliards de m³ Dont 61% reviennent au

Maroc, 23 % à l'Algérie et 16% à la Tunisie (fig.1.6) (Remini,2003), ces barrages enregistre une perte annuelle de capacité de 125 hm³.

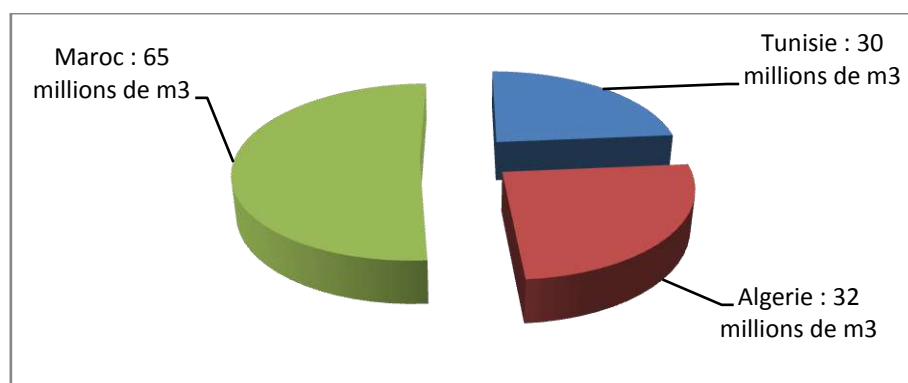


Figure 1.6.Envasement moyen au Maghreb (Remini, 2003).

Selon une récente étude basée sur des séries statistiques comportant les données de 57 grands barrages, L'Algérie perd par envasement 45 à 50 millions de m³ chaque année, ce qui représente une perte de capacité annuelle égale à 0,65 % de la capacité totale. Le volume de vase estime en 2006 était de 1,1 milliards de m³, soit un taux de comblement de 16 % de la capacité totale de 6,8 milliard de m³ (Remini, 2007). Certains barrages ne contiennent pratiquement que de la vase, à l'exemple du Fergoug qui est envasé à 80 %.

Le tableau (1.4) résume l'état d'envasement des grands barrages Algériens répartis sur cinq bassins hydrographique, d'après le dernier levé Bathymétrique.

Tableau 1.4.Envasement des grands barrages en exploitation (ANBT)

Région	Nombre de barrages	Capacité initiale (hm ³)	Date Dernier levé Bathymétrique	Capacité dernier levé (hm ³)	Envasement moyen annuel (hm ³)	Envasement dernier levé (hm ³)	Taux d'envasement %
Ouest	13	1204,88	2004	1015,16	9,14	189,72	15,75
Cheliff	16	2209,40	2005	1639,39	23,77	573,01	25,94
Centre	12	1576,50	2005	1549,03	3,57	27,49	1,74
Est	23	2754,00	2004	2 586,40	11,38	167,60	5,31
Total	64	7744,78		6789,98	47,86	957,82	12,37/14,11

Remini (2005) a développé un modèle prévisionnel de l'envasement en se basant sur les données de près de 43 barrages, ce qui a donné la carte de sensibilité à l'envasement suivante.

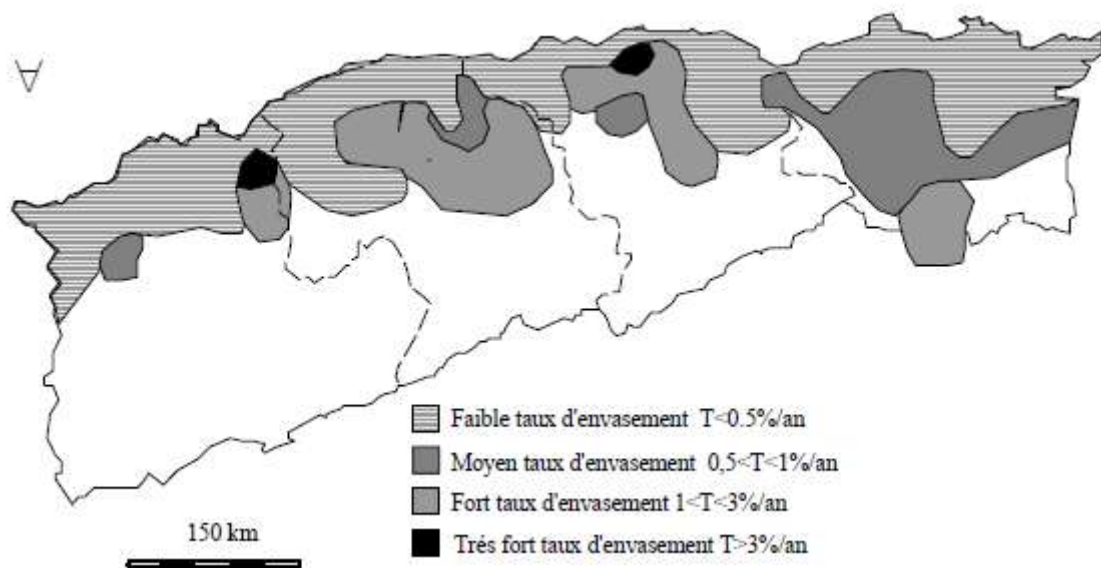


Figure 1.7. Sensibilité à l'envasement des barrages (*Remini, 2005*).

1.9.3. Les moyens de lutte contre l'envasement

1.9.3.1. La conservation des sols

Comme moyen de minimiser la pénétration de matériaux solides dans une retenue, deux méthodes de conservation des sols utilisées pour freiner l'érosion :

- a) L'implantation de structures anti-érosion.
- b) L'aménagement des bassins versants et des cours d'eau.

Il s'agit de l'aménagement des bassins versants par la réalisation de la correction torrentielle des thalwegs, et l'aménagement de cours d'eau : en créant des ouvrages de correction dans la gorge du torrent, ouvrages qui arrêteront les matériaux et diminueront la pente, qui sont des aménagements déterminants, réduisant l'érosion à sa source. (*Remini, 1997*), (*Laura, 2003*). Nous citons quelques exemples de solution proposées sur l'aménagement des bassins versant et des cours d'eau.

- Le reboisement.
- plantation des cultures suivant les courbes de niveau et fixation des berges des oueds (*Abdellatif et al 2006*).
- La réalisation des barrages de décantation à l'amont
- La réalisation des barrages de chasses.

1.9.3.2. Le soutirage des courants de densité

Une méthode pratique qui consiste à évacuer les sédiments drainés par les courants de densité sur le fond de la retenue en utilisant des pertuis de vidange (vannettes de dévasement ou vanne de fond) du barrage. Les opérations de chasses et le soutirage des courants de densité doivent être maîtrisés afin d'arriver à évacuer le maximum de vase avec un minimum d'eau (*Serbah, 2011*).

En Algérie, D'après Remini, La technique du soutirage peut être un moyen efficace de lutte contre l'envasement des retenues de barrages en Algérie compte tenu de son faible coût et surtout de la présence des courants de densité dans l'ensemble des retenues. Son rendement peut atteindre 70 % des apports solides totaux entrants dans la retenue, c'est à dire que la durée de vie de l'ouvrage sera augmentée d'un tiers. Le barrage d'Ighil Emda est parmi les premiers au monde à avoir été équipé d'un dispositif installé spécialement pour le soutirage des sédiments. La durée de vie de ce barrage est ainsi multipliée par trois.

1.9.3.3. la surélévation des digues

La surélévation constitue l'une des techniques qui permettent de prolonger la vie d'un barrage. L'augmentation de la hauteur de la digue permet de compenser le volume d'eau perdu en profondeur occupé par la vase. Leur opération est très encourageante (*Kassoul, 1997*). Cette technique a été réalisée sur 09 barrages en Algérie. Toutes les opérations de surélévation en Algérie ont permis de récupérer jusqu'en 2007 une capacité de 100 millions de m³.

1.9.3.4. Dragage des barrages

Les facteurs qui poussent à envisager le dragage sont liés soit à des considérations hydrauliques, soit à l'entretien et à la restauration du milieu. Le dragage peut avoir plusieurs objectifs dont ; Procéder à des travaux d'excavation sous l'eau dans les retenues des barrages «la récupération de la capacité de stockage» ; Extraire les sédiments immergés tel que sable, gravier, argile, les métaux précieux et les agents fertilisants ; La navigation gênée ou rendue impossible par l'envasement: entretenir et approfondir les voies navigables ; Améliorer ou maintenir la capacité de débit des cours d'eau en augmentant les profondeurs naturelles (*Serbah B., 2011*).

L'Algérie a acquis en 1989 une nouvelle drague suceuse refouleuse baptisée « REZOUG Youcef ». La drague d'un poids total de 300 tonnes, est conçue pour refouler à une hauteur de

28 mètres, dans une conduite de 700 mm avec un débit maximum de mixture de 1600 l/s pour une profondeur de dragage de 3 à 16 m (*Mokhtari, 2017*).

1.10. Conclusion

Dans ce chapitre on a abordé les processus de l'érosion hydrique ainsi que l'envasement résultant dans les retenues, ce problème qui fait l'objet de beaucoup de recherches qui n'ont point réduit sa complexité vu le nombre de paramètres et leur comportement qui entre en jeu. L'envasement des barrages ne peut être considéré comme un mal inéluctable, mais c'est un phénomène inévitable, qu'il faudrait prendre en compte dans les calculs technico-économiques.

Plusieurs d'auteurs ont essayé de décrire et quantifier l'érosion hydrique selon des principes hydrodynamiques, ils se sont heurtés à la complexité du phénomène, d'où l'orientation vers les modèles prévisionnels, ces modèles adaptés à des conditions spécifiques de chaque région, et s'appuyant sur sa propre base de données. Dans ce contexte, nous allons essayer de chercher le modèle le plus fiable de l'érosion hydrique en fonction des facteurs climatiques, topographique, l'occupation du sol et pédologique de notre bassin d'étude, pour quantifier et cartographier les zones risque à l'érosion hydrique, en utilisant l'équation universelle USEL intégrée dans un système d'information géographique (SIG), et des levés bathymétriques au niveau du barrage.

Chapitre 2

Description de la zone d'étude

Chapitre 2: Description de la zone d'étude

2.1. Présentation de la zone d'étude

La zone étudiée se trouve à l'extrême Nord-Est de l'Algérie, au Sud-Est de la Wilaya d'El Taref. Son étendue relie les différents horizons du versant Nord du dernier tronçon de la chaîne septentrionale de l'ATLAS-TELLIEN. Cette dernière est constituée par les monts de la MEDJERDAH coté Algérie, et les monts de KROUNIRIO et GHARDIMAOU en Tunisie.

2.2. Situation géographique de la région d'étude

La zone étudiée est incluse dans le bassin versant des côtières Constantinois-Est, et s'étend sur une superficie de 575 km² entre la longitude 7°94' et 8°31' Est et la latitude 36°38' et 36°69' Nord (fig 2.1). Il faut noter qu'une partie du bassin versant, couvrant la plaine d'Ain El-karma est située dans le territoire tunisien.

Le bassin versant se présente en un bassin montagneux, où les altitudes atteignent les 808 m à Djebel Souani, 1405 m à Djebel M'Sid, 1015 m à Kef El Boum et 740 m à Draa Safsaf.

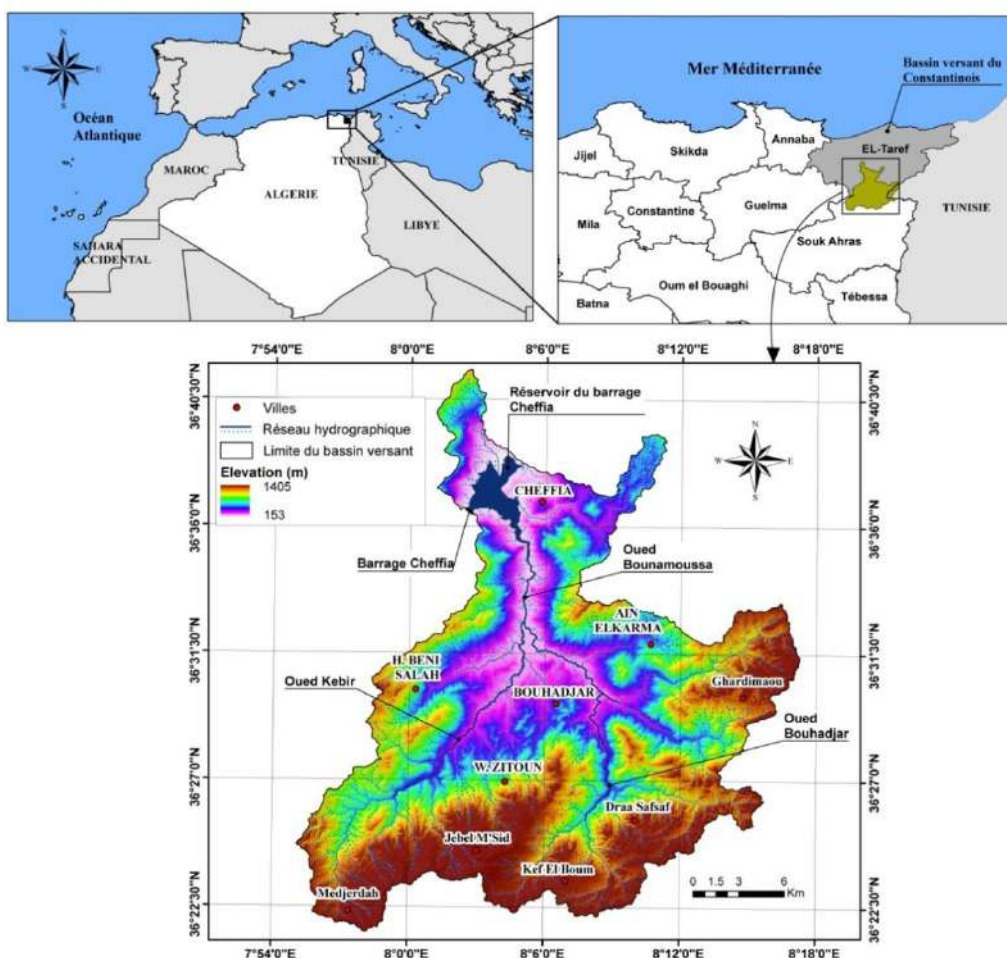


Figure 2.1. Localisation du bassin versant de Bounamoussa.

2.3. Caractéristique morphométrique du bassin

L'écoulement naturel des eaux dans un bassin versant est commandé à la fois par les conditions climatiques et par les caractéristiques physiques du bassin. Les caractéristiques physiques les plus importantes qui jouent un rôle essentiel et qui font l'objet de l'analyse morphométrique sont: la forme, le relief et les modèles de représentation.

Il existe un certain nombre de caractéristiques qui pourront compléter l'analyse morphométrique tels que: la densité de drainage, la fréquence des cours d'eau, l'allongement et le profil des cours d'eau.

2.3.1. Forme du bassin

2.3.1.1. Indice de compacité de Gravelius (Kc)

La détermination de différents indices de forme pour comparer les bassins versants entre eux et estimer certaines de leurs caractéristiques hydrologiques. Parmi ceux-là, l'indice de Gravelius (Kc) qui caractérise la compacité du bassin versant. Il se définit comme le rapport du périmètre du bassin versant et le périmètre du cercle ayant même superficie que le bassin. Il est donné par la relation suivante :

$$Kc = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (2.1)$$

Sachant que:

Kc : Coefficient de compacité de Gravelius

P : Périmètre du bassin versant [m]

S : Surface du bassin versant [km²]

Si, Kc tend vers 1 : Le bassin est ramassé

Si, Kc > 1 le bassin est allongé

Plus ce coefficient s'approche de 1, plus la forme de bassin versant sera ramassée et plus le temps de concentration des eaux seront courts. Elle sera allongée dans le cas contraire.

Pour le bassin versant de Bounamoussa : Kc = 2.06, Au vu de ce résultat, On peut dire que le bassin de Bounamoussa se caractérise par une forme allongée.

2.3.1.2. Rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent ou le rectangle Gravelius, permet de comparer l'influence des caractéristiques géométriques sur l'écoulement. La forme des lignes de

contour dans le rectangle équivalent résulte directement de la distribution hypsométrique dans le bassin versant. Soient **L** et **I** la longueur et la largeur du rectangle équivalent données par les équations suivantes :

$$\text{La longueur: } L = \frac{Kc \sqrt{S}}{1.128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right] \quad (2.2)$$

$$\text{La largeur: } I = \frac{S}{L} \quad (2.3)$$

Ainsi, pour ce qui est du bassin versant Bounamoussa, la longueur équivalente **L** est de 80.21 Km et la largeur équivalente a été déduite : $l = 7.16$ Km

2.3.2. Étude du relief

Le relief est un facteur essentiel dans le comportement hydrologique d'un bassin versant et par conséquent dans l'aptitude aux écoulements des terrains, l'infiltration et l'évaporation. Les paramètres hydroclimatiques (précipitation, température, etc.) varient selon l'altitude et l'exposition des versants.

2.3.2.1. Courbe hypsométrique

Elle consiste en une distribution des superficies par rapport aux altitudes du bassin. Elle donne une idée générale sur son potentiel érosif selon *Strahler in Llamas (1993)*. Nous avons utilisé la carte d'altitude du bassin versant de Bounamoussa, cette dernière est obtenue suite au traitement effectué à partir de la carte MNT téléchargée gratuitement à partir du site <http://glovis.usgs.gov/> de l'*USGS*.

La courbe représente la répartition des fréquences altimétriques avec en abscisse la superficie en % située entre deux courbes de niveau et en ordonnées les altitudes échelonnées par tranches de 200 m.

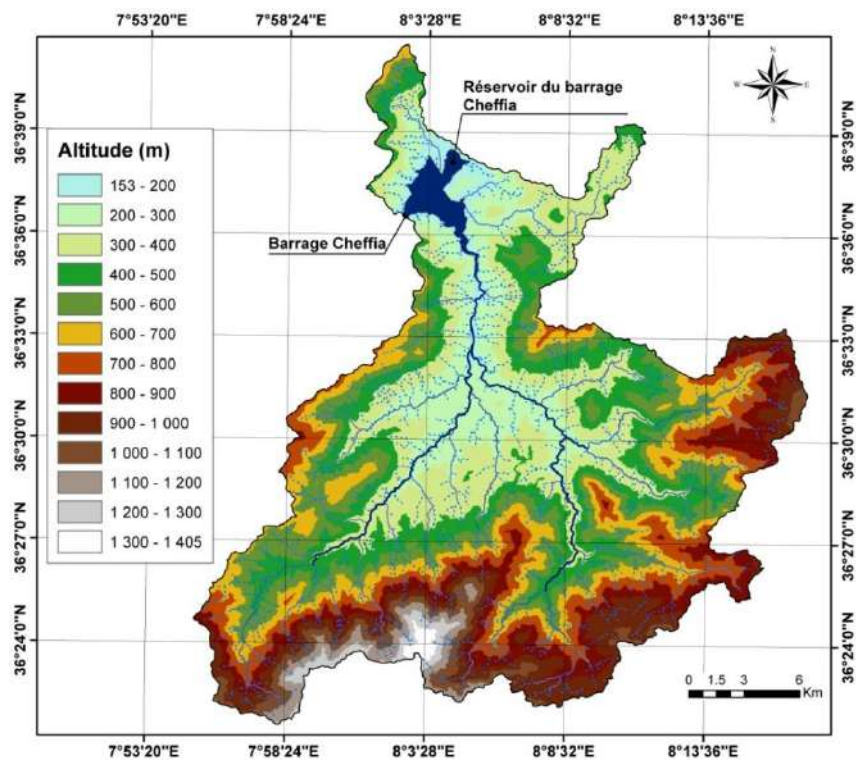


Figure 2.2. Carte d'altitude du bassin versant

Tableau 2.1. Répartition de surface en fonction de l'altitude du bassin versant

Altitude (m)	Surfaces (km ²)	Surfaces (%)	surface cumulés (km ²)	surface cumulés(%)
> 1300	2.14	0.4	2.14	0.4
1300-1200	6.03	1	8.17	1.4
1200-1100	11.73	2	19.9	3.5
1100-1000	17.9	3.1	37.8	6.6
1000-900	37.49	6.5	75.29	13.1
900-800	44.47	7.7	119.77	20.9
800-700	49.65	8.6	169.42	29.5
700-600	62.27	10.8	231.69	40.3
600-500	76.5	13.3	308.19	53.6
500-400	84.34	14.7	392.53	68.3
400-300	95.33	16.6	487.86	84.9
300-200	65.55	11.4	553.41	96.3
<200	21.59	3.8	575	100

On remarque que près de 80% de la surface du bassin versant est située en dessous de 700m d'altitude, et 20% est située entre 700 et 1405 m d'altitude.

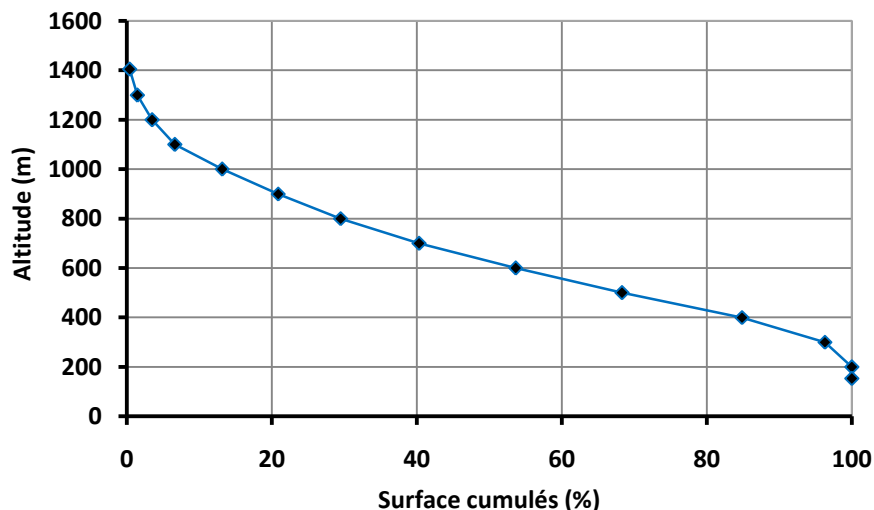


Figure 2.3. Courbe hypsométrique du bassin versant de Bounamoussa.

Cette courbe (fig.2.3) offre une vue d'ensemble de la pente et l'état allant vers l'équilibre du bassin versant de Bounamoussa avec un potentiel érosif important. Elle permet de déduire les altitudes suivantes:

Tableau 2.2. Altitudes caractéristiques du bassin de Bounamoussa.

Altitude	Hauteur (m)
Altitude minimale	153
Altitude maximale	1405
Altitude la plus fréquente en (m)	300-400
Altitude de fréquence 1/2 (m)	350
Altitude H5%	1160
Altitude H50%	620
Altitude H95%	302

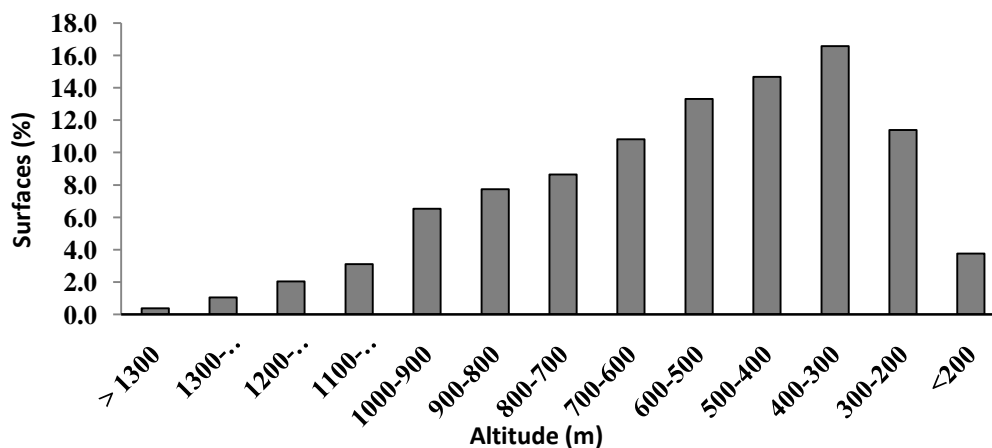


Figure 2.4. Histogramme de fréquences altimétriques du bassin versant de Bounamoussa.

2.3.2.2. Indice de pente

La pente est un facteur important en hydrologie, elle influence directement l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Plusieurs auteurs ont établi des relations de puissance entre le gradient de pente et l'érosion en nappe (*Govers, 1991*).

On a dressé la carte des pentes à partir du modèle numérique de terrain (MNT) de la région (fig.2.5). En tenant compte de l'effet de la pente, des études (*PNUE/PAM/PAP, 2000 ; Mollenhauer, 1980*) ont montré que l'érosion devient active sur des pentes supérieures à 5 %.

Les classes de pentes utilisées dans notre travail sont indiquées dans le tableau 2.3:

Tableau 2.3. Classe des pentes et superficies correspondantes.

Pente	Classe (%)	Superficie en (%)
Faible	0 - 5	7
Modérée	5 -15	30
Assez forte	15 - 25	34
Forte	25 - 35	18
Très fort	> 35	10

La répartition des pentes du bassin versant de Bounamoussa montrent une forte aptitude à l'érosion. En effet, les zones à pente faible couvrent 7 % de la superficie totale du bassin versant soit 38 km², alors que celles à pente modérée à très élevée occupent 93 % de la surface du bassin versant soit 537 km².

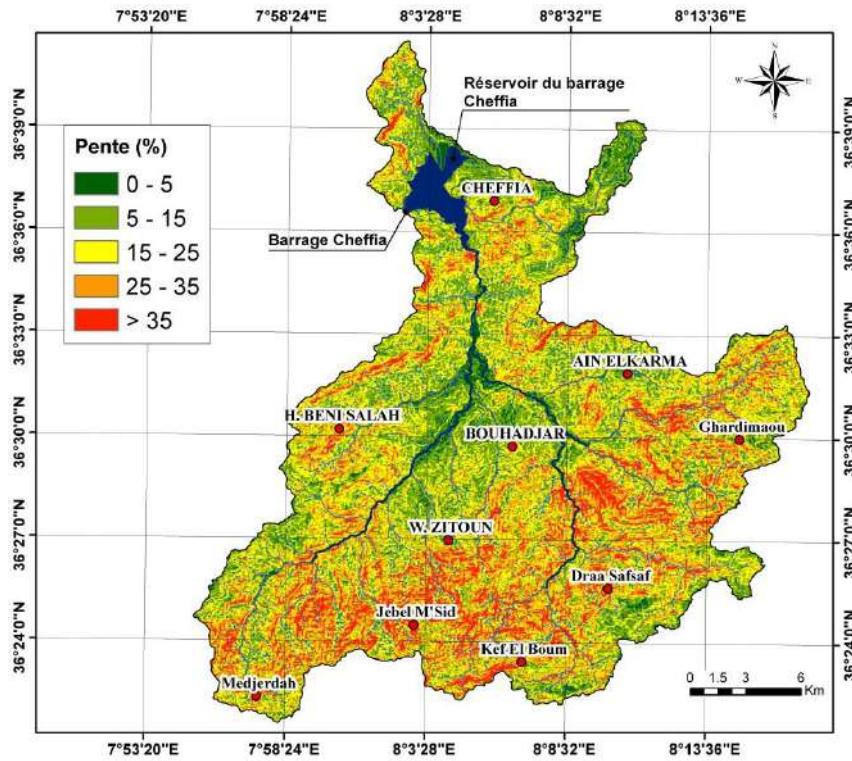


Figure 2.5. Carte des pentes du bassin versant de Bounamoussa

a) Indice de pente de Roche (I_p)

L'indice de pente de Roche I_p est déterminé à partir du rectangle équivalent par la relation suivante :

$$I_p = 1/\sqrt{L} \sum_{i=1}^n X_i \sqrt{B_i(a_i - a_{i-1})} \quad (2.4)$$

L : longueur du rectangle équivalent [Km].

X_i : distance séparant deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent.

B_i : fraction de la surface totale du bassin comprise entre les côtes a_i et a_{i-1} ; fonction donnée par le tableau hypsométrique.

$(a_i - a_{i-1})$: dénivelé entre deux courbes voisines [m].

$I_p = 0.16$

b) Indice de pente globale (I_g)

L'indice de pente globale est calculé pour indiquer la nature du relief en se référant à la classification de l'ORSTOM (tableau 2.4). Cet indice s'exprime par l'équation suivant :

$$I_g = D/L \quad (2.5)$$

D : dénivelée (m) ou bien l'intervalle qui sépare les altitudes à 5% et 95% de la surface cumulée donnée à partir de la courbe hypsométrique.

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \quad (2.6)$$

L : longueur du rectangle équivalent ;

La valeur trouvée de $I_g = 0.10$ présente suivant la classification de l'ORSTOM. le bassin versant de Bounamoussa a un relief fort.

Tableau 2.4. Classification du relief selon I_g par l'ORSTOM

la nature de relief	Valeur de I_g
Relief très faible	$I_g < 0.002 \text{ m/km}$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$
Relief très fort	$0.5 \text{ m/km} < I_g$

c) Dénivelée spécifique (D_s)

Vu que l'indice de pente globale I_g diminue lorsque la longueur du rectangle équivalent L augmente, ou quand la surface du bassin versant augmente ; il sera donc difficile de comparer de bassins versants de taille différente. La dénivelée spécifique D_s (ou coefficient de rugosité), proposé par *Melton (1965)*, donne la possibilité de comparaison entre différents bassins (tableau 2.5). Il s'exprime comme suit:

$$D_s = I_g \sqrt{A} = D \sqrt{\frac{l}{L}} \quad (2.7)$$

Sachant que ;

I_g : indice de pente globale [m/Km]

A : Aire du bassin [Km²]

D : dénivelée [m]

l : Largeur du rectangle équivalent [Km]

L : Longueur du rectangle équivalent [Km]

Ds = 295 m

Elle sert aussi à classer le relief, d'après la classification de l'ORSTOM., la dénivelée spécifique du bassin versant de Bounamoussa est rangée dans la classe de relief fort.

Tableau 2.5. Classification du relief selon Ds (ORSTOM.)

Ds < 10 m	Relief très faible
10 m < Ds < 25 m	Relief faible
25 m < Ds < 50 m	Relief assez faible
50 m < Ds < 100 m	Relief modéré
100 m < Ds < 250 m	Relief assez fort
250 m < Ds < 500 m	Relief fort
Ds > 500 m	Relief très fort

Les valeurs de Ds (Table 2.6), traduisent bien l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief.

d) Indice de pente moyenne (Im)

Il est donné par la formule suivante :

$$i_m = \frac{D \cdot L}{A} \quad (2.8)$$

Où :

im : pente moyenne [m/km ou 0/00].

L : longueur du cours d'eau principal [km].

D : équidistance entre deux courbes de niveau [m].

A : surface du bassin versant [km²].

Im = 19.73%.

Cet indice met en évidence les pentes élevées du bassin.

Tableau 2.6. Indices de pentes et de relief du bassin versant de Bounamoussa.

bassin	Ip	Ig	Im	Relief selon Ig	Ds	Relief selon Ds
Bounamoussa	0.16	0.1	0.19	fort	295	fort

2.3.3. Caractéristiques hydrographiques

Le réseau hydrographique du bassin versant de Bounamoussa est composé de l'Oued principal (Oued Bounamoussa) qui draine deux affluents importants Oued Bouhadjar rive droite et Oued Kebir rive gauche (fig.2.6), il s'écoule du Sud vers le Nord et alimente l'un des plus grands barrages de la région, le barrage de Cheffia qui est d'une capacité de 165 hm³. La longueur de son cours d'eau principal est de 23 km.

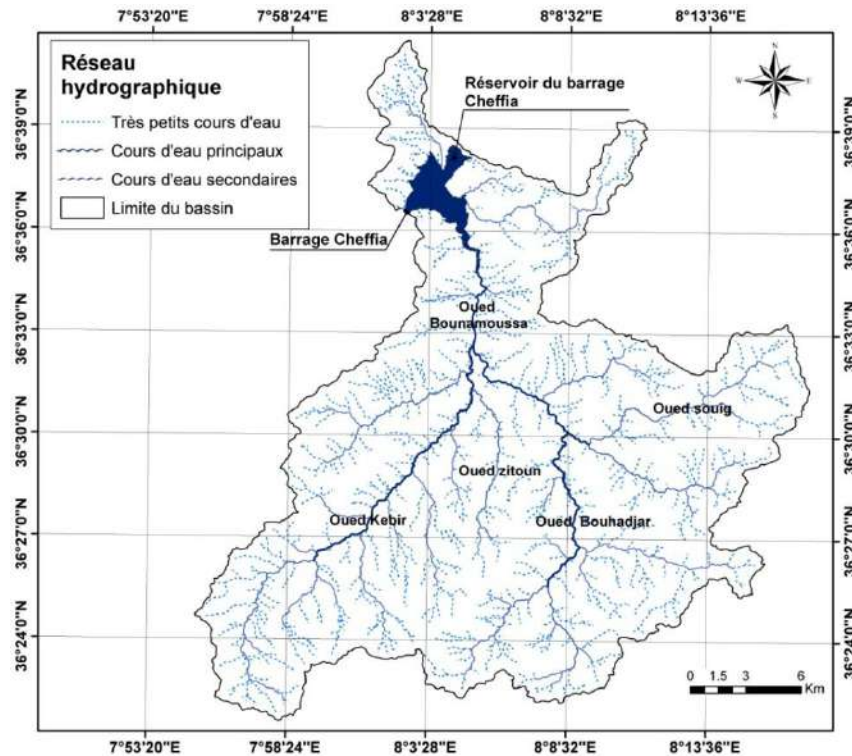


Figure 2.6. Réseau hydrographique de la zone d'étude.

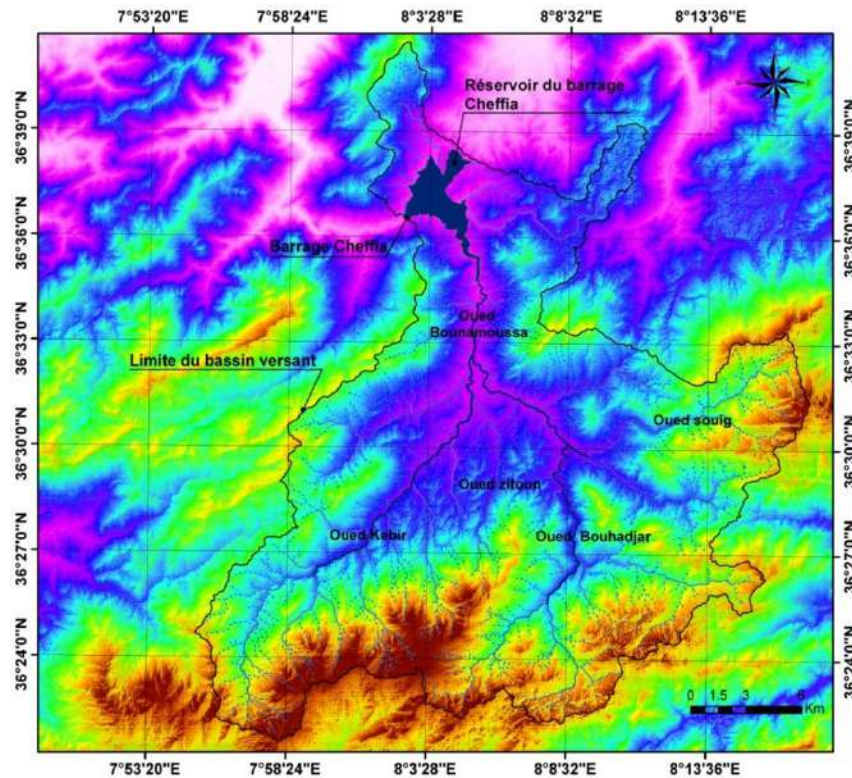


Figure 2.7. Modèle numérique de terrain (MNT) du BV de Bounamoussa.

Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : le rapport de confluence (R_c), le rapport des longueurs (R_l) et la densité de drainage (D_d).

2.3.3.1. Rapport de confluence (R_c)

Il est défini par :

$$R_c = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (2.9)$$

Sachant que,

R_c : rapport de confluence.

N_i : nombre de cours d'eau d'ordre (i).

N_{i+1} : nombre de cours d'eau d'ordre supérieur ($i+1$).

$R_c = 3.581$

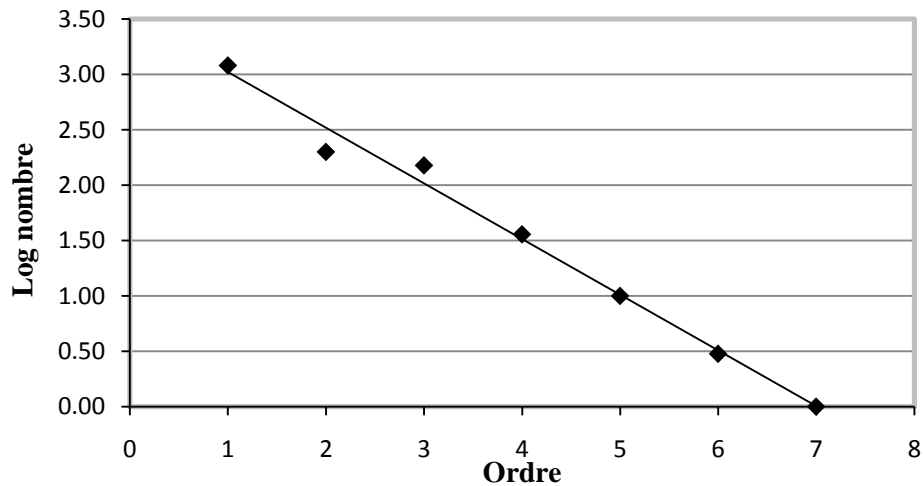


Figure 2.8. Droite représentative du nombre de cours d'eau en fonction de l'ordre

La figure 2.8 montre que le réseau hydrographique est bien organisé, les nombres de cours d'eau d'ordre consécutif croissant composent une série géométrique inverse.

2.3.3.2. Rapport des longueurs (R_L)

La définition est la suivante :

$$R_L = \frac{L_{i+1}}{L_i} \quad (2.10)$$

L_i : longueur de cours d'eau d'ordre n .

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

$$R_L = 2.94$$

2.3.3.3. La densité de drainage (D_d)

La densité de drainage est le rapport de la longueur totale des thalwegs sur la surface du bassin versant. Elle reflète la dynamique et le degré de drainage du bassin.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (2.11)$$

Où,

D_d : densité de drainage en [km/ km²].

L : longueur cumulée de tous les cours d'eau du bassin [km].

A : superficie du bassin [km²].

$D_d = 3,16$ km/km², bassin bien drainé

2.3.3.4. Coefficient de torrentialité

Ce rapport s'exprime par :

$$C_t = Dd \cdot \frac{N_1}{A} \quad (2.12)$$

C_t : coefficient de torrentialité.

Dd : densité de drainage en km/km².

N_1 : nombre de cour d'eau d'ordre 1.

A : surface du bassin versant en km².

$C_t = 16.51$: fréquence appréciable des thalwegs d'ordre 1

2.3.3.5. Temps de concentration

Le temps de concentration des eaux sur un bassin versant s'exprime comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier déterminé par la relation de GIANDOTTI.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5 L}{0.8\sqrt{(H_{moy} - H_{min})}} \quad (2.13)$$

Où

T_c : temps de concentration [heures].

A : superficie du bassin [km²].

L : longueur de cours principal [km]

H_{moy} : altitude moyenne [m]

H_{min} : altitude minimale [m]

$T_c = 6.95 H$.

Dans le tableau 2.7, nous consignons l'ensemble des paramètres morphométriques du bassin de Bounamoussa.

Tableau 2.7. Paramètres morphométrique du bassin versant de Bounamoussa

Paramètre physique	Symboles	Unité	Valeur
Superficie	S	km ²	575
Périmètre	P	km ²	176
Indice de compacité de gravelius	Kc	/	2.06
Longueur du rectangle équivalent	Lr	m	80.21
Largeur du rectangle équivalent	Ir	m	7.17
Altitude minimale	Hmin	m	153
Altitude maximale	Hmax	m	1405
Altitude moyenne	Hmoy	m	702.5
Indice de pente de roche	Ip	%	0.16
Indice de pente global	Ig	%	0.02
Dénivelée spécifique	Ds	m	295
Indice de pente moyenne	Im	%	19.73
Rapport de confluence	Rc	%	3.58
Rapport des longueurs	Rl	/	2.94
Densité de drainage	Dd	km/km ²	3.16
Coefficient de torrentialité	Ct	/	16.51
Temps de concentration des eaux	Tc	H	6.95

2.4. Sols et végétation

La végétation est un facteur primordial de la protection contre l'érosion. L'activité végétative et le type de sol sont intimement liés et leurs actions combinées influencent singulièrement l'écoulement en surface. Le couvert végétal retient, selon sa densité, sa nature et l'importance des précipitations, une proportion variable de l'eau atmosphérique. Cette eau d'interception est en partie soustraite à l'écoulement (*Bouanai, 2004*). L'occupation des sols est en rapport direct avec les activités anthropiques.

La carte d'occupation du sol (fig.2.9) a été établie à partir de l'image satellitaire Landsat-8 acquise en 2005, qui a été traitée, classée et validée à partir des données issues de travaux réalisés sur la Wilaya d'El-Taref (*TAD CONSULT, 2005*), ainsi que des visites sur le terrain.

. On peut distinguer six grands types d'occupation de sol dans la zone d'étude :

- Le couvert végétal du bassin de Bounamoussa est caractérisé par une diversité de végétation naturelle, plus de la moitié du bassin (52%) est occupée par des végétations forestières qui sont constituées principalement de Chêne Liège et de Chêne Zéen, localisés essentiellement dans la partie haute et moyenne du bassin versant.

- Les cultures annuelles, dominées par les céréales, représentent 19.3 % de la superficie totale du bassin versant et se trouvent concentrées à l'extrême limite du bassin, et éparpillées au niveau central ou dans les zones à moyennes et faibles pentes du bassin versant.
- Une superficie représentant 14.37 % de la superficie totale du bassin versant est occupée par des terrains de parcours.
- Les maquis représentent 10.60 % du total et indiquent un stade relativement important de dégradation de la forêt qui augmente d'une année à l'autre et qui était autre fois un potentiel forestier très important pour le bassin. Le reste, soit 3.09 %, est représenté par des terres nues et des agglomérations.

Tableau 2.8. Occupation des sols du bassin versant du Bounamoussa

Type d'occupation du sol	Superficie en Km ²	Superficie en %
Plan d'eau	7.69	1.34
Foret Claire	142.57	24.74
Foret Dense	154.41	26.8
Culture et parcours	149.4	25.93
culture	45.62	7.92
Parcours	1.45	0.25
Maquis Clair	22.49	3.9
Maquis Dense	38.45	6.67
Sols Nus	8.43	1.46
Agglomération	4.5	0.78

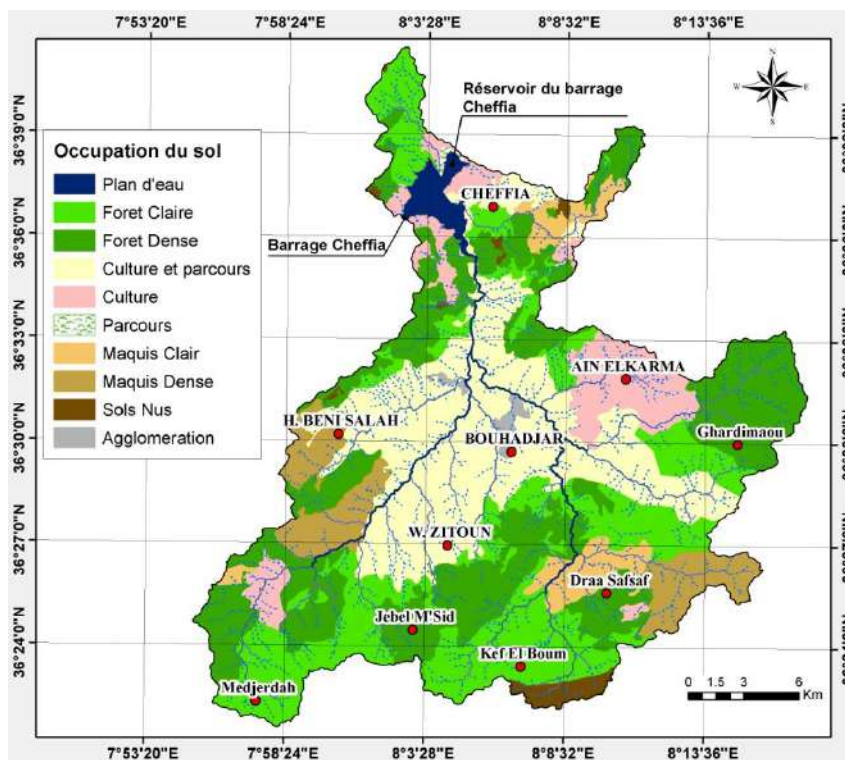


Figure 2.9. Occupation du sol du BV de Bounamoussa



Photo 2.1. Chêne liège (Commune Cheffia)
(cliché :CH.bouhadeb, 2016)



Photo 2.2. Chêne Zéen (Djebel M'Sid)
(cliché :CH.bouhadeb, 2016)

2.5. Géologie du bassin :

Le type de formations géologiques d'un bassin versant conditionne les écoulements des eaux souterraines et des eaux superficielles. Les matériaux géologiques se classent en

formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grès, calcaires, dolomies,...).

Les caractères des déformations dans la région d'étude sont ceux des terrains telliens, du domaine externe nappé et dont la majeure partie des formations sont des argiles et des grès numidiens. Ce sont des terrains plissés et faillés, parfois même chahutés où s'intercalent d'autres formations nappées crétacées et miocènes. La semelle des nappes est essentiellement triasique, mais qui n'affleure qu'en bordure de cette région, dans les wilayas de Souk Ahras et Guelma et en Tunisie, au-delà de la frontière. Nous nous sommes appuyées sur des études antérieures, dont celles de J. M. Villa en 1980 et A. Marre en 1987, qui décrivent notre terrain d'étude à partir des cartes géologiques à l'échelle 1/50000 d'El Tarf.

Nous allons présenter brièvement les caractères généraux de la géologie du bassin versant de Bounamoussa.

2.5.1. La formation Quaternaire

Le Quaternaire du bassin versant de Bounamoussa n'est pas ou est bien développé, il est réparti au sud du bassin. Il est représenté par le remplissage alluvionnaire de la haute terrasse, les dépôts fluviomarins, éboulis de pentes développés au pied des escarpements gréseux par les grès numidiens où ils recouvrent les marnes argileuses sous-jacentes et par les formations déluvio-proluviales de couverture (cailloutis, sables, limons).

2.5.2. Le Miocène

Le Miocène dans cette région est représenté par les formations d'âge Pontien, il s'agit de formations sableuses, de conglomérats et d'argiles rouges ou grises.

Le Miocène dans ce bassin de Bounamoussa affleure nettement moins que l'Eocène et l'Oligocène, il n'est présent qu'aux alentours d'Aïn El Kerma à l'amont de l'Oued Zitoune et sur les deux rives de l'Oued Bouhadjar et à l'amont de l'Oued principal de Bounamoussa.

2.5.3. Les formations de l'Oligocène et de l'Eocène

Ces terrains sont souvent étudiés ensembles et sont même parfois confondus sous la même dénomination, les formations numidiennes. Ils sont représentés par des faciès argilo-gréseux d'âge numidien.

Les argiles numidiennes sont très répandues dans ce bassin, surtout à travers les reliefs du domaine montagneux. Ces formations sont souvent associées aux grès de même âge (les grès numidiens) et appartiennent tous, selon *Vila (1983)* à la nappe numidienne, classée ici dans le domaine du Tell externe. Ce sont des terrains qui évoluent souvent côte à côte, mais où la morphologie est différente, avec un ravinement fréquent dans les argiles et une altération en sable ou sablo argileuse dans les grès.

2.5.4. Le Crétacé

Les terrains crétacés de la région d'étude sont représentés par des dépôts essentiellement marins composés de marno-calcaires et des schistes légèrement argileux avec des intercalations de calcaires. Ils sont relativement plus répandus que les terrains du Trias dans ce bassin. Il est concentré dans deux régions, de Aïn Kerma Est dans la vallée de l'oued Zitoune, et dans la région de Cheffia au Nord du bassin.

2.5.5. Le Trias

Il est largement représenté par des formations hétérogènes où l'on rencontre, sans ordre apparent, des argiles bigarrées, des calcaires dolomitiques, des cargneules jaunes, des calcaires marneux jaunâtres et des grès psammitiques. Le gypse est aussi très abondant dans cette formation. On le rencontre en masses importante dans le fond des grandes vallées. Les formations triasiques se trouvent principalement dans la limite Sud du bassin couvrant la zone montagneuse de Djale M'sid.

Dans le tableau 2.9 ci-dessous sont regroupées les différentes formations lithologiques de la zone d'étude par rapport à la surface totale du bassin versant.

Tableau 2.9. Formation lithologique du bassin versant de Bounamoussa

Formation lithologique	Superficie en %
Alluvions de haute terrasse	7.42
Argile Numidiennes	21.78
Grés Numidiens	46.92
Calcaires Bitumineux et marno-calcaires noirs	9.33
formation argilo-gypso-gréseuses a fragments et blocs de roches diverses	1.36
Marnes a ammonites phriteuses	8.22
formations sableuses, de conglomérats et d'argiles rouges ou grises.	4.96

2.6. Pédologie du bassin

Comme l'illustre la carte pédologique (fig.2.10), la répartition des sols varie en fonction du domaine morphologique :

Les sols les plus répandus dans le bassin versant de Bounamoussa, particulièrement à l'Est et au Sud sont les sols podzoliques, développés sur les terrains montagneux et forestiers presque tout le long de la limite du bassin. Cinq classes de sols ont été distinguées :

- ❖ **Sol podzolique** à vocation forestière de chêne liège sur les reliefs dont l'altitude est comprise entre 800 et 1405 m, prenant naissance sur les grès de Numidie, leurs éboulis et les bancs gréseux de la partie supérieure des argiles de Numidie à l'horizon superficiel sableux ou léger, d'autant plus qu'il s'agit là d'un milieu humide où la pluviométrie dépasse les 1000 mm en moyenne annuelle.
- ❖ **Sol calcaire** ne présentant qu'un seul horizon différencié riche en calcaire, de texture légère, perméable, formé de cailloutis, sables et limons.
- ❖ **Sols alluviaux** qui sont des dépôts alluviaux quaternaires continentaux avec des niveaux argilo-sablo-conglomératiques, à profil indifférencié, mais la présence de niveaux argileux permet le développement de marécages et de sols hydromorphes, constitués en terrasses et regs, leur végétation est toujours herbacée.
- ❖ **Les Vertisols** de texture argileuse prenant place sur les reliefs d'altitude inférieure à 800 m, occupant plus de 21 % de la superficie du bassin versant.
- ❖ **Les rendzines** à horizon humifères reposant directement sur le substrat calcaire et possédant une richesse en carbonate de calcium.

Dans le tableau 2.10 sont classées les différentes formations pédologiques du bassin versant de Bounamoussa par rapport à la surface totale du bassin.

Tableau 2.10. Les classes pédologiques du bassin versant de Bounamoussa

Type	Superficie (km ²)	Superficie(%)
Sols podzoliques	269.79	46.92
Vertisols	124.86	21.72
Sols alluviaux	75.94	13.21
Sols rendzines	53.69	9.34
Sols calcaires	50.71	8.82

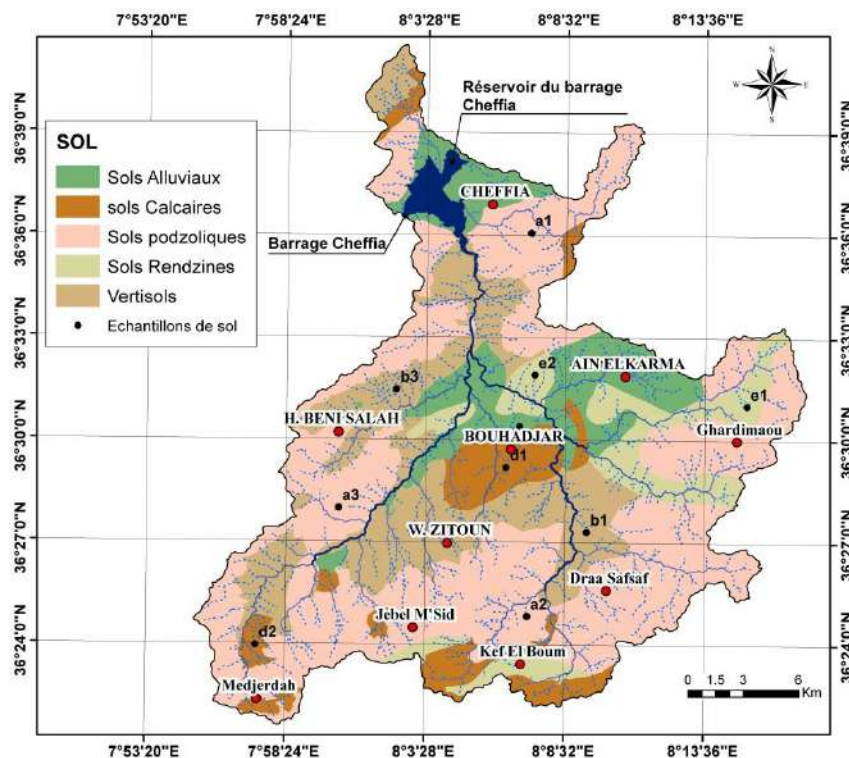


Figure 2.10. Sol du bassin versant de Bounamoussa. Réalisée à partir de la carte du sol de l'algérie coté Constantinois (*Durand, Barbut in 1948*)

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de présenter les grandes traits morphologiques du bassin versant de l'Oued Bounamoussa, et qui ont une influence sur l'écoulement de surface d'une manière générale.

Le bassin versant de Bounamoussa s'étend sur une superficie de 575 km² et un périmètre de 175.67 km. La valeur de l'indice de compacité permet d'affirmer que ce bassin présente dans l'ensemble une forme moyennement allongée, Il est caractérisé par un relief fort, avec une pente moyenne élevée, le réseau hydrographique bien drainé présente une hiérarchisation moyenne. Le temps de concentration du bassin versant est de 6,95 heures.

La région du bassin Bounamoussa est dominée essentiellement par Grés Numidiens, les Argile Numidiennes, comme formation géologique.

Chapitre 3

Hydroclimatologie

Chapitre 3: Hydroclimatologie

3.1. Introduction

L'étude hydroclimatologique d'un bassin versant tient une place primordiale dans la connaissance des comportements des systèmes hydrauliques, parce qu'elle permet d'établir un bilan hydrique et implique la connaissance des paramètres suivants : les précipitations, l'évaporation, l'infiltration et le ruissellement qui conditionnent le bilan. Ont été déterminées quelques informations concernant les caractéristiques climatiques de la zone d'étude.

3.2. Stations de mesure

L'étude est basée essentiellement sur les données d'observation faites au niveau de la station météorologique du barrage Cheffia et cinq stations pluviométriques. Ces données ont été recueillies au niveau de l'Agence Nationale des ressources Hydrauliques de Annaba (ANRH) et l'Agence Nationale des Barrages et transfert de Cheffia (ANBT). Les données sont sous forme de moyennes mensuelles et annuelles des hauteurs de pluie pour une période de 42 ans (1970-71/2011-12), et des moyennes mensuelles et annuelles des températures pour la même période. Les coordonnées géographiques et les altitudes de ces stations ainsi que leurs codes sont consignés dans le tableau (3.1).

Tableau 3.1. Coordonnées géographiques des stations et périodes d'observation

Station	Coude	Coordonnées DMS			Périodes d'observation	Type de station
		Est	Nord	Elévation [m]		
Mechroha	120103	7°50'17"	36°21'48"	750	1970/71 - 2011/12	S. Pluviométrique
Ain el karma	31503	8°11'25"	36°35'22"	280	1970/71 - 2011/12	S. Pluviométrique
Asfour	31501	7°58'14"	36°40'16"	160	1970/71 - 2011/12	S. Pluviométrique
Cheffia	31502	8°01'43"	36°36'57"	170	1970/71 - 2011/12	S. Météorologique
Bouhadjar	31604	8°06'07"	36°30'22"	300	1970/71 - 2011/12	S. Pluviométrique
Ain seynour	140502	7°52'30"	36°19'25"	792	1970/71 - 2011/12	S. Pluviométrique

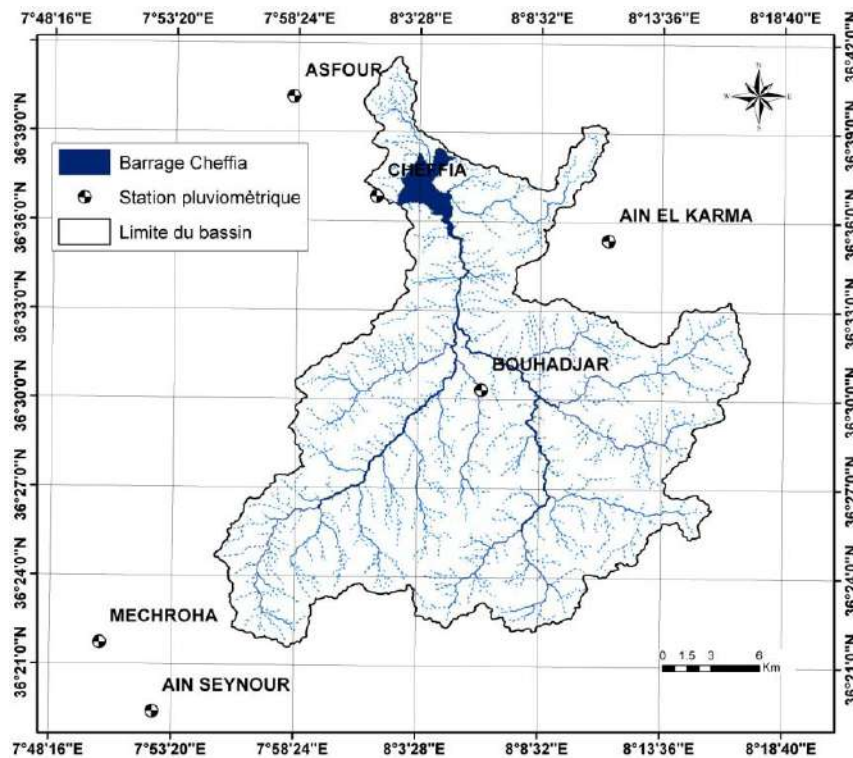


Figure 3.1. Carte de positionnement des stations pluviométriques

3.3. Facteurs climatiques

3.3.1. Précipitations

La précipitation est un facteur très important dans la détermination de l'abondance fluviale, qui conditionne l'écoulement saisonnier et influence directement le régime des cours d'eau (Roche, 1963, Cosandey et Robinson, 2000). Pour cela nous lui consacrons plus d'intérêt. La pluviosité dans cette région est conditionnée par deux phénomènes météorologiques importants. D'une part, les perturbations cycloniques d'origine atlantique de l'Ouest et du Nord-Ouest qui, après avoir traversé l'Espagne et une partie de la Méditerranée Occidentale, affectent le Nord-Est algérien et d'autre part les dépressions qui prennent naissance en Méditerranée Occidentale.

Les caractéristiques de la pluviosité dans la région d'étude résident dans sa grande variabilité annuelle, saisonnière et mensuelle. C'est une caractéristique du climat méditerranéen avec une concentration de la totalité des précipitations sur quelques mois de l'année, de novembre à avril au cours desquels, les précipitations gagnent sur l'évaporation. Une saison sèche de mai à octobre, où les précipitations sont déficitaires par rapport à l'évaporation et le minimum annuel s'observe toujours durant la période juillet-août. Pour l'interprétation des données pluviométriques dans notre région d'étude, nous avons utilisé des

séries de précipitation allant de 1970 jusqu'à 2012 soit 42 ans d'observation. Il faut noter que nous n'avons pas pu obtenir des données plus récentes.

3.3.2. Contrôle de la Fiabilité des Séries

L'emploi d'outils statistiques et graphiques est nécessaire pour le contrôle de la qualité des échantillons pluviométriques, et déceler les anomalies en vue de leurs homogénéisation. Cette dernière opération est indispensable si l'on veut déterminer de façon plus ou moins précise les caractéristiques des précipitations. La méthode des « doubles cumuls » nous a permis de faire une vérification complète des totaux annuels.

Cette méthode nécessite l'existence d'une série de données annuelles homogènes observées dans une station de référence (station de base), il s'agit de comparer la tendance des totaux cumulés relevés aux postes pluviométriques à ceux d'un poste de référence ayant fonctionné sur une période longue et continue et dont la série est homogène (Mébarki, 1984). Dans notre étude, ont été choisies la station de Cheffia comme une station de référence (station de base) au titre de la série 1970/71-2011/12. On peut conclure que les séries des stations de Mechroha, Asfour, Ain Karma, Bouhadjar et Ain Seynour sont homogènes, avec un coefficient de corrélation proche de 01 ($R^2 \approx 1$), ce qui signifie qu'on a une très bonne corrélation (fig 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6).

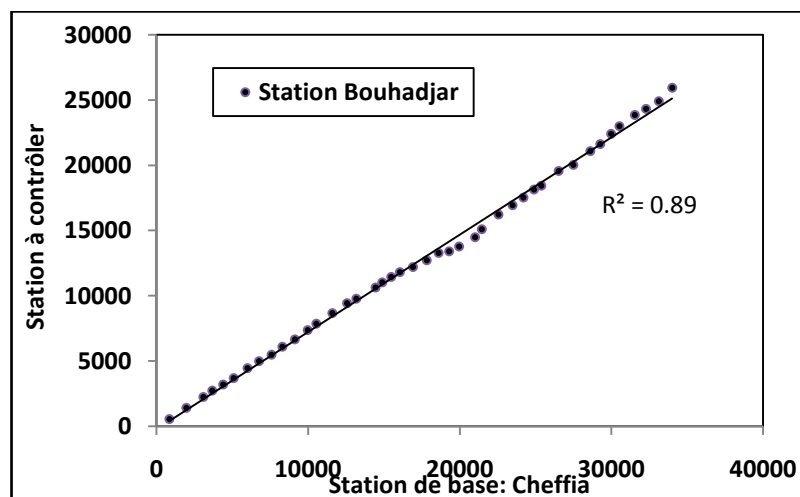


Figure 3.2. Corrélation des données pluviométriques par la méthode des doubles-cumuls station Bouhadjar période: (1970/71-2011/12)

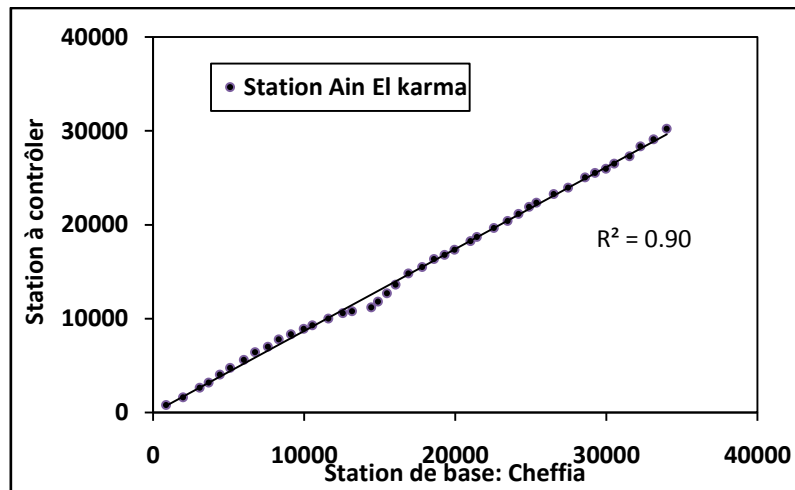


Figure 3.3. Corrélation des données pluviométriques par la méthode des doubles- cumuls station Ain El karma période: (1970/71-2011/12)

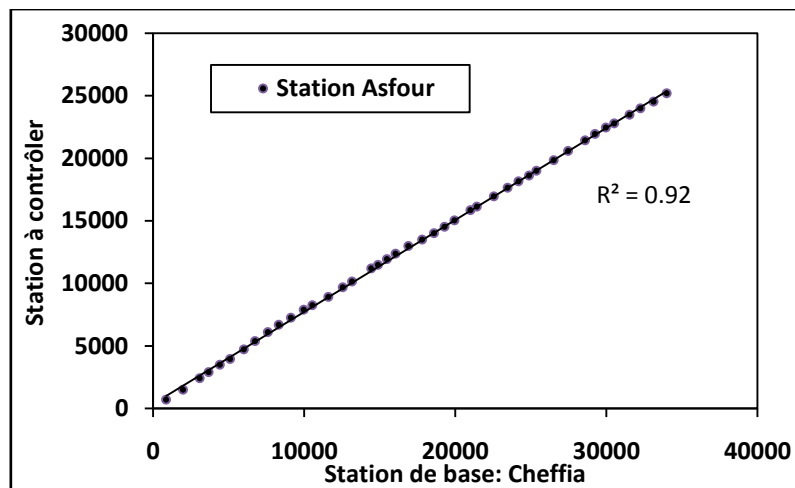


Figure 3.4. Corrélation des données pluviométriques par la méthode des doubles- cumuls station Asfour période : (1970/71-2011/12)

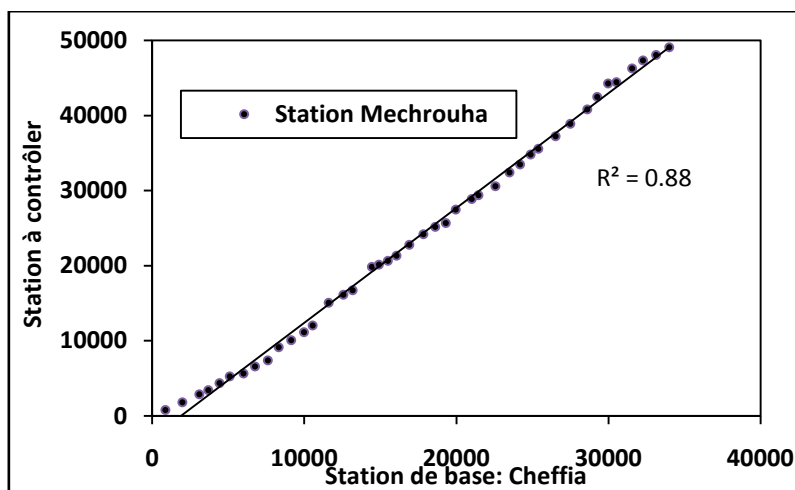


Figure 3.5. Corrélation des données pluviométriques par la méthode des doubles- cumuls station Mechrouha période : (1970/71-2011/12)

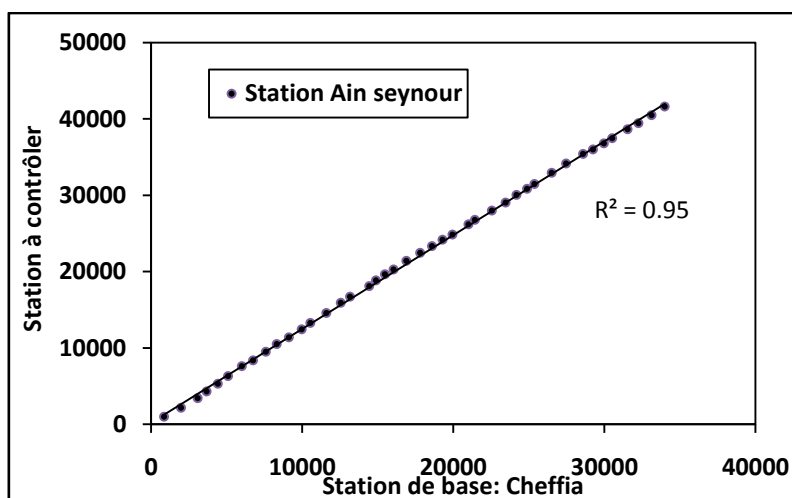


Figure 3.6. Corrélation des données pluviométriques par la méthode des doubles- cumuls station Ain Seynour période: (1970/71-2011/12)

3.3.3. Comblement des lacunes d'observation

Les données concernant les stations retenues dans notre étude sont complètes à l'exception de celle de Ain El karma qui présente des lacunes entre 2005 et 2010 sur 10 mois et celle de Bouhadjar qui présente des lacunes sur 5 mois entre 2002 et 2005.

Le comblement des données se fait par régression. Le principe de cette méthode est d'expliquer une variable y à partir d'une variable x en prenant la station de Cheffia comme station de référence. Ainsi, l'on reconstitue les hauteurs de pluie tombée pendant un même mois (valeurs en racines carrées transformées ensuite en valeurs réelles). Nous donnons ci-dessous l'exemple de la droite de régression qui a permis de reconstituer le mois de novembre 2002 à la station de Bouhadjar à partir des données du même mois à la station de référence (fig. 3.7). La même procédure a été suivie pour le comblement de toutes les lacunes observées.

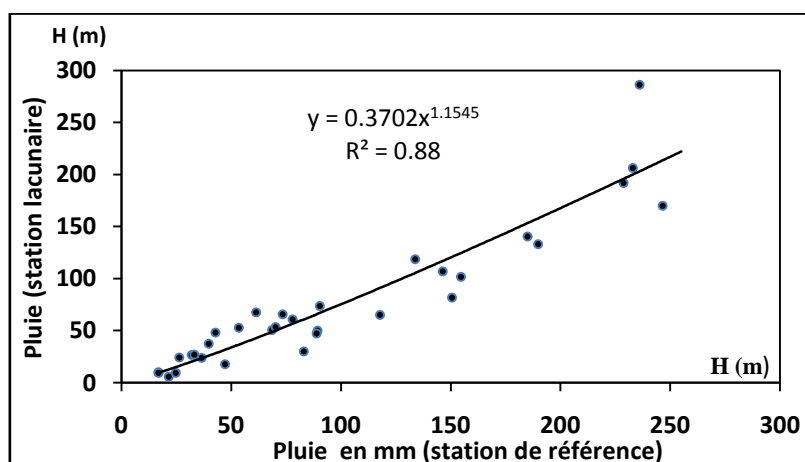


Figure 3.7. Comblement de lacune du mois de Novembre 2002 à la station de Bouhadjar

3.3.4. Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières

L'étude des précipitations mensuelles et saisonnières est déterminante pour la compréhension du régime d'écoulement des cours d'eau.

3.3.4.1. Répartition moyenne mensuelle

Pour caractériser le régime des pluies à une station exploitée depuis de nombreuses années, il est de tradition d'établir la courbe des hauteurs des pluies moyennes mensuelles en fonction du temps. Les pluies moyennes mensuelles des six stations (Mechroha, Ain el karma, Asfour, Cheffia, Bouhadjar, Ain seynour) pour une période d'observation allant de (1970 à 2012) sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.2. Les hauteurs moyennes mensuelles des précipitations en mm (1970-2012)

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Mechroha	48.90	75.10	122.25	144.95	145.56	151.18	167.64	117.33	116.77	34.16	2.17	7.75
Ain El Karma	27.27	60.51	80.11	99.23	114.87	91.31	84.95	82.44	57.72	14.51	1.50	4.95
Asfour	30.73	51.20	72.44	98.10	91.18	73.90	73.54	59.02	32.30	7.86	3.77	5.62
Cheffia	42.10	68.20	100.00	115.30	120.40	102.00	90.10	89.20	52.00	18.70	3.50	8.00
Bouhadjar	29.70	51.20	83.80	87.20	84.90	79.10	74.40	66.30	37.80	12.90	1.70	8.80
Ain Seynour	38.73	68.87	102.27	150.15	157.40	140.57	121.41	115.68	55.72	22.09	4.34	13.29

La représentation graphique relative aux précipitations moyennes mensuelles (fig. 3.8) montre un accroissement des précipitations durant la période Septembre - Janvier sauf la station de mechroha (septembre - Mars). Au delà débute une baisse des précipitations qui se poursuit jusqu'au mois d'Août. Le maximum des pluies est enregistré au mois de Mars à Mechroha avec 167.64 mm et au mois de janvier avec 157.40 mm à Ain Seynour, alors que le minimum est enregistré au mois de Juillet pour toutes les stations avec une variation pluviométrique de 1.50 jusqu'à 4.34 mm.

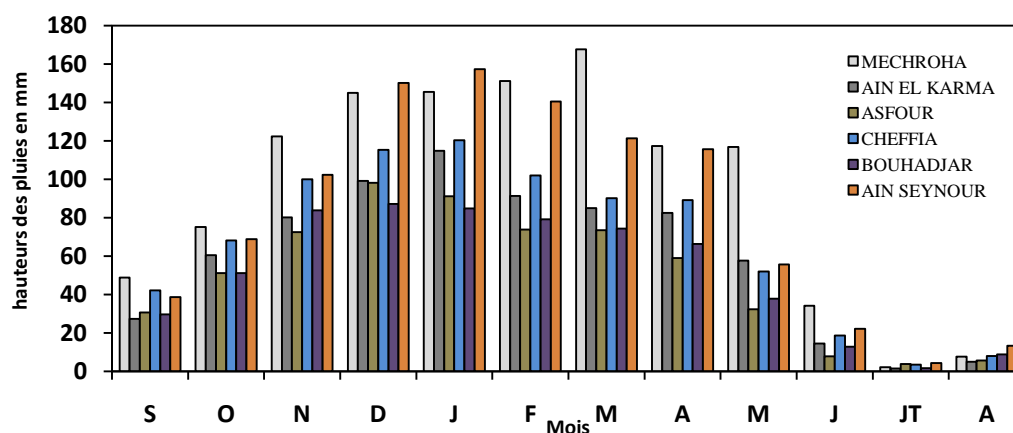


Figure 3.8. Précipitations moyennes mensuelles en mm aux stations de la région étudiée (période 1970/2012).

3.4.4.2. Répartition saisonnière des précipitations

L'étude de la répartition saisonnière est indispensable pour voir si la baisse ou la hausse de la pluviométrie est spécifique à une saison particulière ou à plusieurs saisons. Nous avons calculé le pourcentage des précipitations de chaque saison par rapport au total annuel (Tableau 3.3).

Tableau 3.3. Répartition saisonnière des précipitations

Saison	Automne		Hiver		Printemps		Eté	
	Sep - Oct - Nov		Déc - Jan - Fev		Mar - Avr - Mai		Jui - Juil - Aou	
stations	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Mechroha	246.25	21.7	441.69	39.0	401.74	35.4	44.08	3.9
Ain El Karma	167.89	23.3	305.41	42.5	225.11	31.3	20.96	2.9
Asfour	154.37	25.7	263.18	43.9	164.86	27.5	17.25	2.9
Cheffia	210.30	26.0	337.70	41.7	231.30	28.6	30.20	3.7
Bouhadjar	164.70	26.7	251.20	40.7	178.50	28.9	23.40	3.8
Ain Seynour	209.87	21.2	448.12	45.2	292.81	29.6	39.72	4.0

La répartition saisonnière des pluies (Tableau. 3.3) montre, que l'été correspond à la saison la plus sèche. La période s'étalant de l'automne au printemps forme une saison humide durant laquelle s'effectue la plus grande partie des écoulements.

3.3.5. Les précipitations annuelles

3.3.5.1. Répartition interannuelle des précipitations

Pour le bassin versant de Bounamoussa, la répartition des précipitations est très irrégulière d'une année à une autre (pour la période d'observation de 42 ans) (Fig. 3.9). Le régime des précipitations est largement influencé par l'emplacement des stations et leurs altitudes :

Tableau 3.4. Régime des précipitations interannuel

Station	Max (mm)	Année	Min (mm)	Année	Module interannuel (mm)
mechroha	2086	2010	140	1970	1133
Ain el karma	1169	1991	202	1986	719
Asfour	1039	1987	299	1988	600
Cheffia	1261	1987	439	1997	810
Bouhadjar	1136	1988	125	1994	718
Ain Seynour	1426	2003	583	1997	991

Les modules pluviométriques sont généralement élevés, ils varient entre 1133 mm et 600 mm (tableau 3.4).

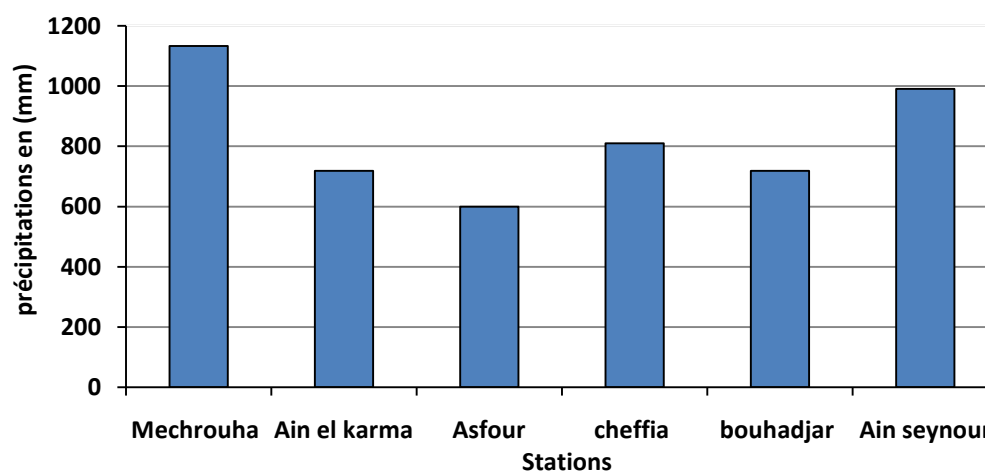
**Figure 3.9.** Le module pluviométrique interannuel (mm) durant la période (1970-2012)

Tableau 3.5. Précipitations annuelles (mm) aux différentes stations pluviométriques (42 ans)

années	Mechrouha	Ain el karma	Asfour	cheffia	bouhadjar	Ain seynour	années	Mechrouha	Ain el karma	Asfour	cheffia	bouhadjar	Ain seynour
1970/1971	795.1	803.3	706.7	856.9	551.8	1012.4	1991/1992	912.3	683.8	489.7	908.3	499.2	1044.7
1971/1972	1030.6	824.6	793.1	1123	865.2	1181.1	1992/1993	985.3	856.8	515.8	789.5	580.7	884.7
1972/1973	1057.9	1007.0	926.2	1111.8	824.9	1263.5	1993/1994	474.1	443.7	531.2	691	125.9	833.6
1973/1974	582.1	561.9	487.1	591.2	495.4	848.8	1994/1995	803.7	565.6	487.4	658.1	356.6	670
1974/1975	900.2	844.9	570.9	723.8	470.1	1016.4	1995/1996	1408.6	898.7	822.8	1050.3	712.3	1354.8
1975/1976	898.4	704.6	464.3	688.4	483.7	1021	1996/1997	500.4	467.1	300.5	439.2	616.2	584.7
1976/1977	381.8	853.9	771.9	905.2	751.8	1290.9	1997/1998	1222.3	938.3	814.3	1113.6	1136.1	1190
1977/1978	968.1	838.1	657.3	755.1	537.6	740.1	1998/1999	1811.3	749.8	689.8	921.6	695.7	1072.3
1978/1979	783.9	563.8	738.8	839.6	510.0	1142.2	1999/2000	1076.1	752.3	514.0	704.2	587.9	971.5
1979/1980	1754.2	776.7	581.2	713	597.3	1005.5	2000/2001	1337.7	739.3	455.8	696.8	611.9	811.8
1980/1981	944.3	541.6	550.7	813.4	576.2	870.5	2001/2002	729.1	448.5	377.4	502.5	304.1	622.5
1981/1982	1074.9	586.1	643.1	839.6	698.8	1046.3	2002/2003	1704.1	912.2	850.9	1139.4	1118.5	1486
1982/1983	889.1	398.5	373.6	577.2	500.4	856.3	2003/2004	1622.3	698.4	726.4	959.1	476.5	1201
1983/1984	1007.0	707.3	661.2	1054.9	820.4	1281.8	2004/2005	1952.9	1088.6	867.3	1124.5	1055.0	1262.6
1984/1985	1080.1	571.3	759.9	970.1	740.1	1332	2005/2006	1627.3	488.2	503.0	642.2	533.6	583.1
1985/1986	588.0	202.4	465.8	610.5	344.7	818.5	2006/2007	1810.9	442.8	500.9	730.2	777.4	787.8
1986/1987	1126.3	398.6	1033.8	1261.4	867.5	1389.7	2007/2008	1166.7	521.8	334.7	549	590.1	664.7
1987/1988	298.6	639.3	299.2	456.3	402.4	751.3	2008/2009	1832.0	791.3	687.8	1013.4	877.7	1176.2
1988/1989	518.4	881.0	444.2	589.3	402.4	769	2009/2010	2086.0	1059.7	506.9	729.3	468.0	820
1989/1990	664.2	920.1	449.4	572.9	365.3	645.5	2010/2011	1708.6	764.6	541.4	854.8	583.2	1017.4
1990/1991	1465.4	1169.5	616.4	850.3	405.9	1132.2	2011/2012	2037.0	1107.6	673.5	877.8	1024.5	1147.1

3.3.5.2. Etude statistique des précipitations

L'analyse statistique des précipitations permet de préciser les conditions du régime pluviométrique dans notre zone d'étude, elle nous mènera aussi à estimer les précipitations pour des récurrences données. On déterminera également les lois de répartition que suivent les précipitations.

Les précipitations annuelles (période 1970-2012) sont ajustées par la loi normale et log normale. Les résultats des paramètres cités (les précipitations moyennes annuelles, écart type, coefficient de variation et écart à la normale) sont indiqués dans le tableau (3.6).

Tableau 3.6. Paramètres de position des précipitations aux différentes stations pluviométriques (1970-2012)

Paramètres		Mechrouha 140502	Ain el karma 031604	Asfour (031502)	cheffia 031501	bouhadjar 031503	Ain seynour (120103)
Moyenne P (mm)		1133	719	600	810	718	991
Variance (V)		236937.67	48226.27	30273.87	42734.77	50645.39	58523.65
Ecart-type (δ)		486.76	219.60	173.99	206.72	225.05	241.92
Coefficient de variation Cv		0.43	0.31	0.29	0.26	0.36	0.24
Ecart à la normale (ei)	Année sèche extrême	-0.74	-0.72	-0.50	-0.46	-0.80	-0.41
	Année humide extrême	0.84	0.63	0.72	0.56	0.84	0.50

La forte dispersion des lames d'eau écoulées mise en lumière par la valeur élevée du coefficient de variation laisse supposer une distribution dissymétrique de notre série. Les coefficients de variation étant inférieurs à 0.5, cela laisse supposer que l'ajustement suit une loi normale.

3.3.6. Analyse des pluies sur l'ensemble du bassin versant

Plusieurs méthodes permettent de calculer la hauteur des précipitations à travers les bassins versants et les plus usitées sont la méthode de la moyenne arithmétique, la méthode des polygones de Thiessen et la méthode des isohyètes.

3.3.6.1. Méthode de la moyenne arithmétique

C'est la méthode la plus simple pour calculer les précipitations moyennes sur un bassin. Cette méthode reste peu précise car le nombre de points d'observation est très insuffisant, la

topographie est très accidentée et la répartition des stations n'est pas suffisamment homogène sur le bassin. Les résultats sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau 3.7. Estimation de la lame d'eau précipitée par la méthode arithmétique.

Station	Coude	P moyennes annuelles (mm)
Mechroha	120103	1133
Ain el karma	31503	719
Asfour	31501	600
Cheffia	31502	810
Bouhadjar	31604	718
Ain Seynour	140502	991
Précipitation moyenne en (mm)		828.5

3.3.6.2. la méthode des polygones de Thiessen

C'est une méthode arithmétique dans laquelle on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence définie géométriquement. Elle convient notamment quand les précipitations ne sont pas uniformément réparties sur toute la surface du bassin. La précipitation moyenne sur le bassin s'écrit :

$$P_{moy} = \sum_{i=1}^{i=n} P_i \times S_i / S_{bv} \quad (3.1)$$

Avec :

P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin,

P_i : précipitation enregistrée à la station i ,

S_i : superficie du polygone associée à la station i .

S_{bv} : superficie totale du bassin.

Les résultats sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau 3.8. Pluie annuelle et la surface d'influence pour chaque station

N° du polygone	Station	Coude	Pluie moyennes annuelles P_i (mm)	Surface des polygones (A_i) km^2	pluie moyenne (P_{moy}) mm
A1	Mechroha	120103	1133	18.86	685.00
A2	Ain el karma	31503	719	81.07	
A3	Asfour	31501	600	5.04	
A4	Cheffia	31502	810	57.67	
A5	Bouhadjar	31604	718	386.47	
A6	Ain Seynour	140502	991	26.03	

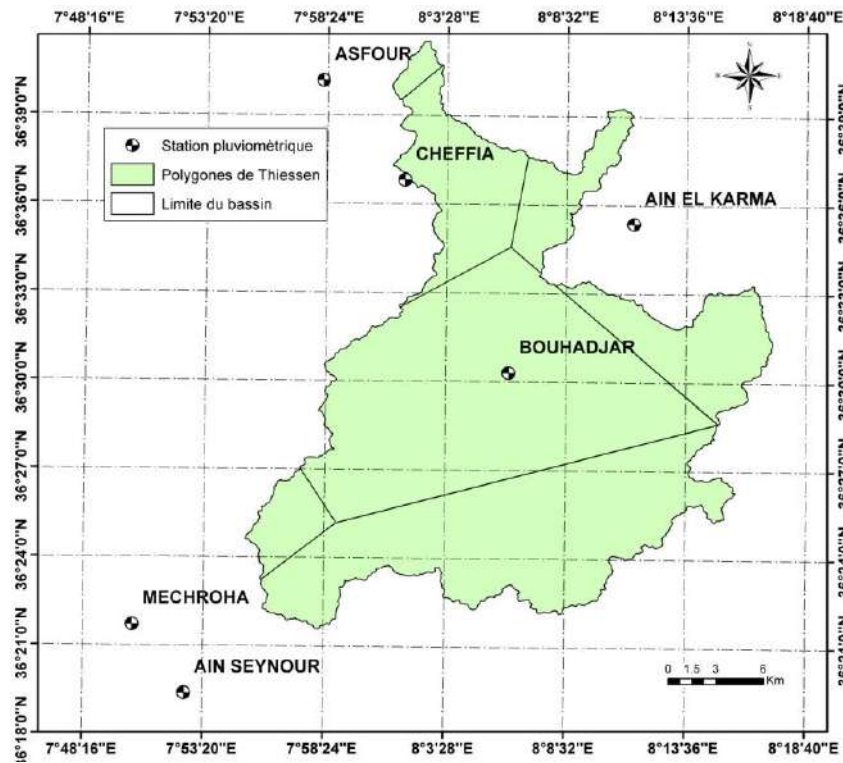


Figure 3.10. Le polygone de Thiessen du bassin versant de Bounamousa

3.3.6.3. Méthode des isohyètes

Pour trouver la pluie moyenne par cette méthode, il faut déterminer les superficies du bassin comprises entre les différentes isohyètes.

Le calcul de la précipitation moyenne dans le bassin se fait selon la formule suivante :

$$P_{moy} = \frac{1}{S_t} \sum_{i=1}^{m-1} S_i \times \frac{(P_i + P_{i+1})}{2} \tag{3.2}$$

Sachant que :

S_i : superficie entre deux isohyètes successives P_i et P_{i+1}

S_t : surface totale du bassin

m : nombre d'isohyètes représentées dans le bassin.

$P_{moy} = 730 \text{ mm}$

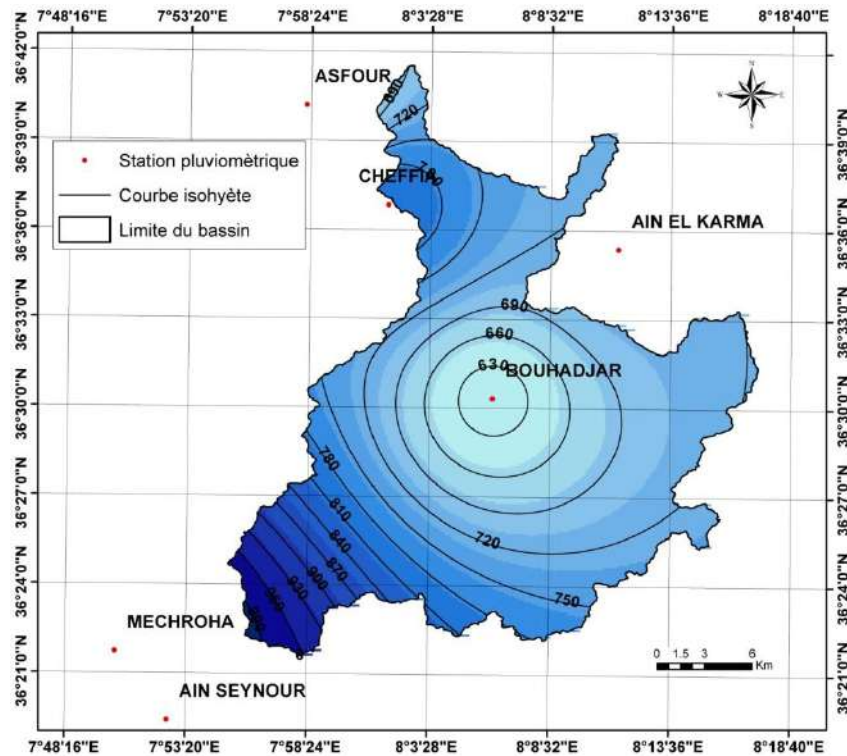


Figure 3.11. Carte des isohyètes pour le bassin de Bounamoussa

L'application de cette méthode, donne une hauteur pluviométrique moyenne annuelle de 730 mm sur la totalité de la superficie du versant de Bounamoussa.

Nous avons regroupés les résultats obtenus par les trois méthodes dans le tableau (3.9)

Tableau 3.9. Précipitations en (mm) estimées par les trois méthodes

Méthode	Pluie moyenne en (mm)
la moyenne arithmétique	828.50
polygones de Thiessen	685.00
isohyètes	730.00

Parmi les trois méthodes nous retenons la méthode des isohyètes en raison de sa précision, relativement acceptable, pour évaluer la pluviométrie moyenne du bassin versant : $P = 730$ mm.

3.3.7. Coefficient pluviométrique

Pour savoir si l'année est excédentaire ou déficitaire d'une station donnée, il faut déterminer le coefficient pluviométrique. L'année est d'autant plus excédentaire que $H > 1$. Lorsque $H < 1$, l'année correspondante est déficitaire. Il est défini par le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne d'une période donnée:

$$H = \frac{P_i}{P} \quad (3.3)$$

Avec:

H : coefficient pluviométrique.

P_i : pluviométrie d'une année en mm.

P : pluviométrie moyenne en mm.

Le tableau ci-dessous montre les variations de H au cours des années d'observation :

Tableau 3.10. Coefficient pluviométrique des stations pluviométrique (1970/2012).

années	Mechroha	Ain el karma	Asfour	Cheffia	Bouhadjar	Ain Seynour
1970/1971	0.7	1.1	1.2	1.1	0.9	1
1971/1972	0.9	1.1	1.3	1.4	1.4	1.2
1972/1973	0.9	1.4	1.5	1.4	1.3	1.3
1973/1974	0.5	0.8	0.8	0.7	0.8	0.9
1974/1975	0.8	1.2	1	0.9	0.8	1
1975/1976	0.8	1	0.8	0.9	0.8	1
1976/1977	0.3	1.2	1.3	1.1	1.2	1.3
1977/1978	0.9	1.2	1.1	0.9	0.9	0.7
1978/1979	0.7	0.8	1.2	1	0.8	1.2
1979/1980	1.5	1.1	1	0.9	1	1
1980/1981	0.8	0.8	0.9	1	0.9	0.9
1981/1982	0.9	0.8	1.1	1	1.1	1.1
1982/1983	0.8	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9
1983/1984	0.9	1	1.1	1.3	1.3	1.3
1984/1985	1	0.8	1.3	1.2	1.2	1.3
1985/1986	0.5	0.3	0.8	0.8	0.6	0.8
1986/1987	1	0.6	1.7	1.6	1.4	1.4
1987/1988	0.3	0.9	0.5	0.6	0.7	0.8
1988/1989	0.5	1.2	0.7	0.7	0.7	0.8
1989/1990	0.6	1.3	0.7	0.7	0.6	0.7
1990/1991	1.3	1.6	1	1.1	0.7	1.1
1991/1992	0.8	1	0.8	1.1	0.8	1.1
1992/1993	0.9	1.2	0.9	1	0.9	0.9
1993/1994	0.4	0.6	0.9	0.9	0.2	0.8
1994/1995	0.7	0.8	0.8	0.8	0.6	0.7
1995/1996	1.2	1.2	1.4	1.3	1.2	1.4
1996/1997	0.4	0.6	0.5	0.5	1	0.6
1997/1998	1.1	1.3	1.4	1.4	1.8	1.2
1998/1999	1.6	1	1.2	1.1	1.1	1.1
1999/2000	0.9	1	0.9	0.9	1	1
2000/2001	1.2	1	0.8	0.9	1	0.8
2001/2002	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6
2002/2003	1.5	1.3	1.4	1.4	1.8	1.5
2003/2004	1.4	1	1.2	1.2	0.8	1.2
2004/2005	1.7	1.5	1.4	1.4	1.7	1.3
2005/2006	1.4	0.7	0.8	0.8	0.9	0.6
2006/2007	1.6	0.6	0.8	0.9	1.3	0.8
2007/2008	1	0.7	0.6	0.7	1	0.7
2008/2009	1.6	1.1	1.1	1.3	1.4	1.2
2009/2010	1.8	1.5	0.8	0.9	0.8	0.8
2010/2011	1.5	1.1	0.9	1.1	0.9	1
2011/2012	1.8	1.5	1.1	1.1	1.7	1.2

Les résultats obtenus montrent une alternance entre les années excédentaires et les années déficitaires au niveau des six stations.

3.3.8. Les facteurs thermiques

La température est un facteur important qui agit sur le climat en interaction avec les autres facteurs météorologiques (précipitations, ensoleillement, vent, etc.) et biogéographiques, sur l'évaporation et par conséquent sur le déficit d'écoulement annuel et saisonnier.

Pour la réalisation de cette étude, nous disposons des mesures effectuées à la Station Métrologique de l'Agence Nationale des Barrages (Barrage Cheffia) pour la période de 1970 à 2012.

3.3.8.1. Températures moyennes mensuelles

Les températures moyennes mensuelles, moyenne des maxima et moyenne des minima par mois, pendant une période de 42 ans (1970-2012), enregistrées à la station météorologique de Cheffia sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.11. Répartition des températures moyennes mensuelles en °C (1970/2012).

Température	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
T moy (°C)	23.6	20.2	16.1	12.7	11.5	11.9	14.1	16.1	18.9	23.1	25.5	26.1
T min (°C)	18.1	14.6	10.7	7.5	6.4	6.7	8.0	9.7	13.1	16.7	19.1	20.0
T max (°C)	29.6	25.1	20.3	16.2	15.0	15.9	18.5	20.9	24.4	29.1	32.3	32.8

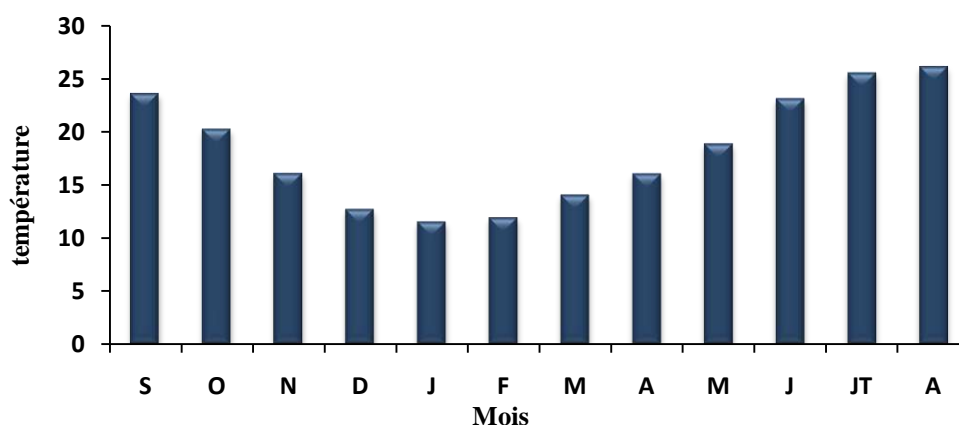


Figure 3.12. Variation des températures moyennes mensuelles (1970/2012).

Les variations thermiques font ressortir que les faibles valeurs sont enregistrées aux mois de décembre, janvier (mois le plus froid $T^{\circ} = 11^{\circ}\text{C}$), février et mars. Tandis que les plus fortes valeurs caractérisent les mois de juin, juillet et août (mois le plus chaud avec une température

de l'ordre de 25.5°C). Sachant que la température moyenne annuelle dans le bassin de Bounamoussa est de 18.3 °C.

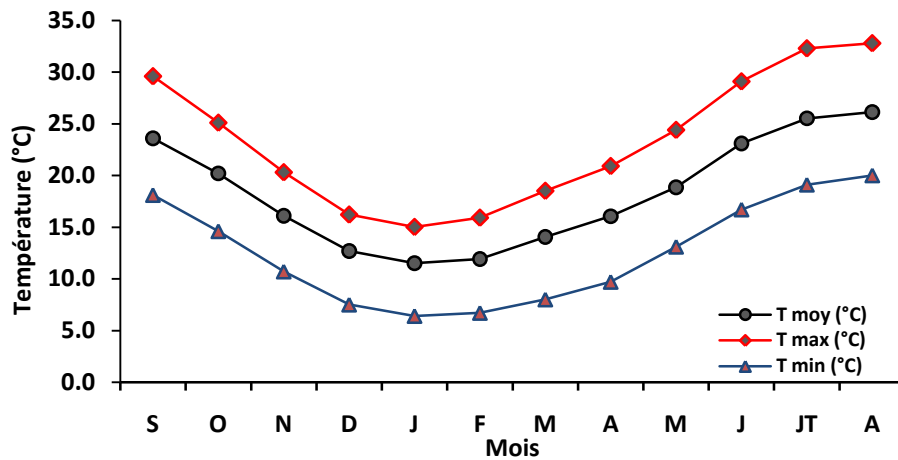


Figure 3.13. Variation mensuelle des T° moyennes, maximales et minimales.

Les maxima moyens sont mesurés aux mois de Juillet et Août où ils atteignent leur maximum de 32°C. Exceptionnellement, on a enregistré une valeur de 43°C en juillet 1982. Elles s'abaissent durant la période froide à 19°C en Janvier et 19.5°C en Février. Les Minima moyens atteignent entre 6.4° et 6.8°C en janvier et février (Fig. 3.13).

3.3.9. Les Diagrammes Ombrothermiques

Afin d'avoir une idée sur le caractère des saisons dans la zone du bassin versant de Bounamoussa, nous avons établi les diagrammes ombrothermiques de GAUSSEN pour Les six stations c'est la combinaison des facteurs thermique et pluviométrique où le total de la précipitation est égal ou inférieur au double de la température moyenne soit ($P_{mm} \leq 2 t^{\circ}c$). Il permet de déterminer les mois véritablement secs et humides.

Selon ces diagrammes (fig. 3.14), on remarque pour les six stations, deux périodes distinctes : l'une sèche débute du mois de Mai jusqu'à la fin du mois d'septembre, l'autre humide commence au début du mois d'Octobre jusqu'à la fin du mois d'Avril.

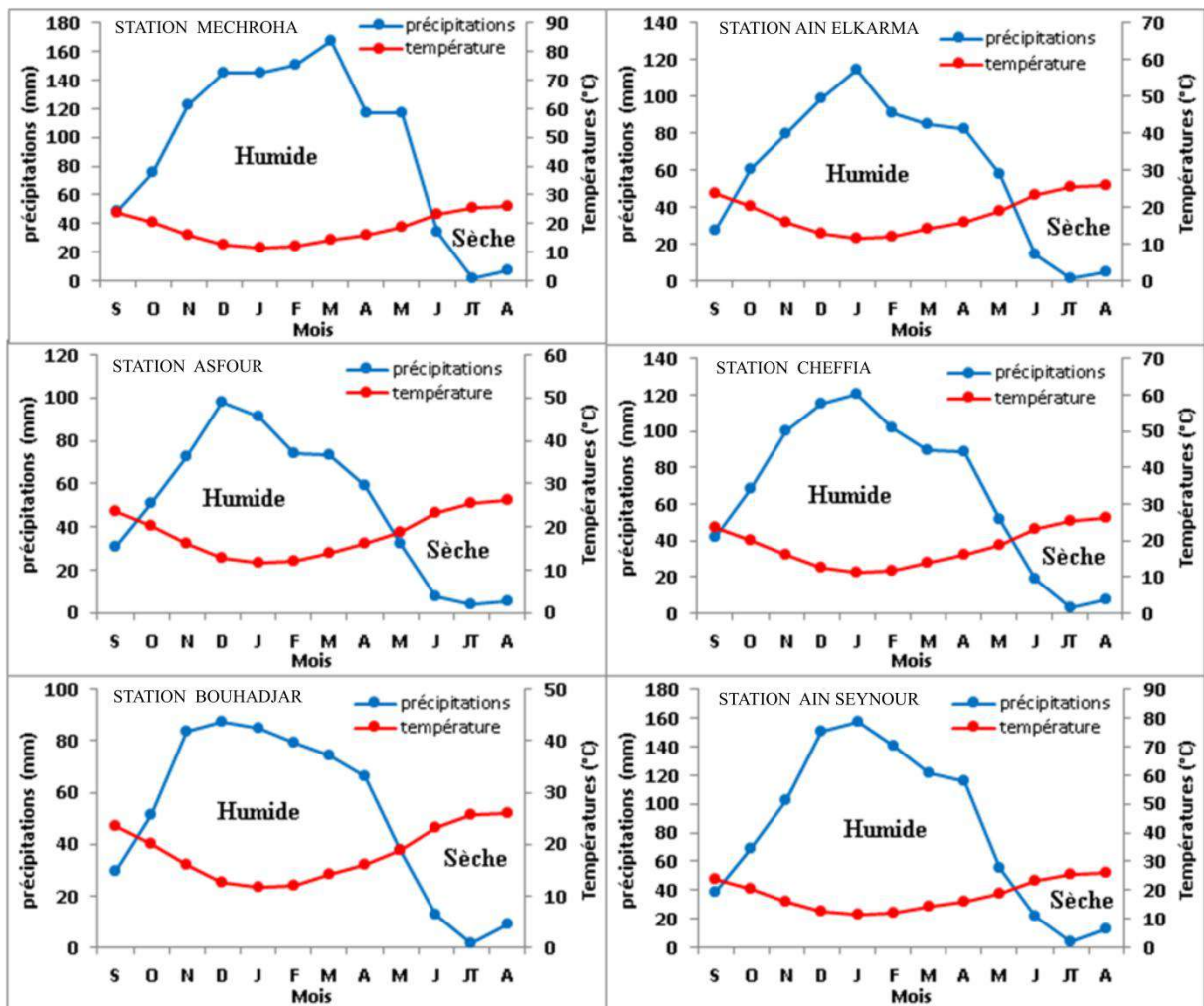


Figure 3.14. Diagrammes Ombrothermiques des stations d'étude - période (1970-2012).

3.3.10. Caractéristiques climatiques d'aridité

Il existe plusieurs méthodes qui permettent d'évaluer les caractéristiques climatiques, nous citons celle de De Martonne, de Moral, d'Euverte et celle d'Emberger. Pour notre étude, nous essayerons de calculer l'indice d'aridité annuel de De Martonne, l'indice mensuel et l'indice d'Emberger.

3.3.10.1. Indice d'aridité annuel de " DE MARTONNE "

Emmanuel DE.MARTONNE (1925) a proposé un indice d'aridité, exprimé en fonction de la température (T) et des précipitations (P) qui permet de classer le type de climat qui règne dans la région, selon la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T + 10} \tag{3.4}$$

Sachant que:

A : indice d'aridité annuelle;

P : précipitations moyennes annuelles en mm;

T : températures moyennes annuelles en °C

Tableau 3.12. Indice d'aridité Selon DE.MARTONNE

Valeur de I	type de climat
0 à 5	hyper aride
5 à 10	aride.
10 à 20	semi-aride
20 à 30	semi-humide
30 à 40	humide

Les résultats des calculs sont récapitulés dans le tableau ci-dessous:

Tableau 3.13.Indice d'aridité annuelle (D'après la formule DE.MARTONNE).

Station	Code	Valeur de I
Mechroha	120103	40.46
Ain el karma	31503	25.68
Asfour	31501	21.43
Cheffia	31502	28.93
Bouhadjar	31604	25.64
Ain Seynour	140502	35.39

D'après ces résultats nous remarquons que les quatre stations de Ain el karma, Asfour; Cheffia et Bouhadjar peuvent être classés en zone semi-humide (pour une valeur comprise entre 20 et 30). Par contre les autres stations (Mechroha et Ain Seynour) sont classées en zone humide (pour une valeur comprise entre 30 et 40).

3.3.10.2. Indice d'aridité mensuelle.

Cet indice permet de suivre l'évolution du climat au cours de l'année. Il est exprimé par la relation suivante :

$$I = \frac{12P}{T + 10} \quad (3.5)$$

P : Précipitation mensuelle en (mm).

T : Température moyenne mensuelle en °C.

Même observation que pour l'indice d'aridité annuelle sauf que pour l'indice d'aridité mensuelle nous pouvons mieux suivre l'évolution de la fluctuation de cet indice.

Tableau 3.14.Indice d'aridité mensuel.

STATION	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
MECHROHA	17.5	29.8	56.2	76.6	81.2	82.8	83.6	54.0	48.6	12.4	0.7	2.6
AIN EL KARMA	9.7	24.0	36.8	52.5	64.1	50.0	42.4	38.0	24.0	5.3	0.5	1.6
ASFOUR	11.0	20.3	33.3	51.9	50.8	40.5	36.7	27.2	13.4	2.8	1.3	1.9
CHEFFIA	15.0	27.1	46.0	61.0	67.1	55.8	45.0	41.1	21.6	6.8	1.2	2.7
BOUHADJAR	10.6	20.3	38.5	46.1	47.3	43.3	37.1	30.5	15.7	4.7	0.6	2.9
AIN SEYNOUR	13.8	27.4	47.0	79.4	87.8	77.0	60.6	53.3	23.2	8.0	1.5	4.4

3.3.10.3. Indice de " L.EMBERGER "

Le système d'EMBERGER permet la classification des différents climats méditerranéens (DAJOZ, 1985; DAJOZ, 2003). Il est défini par la formule suivante :

$$Q_2 = \left(\frac{P}{\left(\frac{M+m}{2} \right) \times (M-m)} \right) \times 1000 \quad (3.6)$$

P : moyenne annuelle en (mm).

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en degré absolu (°K).

m : moyenne des minima du mois le plus froid en degré absolu (°K).

Cette formule, établie par L. EMBERGER, combinant trois facteurs climatiques primordiaux (moyenne des températures extrêmes, précipitation et valeur de l'évaporation grâce à l'amplitude extrême M-m) est précieuse pour comprendre les variations floristiques et les différentes associations végétales de la région étudiée. Les résultats des calculs sont récapitulés dans le tableau ci-dessous:

Tableau 3.15. Indice de L.EMBERGER pour la région du bassin Bounamoussa.

Moyenne annuelle	Valeurs	Q2 d'Emberger
P moy en (mm)	730	94.5
Moy T° mini (°C)	6.4	
Moy T° mini (°K)	279.55	
Moy T° maxi (°C)	32.8	
Moy T° maxi (°K)	305.95	

A partir de ce Climagramme (fig. 3.15), nous constatons que l'étage bioclimatique de la région du bassin Bounamoussa est sub-humide à hiver doux.

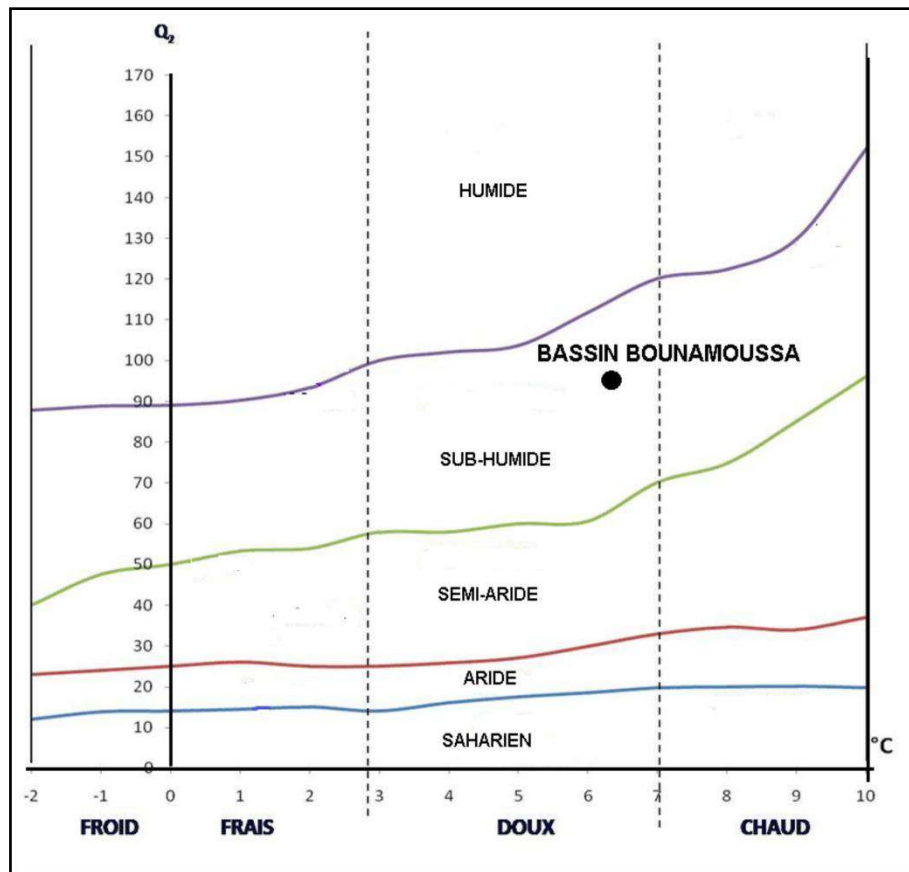


Figure 3.15. Diagramme bioclimatique d'Emberger pour le bassin Bounamoussa

3.4. Les Vents :

Le vent est un air en mouvement qui se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression. La moyenne annuelle de la vitesse maximale instantanée du vent est de 18.4 m/s, les plus violents soufflent en hiver et les plus faibles en été, dont les prédominants sont de direction Nord-Ouest, à l'opposé des vents de Sud-Ouest qui s'accompagnent d'une élévation de la température qui assèche l'air et favorise les incendies des forêts, provoquant aussi le Sirocco et pouvant souffler 14 jours par an, le maximum des journées étant enregistré en août, à raison de 2 à 3 jours.

Nous disposons des données d'observations des vitesses des vents maximales de la station météorologique du barrage Cheffia (tableau 3.16).

Tableau 3.16. Variation des moyennes mensuelles de la vitesse maximale instantanée (station Cheffia)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	Moy. Ann
Vitesse max (m/s)	20	19	22.8	20	18	21.5	17	23	16	19	15	9	18.4

3.5. Bilan hydrique

La connaissance du bilan hydrique, nous permettra de quantifier les transferts d'eau issus des précipitations entre les différentes composantes du bilan. Il comporte trois principaux termes (les entrées, les sorties et les stocks) tel que l'écoulement, l'infiltration et l'évaporation. Pour estimer ce bilan, la méthode de THORNTHWITE est la plus adaptée dans les régions à climat semi-aride et le climat méditerranéen, Il est calculé par la formule suivante :

$$P = R + E + I \quad (3.7)$$

Sachant que :

P : lame d'eau annuelle moyenne précipitée en (mm).

R : ruissellement de surface moyenne annuelle (mm).

E : évapotranspiration moyenne annuelle (mm).

I : infiltration moyenne (mm).

3.5.1. L'évapotranspiration :

L'évapotranspiration est la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère, par l'évaporation directe de l'eau du sol et la transpiration par les plantes. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire.

3.5.1.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

C'est l'ensemble de la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant. La formule de THORNTHWAITE (1948) qui permet le calcul de l'ETP en utilisant la température de l'air et la latitude de la station, est la suivante :

$$ETP = 16 \times \left(\frac{10 \times T}{I} \right)^a \times K \quad (3.8)$$

$$I = \sum_1^{12} i \text{ avec } i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (3.9)$$

$$a = \left(\frac{1.6}{100} \right) \times I + 0.5 \quad (3.10)$$

Où :

ETP : évapotranspiration potentielle du mois en (mm).

T : température moyenne mensuelle de la période en (°C).

I : indice thermique annuelle qui représente la somme des indices mensuelle i.

K : Coefficient d'ajustement mensuel en fonction de la latitude et la durée du jour.

3.5.1.2. L'évapotranspiration réelle (ETR) :

C'est la somme de l'évaporation et de la transpiration réelle pour une surface donnée. L'ETR représente la quantité d'eau réellement perdue sous forme de vapeur effectivement exportée vers l'atmosphère par les sols et les végétaux. La méthode de Thornthwaite donne des propositions pour le calcul de l'ETR comme suit :

- Si la pluie mensuelle P supérieure à l'évapotranspiration potentielle ETP ($P > ETP$) :
ETR = ETP
- Si la pluie mensuelle P égale à l'évapotranspiration potentielle ETP ($P = ETP$)
ETR = ETP.
- Les réserves en eau de sol restent les mêmes que celles du mois précédent.
- Si la pluie mensuelle P inférieure à l'évapotranspiration potentielle ETP ($P < ETP$) ;
ETR = ETP si $P + RFU > ETP$
ETR = $P + RFU$ si $P + RFU < ETP$
- Lorsque les réserves en eau du sol sont épuisées et $ETP > ETR$ leurs différences donne le déficit d'alimentation.

Le paramètre RFU (réserve facilement utilisable) représente la lame d'eau que le sol est capable d'emmagasiner en fonction de la nature du sol et de la profondeur racinaire des plantes. La valeur de la RFU est estimée selon la formule de Hallaire qui s'écrit de la manière suivante :

$$RFU = \frac{c - f}{100} (H \times D) + 30 \text{ (mm)} \quad (3.11)$$

Avec :

RFU : réserve en eau du sol

C : Capacité au champ

f : Capacité au point de flétrissement

H : Profondeur du sol en (mm)

D : Densité apparente, $D=1$

Les valeurs de C-f données par Hallaire selon la nature du sol sont :

- C-f=5% pour un sol sableux
- C-f=10% à 15% pour un sol limoneux
- C-f=20% pour un sol argilo-sableux.

On estime la valeur de saturation du sol ($RU=100$ mm) durant la période sèche et où les précipitations sont inférieures aux valeurs calculées de l'ETP ($RU=0$).

3.5.2. Le ruissellement (R):

Le ruissellement se produit quand l'intensité des précipitations dépasse l'infiltration et la capacité de rétention de la surface du sol. Le but de l'évaluation de ruissellement est d'apprécier l'importance de l'érosion mécanique qui affecte la surface du sol. Le coefficient de ruissellement (R) est calculé par la formule de TIXERONT- BERKALOFF :

$$R = \frac{P^3}{3 \times (ETP)^2} \quad (3.12)$$

Avec :

R : ruissellement en (mm).

P : précipitations moyenne annuelles en (mm).

ETP : évapotranspiration potentielle annuelle en (mm).

Si : $P < 600$ mm.

➤ Formule de TEXERON-BERKALOFF modifiée par ROMANTCHOOK :

$$R = \frac{P^3}{3} \quad (3.13)$$

Si : $P > 600$ mm.

Comme on a dans les six stations de mesure $P > 600$ mm on applique la deuxième formule, dont les résultats sont consignés dans le tableau suivant:

Tableau 3.17. Détermination des paramètres de ruissellement.

STATION	Code	P moy (mm)	ETP (mm)	R (mm)
CHEFFIA	31502	810	423.9	230.12

En effet, cette valeur de ruissellement est due aux facteurs physiographiques suivants :

- Les caractéristiques du bassin concernant la forme, la pente de la surface de drainage, la perméabilité et la capacité d'emménagement.
- Les caractéristiques des cours d'eau.
- Les caractéristiques climatologiques, telles que la température, précipitation, radiation solaire et humidité de l'air ...etc.

3.5.3. L'infiltration (I) :

L'infiltration est définie comme le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol. C'est sans aucun doute le paramètre le plus difficile à calculer à cause des multiples approximations dans sa quantification. On utilise la formule générale du bilan hydrique :

$$P = R + I + ETR \quad (3.14)$$

Donc :

$$I = P - R - ETR \quad (3.15)$$

Où :

R : ruissellement en (mm).

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETR : évapotranspiration réelle en (mm).

I : infiltration en (mm).

Les résultats obtenus sont données dans le tableau ci-dessous:

Tableau 3.18.Détermination des paramètres d'infiltration.

STATION	P (mm)	R (mm)	ETR (mm)	I (mm)
CHEFFIA	810	230.12	423.90	155.98

D'après les résultats obtenus au tableau (3.18), on constate que l'infiltration au niveau du bassin versant de Bounamoussa est de 155.98 mm. Ce résultat est largement influencé par la lithologie qui déterminera le comportement hydrologique du bassin versant étudié.

3.5.4. Représentation graphique du bilan hydrique :

Le bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite, pour le Bassin versant de Bounamoussa, donne une ETP de l'ordre de 877.5 mm/an à la station Cheffia, soit un déficit de 453.6 mm/ans, et cela durant la période déficitaire qui s'étale de Juin à Octobre où l'ETP est nettement supérieure au volume des précipitations.

En outre, l'évapotranspiration réelle se fait alors au détriment du stock qui se trouve rapidement épuisé pendant le mois de Juillet. Le bilan est excédentaire durant les mois de Décembre à Avril avec 313.16 mm/ans respectivement (tableau 3.19).

D'après les résultats du bilan hydrique, on constate que la valeur de l'ETR atteint de 423.5 mm/an. Cette valeur dépasse la précipitation moyenne annuelle enregistrée au niveau de la station Cheffia, avec un taux de l'ordre de 56 %.

L'écoulement commence après le remplissage de la RU (100mm) dès le début du mois d'Octobre jusqu'à la fin de mois de Mai, avec un maximum au mois de Décembre et Janvier où l'excédent est de 98.6 mm.

Cette analyse est représentée par la figure n°3.16. Elle met en évidence quatre périodes bien différentes qui sont:

- a) **Période de constitution de la réserve utile (deux mois):** une reconstitution de la RU (recharge du sol) à partir du mois de Novembre jusqu'au mois de Décembre.
- b) **Période de saturation (quatre mois) :** la réserve utile est à son maximum de saturation dès le mois de Janvier jusqu'à du mois d'avril avec un excédent très important qui varie selon les quantités des précipitations.
- c) **Période d'utilisation (un mois)** où l'évapotranspiration réelle se fait alors au détriment du stock de la réserve utile durant le mois de Mai.
- d) **Période de déficit où le surplus est nul (cinq mois):** mois de Juin la réserve utile est totalement épuisée et ce déficit hydrique est à prendre en considération dans toutes propositions d'aménagement. Elle s'étend jusqu'au mois d'Octobre avec le début des précipitations.

La figure (3.16) donne la représentation graphique du bilan hydrique à partir de la méthode de Thornthwaite.

Tableau 3.19. Bilan hydrique ; station de Cheffia période : (1970/2012)

Mois	T°c	P	I	K	ETP	Bh	Vr	RU	ETR	Déf	Excé
S	23.6	42.10	10.9	1.03	105.9	-63.80	0	0	42.1	63.8	0.0
O	20.2	68.20	8.6	0.97	73.5	-5.30	0	0	68.2	5.3	0.0
N	16.1	100.00	6.1	0.86	41.7	58.30	58.30	58.30	41.7	0.0	0.0
D	12.7	115.30	4.2	0.84	25.5	89.80	41.70	100	25.5	0.0	48.1
J	11.5	120.40	3.6	0.87	21.8	98.60	0	100	21.8	0.0	98.6
F	11.9	102.00	3.8	0.86	23.1	78.90	0	100	23.1	0.0	78.9
M	14.1	90.10	4.9	1.03	38.2	51.90	0	100	38.2	0.0	51.9
A	16.1	89.20	6.0	1.10	53.1	36.10	0	100	53.1	0.0	36.1
M	18.9	52.00	7.7	1.21	80.0	-28.00	-28.00	72.00	80.0	0.0	0.0
J	23.1	18.70	10.6	1.22	120.3	-101.60	-72.00	0	18.70	101.6	0.0
JT	25.5	3.50	12.3	1.24	148.7	-145.20	0	0	3.50	145.2	0.0
A	26.1	8.00	12.8	1.16	145.7	-137.70	0	0	8.00	137.7	0.0
ANUELLE	18.3	809.50	91.5	/	877.5	-68.00	/	/	423.9	453.6	313.6

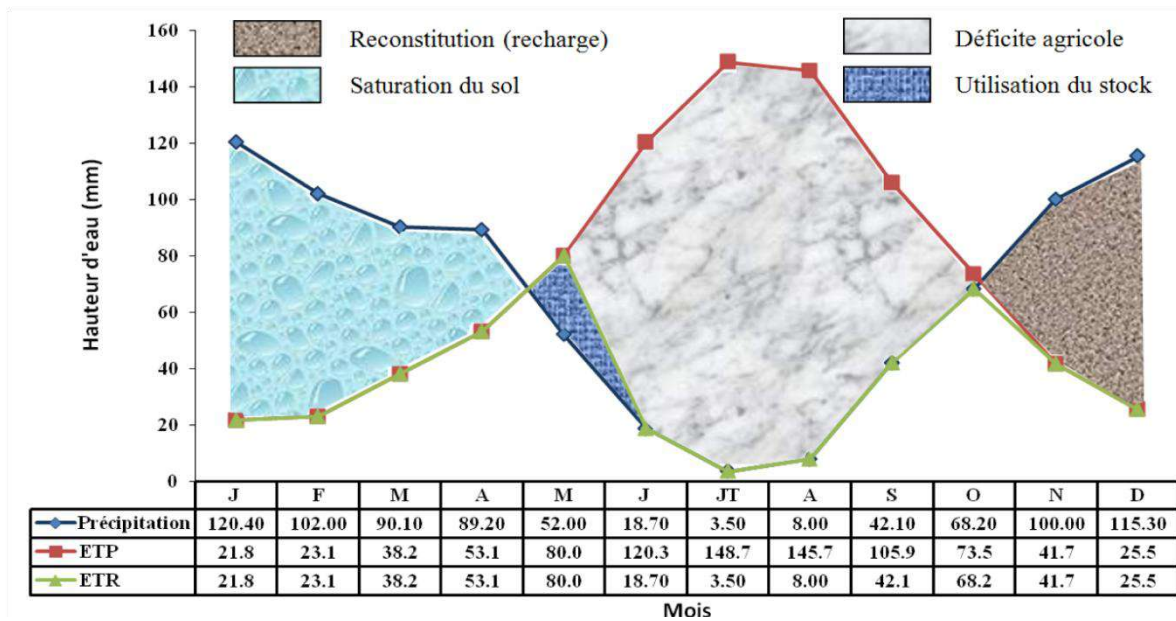


Figure 3.16. Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite à la station de Cheffia (1970 -2012)

3.6. Conclusion

L'étude hydroclimatologique nous a permis de déterminer que la zone d'étude est caractérisée par un climat de type sub-humide à hiver doux avec deux saisons distinctes l'une pluvieuse et humide allant au début du mois d'Octobre jusqu'à la fin du mois d'Avril, l'autre sèche et chaude débute du mois de Mai jusqu'à la fin du mois de Septembre.

La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 730 mm sur une période de 42 ans (1970-2012). Sur le plan mensuel, le mois de Mars est généralement le plus humide ; Juillet et Août étant les plus secs. La température moyenne annuelle enregistrée au niveau de la station du barrage Cheffia (1970-2012) est de 19.3°C. Le mois de Janvier est le plus froid avec 11.5°C ; Juillet et Août sont les plus chauds avec 25.5°C et 26.1°C. On remarque une évaporation importante en été. Elle atteint son maximum au mois de juillet et Août.

Le bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite, permet l'estimation de l'ETR qui montre qu'une grande partie des précipitations est reprise par l'évapotranspiration ETR (424 mm/an à la station du barrage Cheffia). La reconstitution du stock commence au mois de novembre et s'achève à la fin du mois d'avril. L'utilisation du stock du sol s'observe au mois de mai et la nécessité d'irriguer s'impose surtout pour la période allant du mois de Juin au mois d'octobre où l'on constate un déficit agricole pouvant atteindre 453.6 mm.

La hauteur d'eau ruisselée est de 230.12 mm. En fait, ce n'est qu'une valeur moyenne car le ruissellement dépendra beaucoup plus de l'intensité des averses particulièrement dans ces

régions subhumides et la nature lithologique des formations. L'infiltration moyenne annuelle au niveau du bassin versant de Bounamoussa est de 156 mm soit 28.4% des précipitations. La moyenne annuelle de la vitesse maximale instantanée des vents à la station du barrage Cheffia est de 18.4 m/s (période :1970/2012).

Chapitre 4
Cartographie et évaluation quantitative
de l'érosion hydrique

Chapitre 4 : Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique

4.1. Introduction

L'érosion hydrique constitue l'un des principaux facteurs de la dégradation des terres (*Bouguerra et al. 2017*). Elle impacte négativement les retombées socio-économiques à l'échelle locale, régionale et nationale.

L'accentuation de la dégradation des sols dépend de plusieurs facteurs naturels et anthropiques favorisant le déclenchement et le développement des processus d'érosion. Ces facteurs sont divisés en deux catégories, ceux qui sont de nature quasi-statiques (infiltration, érodibilité et morphologie) et les autres qui ont une variabilité dans le temps tels que le couvert végétal, l'utilisation du sol, l'intensité des pluies et les pratiques agricoles (*Roose et Lelong 1976, Vrieling 2005, Boukheir et al. 2006*).

Afin de traiter la spatialisation de l'érosion d'un point de vue quantitatif, il est nécessaire de recourir à la modélisation. Nous nous sommes donc intéressés aux processus de transfert des sédiments depuis le versant jusqu'au réseau hydrographique et aux différents modèles s'y attachant afin de savoir s'il était possible de coupler un modèle hydrodynamique à la spatialisation de l'aléa érosion (*Printemps, 2007*).

4.2. Méthode utilisée d'évaluation de l'érosion hydrique

De nombreux modèles mathématiques ont été établis pour estimer le risque d'érosion des sols. Parmi ceux-ci et les plus connus (7): Universal Soil Loss Equation (USLE) de Wischmeier et Smith, (1978); Soil Erosion Model for Mediterranean Areas (SEMMED) Morgan and Finney (1984); Water Erosion Prediction Project (WEPP) de Flanagan and Nearing, (1995). Le choix d'un modèle particulier dépend du but recherché et des données disponibles.

Un des plus utilisés durant les 30 dernières années est le modèle de l'équation universelle de perte de sol (USLE) et sa version révisée (RUSLE) utilisée dans le cas étudié (*Nighat Rasoo et al, 2014*), ce modèle permet d'évaluer les pertes en terres et les taux moyens annuels d'érosion pour des prédictions à long terme sur l'ensemble du bassin-versant, exprimée en t ha⁻¹ an⁻¹. Cependant, le modèle est limité dans le sens où il ne peut pas simuler l'érosion du lit de dépôt, ou en ravin (*Foster, 1988*).

Le modèle de l'équation universelle de pertes en sol (*Wischmeier et Smith, 1978*) s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappe et en rigole. Il s'agit d'un

modèle empirique qui prend en compte des paramètres du relief et climatiques ayant une incidence sur la vitesse de l'érosion hydrique, à savoir, l'agressivité des précipitations, l'érodibilité des sols, l'inclinaison et la longueur de la pente, le couvert végétal et les pratiques antiérosives. L'équation du modèle se présente sous la forme (4.1) :

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (4.1)$$

Où :

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

R : facteur d'érosivité des pluies exprimé en MJ.mm/ha.h.an,

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

LS : facteur topographique indiquant la pente et la longueur de pente adimensionnel,

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

P : facteur adimensionnel relié aux pratiques de conservation des sols.

Les utilisations antérieures de RUSLE dans d'autres études ont donné des résultats acceptables par comparaison aux mesures réelles, on cite parmi eux quelques études qui ont été appliquées dans la région de Nord Afrique

- [Cheikha et Guedderi, 2008](#). Application au bassin versant du Jannet (Tunisie).
- [Tahiri et al, 2014](#). Application au Sous-Bassin de l'Oued Sania (Rif nord occidental, Maroc).
- [Markhi et al, 2015](#). Application au Bassin versant n'fis dans le haut atlas de marrakech (Maroc).
- [Mokhtar, 2017](#). Application au bassin versant de l'oued Cheliff- Ghrib (Algérie).
- [Bouguerra et al, 2017](#). Application au Bassin Bouhamdane (Nord-Est Algérie).

Pour cette étude, L'application de RUSLE dans le bassin versant de Bounamoussa a nécessité l'évaluation des différents facteurs de l'équation universelle sur l'ensemble du bassin, en les exprimant sous forme de cartes thématiques. L'intégration de ces cartes dans le Système d'Information Géographique SIG a été effectuée par numérisation. Toutes les couches des cartes ont été projetées en UTM zone 32N en utilisant le WGS 1984. Le croisement de ces dernières dans le modèle de Wischmeier et Smith (1978) pour identifier et quantifier le taux d'érosion moyen sur toute la zone d'étude ainsi que l'élaboration de la carte synthétique des pertes en sol a été établi selon l'organigramme méthodologique présenté par la figure (4.1).

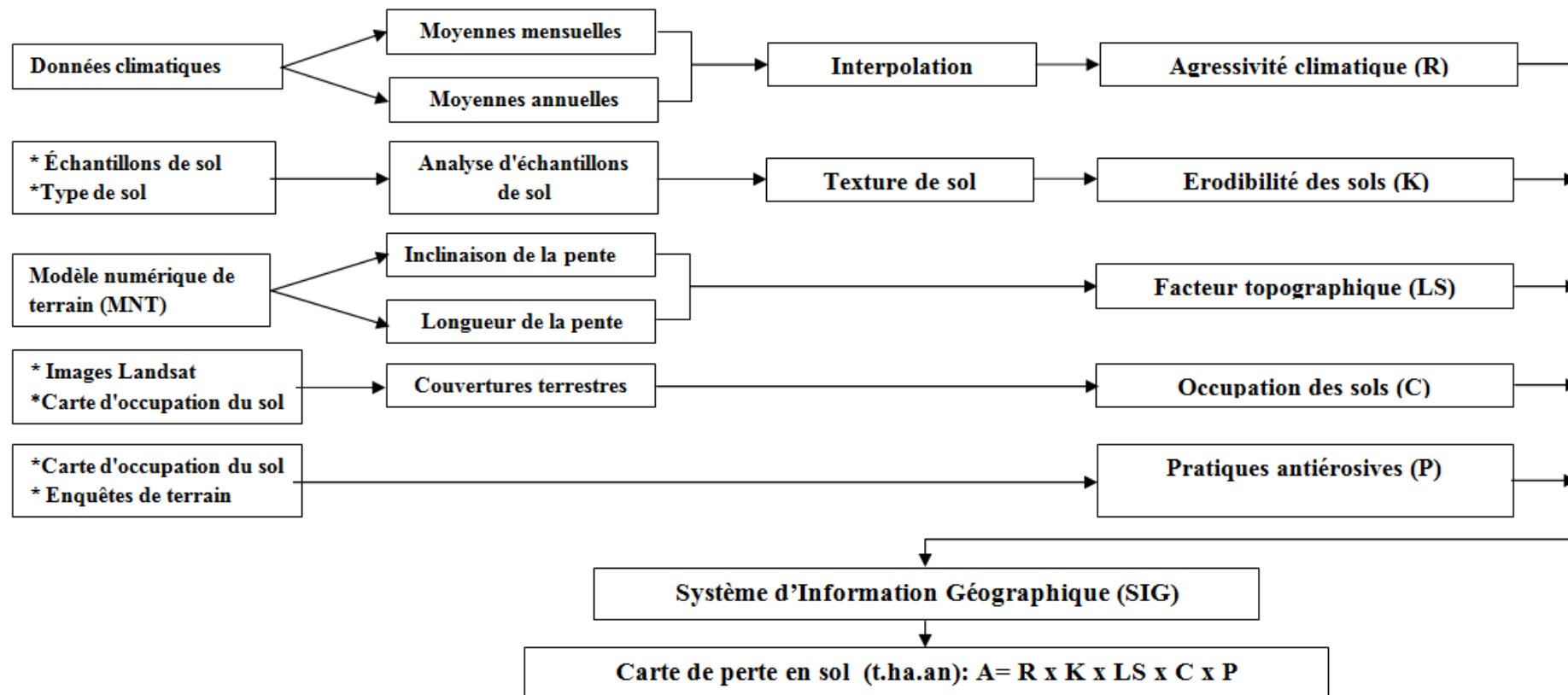


Figure 4.1. Schéma des procédures adoptées pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Bounamoussa

4.3. Détermination des paramètres d'érosion

4.3.1. Facteur d'érosivité des pluies (R) :

L'érosivité des pluies est un facteur climatique qui représente la force d'agressivité des pluies sur le sol (*Renard et al., 1997; Loureiro et Coutinho, 2001; Zhang et Fu, 2003*). Selon la formule de *Wischmeier et Smith (1978)*, l'intensité est celle qui accuse la plus forte corrélation à la quantité de sol érodé. L'estimation de ce facteur nécessite la détermination des énergies cinétiques E en (mm/h) et l'intensité moyenne sur 30 minutes (I_{30}) successives de pluie de chaque averse exprimée en ($J/m^2/mm$). Ils ont donc établi la relation suivante :

$$R = E \times I_{30} \quad (4.2)$$

Où :

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

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

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

L'énergie cinétique des pluies est donnée par la formule suivante :

$$E = 210 + 89 \log_{10} \cdot I \quad (4.3)$$

Où I = l'intensité de pluie.

Ces formules (Équation n° 4.2 et équation n° 4.3) proposées par *Wischmeier et Smith (1978)* comme indicateur d'érosivité restent difficilement applicables pour cette région d'étude où les intensités des ne sont pas disponibles dans les stations pluviométriques du bassin ou à sa proximité.

De nombreuses formules permettent cependant le calcul de R en fonction des précipitations annuelles ou de l'indice de Fournier (*Kalman, 1970 ; Roose, 1977 ; Arnoldus, 1980 ; Renard et Freimund, 1994*). Ces formules de substitution ont été appliquées dans différents travaux impliquant une modélisation USLE (*Morschel et Fox, 2004 ; Sadiki et al., 2004 ; El Gouarani et al., 2008*) et ont donné des résultats satisfaisants.

Les seules données disponibles dont la région d'étude, sont les pluies moyennes mensuelles et annuelles. Pour remédier à ce manque de données pluviométriques de la formule de *Wischmeier et Smith (1978)*, Un certain nombre d'auteurs (*kalman, 1967, Arnoldus, 1987, Rango&Arnoldus, 1987*) ont développé des formules alternatives qui se basent sur les données disponibles pour déterminer l'agressivité climatique.

Pour le bassin versant de Bounamoussa, nous avons opté pour l'utilisation de la formule (4.4) de Rango et Arnoldus (1987) pour le calcul du facteur d'agressivité climatique. Cette formule a été largement appliquée dans la région maghrébine et utilisée par plusieurs auteurs (*Sadiki et al. 2004 au Maroc, Toumi et al., 2013 en Algérie*), Ceci pour des raisons :

- les résultats encourageants obtenus par les auteurs précités ;
- la diversité des milieux algériens où cette formule a été appliquée ;

$$\text{Log R} = 1,74 \cdot \text{Log} \Sigma \left(\frac{P_i^2}{P} \right) + 1,29 \quad (4.4)$$

Où :

P_i : représente les précipitations mensuelles

P : les précipitations annuelles en mm.

P_i et P sont calculées en utilisant les données de 06 stations pluviométriques réparties dans la région d'étude et pour une période de 42 ans (1970-2012). Par la suite, les résultats ont été interpolés sur toute la superficie du bassin versant.

4.3.2. facteur d'érodibilité du sol (K) :

Ce facteur traduit l'influence de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique et dépend de la résistance inhérente au détachement et au transport des particules véhiculées par l'eau, générés par la force des précipitations, et qui dépend aussi de ses propriétés intrinsèques à savoir sa texture, sa structure et sa perméabilité (*Roose et Sarrailh, 1990*). Le facteur K est fonction de la texture, la teneur du sol en matière organique et la perméabilité du sol. Ces éléments n'étant disponibles pour l'ensemble du bassin versant de Bounamoussa. La méthode de Wischmeier et Smith proposée en 1978 (Équation n° 4.5) n'a pu être appliquée dans le cadre de cette étude.

$$K = 2,1 \cdot M^{1,14} \cdot 10^{-6} (12 - MO) + 0,0325 \cdot (b - 2) + 0,025 \cdot (c - 3) \quad (4.5)$$

Où

M = (% sable fin + limon) * (100 - % argile)

MO = Matière organique

b = Indice de structure du sol

c = Perméabilité du sol

Le facteur K a donc été calculé à l'aide du triangle de texture (*Brown, 2003*) et du tableau de correspondance de Stone et Hilborn (tableau, 4.1) permettant ainsi de déduire à partir de la texture les valeurs d'érodibilité des sols. Les pourcentages d'argile, de limon, de sable et de matière organique de chaque type de sol ont été déterminées par des analyses granulométriques effectuées sur 13 échantillons de sol prélevés entre 0 et 25 cm de profondeur et répartis sur toute la superficie du bassin. Chaque type de sol est concerné par 2 ou 3 échantillons. Les valeurs obtenues ont été généralisées aux classes de même type. Ces valeurs ont permis le calcul du facteur K à l'aide du triangle de texture de l'United States Department of Agriculture l'USDA (*Brown, 2003*) et du tableau de correspondance de Stone et Hilborn (2000).

Ces valeurs sont données en tonne/acres (Système US), et nécessitent d'être converties dans le système international par la multiplication de K par un facteur correctif de 0,1317.

Tableau 4.1. Variation de l'érodibilité du sol (K) en fonction du type de sol (*Stone et Hilborn, 2000*).

Classe texturale	Facteur K (tonne/acres)	Facteur K (t.ha.h/ha.MJ.mm)
Argile	0.22	0.02897
Loam argileux	0.3	0.03951
Loam sableux gossier	0.07	0.00922
Sable fin	0.08	0.01054
Loam sableux fin	0.18	0.02371
Argile lourde	0.17	0.02239
Loam	0.3	0.03951
Sable fin loameux	0.11	0.01449
Sable loameux	0.04	0.00527
Sable très fin loameux	0.39	0.05136
Sable	0.02	0.00263
Terre franche argileuse	0.2	0.02634
Loam sableux	0.13	0.01712
Loam limoneux	0.38	0.05005
Agile limoneuse	0.26	0.03424
Loam limono-argileux	0.32	0.04214
Sable très fin	0.43	0.05663
Loam sableux très fin	0.35	0.04610

4.3.3. facteur topographique (LS) :

Ce facteur représente l'effet de la topographie sur les pertes en sol en raison de la longueur de la pente (L) et de son inclinaison (S) (McCool *et al*, 1987). Ces paramètres influencent considérablement l'érosion des sols (Roose, 1994) et sont le plus souvent combinés en un facteur unique adimensionnel (LS).

La longueur de pente conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules croît en fonction de la longueur de la parcelle, plus la longueur de la parcelle est grande, plus la vitesse augmente (McCool *et al*, 1989). De même, les transports solides croissent de façon exponentielle avec le pourcentage de pente (Zingg, 1940; Hudson, 1973; Roose, 1994). Les particules d'eau qui ruissellent emmagasinent donc une énergie plus importante qui se traduit par la création et le creusement de rigoles (Printemps, 2007).

De nombreuses formules ont été proposées, mais elles ne sont pas applicables de manière universelle. De plus, tout comme pour l'inclinaison de la pente, il faut prendre en compte le type d'érosion pour pouvoir déterminer quelle est l'influence de la longueur de la parcelle (Fig. 4.2) (Printemps, 2007).

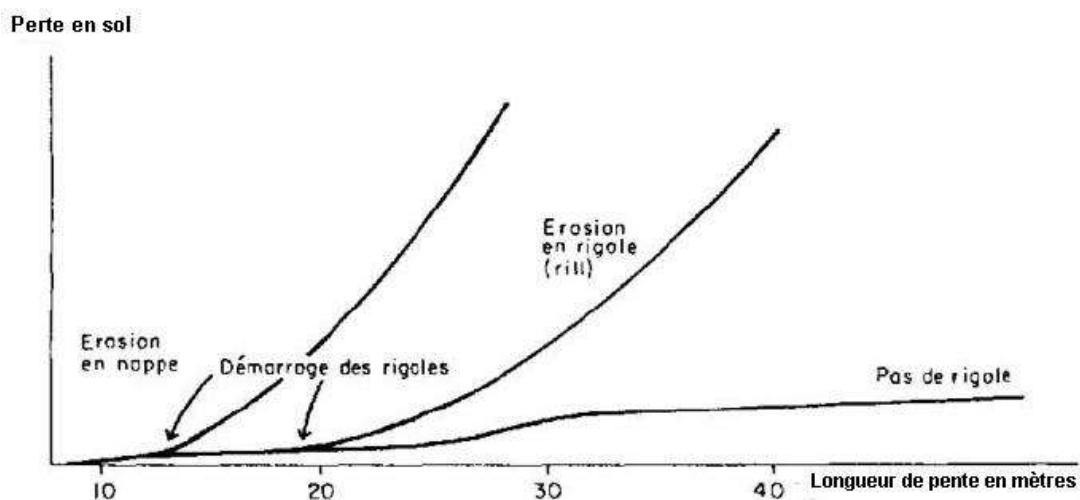


Figure 4.2. Perte en terre en fonction de la longueur de la pente et du type d'érosion (*d'après Roose, 1994*)

Le facteur (LS) peut être calculé selon l'équation de Wischmeier, établie pour des parcelles expérimentales de 22,1 m et 9 % de pente. Elle constitue l'équation de référence (Équation n° 4.6) la plus usitée permettant de définir le facteur LS et se définit par :

$$LS = \left(\frac{L}{22.13} \right) m \cdot (0,065 + 0,045 \cdot S + 0,065 \cdot S^2) \quad (4.6)$$

Où :

L : longueur de la pente;

m : exposant établi en fonction de la pente (tableau 4.2).

Tableau 4.2. Variation de m en fonction de la pente

Pente (%)	$P < 1$	$1 \leq P \leq 3$	$3 \leq P \leq 5$	$P \geq 5$
m	0.2	0.3	0.4	0.5

S : inclinaison de la pente (%), ce facteur (S) est estimé par deux régressions données par (*Mc Cool et al. 1995 ; Renard et al. 1991*) :

$S = 10.8 \cdot \sin \theta + 0.03$ si la pente est inférieure à 9%.

$S = 16.8 \cdot \sin \theta - 0.50$ si la pente est supérieur ou égale à 9%.

θ : Angle par rapport à l'horizontale

Pour le cas de notre étude, le calcul et la spatialisation du facteur (LS) a nécessité l'établissement de la carte des pentes et la carte des flux par l'utilisation d'un modèle numérique de terrain (MNT) obtenu à partir du satellite Aster (résolution 30 m) avec plusieurs prétraitements (SIG). Le facteur (LS) a été par la suite calculé pour chaque parcelle à partir de son inclinaison (S en %) et de sa longueur (L en m) selon l'expression de l'équation (4.6).

4.3.4. Facteur d'exploitation du couvert

C'est le facteur le plus important de la protection du sol contre le risque érosif. Les pertes en sol diminuent avec l'augmentation du couvert végétal (*Soutter et al, 2007*). Ce facteur est le plus complexe à déterminer, sa variation repose essentiellement sur le type d'assolement, de rotation, la nature, la densité et le stade végétatif des cultures (*Souadi, 2011*).

Le type de couvert végétal est à prendre absolument en compte puisque c'est de lui que va dépendre l'amortissement des gouttes de pluies, le ralentissement de l'écoulement et l'infiltration (*Roose, 1994*). Le facteur C dépend :

- du pourcentage de sol nu, l'érosion intervenant majoritairement sur des sols nus lors d'épisodes pluvieux agressifs ;
- de la hauteur du couvert végétal, il est intéressant d'avoir un couvert végétal, mais si celui-ci est trop élevé, l'amortissement des gouttes de pluies n'interviendra plus. En

effet, après une première interception, les gouttes seront de nouveau rejetées vers le sol ;

- de l'architecture des plantes, des plantes en forme d'entonnoir auront tendance à drainer l'écoulement et à provoquer des ravinements. A l'inverse, les plantes dites "parapluie" vont disperser les gouttes d'eau et donc diminuer leur énergie.

La valeur de C varie de près de zéro pour les sols bien protégés à 1 pour les surfaces striées très sensibles à l'érosion en rigoles (Angima et al, 2003). Il peut être calculé à l'aide de nomogrammes proposés par Roose en 1994, ce graphe est établi en fonction du pourcentage de couverture du sol et de la hauteur de la végétation (Fig.4.3) ou estimé en prenant des valeurs connues pour un certain type de végétation ou de culture (Tableau 4.3).

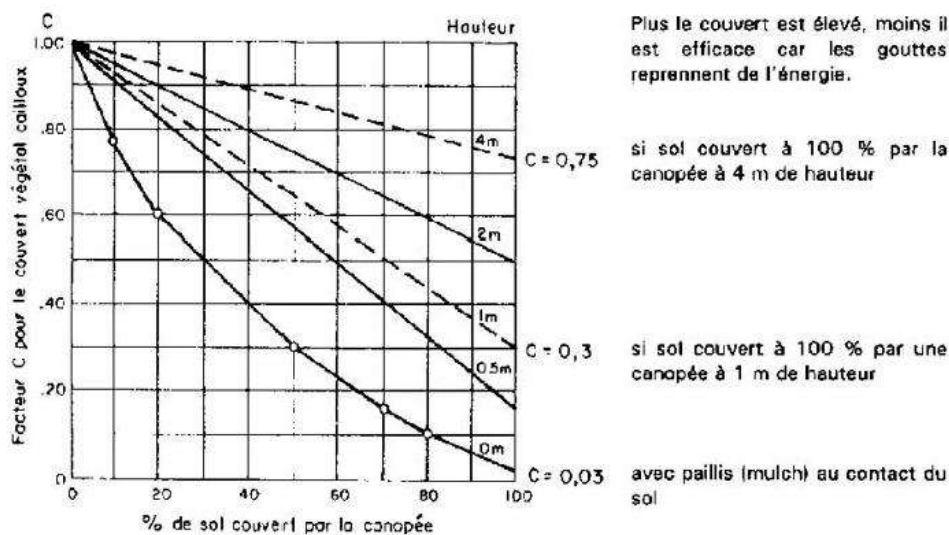


Figure 4.3. Valeur du facteur du couvert végétal (Roose, 1994)

Plusieurs effets du type de couverture végétale et du type de culture sont présentés par WISCHMEIER et SMITH (1965) sous la forme de tableaux.

Tableau 4.3. la valeur de (C) pour différentes cultures et pratiques.

COUVERTURE VÉGÉTALE ET UTILISATION DE LA TERRE	VALEUR DE "C"
Forêt dense	0.003 - 0.01
Forêt éclaircie avec sous strate herbacé dense	0.003 - 0.01
Forêt éclaircie avec sous strate herbacée dégradée	0.01 - 0.1
Buisson dense	0.003 - 0.03
Buisson clair avec substrat herbacé dense	0.003 - 0.03
Buisson clair avec substrat herbacé dégradé (ouvert)	0.03 - 0.10
Étendue désertique	0.003 - 0.04
Pâturage naturel complet	0.03 - 0.01
Pâturage naturel (nourriture pour animaux)	0.04 - 0.20
Pâturage cultivé (géré)	0.003 - 0.04
Terrains dépourvus de végétation	0.9 - 1.0

Cultures annuelles de cycle court (1-6 mois)	0.3 - 0.8
Cultures annuelles de cycle long (6 mois)	0.4 - 0.9
Cultures permanentes associées (denses)	0.01 - 0.3
Cultures permanentes non denses	0.1 - 0.45
Jardins de subsistance	0.3 - 0.9
Zones urbaines	0.003 - 0.01
Lagons et barrages	0

Wischmeier y Smith (1978) ; Roose (1977) ; Singh, Babu y Chandra (1981) ; El-Swaify, Dangler y Armstrong (1976); Hurni (1987); Hashim y Wong (1988).

Autre Tableau avec valeurs du facteur "C", ou sont montrées les variations de 0.058 dans un reboisement dense à 1.0 dans un sol nu selon *Sadiki en 2004*.

Tableau 4.4. Valeur de C pour différents types de couvert végétal (*Sadiki et al., 2004*)

Type de couvert végétal	C
reboisement dense	0.058
Forêt moyennement dense	0,13
matorral dégradé, parcours dense	0,17
reboisement clair	0,18
matorral clair, parcours dense,	0,20
Matorral très dégradé	0,22
steppes à alfa	0,32
céréaliculture	0,70
Terrain nu	1

La détermination de ce facteur pour le bassin versant de Bounamoussa a été établie à partir de la carte d'occupation du sol, la réalisation de cette carte s'est faite en se basant sur l'interprétation d'images satellites Landsat-8 acquise en 2005, qui a été traitée, classée et validée à partir des données issues de travaux réalisés dans la Wilaya d'El-Taref, ces travaux comportent plusieurs cartes thématiques, notamment les cartes des formations forestières, des parcours et des terres agricoles de la région.

En l'absence d'information sur le pourcentage de sols recouvert par la canopée et de la hauteur des différents types de couvert végétal, le facteur C n'a pu être calculé à partir du graphique linéaire proposé par *Roose en 1994*. Le facteur C a été attribué aux différents types d'utilisation de sols en se référant aux tableaux de *Wischmeier et Smith (1978)* qui donnent des valeurs préétablies pour les forêts, les matorrals et les pâturages aux Etats-Unis, ainsi que pour des cas étudiés en Tunisie par *Cormary et Masson (1963)* concernant les types de cultures et les rotations culturales.

4.3.5. Facteur de pratique anti-érosive

Le facteur (P), adimensionnel, reflète la protection du sol par les pratiques agricoles qui réduisent la quantité et la vitesse d'eau de ruissellement, diminuant ainsi les effets de l'érosion hydrique (Payet, 2011). Il prend en compte les techniques de conservation des sols adoptées : tels que les cultures en courbe de niveau, en bandes alternées ou en terrasse, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage naturel ou artificiel (Roose, 1994).

Le tableau 4.5 ci-dessous donne quelques exemples de valeurs du facteur P par type de pratique anti-érosive.

Tableau 4.5. Valeurs du facteur P (Wischmeier & Smith, 1978)

Type de pratique anti-érosive	Pente	Longueur maximale	Facteur P
Culture en courbe de niveau	1 à 8%	61 à 122 m	0.5
Culture en courbe de niveau	9 à 12%	36 m	0.6
Culture en courbe de niveau	13 à 16%	24 m	0.7
Culture en courbe de niveau	17 à 20%	18 m	0.8
Culture en courbe de niveau	21 à 25%	15 m	0.9
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées	1 à 8%	30 à 40 m	0.25 à 0.5
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées	9 à 16%	24 m	0.3 à 0.6
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées	17 à 25%	15 m	0.4 à 0.9

Dans le modèle RUSLE, l'érosion potentielle est donc le résultat du produit de cinq facteurs : l'érosivité des pluies, l'érodibilité du sol (amélioration de la structure des sols), la topographique (longueur et l'inclinaison de la pente), l'occupation du sol (amélioration du couvert végétal) et les pratique anti-érosive (aménagement des travaux). La modélisation est par la suite mise en œuvre par le croisement des cartes thématiques entre elles. La combinaison des couches s'appuie sur des règles arithmétiques et des opérateurs booléens afin de produire une nouvelle valeur dans la couche composite, ici représentative pour chaque pixel des pertes de sols (A) (Payet, 2011).

4.4. Résultats et discussion

Les résultats présentés détaillent d'une part le calcul et la spatialisation des différents facteurs de l'équation RUSLE (R, K, LS, C, P) et d'autre part la spatialisation et l'estimation des pertes de sols potentiellement émises (A) sur le bassin versant de Bounamoussa. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude permettent de mettre en évidence le potentiel érosif du bassin versant de Bounamoussa. Ils permettent une évaluation des pertes de sols

moyenne annuelle potentiellement fournie pour chaque parcelle du bassin versant selon la modélisation RUSLE.

4.4.1. Calcul du facteur d'érosivité des précipitations (R)

Les données sur les précipitations fournies par les stations pluviométriques relevant de l'Agence Nationale des ressources Hydrauliques de Annaba (ANRH), et l'Agence Nationale des Barrages et transfert de Cheffia (ANBT), sont des moyennes mensuelles et annuelles. Elles comportent des lacunes sur quelques mois, pour cela nous avons procédé à des corrélations entre stations voisines pour combler ces lacunes (voir chapitre 03).

Les précipitations moyennes mensuelles montrent un régime pluviométrique irrégulier. La période pluvieuse s'étend entre les mois de septembre jusqu'au mois de mars avec une moyenne annuelle de 730 mm.

A partir des données pluviométriques relevées dans le bassin, nous avons déterminé le facteur d'érosivité R pour chaque station par l'application des relations de FOURNIER et celle d'ARNOLDUS, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (4.6).

Tableau 4.6. Les résultats du facteur R pour six stations

STATION	Élévation [m]	Pluie annuelle [mm]	Facteur R [$\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$]
MECHROHA	750	1133.8	238.5
AIN EL KARMA	280	719.4	171.2
ASFOUR	16	599.7	149.9
CHEFFIA	170	809.5	184.6
BOUHADJAR	300	617.8	150.8
AIN SEYNOUR	792	990.5	219.1

Ont été interpolées les valeurs obtenues du facteur R sur l'ensemble du bassin versant à l'aide de la méthode Krigeage Ordinaire dans le SIG.

La mesure de la quantité annuelle totale et la répartition spatiale de pluie érosive aux stations, montre que le bassin versant de Bounamoussa est soumis à une agressivité pluviale. La carte de spatialisation du facteur R (Fig.4.4) montre un étagement croissant des valeurs avec la topographie. Les valeurs du facteur R varient entre 153 et 207, avec une moyenne établie à 170. Les valeurs R les plus faibles ont été enregistrées dans la partie centrale du bassin versant et les plus élevées ont été enregistrées dans la partie sud-ouest. Selon la figure (4.5), plus de 80% de la zone d'étude est soumise à une agressivité climatique élevée, elle présente des valeurs de facteur

R supérieures à 160. Ces résultats permettent de déduire que le bassin est soumis à une érosion pluviale importante.

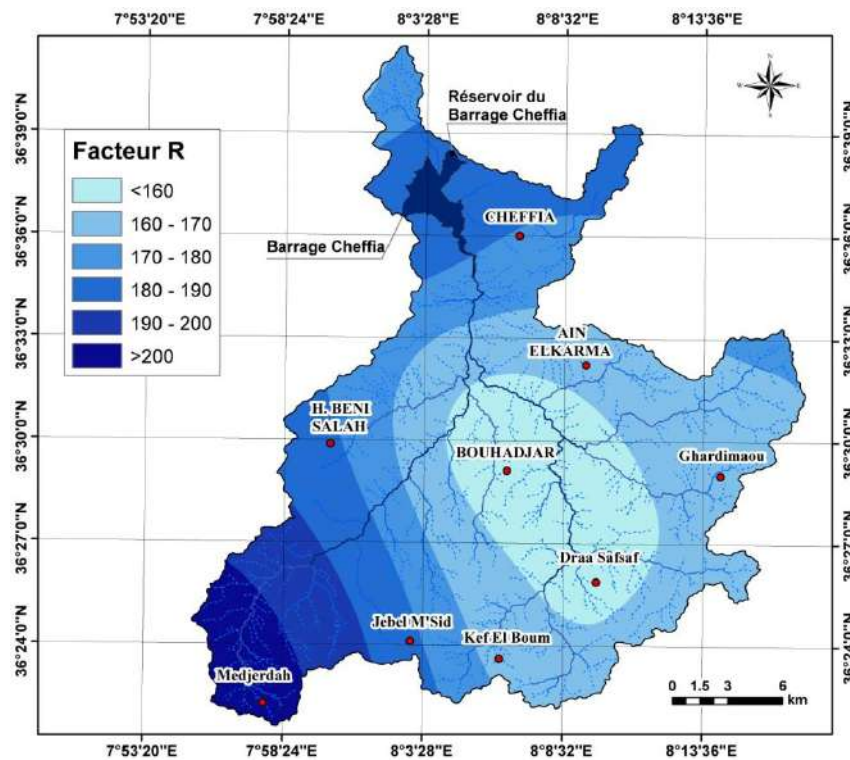


Figure 4.4. Variation spatiale du facteur d'érosivité de pluie R en ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$)

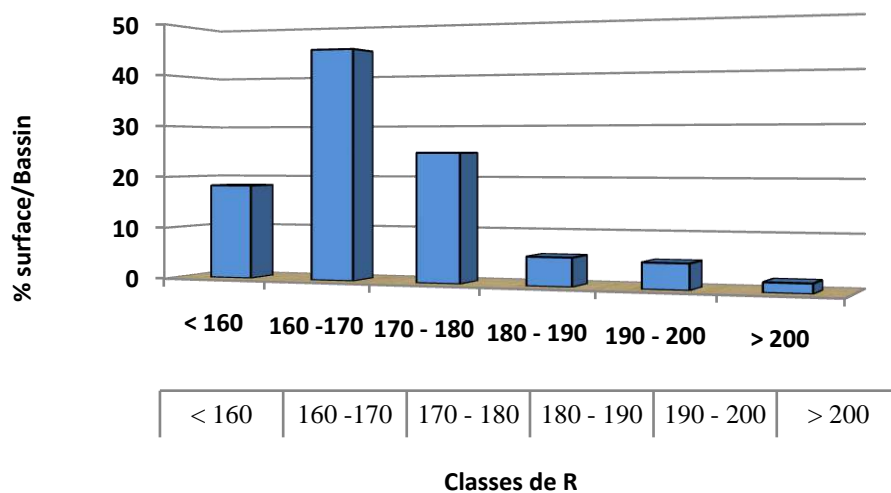


Figure 4.5. Distribution des classes du facteur R dans le bassin versant Bounamoussa

4.4.2. Facteur d'érodibilité du sol (K)

Pour déterminer le facteur K dans le bassin versant, l'échantillonnage a été effectué en surface des différentes formations pédologiques affleurant dans le bassin versant. En s'appuyant sur la carte pédologique de la région d'étude, nous avons prélevé plusieurs

échantillons correspondant à plusieurs affleurements de la même classe du sol et en prenant 2 à 3 échantillons pour chaque type de sol. Les valeurs obtenues ont été généralisées aux classes de même type. Nous avons attribué pour chaque classe de sol la moyenne des valeurs de K trouvée.

4.4.2.1. Détermination des caractéristiques physiques des sols

A partir de résultats d'analyses de sol, il fut possible de déterminer les pourcentages moyens d'argile, de limon, de sable et de matière organique de chaque type de sol (Tableau 4.7).

Tableau 4.7. Caractéristiques physiques des sols

TYPE DE SOL	% Argile	% Sable	% Limon	% MO
Sols Alluviaux	38	10.4	51.6	4.9
sols Calcaires	20	25.5	54.5	2.1
Sols podzoliques	21.2	43.8	35	5.2
Sols Rendzines	33	17	50	0.4
Vertisols	50.7	21.9	27.4	3.3

4.4.2.2. Détermination de la texture des sols

A partir de ces informations, il est possible de déterminer la texture de chaque grand type de sol en utilisant le triangle des textures USDA (*Brown, 2003*) (Fig.4.6). Pour cela, il suffit de reporter les pourcentages d'argile, de sable et de limon dans le triangle.

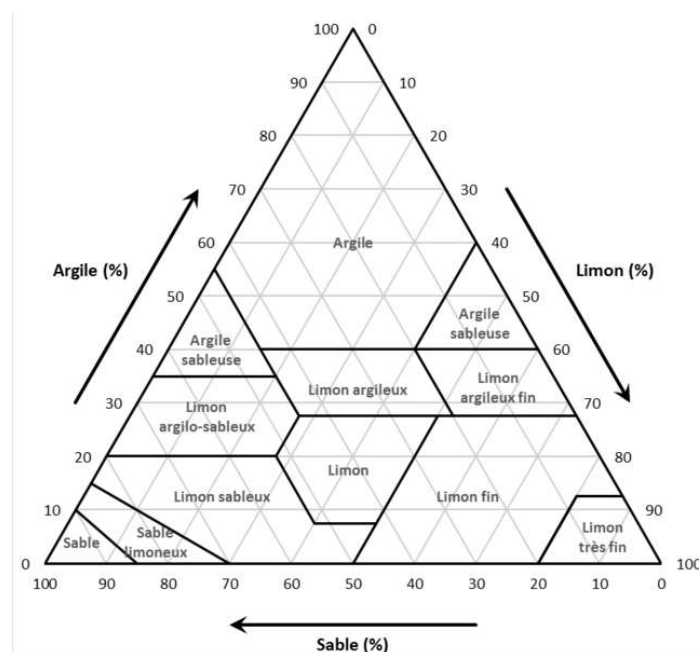


Figure 4.6. Le triangle des textures de sols USDA (United States Department of Agriculture)

Cette opération effectuée, il est alors possible d'obtenir le facteur K pour un sol en utilisant le tableau établissant la correspondance entre les textures standards et le facteur K (*Stone and Hillborn, 2002*). Le tableau 4.8 synthétise les valeurs du facteur K pour chaque type de sol. La valeur zéro a été attribuée aux zones d'eau.

Tableau 4.8. Détermination du facteur K pour chaque type de sol de la zone d'étude

Type de sol	Classification USDA	Facteur k (t.ha.h/ha.MJ.mm)	Superficie(%)
Sols Alluviaux	Loam limono-argileux	0.0421	13.21
sols Calcaires	Loam limoneux	0.05	8.82
Sols podzoliques	Loam	0.0395	46.92
Sols Rendzines	Loam limono-argileux	0.0421	9.34
Vertisols	Argile	0.0289	21.72

La carte pédologique et de répartition du facteur K montrent que les valeurs de l'érodibilité diffèrent selon le type du sol (Tab. 4.8). A l'échelle du bassin versant de Bounamoussa, le facteur K varie de 0.028 t.ha.h/ha.MJ.mm pour les sols les plus résistants à 0.05 t.ha.h/ha.MJ.mm pour les sols les plus érodables (fig. 4.7). La figure qui suit présente la répartition de la superficie totale du bassin selon l'érodibilité des sols ainsi que les pourcentages correspondants.

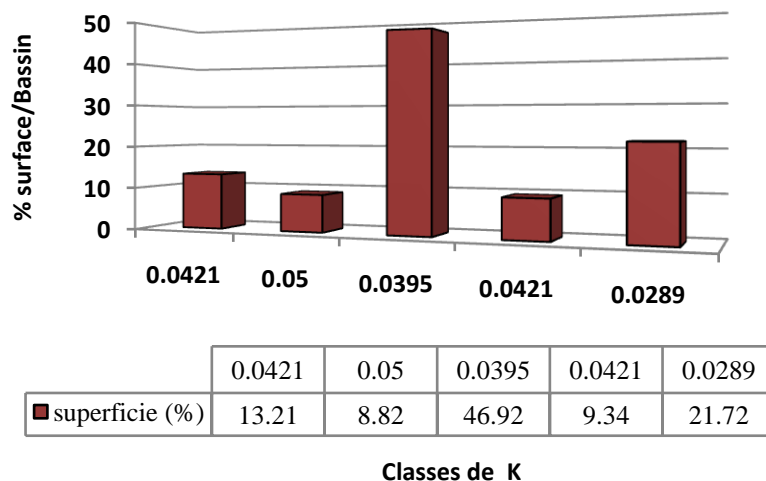


Figure 4.7. Distribution des classes du facteur k dans le bassin versant de Bounamoussa

Selon la classification de la résistance des sols à l'érosion par *BOLLINNE et ROSSEAU (1978)* basée sur le facteur K (Tableau 4.9), Les sols de la zone d'étude sont considérés comme des sols moyennement sensibles à l'érosion avec une valeur moyenne de 0,038

t.ha.h/ha.MJ.mm. Les Vertisols ont la plus faible érodibilité (0,028), alors que les sols les plus érodables sont les sols calcaires (0.05).

Tableau 4.9. Classification de la résistance des sols à l'érosion selon *Bollinne et Rosseau (1978)*

Type de sol	Facteur K (ton.acre.hr/hundreds of acre.ft.tons.in)	Facteur K (t.ha.h/ha.MJ.mm)
Sols très résistants à l'érosion.	$K < 0,10$	$K < 0,0132$
Sols assez résistants à l'érosion.	0,10 – 0,25	0,0132 – 0,0329
Sols moyennement sensibles à l'érosion	0,25 – 0,35	0,0329– 0,0461
Sols assez sensibles à l'érosion.	0,35 – 0,45	0,0461 – 0,0593
Sols très sensibles à l'érosion.	$> 0,45$	$> 0,0593$

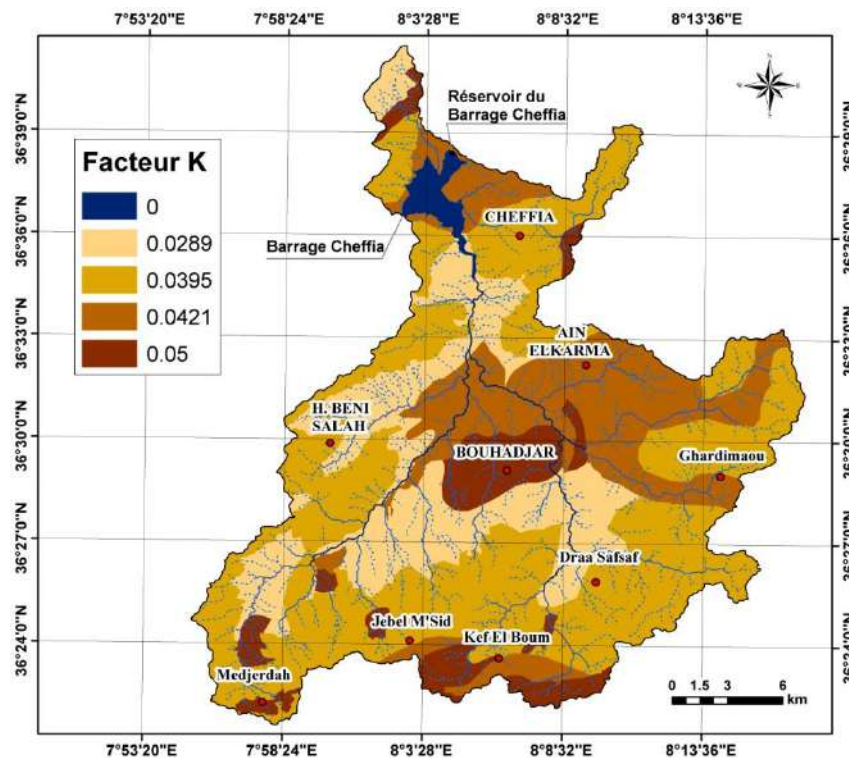


Figure 4.8. Répartition spatiale du facteur d'érodibilité du sol K en (t.ha.h/ha.MJ.mm).

4.4.3. facteur topographique (LS) :

La morphologie du terrain est la source de données la plus riche concernant les processus d'érosion des sols. Pour prendre en compte ce paramètre, l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est indispensable pour pouvoir intégrer les formes des bassins versants (*Guermond, 2005*). Pour la zone d'étude, le facteur LS a été calculé à partir du MNT, ces données sont disponibles sur le web (<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>) et sont acquises par interférométrie radar en 2000, elles se présentent sous

forme de raster (*Geo TIFF Tagged Image Files Format*) renseignant pour chaque pixel de 30 mètres l'altimétrie (Z).

A partir du MNT, il est possible d'obtenir la carte de degré de la pente, l'orientation et la longueur cumulative de la pente. La pente a une grande influence puisqu'elle fournit son énergie érosive à l'eau. Ce paramètre est certainement le plus important concernant les processus d'érosion, à cause de son action gravitaire et de son impact sur les matériaux détritiques (*Dumas, 2004*).

- **Calcul du facteur LS**

Le facteur LS est le produit de deux sous facteurs : la longueur de la pente (L) et l'inclinaison de la pente (S). Ils sont calculés à partir du Modèle Numérique du Terrain (MNT). Il existe plusieurs façons de calculer le facteur LS, notamment en utilisant des approximations dans le SIG à partir de la carte d'accumulation des flux.

Plusieurs étapes, utilisant les fonctions d'analyse spatiale en mode raster sous SIG, ont par la suite été menées.

- La première est la création d'un raster de direction des écoulements à partir de chaque cellule vers sa voisine de plus faible altitude.
- La détermination de la direction des flux du réseau hydrographique théorique permet ensuite de calculer la longueur de pente, tout d'abord pour une cellule et ensuite, pour toutes les cellules.
- La seconde étape consiste à calculer les pentes en degrés pour chaque cellule. En fonction de la pente, la valeur de l'exposant m varie (Tableau 4.2).
- La dernière étape consiste à croiser les calculs de L et S (voir équations 4.6), le résultat final est ensuite divisé par 100.
- Enfin, on détermine le facteur LS.

L'organigramme de la figure 4.9 récapitule les étapes du calcul de facteur LS sous SIG.

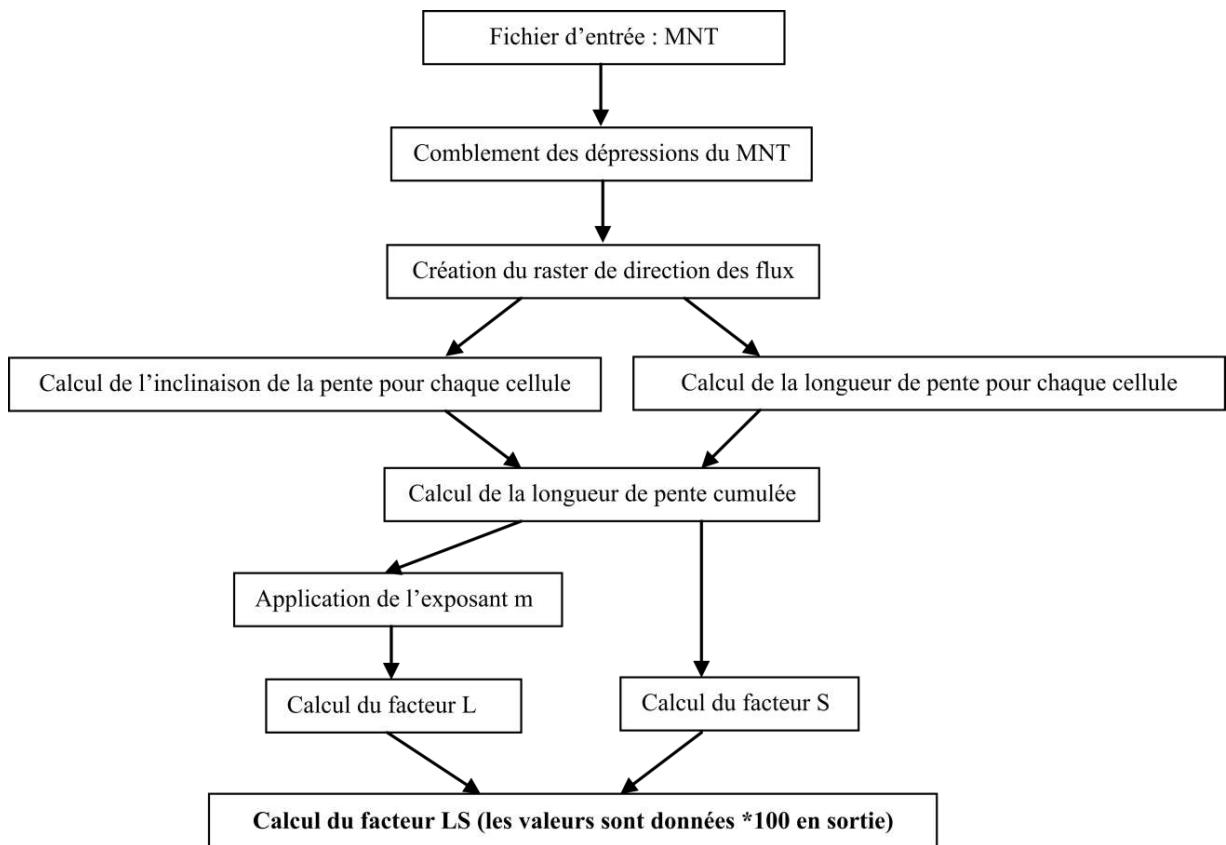


Figure 4.9. L'organigramme des étapes de calcul de LS (*Van Remortel, 2003*)

Le modèle RUSLE a donné des valeurs de LS variant entre 0 à 15.51 avec une moyenne de 3,5. Les zones à fortes de LS correspondent à la partie montagneuse de haute vallée et aussi aux pentes les plus abruptes des affluents de l'oued Bounamoussa, soumis à un grand risque d'érosion de l'aval vers l'amont. Les faibles valeurs $LS < 5$ (fig. 4.10) couvrent la partie centrale du bassin ainsi que le lit du cours d'eau, généralement situé dans les zones à faible altitude.

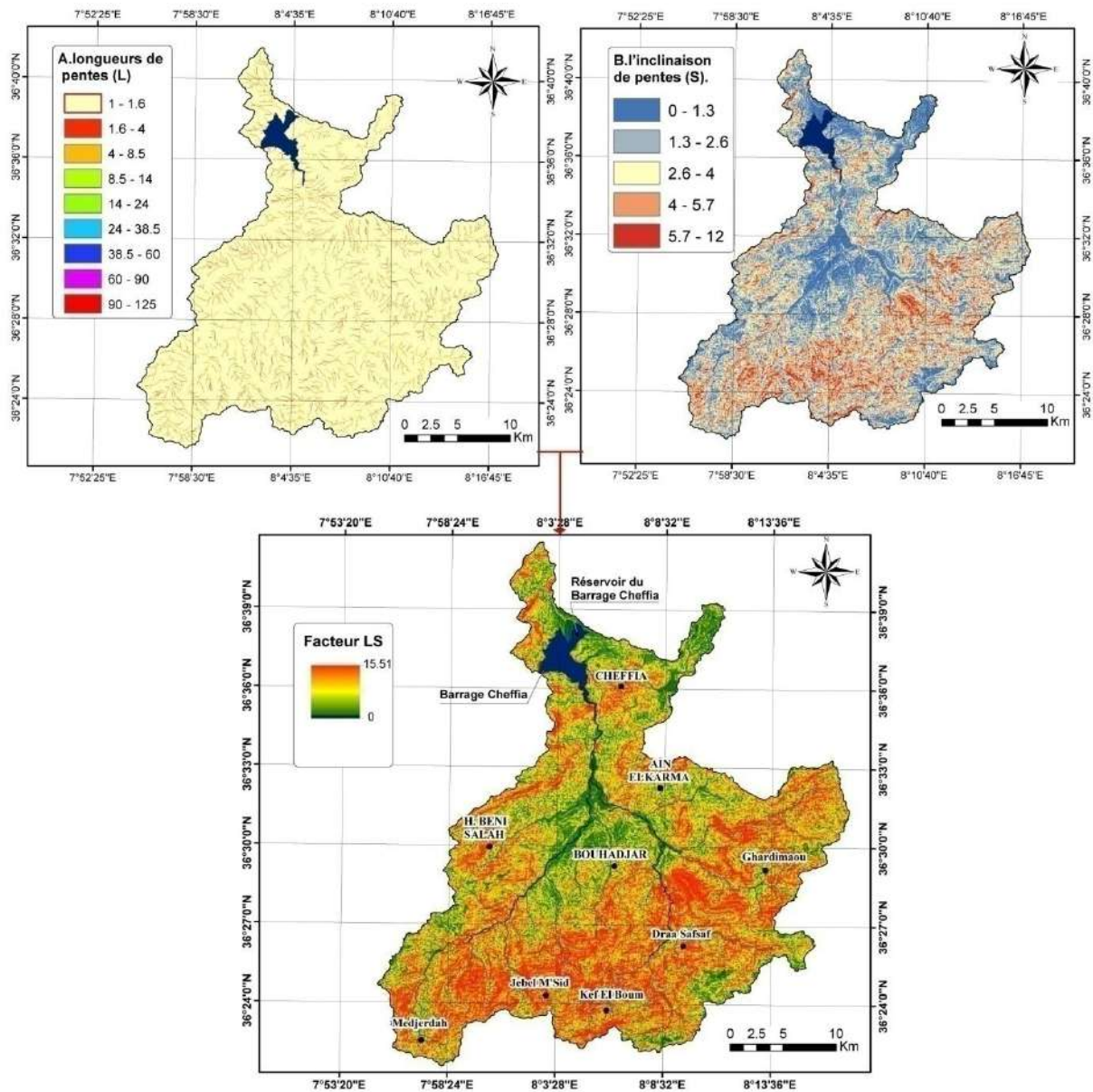


Figure 4.10. Carte du facteur LS obtenue par superposition de la carte des longueurs de pentes (A) et celle de l'inclinaison des pentes (B) par le SIG

4.4.4. Les valeurs du facteur de la couverture végétale (C)

L'occupation du sol dans le bassin versant de Bounamousa a été analysée en se basant sur l'interprétation d'image satellitaire Landsat-8 acquise en 2005, traitée et validée par des données de terrain (*TAD CONSULT, 2005*). La carte d'occupation des sols obtenue (fig.4.11) a été intégrée au système d'information géographique (SIG).

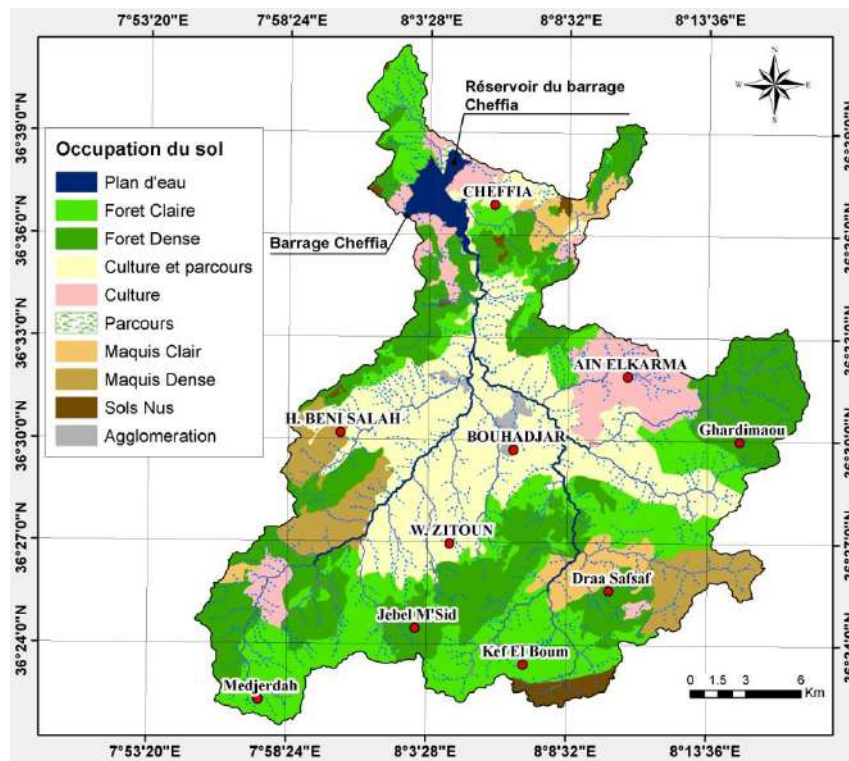


Figure 4.11. Carte de la classification de l'occupation du sol dans la région d'étude

La détermination du facteur C dépend de la couverture de la surface du sol par la végétation et de la hauteur des strates végétales. Dans la base de données qui lui a été affectée, on a introduit les valeurs du facteur C correspondant à chaque utilisation du sol que nous avons déterminé à partir des tableaux de *Wischnmeier et Smith (1978)* et de *Cormary et Masson (1963)*, il est compris entre 0 et 1 à chaque type de couverture végétale sur la zone d'étude. Le tableau (4.10) et la figure (4.12) montrent la distribution du couvert végétal et des valeurs du facteur C dans le bassin versant de Bounamoussa.

Tableau 4.10. Distribution du facteur C dans le bassin versant de Bounamoussa

Type de végétation	Facteur C	Superficie Km ²	Superficie %
Plan d'eau	0.00	7.69	1.34
Foret Claire	0.15	142.57	24.74
Foret Dense	0.12	154.41	26.8
Culture et parcours	0.60	149.4	25.93
culture	0.70	45.62	7.92
Parcours	0.55	1.45	0.25
Maquis Clair	0.25	22.49	3.9
Maquis Dense	0.20	38.45	6.67
Sols Nus	1.00	8.43	1.46
Agglomération	0.10	4.5	0.78

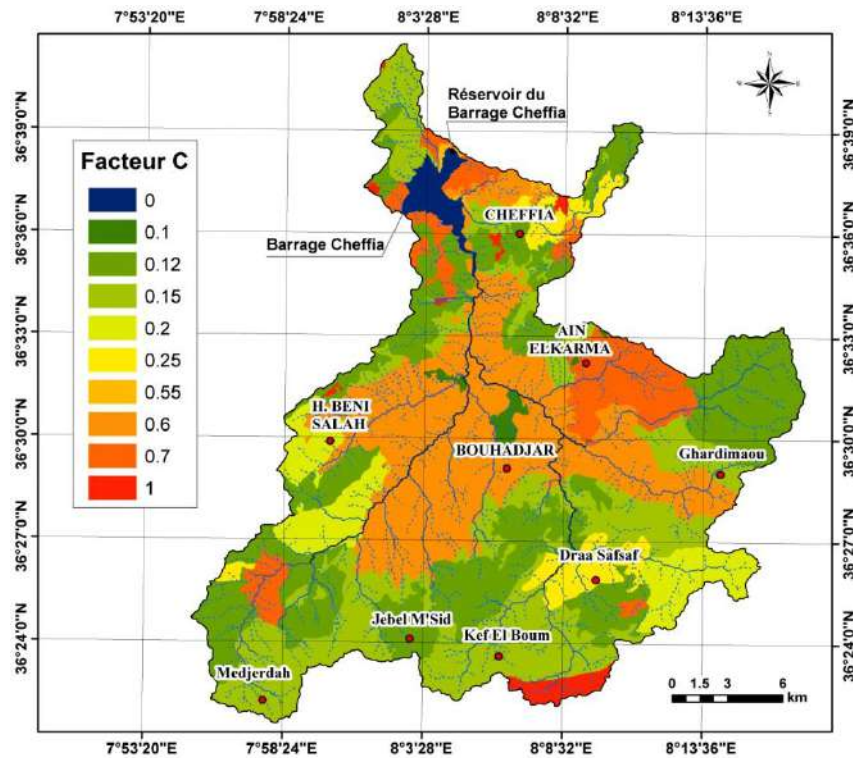


Figure 4.12. Répartition spatiale du facteur du couvert végétal C.

Pour simplifier la lecture des résultats, la représentation graphique ainsi que pour la confrontation du facteur C avec les autres facteurs, nous avons réparti les valeurs de C en cinq classes (Tableau 4.11 et Figure 4.13).

Tableau 4.11. Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant de Bounamoussa

Classes du facteur C	Surfaces ha	% surface
$\leq 0,1$	167.80	29.12
0.1 - 0.2	181.02	31.42
0.2 - 0.3	22.48	3.90
0.3 - 0.65	150.84	26.18
0.65 - 1	54.04	9.38

La répartition du facteur C (Fig. 4.13) montre que la sensibilité des différents types d'occupation de sol vis-à-vis des processus érosifs, se situe entre 0.10 et 1. Les zones à forte végétation sont associées aux valeurs les plus faibles ($C < 0,2$), elles permettent une meilleure protection des sols et correspondent aux formations forestières où l'anthropisation est faible. Les valeurs les plus élevées ($C > 0,2$) correspondent à des sols présentant une plus grande sensibilité à l'érosion. 60 % de la superficie du bassin correspond à des sols relativement protégés alors que le reste, soit 40 % sont faiblement protégés.

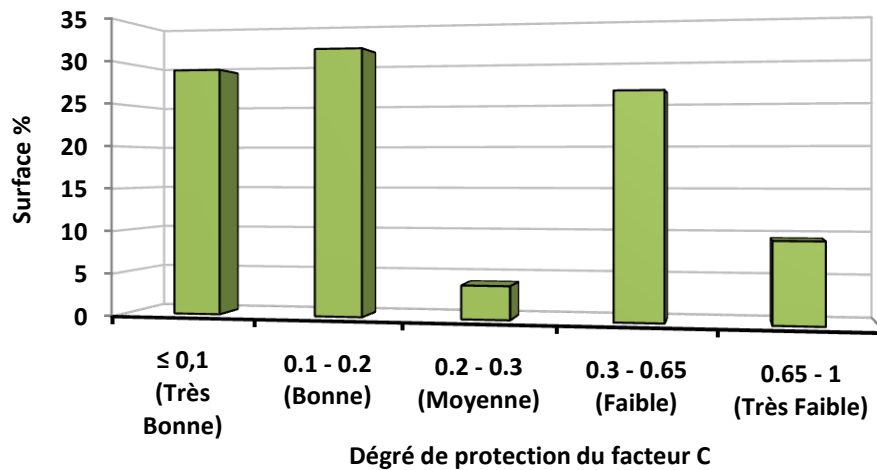


Figure 4.13. Distribution des classes du facteur C dans le bassin versant de Bounamoussa.

4.4.5. La valeur du facteur de pratique anti-érosive (P)

Les pratiques les plus efficaces de conservation de sols sont les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage. Il varie entre 1 pour les terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée, à 0.1 environ, lorsque sur une pente faible, on pratique le billonnage cloisonné (Roose, 1996).

Dans la zone d'étude, il n'y a pas d'aménagements anti-érosifs, les agriculteurs n'utilisent pas de pratiques culturales anti-érosives, En effet, Les cultures sont surtout céréalières et les labours sont rarement parallèles aux courbes de niveaux. Faute de renseignement sur les pratiques de conservation du sol, nous avons attribué la valeur $P = 1$ à toute la superficie du bassin. De ce fait, on considère comme nulles les pratiques anti-érosives et ce facteur n'aura pas d'impact sur le produit final.

4.4.6. Evaluation des pertes en sol dans le bassin versant

A partir de différentes opérations d'analyse multicritères effectuées avec le SIG, nous avons établi et mis en relation les paramètres et facteurs qui interviennent dans le phénomène d'érosion dans notre zone d'étude. Il s'agit maintenant d'intégrer les résultats de ces analyses dans le modèle général et de quantifier les pertes en sol.

Le taux de l'érosion résulte de la combinaison des facteurs du modèle RUSLE, 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.

Le croisement des cartes des principaux facteurs de l'érosion hydrique des sols permet d'obtenir la carte des pertes en sols en tout point du bassin versant. Cette carte donnant la quantité de terre potentiellement érodable en t/ha/an. Les valeurs obtenues ont été regroupées en classes (fig 4.14).

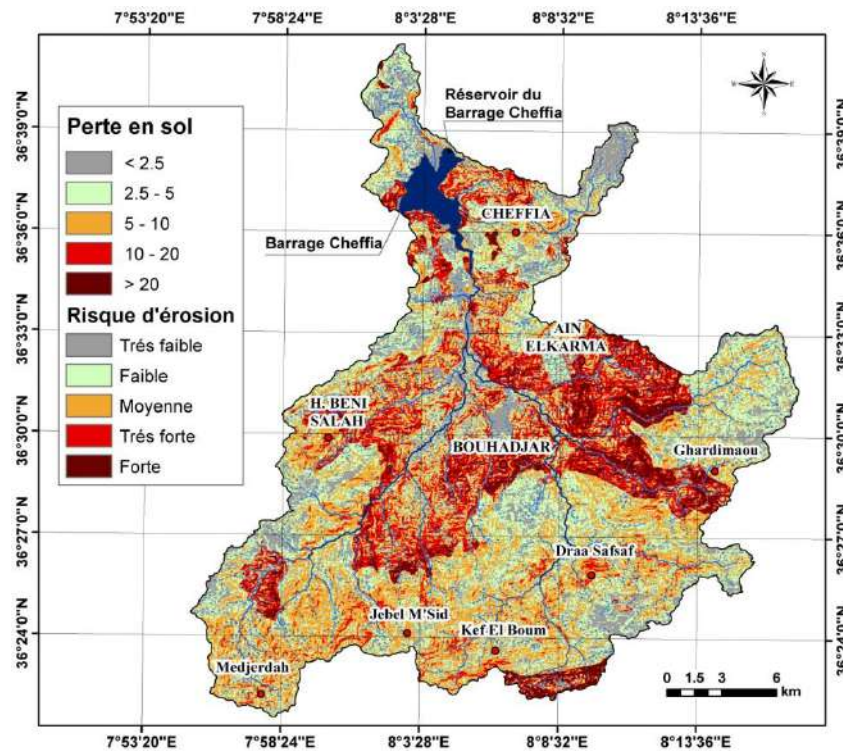


Figure 4.14. Carte des pertes en sols en ($t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) du bassin versant de Bounamoussa

La distribution spatiale de la perte de sols à l'échelle du bassin (Fig. 4.14) résulte de la combinaison des différentes couches thématiques des facteurs du modèle RUSLE traitées précédemment. Les pertes en sol varient entre 0 et 52 t/ha/an, avec une perte moyenne de 7.8 t/ha/an soit un total de 448500 t/an pour l'ensemble du bassin, ce qui est considéré comme une érosion relativement moyenne. Pour les besoins de lisibilité de la carte, les pertes de sol ont été regroupées en cinq classes selon le taux d'érosion : très faible, faible, modérée, élevée et très élevée selon le taux d'érosion (tableau 4.12).

Environ 40 % de la superficie du bassin versant de Bounamoussa est caractérisée par une érosion très faible à faible variant entre 0 et 5 t/ha/an, et se situe principalement dans les zones à faible pente et de couverture végétale dense, Les zones considérées à érosion moyenne (5 à

10 t/ha/an) occupent 30.48 % de la superficie du bassin. La classe à forte érosion (10 à 20 t/ha/an) occupe 22.59 % de la superficie totale et se localise principalement dans les terres agricoles où la pente est relativement forte. Enfin, les zones à très forte érosion ($A > 20$ t/ha/an) occupent seulement 06.89% de la superficie totale du bassin.

Tableau 4.12. Répartition des pertes des sols dans le bassin versant de Bounamoussa

Classe des pertes en sols A (t/ha/an)	Superficies (ha)	Superficies (%)	Risque d'érosion
A < 2.5	11 210.28	19.5	Faible
2.5 - 5	11 810.50	20.54	très faible
05-10	17 528.81	30.48	moyenne
10-20	12 988.47	22.59	forte
A > 20	3 961.94	6.89	très forte

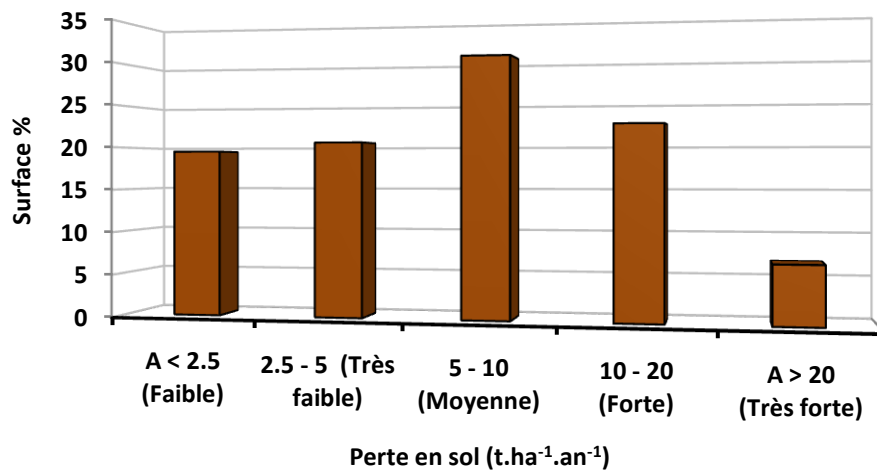


Figure 4.15. Distribution des pertes en sol par rapport à la superficie

Les zones peu affectées par les pertes de sols sont associées aux zones basses du bassin versant, à faible pente ou présentant un couvert végétal dense, tandis que les valeurs fortes sont associées aux sols fragiles (ce qui peut nuire à la production agricole) ou aux zones à relief accidenté avec un couvert végétal dégradé.

4.4.7. Le risque érosif par sous bassin versant

Le découpage des sous-bassins hydrographiques, effectuée par le biais du système d'information géographique (SIG), est utilisé pour délimiter le bassin versant en zones selon le niveau de gravité de la perte des sols.

A partir du MNT, sont réalisées six opérations qui permettent d'obtenir la schématisation du modèle de bassin, la détermination des sous bassins versants se fait en suivant les étapes:

5. Traitement du MNT par un remplissage des cuvettes (**full MNT**)
6. Détermination de la direction d'écoulement (**flow direction**) : Chaque cellule du MNT est entourée par 8 autres cellules ((nord, nord-est, est, sud-est, sud, sud-ouest, ouest, nord ouest).
7. Détermination de l'accumulation d'écoulement (**Flow Accumulation**) : La troisième étape consiste à calculer combien de cellules s'écoulent, en amont, vers chacune des cellules du MNT.
8. Détermination du réseau d'écoulement (**Stream Definition**) : Cette étape classe toutes les cellules dans l'accumulation d'écoulement.
9. Segmentation du réseau d'écoulement (**Stream Segmentation**) : Cette étape divise les cours d'eau en des segments.
10. Détermination du sous bassin versant de chaque tronçon du réseau d'écoulement (**Clip watershed**)

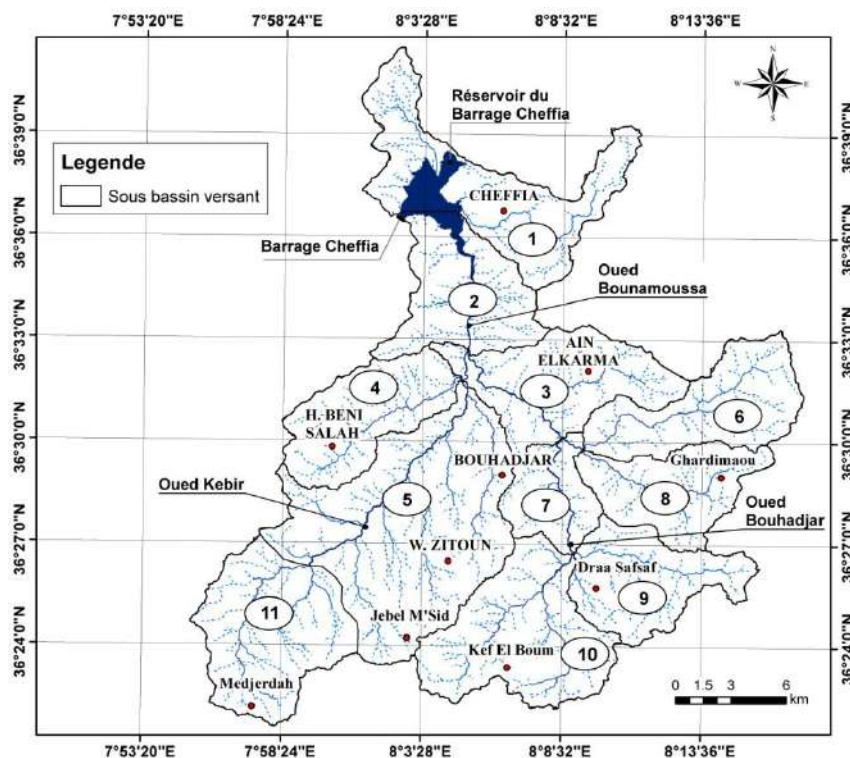


Figure 4.16. Répartition des sous bassins par SIG

Les valeurs moyennes de chaque facteur ont été estimées par sous bassin versant. La figure (4.21) présente les zones sensibles à l'érosion par sous bassin. La carte a été réalisée en

calculant, pour chaque sous bassin, la moyenne de perte en sol prédite. De façon similaire, la moyenne des facteurs R, K, LS et C est déterminée.

Tableau 4.13. Les valeurs moyennes du risque érosif et des facteurs R, K, LS et C par sous bassin versant

A	B	C	D	E	F	G	H
N° SB	Superficie (km ²)	Superficie (%)	Facteur (R)	Facteur (K)	Facteur (LS)	Facteur (C)	Perte en sol (t.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
1	64.67	11.25	173.3	0.037	2.34	0.27	5.32
2	43.93	7.64	170.09	0.0356	2.91	0.32	5.71
3	49.5	8.61	160.94	0.0417	3	0.55	11.72
4	41.16	7.16	170.17	0.0346	3.7	0.41	8.38
5	112.9	19.63	168.85	0.0376	3.81	0.37	8.31
6	44.75	7.78	163.92	0.0409	4.15	0.27	8.55
7	22.99	4	157.06	0.0352	4.37	0.29	7.4
8	36.78	6.4	160.87	0.0395	4.87	0.38	11.6
9	40.09	6.97	160.34	0.038	3.92	0.2	4.66
10	60.98	10.6	163.4	0.0417	4.85	0.23	7.87
11	57.26	9.96	193.67	0.0389	4.59	0.2	7.26
Bassin Bounamoussa	575	100%	170	0.038	3.5	0.32	7.8

-colonne A : numéro du sous bassin versant ;

-colonne B : superficie en (km²) de chaque sous bassin versant ;

-colonne C : superficie en (%) de chaque sous bassin versant ;

-colonne D : Valeurs du facteur d'érosivité des précipitations (R) en (MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹·an⁻¹) de chaque sous bassin tirée à partir de la figure 4.17

-colonne E : Valeurs du facteur d'érodibilité du sol (K) en (t.ha.h/ha.MJ.mm) de chaque sous bassin tirée à partir de la figure 4.18

-colonne F : Valeurs du facteur topographique (LS) de chaque sous bassin tirée à partir de la figure 4.19

-colonne G : Valeurs du facteur de couverture végétale (C) de chaque sous bassin tirée à partir de la figure 4.20

-colonne H : Valeurs de perte en sol de chaque sous bassin tirée à partir de la figure 4.21

Les sous bassins versants présentant de fortes valeurs du risque érosif sont situés à l'Est, l'Ouest et le Sud-Ouest, sont occupée 49 % de la superficie totale du bassin de Bounamoussa (fig.4.21). Les faibles valeurs s'enregistrent dans les sous bassins 1, 2 et 9 qui se trouvent au niveau du barrage et à l'amont du bassin versant, taillé essentiellement dans les terrains plus résistants où le couvert forestier est assez important, avec des pentes faibles.

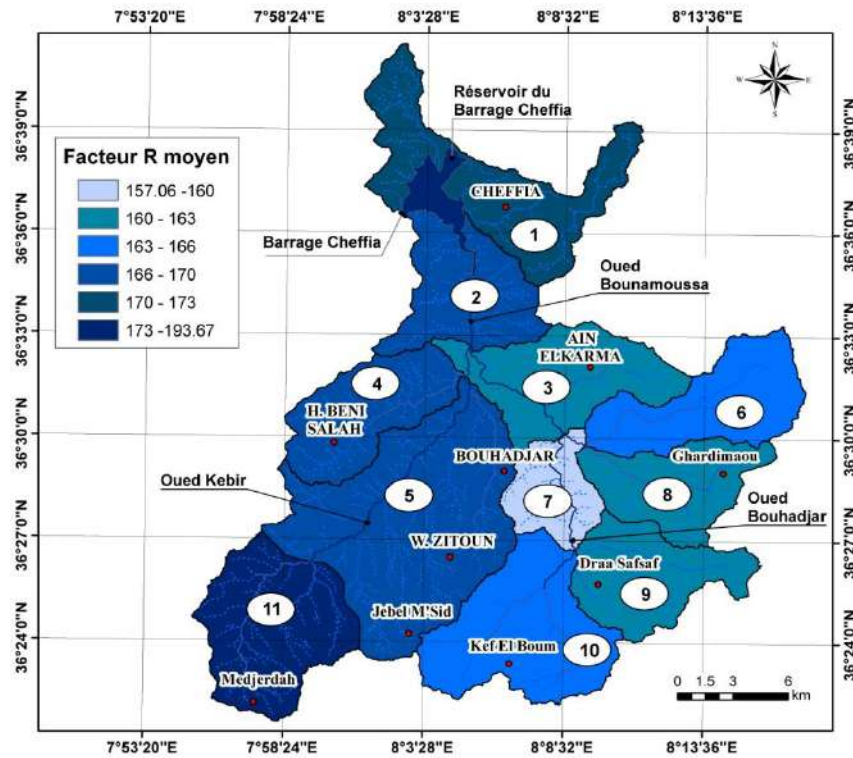


Figure 4.17. Les valeurs moyennes du facteur d'érosivité des précipitations (R) en $(MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot an^{-1})$ par sous bassin versant.

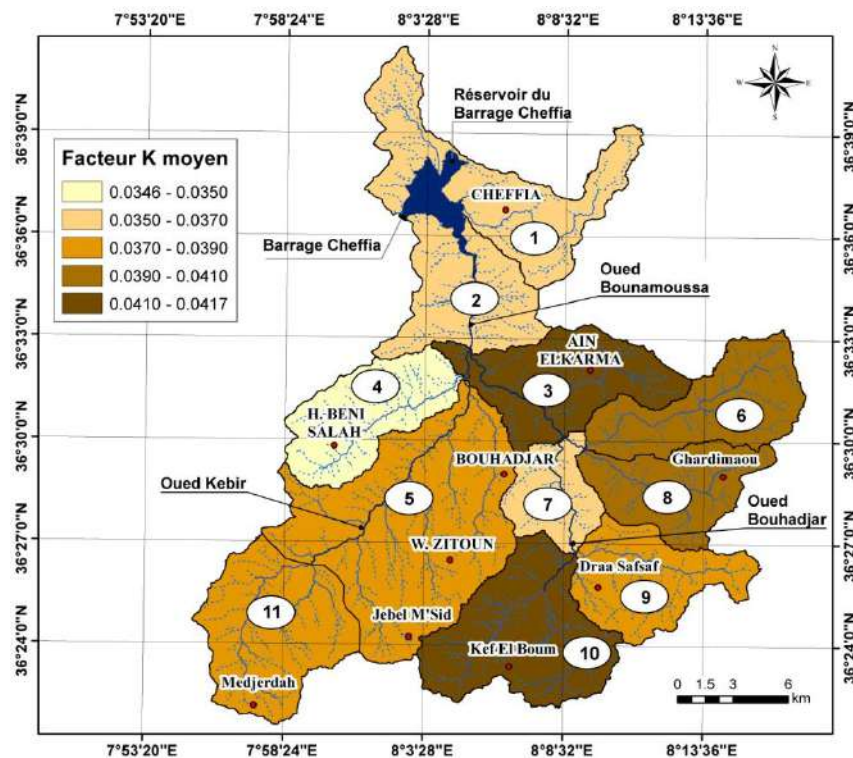


Figure 4.18. Les valeurs moyennes du facteur d'érodibilité du sol (K) en $(t \cdot ha \cdot h / ha \cdot MJ \cdot mm)$ par sous bassin versant.

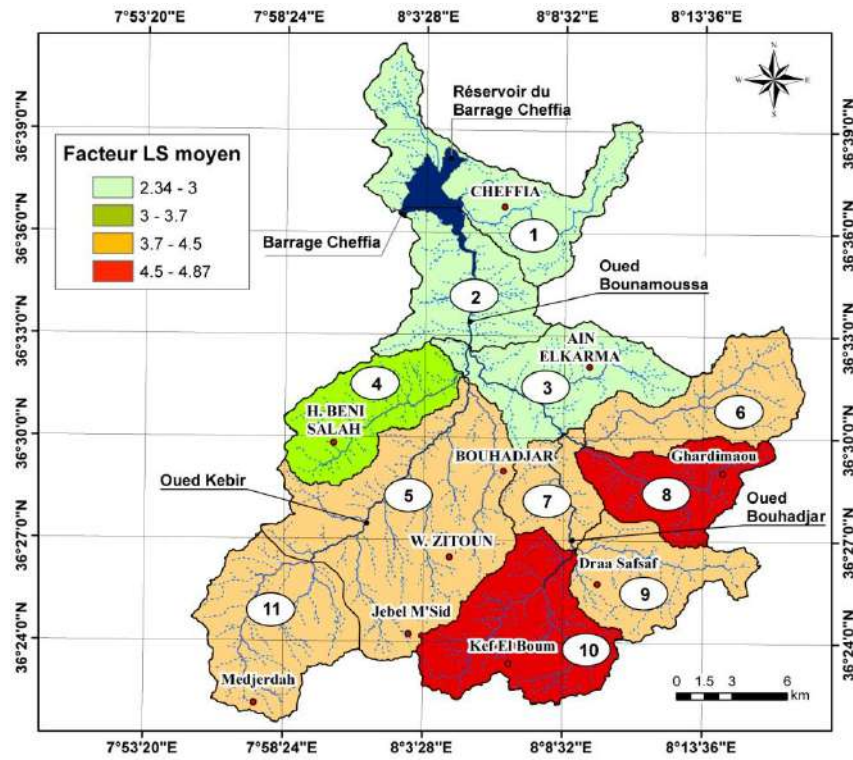


Figure 4.19. Les valeurs moyennes du facteur topographique (LS) par sous bassin versant.

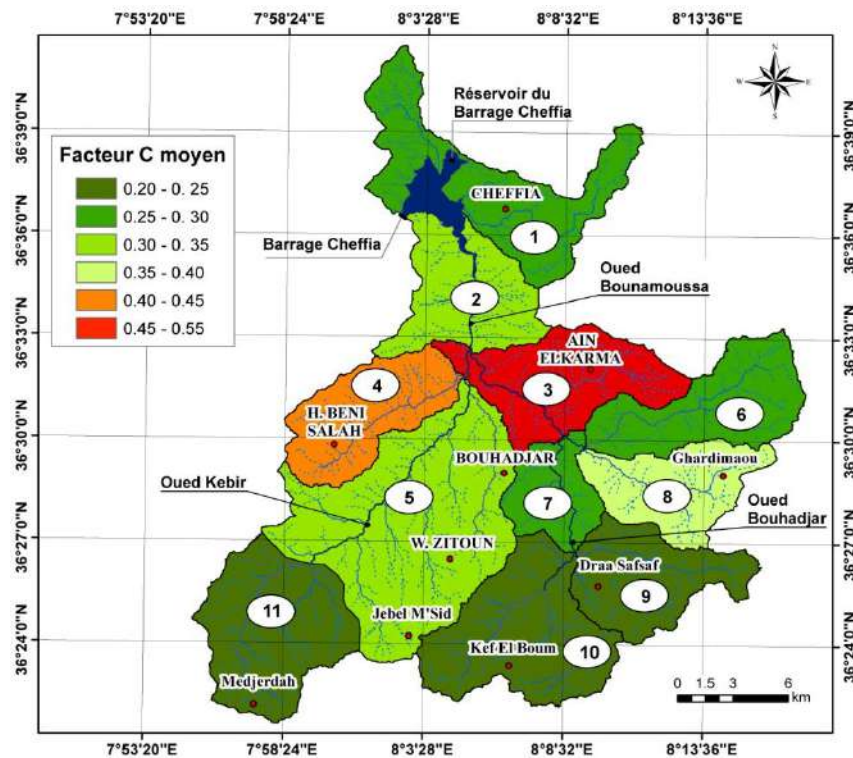


Figure 4.20. Les valeurs moyennes du facteur de couverture végétale (C) par sous bassin versant.

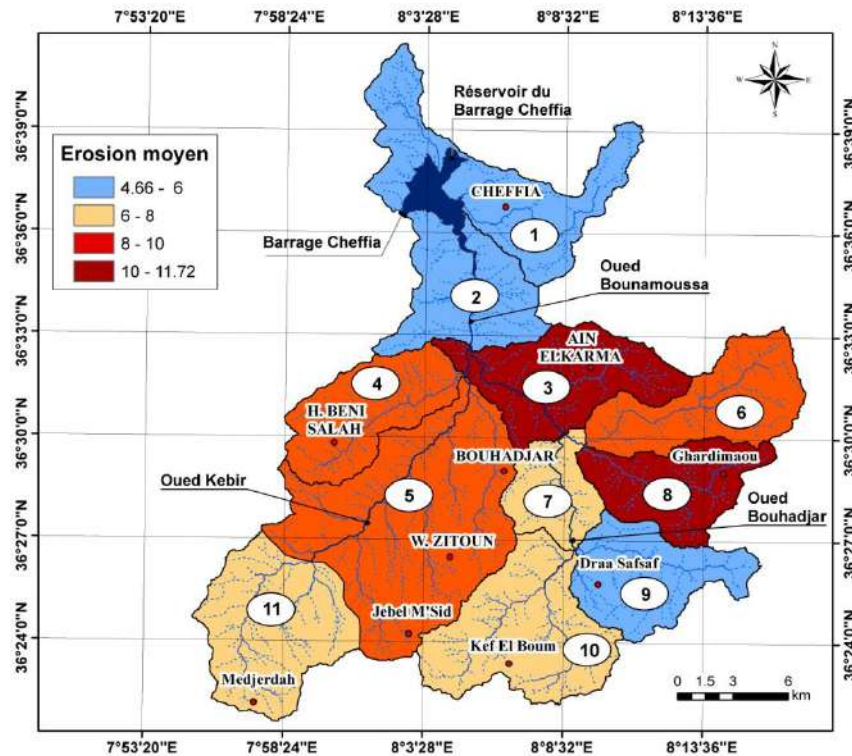


Figure 4.21. Les valeurs moyennes du risque érosif en $t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ par sous bassin versant.

4.4.8. Validation

Les mesures du transport solide n'ont jamais été effectuées sur terrain lors des crues de l'Oued Bounamoussa. Comme approche des estimations de pertes en sols obtenues par l'application du modèle RUSLE, nous avons calculé le tonnage des matériaux solides transportés et sédimentés au niveau du lac du barrage de Cheffia, à partir des mesures bathymétriques effectuées par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) en 1965, 1986 et 2004.

Le transport solide est donné par l'équation (4.6) (Chikha, Guedderi 2008) :

$$T_s = (V_s * D) + (V_{dev} * C) \quad (4.7)$$

Avec :

T_s : le transport solide observé

V_s : le volume de sédiments accumulés dans la retenue entre deux mesures bathymétriques

D : la densité du sédiment

V_{dev} : la somme des volumes d'eau déversés pendant une crue

C : la concentration moyenne en matière solide des eaux déversées

La retenue du barrage Cheffia perd une moyenne de capacité de plus de $186\,762\text{ m}^3/\text{an}$ entre 1965 et 1986 à $509\,611\text{ m}^3/\text{an}$ entre 1986 et 2004, avec un envasement total de $13,09\,10^6\text{ m}^3$, soit une moyenne annuelle de $335\,769\text{ m}^3$ pour une période d'accumulation de sédiments de 39 ans. Ceci correspond à un dépôt solide total de $335\,769\text{ t}/\text{an}$ avec une densité du sédiment de 1,0. De plus, au cours de cette période, une autre quantité de sédiment a été évacuée par les organes de vidange de $82\,421.6\text{ t}\cdot\text{an}^{-1}$.

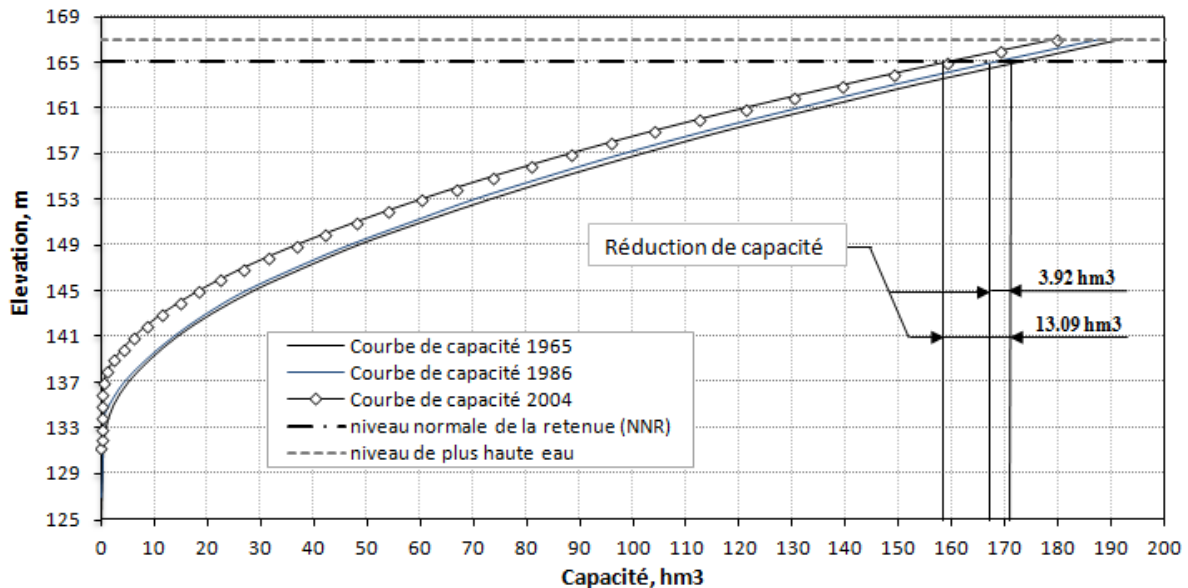


Figure 4.22. Courbe capacité hauteur du barrage Cheffia

L'estimation de la sédimentation moyenne depuis la mise en eau du barrage Cheffia en 1965 jusqu'à l'année 2004 aboutit à une érosion spécifique de $7.2\text{ t}/\text{ha}/\text{an}$. Ces valeurs sont relativement proches des valeurs obtenues par RUSLE ($7.8\text{ t}/\text{ha}/\text{an}$). L'écart entre les deux valeurs est estimé à 7.70% . De nombreuses études ont montré que cet écart existe et traduit les limites de fonctionnement du modèle.

4.5. Conclusion

Cette étude illustre l'application du modèle empirique d'érosion des sols RUSLE intégré au SIG pour estimer la distribution spatiale de l'érosion des sols dans le bassin versant de Bounamoussa afin d'identifier les zones critiques pour les mesures de contrôle de l'érosion. Les résultats indiquent que le bassin versant perd en moyenne $7,8\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, cette valeur est relativement plausible en adéquation avec ceux donnés par interprétation des mesures bathymétriques effectuées dans le barrage Cheffia.

La répartition spatiale des différentes classes de sévérité de l'érosion est de 19,50% soit très faible, 20,54% faible, 30,48% modérée, 22,59% élevée et 6,89% très élevée. Plus de la moitié de la superficie du bassin versant représente des pertes de sol supérieures à $5 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ résultant de l'interaction de plusieurs facteurs, principalement la prédominance de pentes abruptes et de sols très érodables combinée à la forte pression anthropique, de nature agricole qui réduit le couvert forestier au profit des cultures ainsi que l'absence de mesures et d'ouvrages de lutte contre l'érosion.

L'application du modèle RUSLE donne des résultats relativement fiables qui peuvent apporter une aide précieuse, pour cibler les zones qui nécessitent une action prioritaire de traitement anti-érosif en amont et limiter ainsi l'envasement du barrage et contribuer à la protection du milieu naturel. À long terme, les résultats peuvent être utilisés aussi pour suivre l'impact des systèmes de culture et des pratiques de conservation des sols sur le processus d'érosion dans le bassin versant de Bounamoussa.

Chapitre 5

Envasement du Barrage de Cheffia - Moyens de Lutte Contre l'Erosion Hydrique

Chapitre 5 : Envasement du barrage de Cheffia - moyens de lutte contre l'érosion hydrique

5.1. Introduction

L'infrastructure hydraulique des pays du Maghreb est amputée annuellement de 2 % à 5 % de sa capacité utile globale (*Errih et Bendahou, 1997 ; Sidi Adda, 2005*). L'envasement des retenues est l'un des facteurs les plus importants de la perte en capacité. La réserve de stockage des ouvrages hydrauliques diminue de façon continue pour deux raisons essentielles : la première, d'origine naturelle, tient à l'agressivité du climat, l'alternance des périodes sèches et humides, la fragilité des formations géologiques et l'absence d'un couvert végétal suffisant ; la seconde, est d'origine humaine : études et évaluations insuffisantes, d'une part et mauvaise exploitation des ouvrages annexes, tels que vannes de vidange et ouvrages de soutirage, d'autre part (*Bekhti, 2012*).

Le secteur hydraulique en Algérie compte 75 barrages en exploitation. Répartis sur tout le territoire national, dont le plus ancien est le barrage Meurad situé sur le territoire de la Wilaya de Tipaza, sur l'Oued Boudjabroune mis en eau en 1852. La capacité globale (initiale) est de 8110 hm³. Le levé bathymétrique des barrages en 2004 a montré que la capacité de stockage a été réduite à 6789 hm³ du fait de l'envasement (voir tableau 1.4 chapitre N°1) (*ministère des ressources en eau, 2010*). Le phénomène de sédimentation des retenues de barrages en Algérie varie considérablement d'une région à une autre en fonction des facteurs hydroclimatiques conditionnant l'érosion et le transport solide (*Bekhti, 2012*). Ce phénomène naturel n'est que la conséquence de la dégradation des bassins versants sous forme d'érosion hydrique des sols la plus caractérisée (*Conseil des sciences du Canada, 1986*).

A cet effet l'objectif de ce chapitre est axé sur l'estimation du taux d'envasement du barrage Cheffia avec le modèle (PISA), ce modèle utilise des paramètres climatiques, morphologiques et physiques d'un bassin versant, qui peut fournir une prévision du taux moyen annuel de sédimentation dans les réservoirs artificiels exprimée en (m³/km²).

Il faut également noté que cette estimation vient en plus des levés bathymétriques effectués.

5.2. Présentation du barrage Cheffia

5.2.1. Situation géographique du barrage

Le réservoir du barrage de Cheffia (Photo, 5.1) est situé dans la Wilaya d'El-Taref, à 40 km au Sud-Est de la ville de Annaba, au Nord Est de l'Algérie. Il retient les eaux de l'oued Bounamoussa en amont de la digue et alimente la partie orientale de la plaine de Annaba autour de Asfour. Le Barrage Cheffia est situé à une longitude de 8°2' 37.53"E et une latitude de 36°36' 35.476"N, dans le bassin versant de Bounamoussa qui a une superficie de 575 km². Le barrage a été réalisé en terre compactée et il est implanté à 4 kilomètres en amont de la ville de Asfour.



Photo 5.1. Réservoir du barrage CHEFFIA. (cliché :ANBT, 2004)

La mise en eau a été effectuée en Mars 1965. La retenue du barrage renfermait un volume total initial de 171.992 hm³ mais cette valeur a tendance à se réduire avec le temps du fait de l'érosion du bassin versant. La digue principale est équipée d'ouvrages d'évacuation calculés pour une crue maximale de 2000 m³/s. En cas de crue supérieure, un déversoir secondaire, situé au col d'EL-KERMAT (coté nord), permet l'évacuation des eaux excédentaires.



Photo 5.2. Oued Bounamoussa (amont du barrage). (cliché :CH.bouhadeb, 2017)

Le barrage avait 4 objectifs :

- Irriguer les terres de la partie orientale de la plaine de Annaba et El-Taref autour de Asfour.
- Fournir l'eau nécessaire au secteur industriel de la région comme le complexe sidérurgique d'El Hadjar.
- Renforcer l'alimentation en eau de la ville de Annaba et Bouhadjar.
- Limiter les inondations du marais de N'Krada à l'aval du barrage.

Le barrage de Cheffia régularise annuellement 95 millions de mètres cubes : 61 hm³ sont réservés à l'agriculture, 34 hm³ aux villes et industries. La cote de la retenue normale a été fixée à 165.00m dans le Système Altimétrique du Barrage (SAB).

5.2.2. Bref historique sur le déroulement des travaux du barrage

La construction du barrage de Cheffia s'est étalée sur une période de 20 ans, (1945 à 1965).

- 1927 : Première reconnaissance géologique par J. SAVORNIN
- Octobre 1945 : Début de la série de campagnes de recherche des sites et d'études géologiques préliminaires. Trois sites ont été retenus en aval de la plaine de la Cheffia.
- 1964 : Installation d'une station de jaugeage à la Cheffia, un peu en aval du site du barrage actuel. Début de la campagne d'études hydrologiques de précision.
- 1947 : Le plan décennal de développement de l'Algérie (période 1947-1956). Prévoit la construction du barrage de la Cheffia.
- 1951 : Etude géologique du site du barrage.
- 7 juillet 1953 : Etude de la stabilité des terrains dans la vallée de la Bounamoussa en amont de Asfour au moyen d'une triangulation et de nivellement périodiques de précision.
- 1953-1954 : Etude d'un barrage en terre compactée. Etude des matériaux d'emprunt.
- 29 Décembre 1955 : Etude en liaison avec l'administration de l'avant projet du barrage de la Cheffia. Choix entre ce barrage en terre et le barrage en béton.
- 5 aout 1955 : Autorisation de mise en concours des travaux à réaliser.
- 12 juillet 1960 : Etude géologique complémentaire : construction de 10 puits de 10 à 18 m de profondeur et de 0.80 m de diamètre sur le site du barrage pour l'examen des roches en place.
- 1^{er} septembre 1960 : Mesures de précision de stabilité des terrains aux abords du barrage faisant suite aux observations faites en 1953 par la S.F.S.

- 19 Septembre 1960 : Début des travaux.
- 03 mai 1962 : Adjonction d'une galerie de contrôle de 2.30 m de diamètre dans le schiste sous le masque d'étanchéité, construction d'un voile primaire complémentaire à partir de la galerie de contrôle.
- 13 juillet 1963 : Modification des dispositions des prises d'eau pour l'aimantation de la ville d'Annaba.
- 1964 : Projet et décision de construction de la conduite n°2 pour l'alimentation en première étape au périmètre irrigable.
- Mars 1965 : Mise en eau du barrage. La mise en se poursuivra jusqu'en 1969.

5.2.2. Description de l'ouvrage

L'ouvrage est composé d'une digue en terre compactée avec masque amont d'étanchéité en argile, la longueur de cette digue est de 400 m pour une hauteur de 65m. De l'amont vers l'aval, la digue est constituée de :

- Rip-Rap en enrochement ;
- Filtre sous Rip-Rap ;
- Recharge amont en alluvions;
- Volume total des remblais: 1.3 million de m³.



Photo 5.3. La digue du Barrage Cheffia. (cliché :CH.bouhadeb, 2016)

5.2.3. Caractéristiques techniques du barrage

Les caractéristiques techniques du barrage sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 5.1.Caractéristiques techniques du barrage Cheffia

Caractéristique géométriques	Paramètre	Caractéristiques physiques	Paramètre
Côte de la crête du barrage	169 m	1- Noyau	
Hauteur du barrage	50 m	Perméabilité	$K_N < 10^{-8}$ cm/s
Largeur en crête	10 m	Limite de liquidité	$L_q = 20$ à 40 %
Longueur développée en crête.	650 m	Limite de plasticité	$L_p = 10$ à 15 %
Niveau de plus haute eau (NPHE)	167 m	Indice de plasticité	$I_p = 15$ à 25 %
Niveau normal de la retenue (NNR)	165 m	Teneur en eau	$W_N = 17,70$ %
Niveau de lit d'Oued	120 m	Masse volumique	$\gamma_N = 2,14$ t/m ³
Largeur maximale à la base	214 m	2- Alluvions	
Superficie de la cuvette	9,87 km ²	Masse volumique	$\gamma_A = 2,26$ t/m ³
Volume de la retenue normale	170 000 000 m ³	Perméabilité	$K_A = 0,6 \cdot 10^{-5}$ à 0,6 cm/s
Volume de la retenue maximale	192 237 000 m ³	Teneur en eau	$W_A = 2$ %
Caractéristiques hydrologiques	Paramètre	Ouvrages annexes	Paramètre
Surface du bassin versant	575 Km ²	Evacuateur de crues	
Débit annuel moyen	140 hm ³	Débit	1800 m ³ /s
Crue décennale	800 m ³ /s	Vidange de fond	
Crue centennale	1500 m ³ /s	Débit à la côte 165 m	1800 m ³ /s
Crue millénaire	3000 m ³ /s	Débit à la côte 167 m	1900 m ³ /s
Evaporation annuelle moyenne	8 hm ³	Vidange ouverte	
Pluie moyenne annuelle	730 mm	Débit à la côte 165 m	1950 m ³ /s
Envasement moyen annuel initial	199822 tonnes	Débit à la côte 167 m	2050 m ³ /s
Capacité initiale à la côte R.N	171,992 hm ³	Galerie de fuite	
Capacité à la côte PHE	179,450 hm ³	Longueur développée	156,50 m

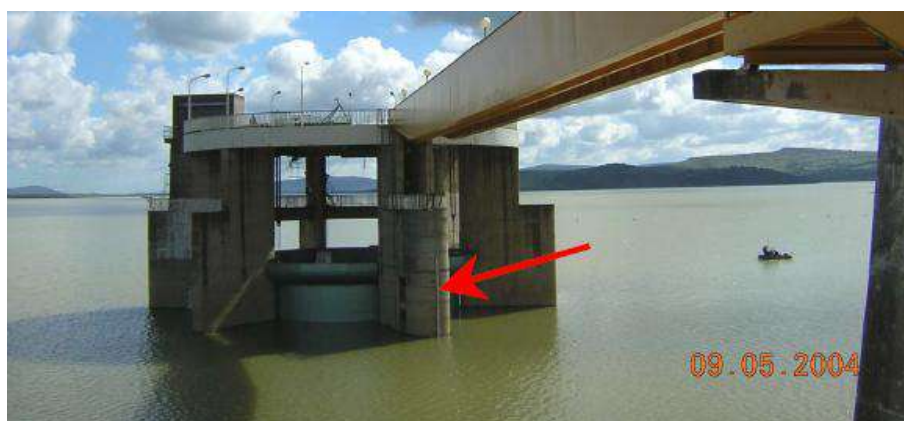
**Photo 5.4.** Référence Hydrographique de la retenue. (cliché : ANBT, 2004)



Photo 5.5. Evacuateur de crues.
(cliché :CH.bouhadeb, 2016)

Photo 5.6. Vidange de fond.
(cliché :CH.bouhadeb, 2016)

5.3. Evolution du volume de vase en fonction du temps

➤ Dépouillement des mesures :

Deux méthodes ont été utilisées pour le dépouillement des mesures : La méthode de la Formule Générale et celle de la Hauteur Moyenne. Ont été considérés les profils initiaux du levé topographique réalisé avant la mise en eau (mesure zéro), le papier minute du levé bathymétrique et un fond topographique au 1/5000 de la zone de la retenue. Le nombre total de profils de mesure retenue est de 6, CH01, CH02, CH03, CH04, CH05 et N (borne GEOKART, 1986). Ils ont été rattachés au point CH00 (point du réseau d'appui, correspondant au pilier d'auscultation B situé au centre du village près de la digue) à l'aide d'au moins deux lignes de base GPS observées en mode statique post-traité (fig.5.2).

L'agence nationale des barrages et transferts a réalisé trois levés bathymétriques (1965, 1986, 2004) durant l'exploitation du barrage Cheffia pour une période de 39 ans.

➤ Etat initial (1965) :

Cet état initial ou -zéro- a été élaboré de la manière suivante : après tracé des courbes de niveau de la surface en fonction de la côte de la retenue, la surface et le volume correspondant à la cote de la retenue normale (165 m) ont été évalués, soient $S = 880$ ha et $V = 171,922$ hm³.

➤ Etats 1986 et 2004 :

Ces états concernent la capacité du barrage en 1986 et 2004: les résultats des mesures bathymétriques réalisées dans la retenue du barrage en 1986 et 2004, ont permis d'évaluer le volume d'eau correspondant à la cote de la retenue normale (165m) à respectivement $V = 168$ hm³ et 158.827 hm³. Ceci signifie que le volume d'envasement accumulé jusqu'à 2004 est égal à $V_i - V_{2004} = 171,922 - 158,827 = 13,095$ hm³.

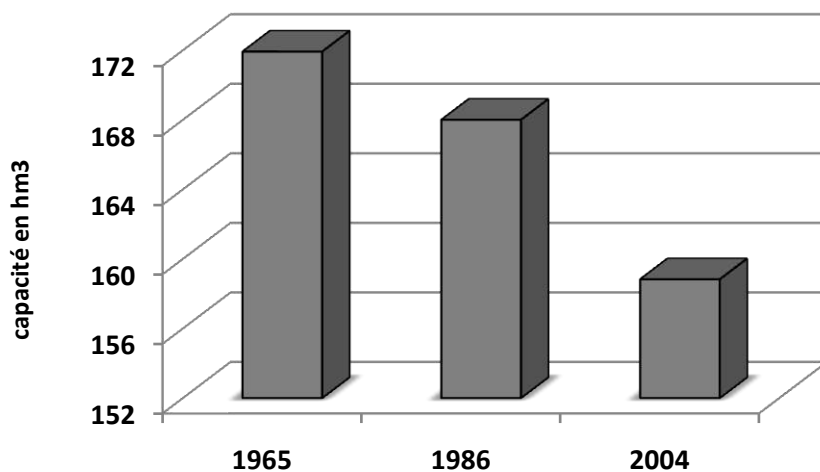


Figure 5.1. Évolution du volume d'eau du barrage Cheffia (période 1965-2004)

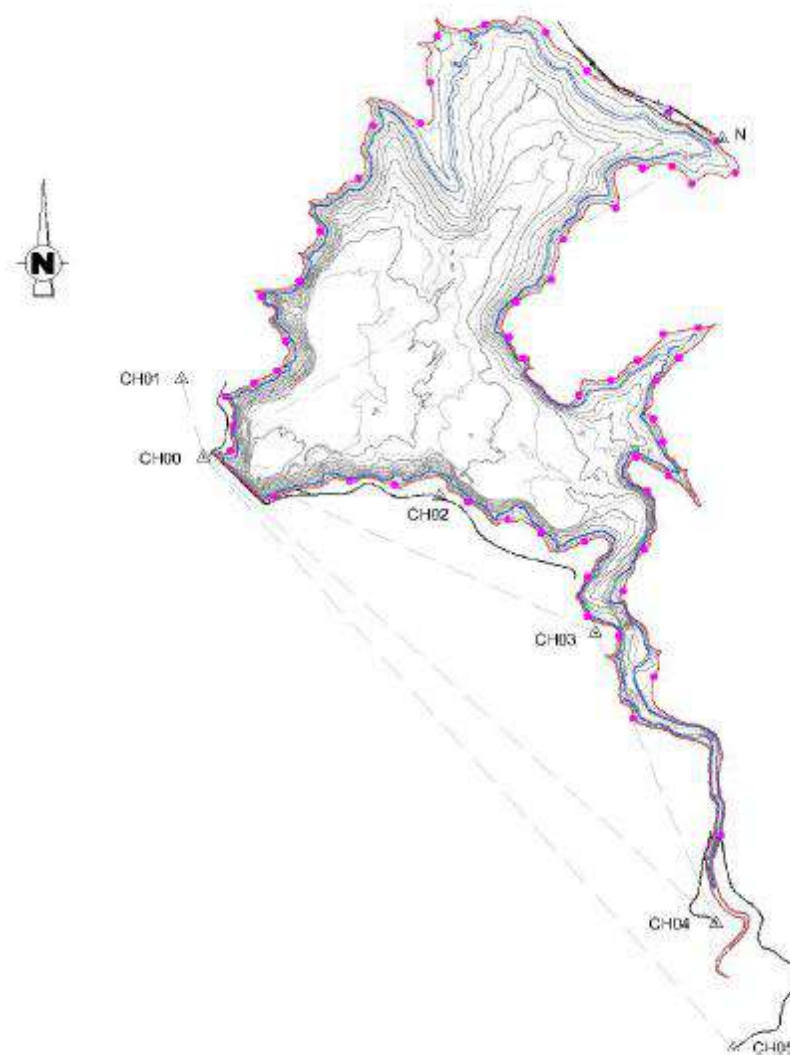


Figure 5.2. Schéma du réseau de points d'appui

5.4. Estimation de l'envasement du barrage Cheffia par le modèle PISA

5.4.1. Le modèle PISA

L'estimation indirecte de l'érodabilité des terrains en amont du barrage peut être aussi obtenue par l'utilisation d'un modèle mathématique à paramètres statistiques qui est appliqué à la prévision du taux de sédimentation dans les retenues artificielles.

PISA étant l'acronyme de : Previsione Interrimento Serbatoi Artificiali ou : « modèle de prévision de l'envasement dans les réservoirs artificiels » (*Bazzoffi 1987; Baldassarre et Bazzoffi 1998; Baldassarre et al. 2001; Bazzoffi et Van Rompaey 2003; Bazzoffi et al. 1997*). Le modèle PISA a été élaboré à partir de l'analyse de 42 systèmes « bassin versant-barrage » dispersés sur la totalité du territoire italien dans des zones différentes par leurs conditions climatiques, morphologiques et physiques (*Bazzoffi et al. 1996, 1997, 1998; Bazzoffi et Baldassarre 2000; Bazzoffi et Van Rompaey 2003; Ouechtati et Baldassare 2011; Benkhadja et al, 2012*).

Le modèle de prévision de l'envasement dans les réservoirs artificiels (PISA) est un modèle paramétrique statistique de régression linéaire multiple, conçu pour l'évaluation de la sédimentation moyenne annuelle dans une retenue exprimée en m^3/km^2 de sédiments humides relatifs à la superficie du bassin de la retenue. Il permet alors une estimation indirecte de l'érosion des sols en amont du barrage (*Benkhadja et al., 2012*). Il a été formulé pour être facilement et rapidement applicable, sans avoir besoin de données recueillies directement sur terrain mais à partir de la cartographie et l'analyse des séries chronologiques des variables hydrologiques (*Achite, 2014*). L'application de ce modèle dans quelques études antérieures a donné des résultats suivants :

- En Tunisie par *Ouechtati et Beldessare (2011)* : il révèle une surestimation du taux de sédimentation double de la valeur d'envasement réel du barrage Siliana et de 4 fois l'envasement du barrage de Lakhmess.
- en Algérie par *Benkhadja et al. (2012)* : les résultats obtenus sont presque similaires à ceux trouvés par *Ouechtati et Beldessare (2011)*, car l'estimation de l'envasement du barrage K'sob avec le modèle PISA est 3 fois plus élevée que les valeurs obtenues par les mesures bathymétriques.
- En Algérie par *Achite et al, (2014)*:il révèle une surestimation du taux de sédimentation 1,68 de la valeur d'envasement réel du barrage de Sidi M'hamed Benaouda.

5.4.2. Application du modèle au barrage de Cheffia

Ce modèle se base sur des paramètres climatiques, morphologiques et physiques du bassin versant. La formulation la plus courante relative à ce modèle est la suivante (*Bazzoffi 1987*):

$$y = 425,9334 - 1,3898 S + 102,9576 (S_{ER})^{0.5} - 9.84435 P_{EN} - 0.31 P + 116.718 D \quad (5.1)$$

Où :

Y : Indice de sédimentation exprimé par le volume annuel de sédiments humides versés dans le barrage par unité de surface du bassin versant ($m^3.km^{-2}$).

S_{ER}: La surface érodable correspondant à la surface cultivable ajoutée à 1/16 de la surface non cultivées agro-forestière (km^2).

S : Superficie du bassin versant (km^2).

P_{EN} : Pente moyenne du bassin versant (grades)

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

D : Densité de drainage ($km.km^{-2}$).

La détermination des différentes variables du modèle pour notre bassin a été effectuée à l'aide du SIG de la région. Notamment la pente moyenne du bassin versant obtenue à partir de la carte des pentes que nous avons élaborée. Quant aux densités de drainage, elles sont issues de la carte du réseau hydrographique. L'évaluation des surfaces érodables s'est faite à partir de la carte d'occupation des sols du bassin versant de Bounamoussa. Le tableau 5.2 rassemble les calculs relatifs à la surface érodable du bassin versant de Bounamoussa. Par ailleurs, Pour la détermination de la pluviométrie moyenne annuelle, nous avons élaboré une carte en isohyètes par l'utilisation de six stations pluviométriques réparties sur l'ensemble du bassin (voir chapitre 3).

L'avantage de ce modèle réside dans la formulation pour une application en phase de projet de construction d'un barrage dans des zones aux données hydrologiques insuffisantes, voire absentes. Le second avantage réside dans son applicabilité à des bassins versants de différentes tailles. Toutefois, le modèle peut être utilisé pendant la phase de fonctionnement du réservoir, pour (i) assurer la gestion et les actions y afférant, (ii) réduire les arrivées de sédiments au niveau du barrage et les impacts négatifs qui en résultent sur l'environnement (*Bazzoffi et Baldassarre 2000*) et rétablir la capacité d'origine de la retenue du barrage (*Ouechtati et Baldassarre, 2011*).

Tableau 5.2. Détermination de la surface érodable du bassin versant de Bounamoussa

Type d'occupation du sol	Surfaces (km ²)	Surfaces (%)	Surfaces cultivables (km ²)	Surfaces non cultivables (km ²)
Plan d'eau	7.69	1.34	0	7.69
Foret Claire	142.57	24.79	0	142.57
Foret Dense	154.41	26.85	0	154.41
Terrain agricole	93	16.17	93	0
Parcours	103.46	17.99	0	103.46
Maquis Clair	22.49	3.91	0	22.49
Maquis Dense	38.45	6.69	0	38.45
Sols Nus	8.43	1.47	0	8.43
Zones urbaines	4.5	0.78	0	4.5
Surfaces totales			93	482
Surface érodable = S. Cultivables + 1/16 (S. non Cultivables)			123.125	

5.4.3. Résultats et interprétation

Après avoir calculé chaque paramètre constituant le modèle PISA, l'indice d'envasement pour le bassin versant de Bounamoussa peut être aisément défini (Tableau 5.3). L'estimation de l'envasement moyen annuel du barrage Cheffia avec le modèle PISA s'élève à 789.89 m³/km²/an. En supposant une valeur de densité de sédiments humides égale à 1.5, l'envasement annuel pour le barrage Cheffia serait de 1184.84 t/km²/an. Le tableau 5.4 récapitule les principaux paramètres du modèle ainsi calculés et l'indice d'envasement pour le bassin versant de Bounamoussa.

Tableau 5.3. Indice d'envasement pour le bassin versant de Bounamoussa

Bassin étudié	S (km ²)	SER (km ²)	Pen (grade)	P (mm)	D (km/km ²)	Y (m ³ /km ² /an)	Y (t/km ² /an)
Bounamoussa	575	123.13	12.83	730	3.16	789.89	1184.835

5.4.4. Envasement annuel :

Le tableau 5.4 présente l'envasement annuel du barrage Cheffia calculé par le modèle PISA au niveau du bassin versant de Bounamoussa.

Tableau 5.4. L'envasement annuel du barrage Cheffia calculé par le modèle PISA (1970-2004)

Année	1970/1971	1971/1972	1972/1973	1973/1974	1974/1975	1975/1976
P (mm)	708.40	872.00	928.00	534.60	678.40	638.60
Y (m3/km ² /an)	796.59	745.87	728.51	850.46	805.89	818.22
Y(t/km ² /an)	1 194.88	1 118.80	1 092.76	1 275.69	1 208.83	1 227.33
Y(t)	687 054.83	643 312.28	628 339.28	733 524.61	695 076.08	705 717.61
Année	1976/1977	1977/1978	1978/1979	1979/1980	1980/1981	1981/1982
P (mm)	742.70	673.90	686.20	813.50	644.00	732.70
Y(m3/km ² /an)	785.95	807.28	803.47	764.00	816.55	789.05
Y(t/km ² /an)	1 178.93	1 210.92	1 205.20	1 146.01	1 224.82	1 183.58
Y(t)	677 883.87	696 279.27	692 990.56	658 953.72	704 273.78	680 557.62
Année	1982/1983	1983/1984	1984/1985	1985/1986	1986/1987	1987/1988
P (mm)	538.80	829.20	817.40	454.10	910.90	426.70
Y(m3/km ² /an)	849.16	759.14	762.80	875.42	733.81	883.91
Y(t/km ² /an)	1 273.74	1 138.71	1 144.19	1 313.13	1 100.72	1 325.87
Y(t)	732 401.63	654 755.93	657 910.96	755 048.29	632 911.39	762 374.37
Année	1988/1989	1989/1990	1990/1991	1991/1992	1992/1993	1993/1994
P (mm)	540.20	542.20	845.30	680.20	691.40	464.60
Y(m3/km ² /an)	848.73	848.11	754.15	805.33	801.86	872.16
Y(t/km ² /an)	1 273.09	1 272.16	1 131.22	1 207.99	1 202.78	1 308.24
Y(t)	732 027.31	731 492.56	650 451.19	694 594.81	691 600.21	752 240.86
Année	1994/1995	1995/1996	1996/1997	1997/1998	1998/1999	1999/2000
P (mm)	530.80	936.40	435.90	961.40	890.40	690.40
Y(m3/km ² /an)	851.64	725.91	881.06	718.16	740.17	802.17
Y(t/km ² /an)	1 277.46	1 088.86	1 321.59	1 077.23	1 110.25	1 203.25
Y(t)	734 540.63	626 093.33	759 914.52	619 408.96	638 392.58	691 867.58
année	2000/2001	2001/2002	2002/2003	2003/2004	-	-
P (mm)	697.40	447.30	1 080.80	851.90	-	-
Y(m3/km ² /an)	800.00	877.53	681.14	752.10	-	-
Y(t/km ² /an)	1 199.99	1 316.29	1 021.71	1 128.15	-	-
Y(t)	689 995.96	756 866.44	587 484.38	648 686.52	-	-

L'envasement annuel du barrage Cheffia varie de 681.10 à 889.30 m3/km²/an (fig.5.3) soit une moyenne de 789.89 m3/km²/an, pour une Précipitation moyenne de 730 mm/an. La variation de l'indice d'envasement du barrage montre que les années (1987-1988), (1996-1997) et (2001-2002) correspondent aux plus forts envasements calculés, par contre les années (1995-1996), (1997-1998) et (2002-2003) correspondent aux plus faibles valeurs d'envasement, La pluie étant le seul facteur variable dans l'équation.

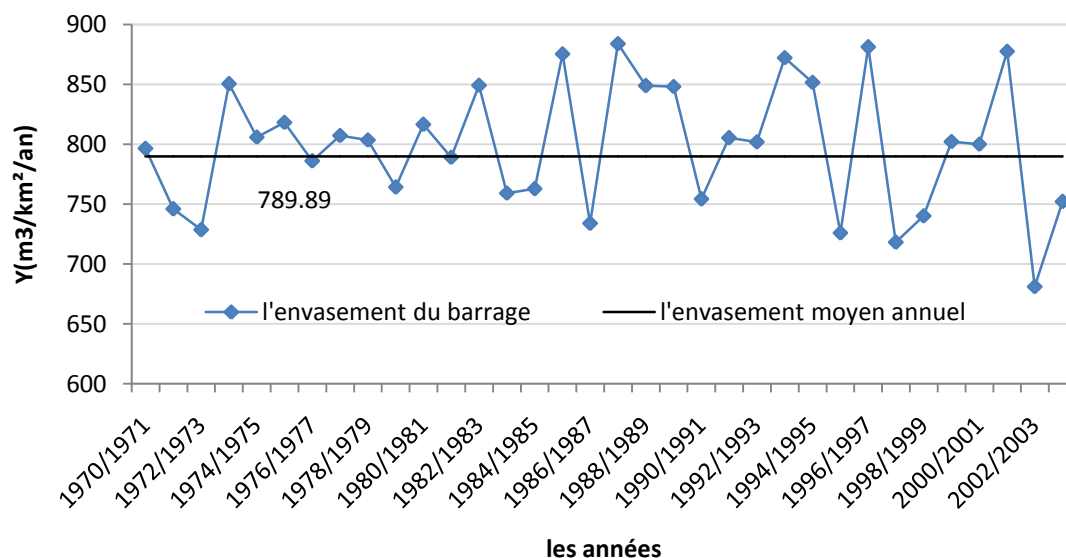


Figure 5.3. Envasement interannuel du barrage Cheffia estimé par le modèle PISA

5.4.5. Validation des résultats du modèle

5.4.5.1. par rapport au levé bathymétrique

L'écart entre le modèle PISA et les mesures bathymétriques se calcule par la formule (5.2). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (5.5).

$$\Delta = \frac{Y - Y_b}{Y_b} \cdot 100 \tag{5.2}$$

Sachant que ;

Δ: Ecart de l'envasement entre le modèle PISA et le levé bathymétrique;

Y : Envasement du barrage Cheffia entre (1965/2004) estimé avec le modèle PISA en (hm³);

Y_b: Envasement du barrage Cheffia entre (1965/2004) mesuré par levé bathymétrique en (hm³).

Tableau 5.5. Ecart entre le modèle PISA et le levé bathymétrique (2004).

Barrage étudié	Y (hm ³ /an)	Y (hm ³)	Y _b (hm ³)	Δ (%)
Cheffia	0.454	17.706	13.095	35.21

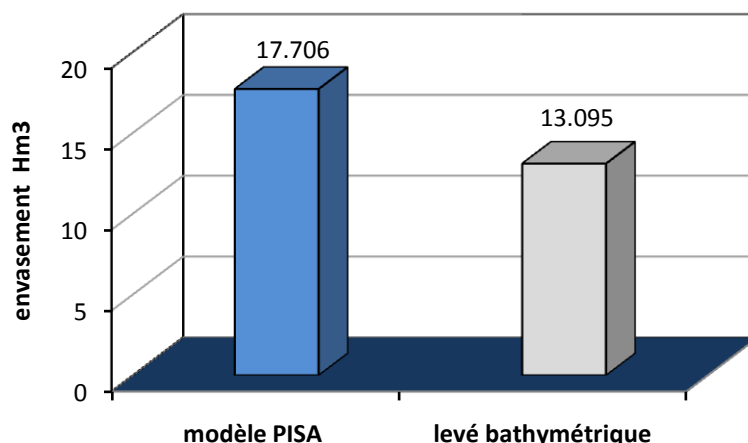


Figure 5.4. Comparaison entre l'envasement mesuré et estimé par le modèle PISA (1965-2004)

Le modèle PISA surestime la valeur de l'envasement du barrage Cheffia avec un ordre de 1,35 fois en comparaison avec le levé bathymétrique de l'année 2004, soit un écart de 35.21 %.

5.4.5.2. Par rapport au volume total de l'apport solide accumulé à la retenue du barrage (1965/2004) :

La méthode de calcul est déterminée dans la formule (5.3).

$$\Delta'' = \frac{As - Y}{As} \cdot 100 \quad (5.3)$$

$$As = V_{\text{vase chassé}} + Y_b \quad (5.4)$$

Δ'' : Ecart entre le modèle PISA et les mesures réelles (%)

Y : Envasement du barrage calculé avec le modèle PISA entre (1965/2004) en (hm³);

As : Transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1965/2004) en (hm³);

V_{vase chassé}: Volume total des sédiments évacués et vidangés (1965/2004) en (hm³);

Y_b: Envasement du barrage Cheffia entre (1965/2004) mesuré par levé bathymétrique en (hm³).

Le volume total des apports solides arrivant au barrage est calculé en tenant compte du volume d'envasement et du volume des sédiments évacués au moment des déversements et des vidanges. Cette partie des sédiments évacués a été estimée en fonction des volumes totaux déversés et vidangés et de leurs concentrations moyennes en sédiments. L'ANRH a procédé à des analyses de quelques échantillons d'eau prélevés au niveau du déversoir et près de la

vidange de fond pour déterminer la valeur moyenne de la concentration en sédiments. Il faut noter que le dépôt des sédiments se fait principalement dans la retenue, avant que les eaux n'arrivent au déversoir. Le tableau (5.6) rassemble les différents calculs effectués.

Tableau 5.6. Les apports solides totaux déversés et évacués entre (1965-2004)

Paramètre	Volume total (hm ³)	Concentration moyenne (g/l)	Total (t)
Eau vidangé	700.25	1.7	1 190 425
Eau distribué	1310.69	0.9	1 179 621
Eau évacuée	1750.58	1.3	2 275 754

Sur la base des données ci-dessus, le volume total chassé est de 3.097 hm³, en prenant la densité de la vase égale à 1.5.

$$V_{\text{vase chassé}} = \frac{4645800 \cdot 1000}{1500} \cdot 10^{-6} = 3.097 \text{ hm}^3$$

$$A_s = 3.097 + 13.095 = 16.192 \text{ hm}^3$$

Le tableau (5.7) rassemble les différents calculs effectués.

Tableau 5.7. Ecart entre le modèle PISA et le volume total du transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1965/2004).

Vvase chassé (hm ³)	Y (hm ³)	Yb (hm ³)	As (hm ³)	Δ" (%)
3.097	17.706	13.095	16.192	9.35

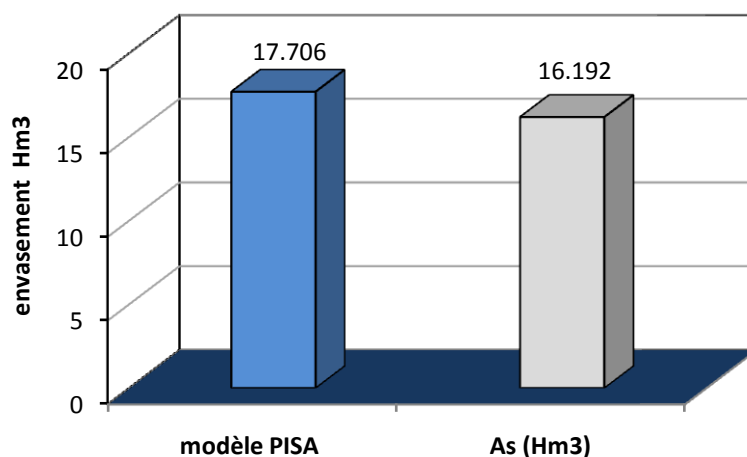


Figure 5.5. Comparaison entre l'envasement calculé par le modèle PISA et l'apport solide total au barrage Cheffia (1965-2004).

L'estimation de l'envasement du barrage Cheffia avec le modèle PISA s'élève à 17.706 hm³, tandis-que par le transport solide total arrivé à la retenue du barrage est de 16.192 hm³,

ce qui donne un écart de 9.35%. L'application du modèle PISA dans le bassin versant de Bounamoussa tend à surestimer la valeur de l'envasement du barrage Cheffia avec un ordre d'environ 10% pour la période (1965-2004).

Cet écart peut s'expliquer par:

- Les sédiments érodés qui n'ont pas atteint le réseau hydrographique;
- Le dépôt des sédiments dans les cours d'eau causant une remontée de lit;
- L'accumulation des sédiments dans les endoréismes;
- La résolution de l'image satellite;
- L'envasement des retenues collinaires situées dans la zone d'étude dont nous ne disposons d'aucune donnée les concernant;
- La fiabilité des données climatiques fournies par l'organisme concerné.

Pour les différentes étapes suivies dans cette étude, l'élaboration d'un organigramme est nécessaire (fig.5.6)

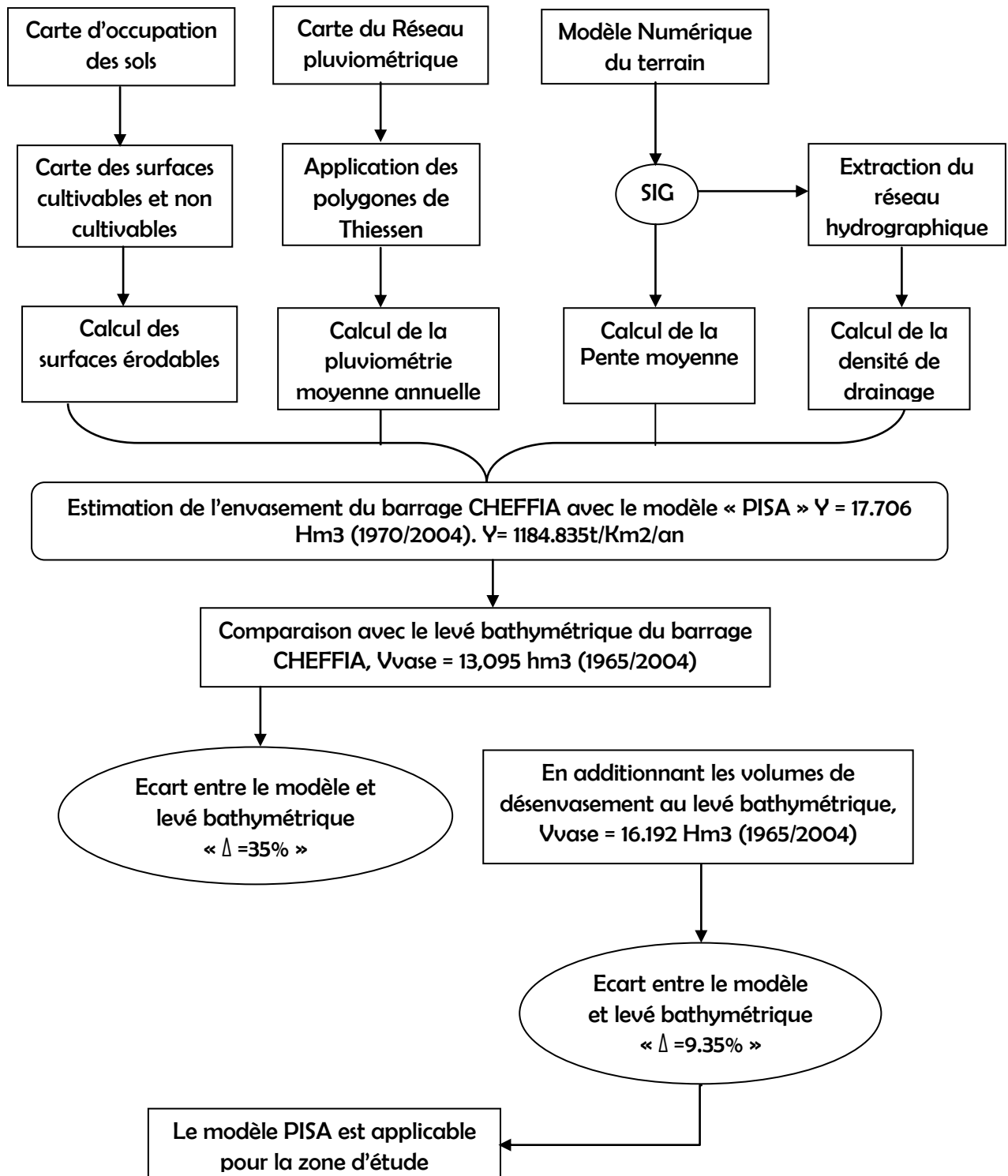


Figure 5.6. Organigramme des principales étapes effectuées pour l'estimation du taux d'envasement du barrage CHEFFIA.

5.5. La durée de vie du barrage Cheffia

La durée de vie du barrage sera calculée comme le rapport entre la capacité du barrage et le volume d'envasement moyen (volume mort), pendant une période à long terme. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure et le tableau ci-dessous :

Tableau 5.8. Les valeurs de l'envasement du barrage Cheffia dans le temps

Modèle PISA	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans	150 ans	200 ans	250 ans	300 ans
Envasement (hm ³)	3.75	9.36	18.73	37.46	56.19	74.92	93.65	112.38
Envasement (%)	2.18	5.45	10.89	21.79	32.68	43.58	54.47	65.37
Capacité (hm ³)	168.18	162.56	153.19	134.46	115.73	97	78.27	59.55
levé bathymétrique	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans	150 ans	200 ans	250 ans	300 ans
Envasement en hm ³	3.36	8.39	16.79	33.58	50.37	67.15	83.94	100.73
Envasement (%)	1.95	4.88	9.77	19.53	29.3	39.06	48.83	58.59
Capacité (hm ³)	168.56	163.53	155.13	138.35	121.56	104.77	87.98	71.19

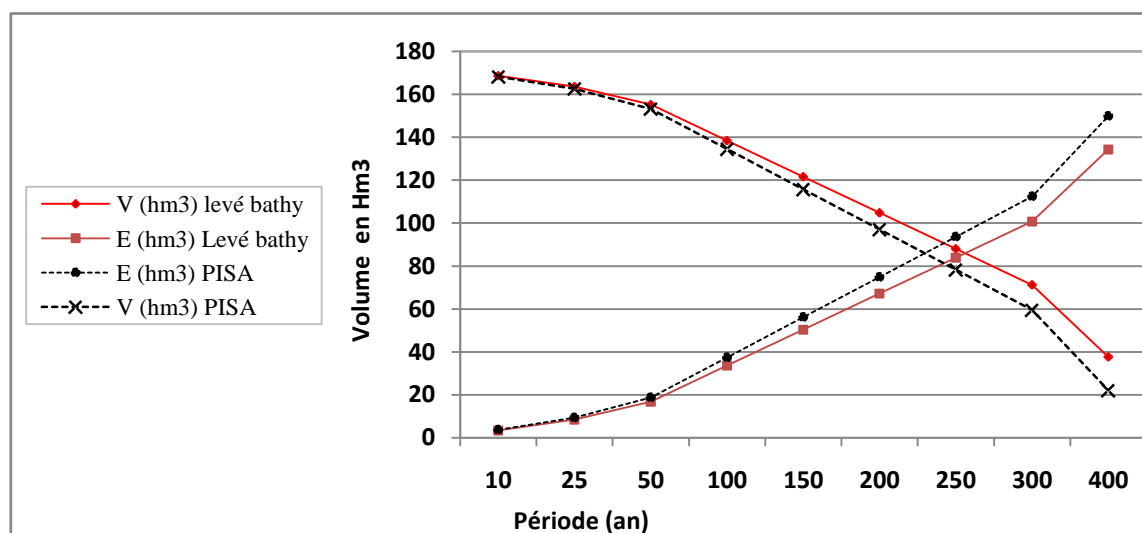


Figure 5.7. L'évolution de l'envasement du barrage Cheffia dans le temps

D'après l'évolution de l'envasement du barrage Cheffia au cours du temps (fig.5.6) obtenue par les deux calculs (levé bathymétrique et le modèle PISA), la durée de vie de ce barrage peut aller à plus de 200 ans à condition d'assurer d'une part, l'entretien et une gestion saine du barrage comme la vidange de fond pour la prévention de la sédimentation de la retenue du barrage, et l'évacuation des crues pour assurer la sécurité de l'ouvrage et d'autre part l'accélération des travaux de protection technique et biologique du bassin versant.

5.6. Les moyens actuels de lutte contre l'envasement du barrage Cheffia

L'évacuation des sédiments par l'utilisation de la vanne de fond est le seul moyen qui a été et qui est toujours utilisé pour lutter contre l'envasement du barrage. Le système comporte

quatre prises pour les chasses de dévasement qui sont aménagées dans des pertuis de vidange, deux prises en rive droite et deux prises en rive gauche. Chaque organe de chasse de dévasement comprend :

- un piquage aménagé dans le mur du pertuis à environ 0.80 m en aval du batardeau ;
- une conduite en acier de 0.50 m de diamètre permettant le refoulement des débits soutirés, dans la galerie de l'évacuateur de crue (épaisseur de tôle 8 mm) ;
- une bouche de refoulement constituée par un piquage de 0.400m de diamètre à travers le mur du pertuis de vidange à environ 1.50m en aval du batardeau ;

5.7. Moyens utilisés de lutte contre l'érosion et l'envasement des barrages en Algérie

Les moyens de lutte les plus utilisés en Algérie sont :

Le reboisement, la restauration des sols, l'implantation des banquettes, la création de petits barrages en amont (retenues collinaires), la plantation des cultures suivant les lignes de niveau, la plantation de végétation à longues tiges dans les oueds (*Achite, 2006*).

Dans le cadre de la protection des bassins, un programme spécial avait été lancé par les services des forêts. Pour le traitement d'une superficie de 1,5 millions d'hectares à l'horizon 2010, soit un rythme de réalisation de 67000 ha/an (*Mahi tani, 2011*).

Pour l'envasement des barrages, plusieurs dispositifs ont été mis en place pour lutter contre ce phénomène (méthodes de chasses, soutirage par courant de densité et dragage).

5.7.1. Actions palliatives

a. Soutirage et chasse

La meilleure façon d'éviter l'envasement, c'est d'empêcher la vase d'arriver jusqu'au barrage. L'Algérie a connu ces 25 dernières années une sécheresse persistante ayant un impact négatif sur le niveau de remplissage des barrages. Les chasses et les lâchés par vidange de fond au moment des crues n'ont pu être effectuées au détriment de l'envasement.

b. Surélévation

L'Algérie a été parmi les premiers pays du monde à pratiquer la surélévation des barrages. Cette pratique a concerné neuf (09) barrages pour un gain de capacité de l'ordre de 170 hm³. Cette technique implique de lourds travaux de génie civil et ne peut être envisagée pour tous les barrages (*Serbah, 2011*).

5.7.2. Actions curatives

➤ Dévasement par dragage

En Algérie, cette alternative est incontournable afin de permettre aux barrages de continuer à sécuriser l'AEP des populations et les besoins pour l'irrigation ; et ce à l'égard notamment de la rareté des sites pour la construction de nouveaux barrages.

La première opération de dévasement en Algérie, a eu lieu en 1957 et a concerné le barrage de Cheurfas (W.Mascara) avec un volume à extraire de 10 hm³. A ce jour 10 barrages ont été concernés par le dévasement. Avec le programme en cours et celui lancé en 2010, le dévasement aura permis un gain de capacité de 108 hm³ (ANBT, 2016).

5.7.3. Actions préventives

➤ Aménagement et protection des bassins versants

Le programme de 2004 de la Direction Générale des forêts a concerné les bassins versants de 09 barrages totalisant une superficie de 14625 km² et qui s'est traduit par le reboisement, la fixation des berges, les corrections torrentielles, les plantations fruitières et fourragères (ANBT, 2016).

Un important programme est en cours d'étude au niveau de l'Agence Nationales des Barrages et Transferts (ANBT) et qui concerne le traitement et la protection des bassins versants d'une trentaine de barrages et portera sur la réalisation d'ouvrages de capture de sédiments, de retenues collinaires, la réalisation de drains et la protection des abords routiers. Cet ambitieux programme traduit la prise de conscience en Algérie des conséquences ravageuse résultant de l'impact négatif de l'érosion des sols et les mesures préventives à prendre pour en atténuer l'impact (Remini, 2003).

5.8. Conclusion

Le phénomène de l'envasement affecte tous les pays du Maghreb, et s'accélère d'une année à l'autre, il a un effet très grave sur les capacités de rétention des ressources hydriques de notre pays.

Pour lutter contre ce phénomène, Il faut tout d'abord établir une bonne prévision des dépôts des sédiments dans une retenue de barrage qui est en relation avec le type d'utilisation

du sol, du système de culture, du travail du sol et du choix des outils, ceci pour le domaine agricole qui est le plus concerné.

L'application du modèle PISA au barrage de Cheffia durant la période (1965-2004) a permis d'estimer le taux de sédimentation à 17.709 hm^3 . Ce résultat est surestimé de 1,35 fois de celui trouvé avec le levé bathymétrique évalué à 13.095 hm^3 . L'écart entre les deux valeurs est estimé à 35.21 %. En additionnant les volumes des sédiments évacués au moment des déversements et des vidanges (3.097 hm^3) durant l'exploitation du barrage entre (1965/2004) au taux d'envasement mesuré sur terrain, l'écart diminue jusqu'à 9.53%. Ainsi, on pourrait constater pour le barrage Cheffia une relative compatibilité entre les estimations issues du modèle PISA et le volume total du transport solide arrivé à la retenue du barrage.

La cause essentielle de cet envasement de la retenue du barrage est en relation avec la nature même des caractéristiques de son bassin versant, ce phénomène résulte de l'interaction de plusieurs facteurs qui se conjuguent aussi pour accélérer l'érosion et le transport solide, à savoir la prédominance des formations lithologiques à érodabilité élevée avec un couvert végétal mince et dégradé et des pentes fortes par endroits, c'est pourquoi il est très important de freiner ce phénomène par les moyens de lutte anti érosifs par le lancement de travaux et techniques adaptés.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'importance de l'érosion hydrique en Algérie s'est toujours traduit par un comblement rapide des retenues des barrages, diminuant ainsi considérablement leur capacité de stockage et par conséquent leur durée de vie.

Il importe donc, non seulement de prévoir le rythme de comblement de la retenue de façon aussi précise que possible de manière à prendre les dispositions techniques nécessaires en termes de lutte contre l'envasement rapide des barrages.

De la présente étude, nous pensons avoir contribué à la connaissance des problèmes de l'érosion et de l'envasement, en particulier dans le bassin versant de Bounamoussa.

L'objectif principal de l'étude est la compréhension du phénomène de l'érosion et ses processus précurseurs et son estimation ainsi que l'envasement. Ce travail, basé sur des données observées, durant la période 1970/2004, a été conduit sur le bassin de Bounamoussa. Ce bassin représente un échantillon des bassins du Nord-Est de l'Algérie qui sont caractérisés par un taux de perte en sol important en raison de nombreux facteurs mis en jeu.

On est parvenu aux conclusions suivantes :

- Du point de vue altimétrie, le bassin est caractérisé par des altitudes variant de 153 m à 1405 m et des pentes favorables à l'écoulement par endroit. Le réseau hydrographique présente une hiérarchisation moyenne. Le bassin est dans son ensemble assez bien drainé

- Le bassin est caractérisée par un climat sub-humide à hiver doux avec deux saisons distinctes : l'une pluvieuse et humide allant du début du mois d'Octobre jusqu'à la fin du mois d'Avril, l'autre sèche et chaude débute au mois de Mai et s'étend jusqu'à la fin du mois de Septembre. Le bilan hydrique établi selon la méthode de Thornthwaite, pour une période de 42 ans (1970 - 2012), relève d'une précipitation annuelle moyenne de l'ordre de 730 mm. Le bilan hydrique indique un déficit agricole annuel de 453.6 mm.

L'approche par SIG a été utilisée avec succès pour déterminer les facteurs d'érosion des sols. Cette approche effectuée dans le bassin versant Bounamoussa (combinant traitement de l'occupation des terres, données pédologiques et climatologiques), a permis d'identifier et de cartographier les surfaces des terres nécessitant la plus grande priorité d'intervention pour la protection du patrimoine sol afin de réduire les apports solides au niveau de la retenue du barrage Cheffia.

L'estimation du facteur d'érosivité des pluies (R) est basée sur une relation approximée basée sur les précipitations annuelles. Le facteur d'érodibilité du sol (K) est estimé à partir de la texture du sol. Pour le facteur topographique (LS), l'angle de pente a été déterminé par un MNT avec une résolution de 30 mètres, qui est acceptable à l'échelle du bassin versant. Le facteur de la couverture végétale C a été estimé à partir de la carte d'occupation des sols, ce dernier peut être influencé par les effets atmosphériques, ce qui peut fausser son estimation.

Il faut souligner que les résultats des analyses spatiales présentées dans cette étude possèdent des limites et des défauts. Tout d'abord, l'équation universelle de perte en sol dans la version révisée (RUSLE) donne une estimation de la perte en sol attendue sur le long terme. Elle prédit seulement l'érosion en nappe et en rigoles; le ravinement n'est pas pris en compte et les dépôts ne sont pas inclus, seule l'érosion grossière est prédite. A cela s'ajoute aussi les incertitudes associées aux différentes sources de données et les modèles utilisés pour la détermination de différents facteurs.

Les résultats obtenus au terme de ce travail selon le modèle RUSLE, confirment une dégradation de sol importante sur le bassin versant de Bounamoussa durant la période 1965-2004, découlant d'un taux d'érosion moyen de $780 \text{ t/km}^2/\text{an}$, cette valeur est relativement plausible et en adéquation avec celles données par les mesures bathymétriques effectuées dans le barrage Cheffia.

Environ 40 % de la surface totale du bassin versant de l'Oued Bounamoussa a une sensibilité faible à très faible à l'érosion, tandis que 60 % présente une sensibilité à l'érosion moyenne à très forte. Leur vulnérabilité détermine le niveau d'exploration du phénomène érosif au niveau du bassin, soumis pour l'essentiel, à une forte pression anthropique, à caractère agricole, qui provoque la réduction du couvert forestier au profit des cultures.

Bien que la validité des pertes en sols de RUSLE soit sujette à discussion, la méthode apporte une aide importante aux décideurs et aménageurs pour simuler des scénarii d'évolution de la région et planifier les interventions de lutte contre l'érosion. Ainsi peut-elle par exemple permettre de suivre l'impact de l'utilisation des sols et des aménagements.

Une autre méthode utilisée pour l'estimation de la perte en sols et de l'envasement annuelle a résidé dans l'application du modèle PISA. On a ainsi obtenu une estimation de la perte en sols moyenne du bassin versant de Bounamoussa, L'application de ce modèle au barrage de Cheffia durant la période 1965-2004 a donné un taux de sédimentation de 17.71 hm^3 , ce qui correspond à une perte moyenne en sols de l'ordre de $1184.84 \text{ t/km}^2/\text{an}$.

On peut finalement estimer que les deux modèles utilisés dans le cas du bassin Bounamoussa, ont donné des résultats plausibles en termes d'estimation des phénomènes érosifs et d'envasement qui affectent le bassin versant et le barrage du Cheffia, surtout si on ne considère pas seulement dans nos calculs, le volume de sédiments accumulés dans la retenue du barrage, mais qu'on lui rajoute la partie correspondant aux volumes désenvasés du barrage Cheffia.

L'évolution de la vase dans le barrage Cheffia depuis sa mise en eau jusqu'à l'année 2004 s'est faite de manière croissante ceci par le fait de tous les apports solides. La durée de vie de ce barrage est estimée plus de 200 ans suivant les taux d'envasement annuels, à condition d'assurer d'une part, l'entretien et une gestion saine du barrage, et l'exécution de travaux de protection dans le bassin versant d'autre part.

Les travaux futurs que nous projetons de réaliser sont :

- Etude et proposition de techniques d'aménagement au niveau du bassin versant de Bounamoussa, en vue de protéger la région contre la dégradation des sols et aussi l'augmentation de la durée de vie du barrage.
- Évolution de la qualité physico-chimique des eaux de la retenue et du tronçon aval depuis le début de la mise en eau du barrage de Cheffia.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdellatif, B-A, Frederic Baillot, K Menoueri et al 2006.** Document de «la faim de l'eau» la boue dans les Barrages, Le magazine des journalistes scientifiques. Université Saad Dahleb de Blida.
- Abdelli, M., Zeggane, M., 2007,** Problématique et enjeu de l'envasement. L'expression. Du 05 Septembre 2007.
- Achite, M. et Meddi M, 2005.** Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi aride. Cas du bassin de l'oued Mina (nord ouest Algérien Rev. Sci. Eau. 18 (spécial), pp 37-56.
- Achite, M., et al, 2006.** Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences & Perspectives. 14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments. Marrakech, Morocco, May 14-19, 2006 (ISCO 2006).
- Achite, M., Toubal, A. K., Bettahar, N., & Ballah, A., 2014.** Evaluation de l'envasement du barrage Sidi M'hamed Benaouda dans le bassin versant de la Mina par l'application du modèle PISA.
- Albergel, J., Pepin, Y., Boufaroua, M., Nasri, S., 2001.** Erosion et transport solide dans des petits bassins versants méditerranéens. *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions* (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003). IAHS Publ. no. 278, 2003, pp. 373-379.
- Albergel, J., Nasri, N., Boufaroua, M. & Pepin, Y., 2003.** Erosion et transport solide dans des petits bassins versants méditerranéens. *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions* (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003). IAHS Publ. no. 278, 2003, pp 273-379.
- Ammari, A., 2012.** Vulnérabilité à l'Envasement des Barrages (cas du bassin Hydrographique des Côtiers Algérois) (Doctoral dissertation, Thèse Doctorat en Hydraulique. Univ Biskra).
- Angima, S.D., Stott, D.E., O'Neill, M.K., Ong, C.K. et Weesies, G.A., 2003.** Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 97, pp.295-308.
- ANBT, 2016.** (Agence nationale des barrages et transferts). Erosion et envasement des barrages réservoirs.. Exposé établi par Mr. Manser Amour, consulté le 01/09/2016. <http://docplayer.fr/1600124-Erosion-et-envasement-des-barrages-reservoirs.html>.
- Arnoldus, H. M. J., 1980.** An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil Loss Equation. In: De Boodt, M. and Gabriels, D., Eds., *Assessment of Erosion*. FAO Land and Water Development Division, Wiley & Sons, Chichester, 127-132.

- Auzet, A.V., 1987.** L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture. Aspects agronomiques. Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Agriculture, CERE-URA 95, CNRS, 60 p.
- Baldassarre, G., Bazzoffi, P., 1998.** Conservation of surface water resources in the Mediterranean basin. A new simplified model pour l'estimation du transport solide à l'échelle d'un bassin versant au Maghreb: cas du bassin versant de l'oued K'sob, Algérie , 4^{ème} colloque international sur les ressources en eau, CIRDD4, Blida, Algérie.
- Baldassarre, G., Bazzoffi, P., Palumbo, N., 2001.** Determining soil erosion by direct surveys and prediction models for assessment of reservoir sedimentation - case study from Italy. In: 3rd international conference on land degradation. Embrapa Solos, Doc. N_ 40, 170–173. Rio de Janeiro.
- Bazzoffi, P., 1987.** Previsione dell'interrimento nei serbatoi artificiali italiani, modello P.I.S.A. Idrotecnica (1):15–18.
- Bazzoffi, P., Baldassarre, G., Vacca, S., 1996.** Validation of PISA2 Model for automatic assessment of reservoir sedimentation. In: Albertson M (ed) Proceedings of the international conference on reservoir sedimentation. Colorado State University, Fort Collins, pp 519–528.
- Bazzoffi, P., Baldassarre, G., Pellegrini, S., Bassignana, A., 1997.** Models prediction of water storage decrease in Italian reservoirs. Collection Environnement de l'Université de Montréal, Horssérie, Num 9:249–252.
- Bazzoffi, P., Baldassarre, G., Pellegrini, S., Radina, B., 1998.** Neural model for assessing basin sediment yield and reservoir sedimentation. 8th Int IAEG Congress, vol IV. Balkema, Rotterdam, pp 2717–2724.
- Bazzoffi, P., Baldassarre, G., 2000.** Effect of agricultural land use changes on sediment yield and reservoir sedimentation: application of an indicator of off-farm sediment flow. In: Water conf and exp “Guarding the Global Resource”. Auckland, New Zealand, pp 110–121. ISBN: 1-877134-30-9.
- Bazzoffi, P., Van Rompaey, A., 2003.** PISA model to assess off-farm sediment flow indicator at watershed scale in Italy. OECD expert meeting “Soil Erosion And Soil Biodiversity Indicators” 25–28 March, 2003, Rome, Italy.
- Benaïcha, A.C., 2011.** Etude des processus des transports solides et leur impact sur l'alluvionnement des barrages. *Mémoire de Magister en Hydraulique, Université Hadj Lakhdar Batna.*
- Benkhaled A., Remini B., 2003,** Analyse de la relation puissance : débit solide – débit liquide du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Revue des sciences de l'eau.* 16/3 : 333-356.
- Benkhadja, R., Hattab, A., Mahdaoui, N., Zehar, C. 2012.** Assessment of soil losses and siltation of the K'sob hydrological system (semiarid area-East Algeria). *Arabian Journal of Geoscience.* 10 p.

- Biko, M. B., 2012.** Utilisation d'un système d'information géographique et de l'équation universelle de perte en terre pour prédire le risque d'érosion pluviale dans une monoculture de bananier (*musa sapientum*) Université De Dschang - Ingénieur Agronome p 122.
- Boiffin, J., 1976.** Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Annales Agronomiques*, 27(4):447–463.
- Boiffin J., 1984.** La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies, Thèse pour le titre de Docteur ingénieur, Sciences Agronomiques, INA-PG, Paris Grignon, 320 + annexes p.
- Boiffin, J., 1994.** Place des bassins versants expérimentaux dans les études sur l'érosion hydrique des sols. In : Du concept de BVRE à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales. Actes du Séminaire national, hydrosystèmes. Paris : Cémagref, : pp 197-201.
- Bouanani, A., 2004.** Hydrologie, Transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérien). *Thèse de Doctorat d'état, Université de Tlemcen*, 250 p.
- Bouanani, A., 2005.** Hydrologie transport solide et modélisation, étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie), thèse de doctorat d'état, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 249p.
- Bouguerra, H., Bouanani, A., Khanchoul, K., Derdous, O., & Tachi, S. E. 2017.** Mapping erosion prone areas in the Bouhamdane watershed (Algeria) using the Revised Universal Soil Loss Equation through GIS. *Journal of water and land development*, 32(1), 13-23.
- Bollinne, A., Rosseau, P., 1978.** Erodibilité des sols de moyenne et haute Belgique, utilisation d'une méthode de calcul du facteur *K* de l'équation universelle de perte en terre . *Bulletin Société Belge d'Etudes Géographiques*. Vol. 14. Iss. 4 p. 127–140.
- Boukheir, R., Cerdo, O., Abdallah, C., 2006.** Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *The Journal of Geomorphology*. Vol. 82. Iss. 3 p. 347–359.
- Bouraba, M., 2002.** Comparaison de la charge solide en suspension dans les oueds Algériens : Essai de synthèse. *Bulletin Réseau Erosion 21, IRD Montpellier (France)*, pp : 358 – 374.
- Bradford, J. M. & Huang, C., 1996.** Splash and detachment by waterdrops. Dans Agassi, M., éditeur, *Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation*, Books in Soils, Plants and the Environment, Chapitre 4, pages 61–76. Dekker, New York.
- Braune, E., Looser, U., 1989,** Cost impacts of sediment in South African rivers. IAHS publications. 184:131-143.
- Brown, R.B. 2003.** Soil texture, soil science fact sheet SL29. Gainesville, Florida. Univ. of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences pp. 8.
- Campbell, F. b., Bauder, H. A., 1940.** A rating-curve method for determining silt discharge of streams, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, N° 21. pp 603-607.
- Chanson, H., Patrick, J., 1998.** Teaching case studies in Reservoir Siltation and Catchment Erosion. *Int. J. Engineering*. Ed. 14(4): 265-275.

- Cheggour, A., 2008.** Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des S.I.G. : Application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad. MARRAKECH.
- Cheikha B.L., Guedderi, M., 2008.** Le bassin versant du Jannet (Tunisie): Evaluation des risques d'érosion hydrique. *Mappemonde Journal*. Iss. 90 p. 1–11.
- Chow, V.T., 1964.** *Handbook of Applied Hydrology*. Mc-Graw Hill Book Company.
- Cormary Y., Masson J. 1963.** Application à un projet type de la formule de perte de sols de Wischmeier. Etude de conservation des eaux et du sol au Centre de recherches du génie rural de Tunisie . Cahiers ORSTOM. Série Pédologie. Vol. 2. Iss. 3 p. 3–26.
- Cosandey, C et Robinson M., 2000.** *Hydrologie continentale* p 360. 128 fig. Ed. Armand Colin.
- Crawford, C.G., 1991.** Estimation of suspended –sediment rating curves and mean suspended sediment load. *Journal of hydrology*. 129: 331-348.
- Dahmani, A., 2012.** Contribution a l'étude de l'érosion et du ruissellement des sols rouges dans les monts de Tlemcen : utilisation de simulation de pluies thèse de magister en foresterie université de Tlemcen p130.
- Dajoz, R., 1985.** *Précis d'écologie*. Éd. Dunod, Paris, 505 p.
- Dajoz, R., 2003.** *Précis d'écologie*. Ed. Dunod, Paris, 615 p.
- Demmak, A., 1982.** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale .Thèse de docteur –Ingénieur.Université de Pierre et Marie Curie, France .pp 323.
- De Ploey, J., 1990.** La conservation des sols. *supp. Agronomie, la recherche*, 227 : pp 38-41.
- De Ploey, J., 1991.** Soil erosion, soil degradation and climatic change. In *land use changes in europe*, 275-292. The geojournal library. Kluwer acad. publ. netherland, 528 p.
- Dumas, P., 2004.** Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et SIG pour une gestion intégrée, Application en Nouvelle-Calédonie. Thèse de doctorat, Orléans, 402p.
- Durand, M.J.H., Barbut M.M., 1948.** Carte des sols d'Algérie, coté Constantine [Soil map of Algeria, Constantinian side] [online]. [Access 20.07.2011]. Available at: http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/Esdb_Archive/EuDASM/Africa/lists/y0_cdz.htm
- Ekern, P. C, 1950.** Raindrop impact as the force initiating soil erosion. *Soil Science Society of America Proceedings*, 15:7–10.
- El Garouani, A., Tribak, A., & Abahrour, M., 2010.** Assessment the Effects of Land-Use Cover Changes on Regional Soil Loss Susceptibility Using RUSLE Model and Remote Sensing Data. Red Books. International Association of Hydrological Sciences Publication, 340, 343-349.

- Ellison, W. D., 1944.** Studies of raindrop erosion. *Agricultural Engineering*, 25:131–136, 181–182.
- El-Swaify, S.A., Dangler, E.W., 1976.** Erodibilities of Selected Tropical Soils in Relation to Structural and Hydrologic Parameters. *In: Soil Erosion: Prediction and Control*, pp.105-114, Soil Conservation Society of America, Ankeny, IA.
- El-Swaify, S.A., Arsyad, S. and Krishnarajah, P., 1983.** Soil erosion by water, in Carpenter, R.A. (ed.), *Natural Systems for Development: What Planners Need to Know*, East-West Environment and Policy Institute, Macmillan Publishing Co, London, pp. 99-61.
- FAO, 1977.** Assessing soil degradation. *Soils Bulletin*, vol.34, 83p.
- FAO, 1980.** Conservation des ressources naturelles en zones arides et semi-arides. *Cahiers FAO : conservation des sols*, vol.3, 135.
- FAO, 1983.** Garder la terre en vie : L'érosion des sols, ses causes et ses remèdes. *Bulletin pédologique*, vol. 50, 62p.
- Foster, G.R., 1988.** Modelling Soil Erosion and Sediment Yield. In R., Lal (Editor), *Soil Erosion Research Methods. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA*.
- Free G., 1952.** Soil movement by raindrops. *Agricultural Engineering*, pages 491–494, 496.
- Govers, G., 1991.** Rill erosion on arable land in Central Belgium: rates, controls and predictability, *Catena* 18, pp 133-155.
- Govers, G., Takken, I. & Helming, K., 2000.** Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20:131–146.
- Guermond, Y., 2005.** Modélisations en géographie, déterminisme et complexités. Hermès Sciences Publications, 389p.
- Hashim, G.M., Wong, N.C., 1988.** *Erosion from Steep Land Under Various Plant Covers and Terrains*, In Tay, T.H., Mokhtaruddin, A.M. and Zahari, A.B. (eds), *Steep Land Agriculture in the Humid Tropics*, MARDI/Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur: 424–61.
- Heusch, B., 1970.** L'érosion du Pré Rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique. *Ann de la Recherche Forestière du Maroc* 12 : 9-176.
- Heusch, B. & millies-lacrois, A., 1971.** Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin : application au Maghreb. *Mines et géologie* 33, pp : 21-39.
- Hudson, N.W., 1957.** Erosion control Research Progress Report on Experiments at Henderson Research Station 1953-1956, *Rhod. Agric.J*, 54 (4); pp 297-230.
- Hudson N. 1973.** *Soil Conservation*. London, B.T. Batsford, c1, 320p.
- Hudson, N.W., 1987.** Soil and water conservation in semi-arid areas. *FAO Soils Bull.* 57, 172 p.
- Hurni, H., 1987.** *Erosion Productivity Conservation Systems in Ethiopia*, In Pla Sentis, I. (ed.), *Soil Conservation and Productivity*, Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo, Maracay: 654–74.

- Kalman, R., 1967.** Essai d'évaluation pour le pré-Rif du facteur couverture végétale de la formule de Wischmeier de calcul de l'érosion. In: Rapport pour l'administration de la forêt et d'eau, Rabat, 1-12.
- Kassoul, M., Abdelgader, A., Belorgey, M., 1997.** Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie revue des sciences de l'eau.
- Kirkby, M.J. et Morgan, R.P.C. (ed.), 1980.** Soil erosion, J. Wiley & Sons, Chichester, 312 pp.
- Lahlou, A., 1994.** Envasement des barrages au Maroc. Casablanca (Maroc) ; Editions Wallada, pp 277.
- Laura de F., Ibanez, F., Benoit, G., Sophia, A., 2003.** Rapport : « Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens Etude bibliographique »
- Le Bissonnais, Y., 1988.** Analyse des mécanismes de désagrégation et de mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France.
- Le Bissonnais, Y., Monter C., Daroussin J. et King D., 1998.** Cartographie de l'aléa érosion des sols en France. Ifen, collection études et travaux, no 18, 63 p. + cd rom.
- Le Bissonnais, Y., 1999.** L'érosion hydrique des sols cultivés. Mécanismes, déterminisme et spatialisation. Thèse HDR. Université d'Orléans, 62 p. 3. Sélection de publications.
- Le Bissonnais, Y., Cerdan O., Lecomte V., Benkhadra H., Souchere V., Martin P. 2005.** Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*, 62, 111-124.
- Leguedois, S., 2003.** Mécanismes de l'érosion diffuse des sols : modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés. Thèse Université Orléans. INRA. 167p.
- Leopold, L.B et Maddock, T.G., 1953.** The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. Washington D.C.U.S. Geological Survey. Professional Paper. 252p.
- Llamas, J., 1993.** Hydrologie générale, principes et applications, Edit. Gaetan marin, Canada, 509 p.
- Loureiro, N., Coutinho, M., 2001.** A new procedure to estimate the RUSLE EI30 index based on monthly rainfall data and applied to the Algarve region, Portugal. *J Hydrol* 250: 12-18.
- Lu, D., Li, G., Valladares, G.S., Batistella, M., 2004.** Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. *Land Degradation and Development* 15, 499-512.
- Ludiwig, 1992.** L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du bassin parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire. Thèse de doctorat, université de Strasbourg I, 201p.

- Mahi tani, w., 2011.** Aménagement intégrés des bassins versants et développement durable dans la région de maghnia cas du barrage hammam bouhrara tlemcen (algerie).
- Maneux, E., 1998.** Erosion mécanique des sols et transports fluviaux de matières en suspension: Application des Systèmes d'Information Géographique dans les bassins versants de l'ADOUR, de la DORDOGNE et de la GARONNE. Thèse de Doctorat. Université Bordeaux 1. 252 p.
- Mankouri, M., 2009** : contribution a l'étude de l'érosion en nappe, du ruissellement et de la fertilité des sols dans le B.V de l'Isser (sous bassin de Gourari et Madjoudj) Tlemcen Algérie, 2p.
- Markhi, A., Laftouhi, N. E., Soulaïmani, A., & Fniguire, F. 2015.** Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrés dans un SIG. Application dans le bassin versant n'fis dans le haut atlas de Marrakech (Maroc). European Scientific Journal, ESJ, 11(29).
- Marre, A., 1987.** « Le Tell Oriental Algérien de Collo à la Frontière Tunisienne », *Etude Géomorphologique*, Volume 1, Office Des Publications Universitaires.
- Mebarki, A., 1984.** *Ressources en Eau et Aménagement en Algérie, Le Bassin du Kebir Rhumel Algérie*, Ed Office Des Publications Universitaires.
- Meddi, M., 1992.** Hydropluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina .Thèse unique, Université louis Pasteur.
- Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire, 2000.** Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement, 95p.
- Mccool, D., Brown, L., Foster, G., Mutchler, C., Meyer, L., 1987.** Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers 30, pp. 1387-1396.
- Mccool, D.K., Papendick, R.I., Hammel, J.E., 1995.** Surface residue management. In: Crop residue management to reduce erosion and improve soil quality. Eds. R.I. Papendick, W.C. Moldenhauer. USDA. Conservation Report. No 40 p. 10–16.
- McCool, D.K., Foster, G.R., Mutchler, C.K., Meyer, L.D., 1989.** Revised slope length factor for the universal soil loss equation. Trans. ASAE 32 (5), 1571–1576.
- Mokhtari, E. H., 2017.** *Impact de l'érosion hydrique sur l'envasement du barrage Ghrib* (Doctoral dissertation, Remini Boualem; Hamoudi Saeed Abdelaamir).
- Mollenhauer, K., 1980.** Land use in water protection areas. In: De Boodt M, Gabriels D, eds. Assessment of erosion. New York: John Wiley et Sons: 271-284.
- Melton, M.A., 1965.** The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in *Southern Arizona. Journal of Geology*, 73, pp 1-38.
- Morschel, J., & Fox, D., 2004.** « Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du Terrefort Lauragais », M@ppemonde, 76, 11 p. <http://mappemonde.mgm.fr/num4/articles/art04404.pdf>.

- Morsli, B., Mazour, M., Arabi, M., Mededjel, N., Et Roose, É., 2006.** Influence of land use, soils and cultural practices on erosion, eroded carbon and soil carbon stocks at the plot scale in the Mediterranean mountains of Northern Algeria. *In : Soil erosion and carbon dynamics*, É. ROOSE, R. LAL, C. FELLER, B. BARTHÈS and B.A. STEWART édit, Édit. CRC Press, Advances in Soil Science, vol. 15, pp 103-124.
- Ouechtati, S. Baldassare, G. 2011.** Evaluation du transport solide et de l'envasement dans le bassin versant de Siliana (tunisie): cas des barrages Siliana et Lakhmess. *Bull Eng Geol Environ* 70(4):709-722.
- Payet, E., Dumas, P., Pennober, G., 2011.** Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sudouest de Madagascar, le Fiherenana . [Access 20.01.2012]. *La revue électronique en sciences de l'environnement*. Vol. 11. Iss. 3. Available at: <http://journals.openedition.org/vertigo/12591>.
- PNUE/PAM/PAP., 2000.** Directives pour la gestion de programmes de contrôle d'érosion et de désertification, plus particulièrement destinées aux zones côtières méditerranéennes. Split, Programme d'actions prioritaires.
- Rasool, S. N., Gaikwad, S. W., & Talat, M. A. 2014.** Relationships between soil properties and slope segments of sallar wullarhama watershed in the Liddar Catchment of Jammu and Kashmir. *Asian J Eng Res/Vol. II/Issue II/Jan.-March, 1*, 10.
- Remini, B., 1997.** Envasement des retenues de barrages : mécanisme et moyens de lutte par la technique du soutirage. Th. Doct. Etat, Ecole Nationale polytechnique d'Alge, 342p.
- Remini, B., Avenard, J., Kettab, A., 2003.** Envasement des barrages. Les Editions CEDOC.
- Remini, B., Hallouche, W., 2005.** Prévision de l'envasement des barrages du Maghreb. *Larhyss journal*, 4 : 69-80.
- Remini, B., W., Hallouche, 2007.** Studying Sediment. *Revue Internationale Water Power et Dam construction*. Octobre, 42-45.
- Remini, B., Hallouche, W., Achour, B., 2009.** L'Algérie : Plus d'un siècle de désenvasement des barrages. L'état des ressources en eau du Maghreb en 2009. UNESCO. p : 123-142.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Mccool D.K., Yoder D.C. 1991.** Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703, 404 p.
- Renard, K.G., & Freimund J.R., 1994.** « Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE », *Journal of Hydrology*, 157, 287-306.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Mccool D.K., Yoder D.C. 1997.** Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington, DC. USDA. Agricultural Handbook. No 703 pp. 404.
- Roche, M., 1963.** Hydrologie de surface. Paris, Gauthier - Villars. 430 p. 204 fig.
- Roose, E., 1967.** Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agronomie tropicale (France)*, volume 22, n°2, p 123-152.

- Roose, E.J., 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. Vol. 18. Iss. 4 p. 365–374.
- Roose, E., 1977.** « Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in West Africa », Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa, 50-71.
- Roose, E et Sarrailh J.M., 1990.** Érodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, Paris, vol. XXV, n° 12, p. 7-30.
- Roose, E. 1994.** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. Bulletin pédologique de la FAO 70. Première consultation : décembre 2001.
- Roose, E., De Noni G., Lamachere J-M., 1998.** L'érosion a l'ORSTOM : 40 ans de recherches multidisciplinaires. Res. Ero. Orstom, Montpellier, France. 66 p.
- Sabir, M. 1987.** L'érosion hydrique et sa quantification. Mémoire d'ingénieur. Université de Paris.
- Sadiki, A., Bouhlassa, S., Auajjar, J., Faleh, A., Macaire, J.J., 2004.** Use of GIS for the evaluation and mapping of erosion risk by the Universal Soil Loss Equation in the Eastern Rif (Morocco): Boussouab watershed case study. Rabat. Scientific Institute Bulletin. Earth Sciences Series. Vol. 26 p. 69–79.
- Serbah, B., 2011.** Etude et valorisation des sédiments de dragage du barrage Bakhadda Tiaret.
- Singh, G., Babu, R., Chandra, S., 1981.** Soil Loss Prediction Research in India, *Central Soil and Water Conservation Research and Training Institute Bulletin*, No: T12/D9, Dehra Dun.
- Souadi, Y., 2011.** L'érosion hydrique au Maghreb, étude d'un cas: le bassin versant de l'oued Barbara (Tunisie septentrionale).
- Soutter, M., Mermoud, A., et Musy A., 2007.** *Ingénierie des eaux et du sol Processus et aménagements*, Presse polytechniques et universitaires romandes, 316 p.
- Stone, R.P., Hillborn, D. 2000.** Universal Soil Loss Equation, USLE. Ontario. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs pp. 9.
- Tahiri, M., Tabyaoui, H., El Hammichi, F., Tahiri, A., & El Haddi, H. 2014.** Evaluation et Quantification de l'Erosion et la Sédimentation à Partir des Modèles RUSLE, MUSLE et Déposition Intégrés dans un SIG. Application au Sous-Bassin de l'Oued Sania (Bassin de Tahaddart, Rif nord occidental, Maroc). *European Journal of Scientific Research*, 125(2), 157-178.
- Terfous, A., Megnounif, A., Bouanani A., 2003.** Détermination des dégradations spécifiques dans trois bassins versants des régions méditerranéennes. IAHS pub. n° 278 , 366-372.
- Touaibia, B., 2000.** Erosion – Transport solide- envasement des barrages. Cas du bassin versant Mina, Thèse de Doctorat d'état , INA, EL-Harrache, Algérie.
- Touaibia, B., Gomer, D., Aidaoui, A., 1999.** Approche quantitative de l'érosion hydrique a

différentes échelles spatiales : bassin versant de l'Oued Mina. *Hydrological Sciences-Journal des sciences Hydrologiques*, 44(6), p 973-986.

Touaibia, B., Gomer, D., Aidaoui, A et Achite, 2001. Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi aride, de l'Algérie du Nord. *Journal des science hydrologique*. 46(1), 41-53.

Touaibia, B., 2010. Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 21(4), pp 333-335.

Toumi, S., Meddi, M., Mahe, 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*. Vol. 58. Iss. 7 p. 1542–1558.

Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. 2000. Soil erosion risk assessment in Europe.

Van Remortel, R.D., Maichle, R.W., Hickey, R.J. 2003. Computing the LS-Factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using C++ executable, Lockheed Martin Environmental Services, Las Vegas, NV.

Villa, j.M., 1980. La chaîne Alpine d'Algérie Orientale et des Confins Algéro-tunisiens, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).

Vrieling, A., 2005. Satellite remote sensing for water erosion assessment, a review. *CATENA*. Vol. 65. Iss. 1 p. 2–18.

Walling, D. E., Webb, D. W., 1981. The reliability of suspended sediment load data. Erosion and sediment transport measurement, Proceedings of the Florence (Symposium, June 1981) IAHS Publ. No. 133.

Walling, D.E., 1984, The Sediment Yields of African rivers. IAHS Publications. 144: 265-283.

Wischmeier, H., Smith, D.D., Uhlandr, E., 1958. Evaluation of factors in the soil-loss equation.

Wischmeier, H., Smith, D.D., 1960. A universal soil-loss estimating equation to guide conservation form plan.

Wischmeier W. H. et Smith D. D., 1965. Prediction rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains : a guide for selection of practices for soil and water conservation. U.S. Dep Agric. Agric. Handbook n° 282.

Wischmeier, W. H., Johnson, C.B. & Cross, B.V., 1971. A soil erodibility monograph for farm lands and construction sites. *Journal of soil and water*. Vol. 265.

Wischmeier, W.H., Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion. A guide to conservation planning. USDA-ARS. Agriculture Handbook. No 537 pp. 58.

Wood, P. A., 1977. Controls of variation in suspended sediment concentration in river Rother, West Sussex, England. *Sedimentology* 24: pp 437-445.

Yalin, M.S., 1980. Mechanics of sediment transport, Pergamon Press, Oxford.

Zhang, W.B., Fu, J.S., 2003. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount. Resour. Sci. 25 (1), 35-41.

Zingg, A. W., 1940, Degree and length of land slop as it affects soil loss in runoff. Agric. Eng., N°21, pp. 59-64.

Zurayk, R., Sayegh, F. E. A. C., Hamadeh, S., & Chehab, A. G., 2001. A GIS based methodology for soil degradation evaluation. In Selected papers from 10th International soil conservation organization meeting (1999) Purdue university and the USDA-ARS National Soil Erosion research laboratory (pp 1082-1089).