ARCHIPEL (UNIVERSITE DU QUEBEC A MONTREAL)

ACADEMIC PUBLICATION

RESEARCH ARTICLE

Erosion hydrique au Maghreb : Cas du bassin de l'Oued Barbara (Tunisie)

AUTHORS

Youssef Souadi

ILMIN LIBRARY • ACADEMIC FREE ACCESS

https://ilminlibrary.com

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

L'ÉROSION HYDRIQUE AU MAGHREB
ÉTUDE D'UN CAS : LE BASSIN VERSANT DE L'OUED BARBARA
(TUNISIE SEPTENTRIONALE)

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR
YOUSSEF SOUADI

MARS 2011

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

Dédicace

À la mémoire de mon père (28/11/2009)

Pour ma mère,

mes frères, mes sœurs,

ma femme,

ma petite fille

et mes amis

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail j'exprime mes vifs remerciements à Monsieur Yann ROCHE, professeur au département de géographie de l'UQAM pour son aide continue, son encadrement, sa disponibilité, ses encouragements et les conseils qu'il n'a cessé de me donner tout au long du déroulement de cette étude qui sans lui n'aurait pas pu être achevée.

Je suis reconnaissant à Monsieur Néjib AZIZI, agroéconomiste à l'Office du développement sylvo-pastorale du Nord Ouest de la Tunisie (ODESYPANO), pour m'avoir permis d'effectuer cette étude en Tunisie et de me faciliter surtout les travaux du terrain.

Je tiens à remercier Monsieur Abdelhamid M'NAJJA, chef de service de l'économie de l'eau à la direction générale du génie rural et de l'exploitation des eaux (DGGREE) au ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques de Tunisie pour ses entrevues et son aide à l'obtention des données (Carte agricole de la Tunisie).

Je remercie Monsieur Mohamed MZOUGHI, agroéconomiste au centre national d'études agricoles de Tunis (CNEA) pour son aide à l'obtention des données et à consulter certains travaux réalisés par le CNEA.

Je remercie Monsieur Mohamed MESSAI, pédologue au commissariat régional de développement agricole (CRDA) du Gabès qui m'a aidé à l'analyse et à l'obtention des données pédologiques.

Mes remerciements sont également attribués aux Messieurs Samir FERTAS et Espartaco CARRERA, amis et collègues à l'UQAM, qui n'ont ménagé aucun effort pour me porter aide lors de l'utilisation d'ArcGis et de PCI Geomatica.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES vi
LISTE DES TABLEAUX viii
LISTE DES SYMBOLES x
LISTE DES ABRÉVIATIONS xi
RÉSUMÉ xii
INTRODUCTION 1
PARTIE I : ÉTUDE DU SYSTÈME GÉNÉRAL 7
MILIEU HUMAIN ET PHYSIQUE 8
1.1 Milieu humain 8
1.1.1 Caractéristiques démographiques de la zone cible 10
1.1.2 Caractéristiques économiques de la zone cible 13
1.2 Milieu physique 15
1.2.1 Le climat 15
1.2.2 Étude lithologique 21
1.2.3 Occupation des sols 27
1.3 Étude hydrologique 31
1.3.1 Description physique du bassin versant de l'oued Barbara 33
1.3.2 Estimation des apports liquides et solides 39
1.4 La lutte antiérosive dans la zone à l'étude de l'oued Barbara 46
PARTIE II : ÉTUDE DE L'ÉROSION HYDRIQUE À LA KROUMIRIE (TUNISIE SEPTENTRIONALE) 50
ÉTUDE DE L'ÉROSION HYDRIQUE AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE L'OUED BARBARA 51
2.1 Méthodologie 51
2.1.1 Collecte des données 54
2.1.2 Évaluation de l'érosion hydrique au bassin versant de l'oued Barbara 59

2.1.3 Association de la population à la gestion des ressources en sols du bassin versant de l'oued Barbara 74
2.1.4 Analyse des résultats 75
2.2 Résultats 76
2.2.1 Évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Barbara 76
2.2.2 Intégration de la population à la gestion des ressources en sols du bassin versant de l'oued Barbara 96
2.3 Discussion 107
CONCLUSION 112
APPENDICE A
DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES DE LA RÉGION À L'ÉTUDE 116
APPENDICE B
RÉSULTATS DES ANALYSES DES ÉCHANTILLONS DES SOLS 122
APPENDICE C
QUESTIONNAIRE DE L'ENQUÊTE 123
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 124

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Localisation géographique et administrative de la zone de l'oued Barbara.	9
1.2	Versant à pente forte exploité par la céréaliculture dans la zone à l'étude (août 2009).	14
1.3	Couverture pédologique de la zone à l'étude de l'oued Barbara	26
1.4	Occupation des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara	29
1.5	Forêt relique d'*olea europea* à la proximité du barrage Barbara.	30
1.6	Forêt de *Quercus suber* sans régénération naturelle dans le bassin versant de l'oued Barbara	30
1.7	Situation hydrologique de l'oued Barbara en période d'étiage	31
1.8	Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Barbara	32
1.9	Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Barbara	35
2.1	Procédure de l'élaboration d'un plan d'aménagement antiérosif pour le périmètre de l'oued Barbara (Tunisie septentrionale)	53
2.2	Localisation des stations pluviométriques	55
2.3	Localisation des profils pédologiques dans la zone à l'étude	57
2.4	Triangle des textures des sols	67
2.5	Évaluation de la perméabilité par le triangle des textures des sols	68
2.6	Zones des potentialités érosives du périmètre à l'étude de l'oued Barbara	77
2.7	Cas de ravinement généralisé dans le bassin versant de l'oued Barbara.	79

2.8 Cas de ravinement hiérarchisé dans le bassin versant de l'oued Barbara..... 79

2.9 Ravin sillonnant une parcelle agricole dans le bassin versant de l'oued Barbara..... 80

2.10 Variation du facteur d'agressivité climatique (R) dans le périmètre à l'étude de l'oued Barbara 83

2.11 Variation du facteur d'érodibilité des sols (K) dans le périmètre à l'étude de l'oued Barbara..... 87

2.12 Variation du facteur topographique (LS) dans la zone de l'oued Barbara..... 89

2.13 Variation du facteur d'occupation des sols (C) dans le périmètre à l'étude de l'oued Barbara..... 91

2.14 Variation du facteur des pratiques antiérosive dans le périmètre à l'étude de l'oued Barbara..... 93

2.15 Évaluation des pertes en sols par USLE au périmètre à l'étude de l'oued Barbara..... 95

2.16 Seuil en pierres sèches implanté sur un ravin dans le bassin versant de l'oued Barbara. 100

2.17 Fixation d'un ravin dans le bassin versant de l'oued Barbara par des plantations *d'acacia cyanophylla*..... 101

2.18 Scénario d'un plan d'aménagement antiérosif pour le périmètre à l'étude de l'oued Barbara..... 104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1.1	Contribution sectorielle de la population active (en %)	10
1.2	Caractéristiques de la population de la région selon le sexe	11
1.3	Répartition de la population cible au sein de la zone à l'étude de l'oued Barbara	12
1.4	Caractéristiques agricoles de la zone à l'étude de l'oued Barbara	14
1.5	Variation saisonnière de la pluviométrie (en mm)	16
1.6	Variation mensuelle des températures (en °C)	18
1.7	Variation mensuelle de l'évaporation potentielle ETP (en mm)	19
1.8	Classification des étages bioclimatiques	21
1.9	Répartition pédologique de la zone à l'étude de l'oued Barbara	25
1.10	Occupation des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara	28
1.11	Classification du relief selon *Ig* par l'ORSTOM	36
1.12	Classification du relief selon la *Ds* par l'ORSTOM	37
1.13	Caractéristiques morpho-métriques du bassin versant de l'oued Barbara	38
1.14	Évaluation de la lame d'eau ruisselée au bassin versant de l'oued Barbara	41
1.15	Estimation des apports solides au bassin versant de l'oued Barbara	45
2.1	Mots clés, variables, indicateurs et nature des données	52
2.2	Caractéristiques des stations pluviométriques	54

2.3 Codification de la structure des sols (c_s).....66

2.4 Codification de la perméabilité du sol (b_p).....66

2.5 Valeurs du paramètre (mp) en fonction de la variation de la pente....69

2.6 Variation de (C) en fonction des stades de la couverture végétale.....71

2.7 Variation de (C) en fonction de la couverture végétale 71

2.8 Variation de (P) en fonction des pratiques antiérosives.....72

2.9 Répartition des zones d'érosion hydrique.....76

2.10 Répartition des niveaux d'érosion hydrique.....78

2.11 Valeurs de l'agressivité climatique du périmètre à l'étude de l'oued Barbara.....81

2.12 La texture des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara.....84

2.13 Perméabilité et structure des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara.....85

2.14 Érodibilité des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara.....86

2.15 Classification de l'érodibilité des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara.....86

2.16 Facteur d'occupation des sols (C) au périmètre à l'étude de l'oued Barbara.....90

2.17 Facteur des pratiques antiérosives (P) au périmètre à l'étude de l'oued Barbara.....92

2.18 Classes des pertes en sols (A) dans la zone de l'oued Barbara.....94

2.19 Résultats des enquêtes.....97

2.20 Composantes d'un scénario antiérosif de la zone à l'étude.....103

LISTE DES SYMBOLES

A	Perte annuelle des sols (tonnes/ha/an)
Al	Apport moyen annuel en eau (m^3)
As	Apport solide spécifique moyen (tonnes/km^2/an)
C	Facteur de la couverture végétale
ETP	Évaporation potentielle (mm)
J	Joule
h	Heure
ha	Hectare
K	Érodibilité des sols
Km	kilomètre
L	Longueur de la pente
Lr	Lame d'eau ruisselée
m	Mètre
mm	Millimètre
MJ	Mégajoule
P	Facteur des techniques agronomiques ou antiérosives
P_a	Précipitation moyenne annuelle
P_h	Précipitation du mois le plus humide
R	Indice d'érosivité des pluies ou agressivité climatique
S	Inclinaison de la pente
Sb	Superficie du bassin

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AEE	Agence européenne pour l'environnement
BAD	Banque Africaine de Développement
CES	Conservation des eaux et des sols
CNEA	Centre national des études agricoles, Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques de la Tunisie.
CRDA	Commissariat Régional du Développement Agricole
DGACTA	Direction générale de l'aménagement et de conservation des terres Agricoles, Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques de la Tunisie.
STUDI	Société tunisienne d'ingénierie
DGF	Direction Générale des Forêts, Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques de la Tunisie.
DF	Direction des forêts
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (Food and Agriculture Organization of the United Nations)
INS	Institut National des Statistiques de Tunis
IRD	Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement
ODESYPANO	Office du développement sylvo-pastorale du Nord-ouest de la Tunisie
ORSTOM	Office de la recherche scientifique et technique outre-mer
SIG	Système d'information géographique
SIDA	Agence Suédoise pour la Coopération au Développement International (Swedish International Development Cooperation Agency)
USLE	Équation universelle des pertes en sols (Universal Soil Loss Equation)

RÉSUMÉ

L'érosion hydrique est un phénomène complexe, largement répandu en Afrique du Nord, notamment dans la chaine montagneuse de la Kroumirie (Nord ouest de la Tunisie) où les facteurs influençant ce fléau expriment bien la fragilité du milieu qui se métamorphose graduellement vers le pire. La région est caractérisée par des reliefs très accidentés, une structure lithologique généralement tendre, des précipitations le plus souvent orageuses au moment où les terres cultivables subissent une forte pression anthropique. Ceci s'exprime notamment par la dégradation des sols et leur fertilité qui se traduit généralement par des bouleversements socioéconomiques et écologiques le plus souvent irréversibles. Au cours de cette recherche, on a étudié de près les cicatrices et les remèdes propices à l'érosion hydrique au Maghreb à travers l'unité géographique du bassin versant de l'oued Barbara (Tunisie septentrionale). Dans un premier temps, le travail consiste à montrer la gravité de la situation par la réalisation de la carte de l'érosion hydrique à travers la méthode de la direction des forêts de la Tunisie (DF/FAO-SIDA) et l'équation universelle des pertes en sols (USLE). La première méthode, qui a diagnostiqué le fléau de l'érosion hydrique sur son aspect qualitatif, a mis en évidence que le ravinement est le processus érosif le plus actif et le plus sévère dans la zone à l'étude. Quant à l'USLE, elle a permis de quantifier le phénomène érosif à une moyenne annuelle des pertes en sol de l'ordre de 36,13 tonnes/ha. Par la suite, des enquêtes et des entrevues auprès des exploitants agricoles et des intervenants locaux de la zone à l'étude ont été faites dans le but d'identifier des aménagements de CES propices à la région pour la lutte antiérosive. Enfin, la projection de ces aménagements déjà définis sur la carte d'érosion hydrique a conduit à l'obtention d'un scénario antiérosif intégré dont l'utilisation pourra sensiblement améliorer, voir même réduire en grande partie les conséquences désastreuses du phénomène de la dynamique de l'érosion hydrique au niveau du bassin versant de l'oued Barbara.

Mots clés : Érosion hydrique, gestion intégrée, conservation des eaux et des sols, Maghreb, Tunisie, Kroumirie.

INTRODUCTION

L'érosion hydrique constitue la principale cause de dégradation des sols en plus de la détérioration de la qualité géochimique de l'eau qu'elle entraîne. Elle n'est pas limitée à la région du Maghreb. En effet, ailleurs dans le monde, on note aussi que des terrains fertiles sont partiellement ou totalement dégradés à cause de ce phénomène, cédant la place à des terrains squelettiques complètement appauvris. En Amérique latine, l'érosion hydrique touche 14,3 % du territoire d'Amérique du Sud et 26 % de l'Amérique centrale (United Nations, 2002). En Europe, selon l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), le problème affecte approximativement 17 % de la surface du territoire à différents degrés et s'observe localement, soit directement sous l'effet des activités humaines, soit indirectement suite aux changements climatiques (Institut français de l'environnement, 2005). Du côté de l'Asie, en Chine où la population est très nombreuse, l'érosion affecte 40 % du territoire, soit 3 569 200 km^2 de terres dont 1,61 millions de km^2 spécifiquement liés à l'érosion hydrique, laquelle provoque annuellement des pertes en terres de l'ordre de 4,52 milliards de tonnes. Si l'érosion des sols se poursuit à ce rythme dans ce pays, la production céréalière y sera réduite de 40 % en 50 ans, conjointement à un important accroissement démographique qui rend justement le problème particulièrement aigu (Agence de presse Xinghua, 2008). En Afrique du Nord, le phénomène de l'érosion hydrique est également très répandu, la majorité des bassins versants étant caractérisée par de fortes dégradations spécifiques dépassant 2000 tonnes/km^2/an, ce qui entraîne un envasement moyen annuel des retenues des barrages à raison de 125 millions de m^3 (REMINI W. et REMINI B., 2003). Au Maroc par exemple, l'érosion hydrique provoque annuellement des pertes de sols allant de 500 tonnes/km^2 à plus de 5 000 tonnes/km^2 selon les régions et un envasement des retenues des barrages de l'ordre de 75 millions de m^3, soit une réduction annuelle de 0,5 % de leur capacité de stockage, ce qui provoque une importante perte concernant les eaux permettant

l'irrigation de 10 000 ha/an et la détérioration de la qualité de l'eau potable mobilisée (Haut commissariat des eaux et des forêts du Maroc, 2008).

L'érosion hydrique est donc un problème environnemental international qui dégrade les sols. Elle provoque une modification de leur porosité[1] et une régression des terres fertiles, et par conséquent une réduction de leur capacité de production agricole, ce qui les rend de moins en moins capables de faire face à l'expansion démographique. Ainsi, pour subvenir à leurs besoins alimentaires, beaucoup de pays ont compensé l'appauvrissement et l'épuisement de leurs sols par l'apport des engrais chimiques auxquels s'ajoutent les pesticides via une agriculture intensive, ce qui a un impact sur le milieu environnemental par la pollution des ressources en sols, hydrologiques (détérioration de la qualité géochimique des eaux), et la perturbation des milieux écologiques et aquatiques. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (United Nations, 2002), la nitrification des sols et des eaux en Amérique latine par exemple est proportionnelle à l'utilisation des engrais chimiques et a triplé entre les années 1972 et 1997 en grimpant de 3,7 millions de tonnes à 10,9 millions de tonnes.

Au Maghreb, la Tunisie a vu sa population passer de 2 millions en 1920 à plus de 10 millions en 2004 (INS, 2005), avec en parallèle une progression des superficies agricoles de 1,2 million d'ha à plus de 5 millions d'ha (DGACTA, 2003). Cet accroissement des superficies a mené à un défrichement de la végétation naturelle, malgré le fait que cette dernière est considérée comme étant la meilleure protection antiérosive des sols. Les conditions géomorphologiques, hydro-climatiques et socio-économiques concernant les terres tunisiennes sont particulièrement favorables à leur dégradation. En effet, l'érosion hydrique menace environ 3 millions d'ha dont 1,5

[1] La porosité d'un sol est définie par l'ensemble des vides qui se trouvent entre ses particules. Elle est occupée généralement soit par l'eau ou par l'air (HOPKINS W.G. et HÜNTER N.P., 2003). Cette propriété permet au sol de constituer de véritables réservoirs hydrologiques.

millions sont gravement affectés par une érosion forte à moyenne (ACHOURI M., 1995).

La Tunisie septentrionale est le château d'eau du pays puisqu'elle en est la partie la plus humide et qu'elle renferme les plus importants ouvrages hydrauliques (AUCLAIR L. et GARDIN J., 2004). Les conditions climatiques y sont assez contraignantes, avec des précipitations annuelles relativement fortes, avoisinant les 1000 mm et prenant le plus souvent un caractère orageux. Sur le plan morphologique, les fortes pentes et les substrats où domine la marne renforcent les effets dévastateurs de ces précipitations, et les mauvaises pratiques agricoles et pastorales ne font qu'aggraver la situation (ELLOUMI M. et SELMI S., 2006). Soumise au climat méditerranéen, la région de la Kroumirie[2] renferme les massifs forestiers les plus importants du pays. Elle est caractérisée par une population rurale exerçant de fortes pressions sur leur environnement soit par l'agriculture, la déforestation ou le surpâturage, par un relief très accidenté et là où les contrastes climatiques sont très marqués, par des hivers froids, humides et des étés chauds, très secs, les impacts de l'érosion hydrique sont vraiment catastrophiques.

Chaque année donc, la Tunisie voit disparaître une partie de ses bonnes terres, la fertilité de ses sols étant elle même en régression. Par son ampleur et la gravité de ses conséquences, l'érosion hydrique est un problème dont la résolution est une nécessité vitale pour le pays. En Tunisie, l'eau présente un caractère stratégique de développement socio-économique en raison de sa rareté. Les potentialités hydrauliques du pays sont évaluées à 4 503 millions de m^3, dont 2 700 millions de m^3 soit 59,96 % sont des eaux de surface. Une protection de ces ressources de surface contre l'envasement passe par la réduction de l'érosion hydrique des bassins versants

[2] La Kroumirie est la région montagneuse de l'extrême Nord-ouest de la Tunisie dont le périmètre à l'étude fait partie. Elle tire son nom des Kroumirs, un peuple autochtone de la région. C'est l'une des régions les plus humides du Maghreb.

via des actions de protection et de conservation des sols à l'échelle des zones les plus vulnérables (BEN MAMMOU A. et LOUATI M. H., 2007). À cet égard, la stratégie du pays en matière de conservation des eaux et des sols (CES) vise surtout la réduction des pertes des terres agricoles, estimée annuellement à 20 000 ha, dont 10 000 ha sont associés à l'érosion hydrique, à réduire le colmatage et l'envasement des ouvrages hydrauliques qui entrainent une perte annuelle de stockage de 28 millions de m^3 d'eau et à augmenter la recharge des nappes par la mobilisation des eaux de surface (DGACTA, 2003). Dans ce contexte, la région est le cadre de plusieurs activités dont les objectifs sont divergents, la protection des sols entre en concurrence avec la déforestation, l'agriculture et le surpâturage. À cela s'ajoutent les changements climatiques qui viennent aggraver la situation par des pluies torrentielles et orageuses généralement après une longue saison sèche à des endroits où le couvert végétal est faible voire où le sol est complètement dénudé, ainsi qu'aux besoins d'une population en pleine expansion démographique, ce qui engendre des contraintes d'ordres écologiques, économiques et sociales. Ainsi, pour éviter le pire, et compte tenu de la complexité du processus de l'érosion hydrique, une approche participative, intégrée et pluridisciplinaire s'impose afin d'assurer une gestion durable des ressources en sols qui deviennent de plus en plus précieuses. Une telle approche permet à la fois aux cadres techniques et à la population locale de participer à la prise de décision en ce qui concerne l'utilisation du territoire, et à évaluer l'efficacité de leurs actions à long terme de telle sorte que la population gère les ressources en sols tandis que les acteurs techniques jouent un rôle de contrôle et de coordination (MEYA K., 2007). Cette approche permettra alors l'implication active de la population cible en tant qu'acteur principal du processus de la gestion, de la conduite et de la préservation des ressources en sols (ELLOUMI M. et al, 2005). C'est dans cette optique que l'État tunisien a entamé une démarche s'appuyant sur la mise en œuvre de législations et de mesures protectives, préventives et curatives pour la conservation des eaux et des sols. Dans le cadre de sa stratégie nationale de la conservation des eaux et des sols, la Tunisie a lancé un programme d'aménagement

des bassins versants prioritaires appelés périmètres d'intervention pour l'amélioration du taux de mobilisation des eaux de ruissellement, le maintien et l'amélioration de la fertilité des sols et la consolidation et la protection de l'infrastructure. Une telle approche permettra de concentrer l'aménagement d'une façon efficace sur une zone limitée, soigneusement identifiée au préalable et choisie conformément à la loi 95-70 du 17 juillet 1995 relative à la conservation des eaux et des sols qui prévoit que tous les aménagements de conservation des eaux et des sols [3] seront mis en œuvre dans le cadre d'une gestion intégrée et participative (Premier ministère de la Tunisie, 1995). C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente recherche consacrée à l'un des problèmes majeurs de l'environnement et du milieu rural : l'érosion hydrique dans ce territoire maghrébin à travers la réalisation d'un plan d'aménagement antiérosif pour le bassin versant de l'oued Barbara (Tunisie septentrionale).

L'objectif principal de l'étude est de démontrer que le développement social, économique et environnemental et la lutte antiérosive en milieu rural maghrébin ne pourront se faire que dans le cadre d'un projet de développement durable qui tient compte à la fois des aspirations socio-économiques de la population riveraine et de la protection de l'environnement. Par ailleurs, les objectifs spécifiques consistent (**i**) à illustrer les impacts de l'érosion hydrique sur le milieu physique et par conséquent sur le milieu agricole (socio-économique) et environnemental, (**ii**) à caractériser ces formes dans la région et (**iii**) à présenter une méthode qui pourrait être utilisée et améliorée ultérieurement pour limiter les impacts désastreux de ce phénomène.

---

[3] Les aménagements de conservation des eaux et des sols sont des techniques utilisées pour réduire l'érosion hydrique, améliorer la fertilité des sols par le maintien des sédiments et à assurer la recharge de la nappe.

Cette étude, qui s'inscrit dans le cadre d'une perspective d'aménagement du milieu physique et humain, se divise de la façon suivante:

Une première partie est consacrée à la présentation du milieu humain afin de montrer l'importance de l'anthropisation dans la région à travers l'agriculture et les pressions auxquelles sont soumis les sols. Par la suite un diagnostic du milieu physique (climat, lithologie et occupation des sols) a été dressé pour montrer la fragilité du milieu et l'influence de ces facteurs dans l'accentuation du phénomène de la dynamique érosive dans la zone à l'étude. Cette partie comprend également une étude hydrologique du bassin versant de l'oued Barbara pour déterminer ses caractéristiques morpho-métriques et de montrer sur la base de modèles empiriques le plus souvent utilisés dans la région méditerranéenne, l'agressivité et l'importance des eaux de ruissellement et du transport solide sur le milieu.

Une seconde partie est ensuite consacrée à l'étude de l'érosion hydrique, dans laquelle on décrit la démarche méthodologique appliquée dans la présente étude, notamment les méthodes d'évaluation des pertes en sols et la procédure d'intégration de la population cible à la gestion de ses ressources en sols. Elle comporte également, la présentation et la discussion des résultats de l'évaluation de l'érosion hydrique et ceux de la simulation d'un scénario antiérosif.

PARTIE I
ÉTUDE DU SYSTÈME GÉNÉRAL

MILIEU HUMAIN ET PHYSIQUE

Le périmètre de notre étude est l'unité hydrologique du bassin versant de l'oued Barbara. Cette entité géographique couvre une superficie de 162,6 km^2 et se situe entre les latitudes Nord 36° 34' et 36° 45' et les longitudes Est 8° 22' et 8° 38'. Administrativement, le bassin versant de l'oued Barbara fait partie du gouvernorat du Jendouba au Nord-ouest de la Tunisie[4] (Figure 1.1), où il rejoint onze *imadats* (secteurs) dont six font partie de la délégation de Fernana, trois de la délégation d'Ain Draham et deux de la délégation de Ghardimaou. Certains de ces secteurs sont intégralement inclus dans le bassin versant tandis que d'autres ne le sont que partiellement.

1.1 MILIEU HUMAIN

Le gouvernorat de Jendouba couvre une superficie de 3 102 km^2, soit environ 1,9 % de la superficie totale du pays (163 610 km^2), répartie essentiellement entre terres incultes 202 km^2 (villes, infrastructures et carrières) et une superficie agricole de 2 900 km^2 soit 93,48 % de la superficie totale du gouvernorat. Cette superficie agricole se subdivise entre superficies agricoles utiles (1 740 km^2, soit 56,09 %), forêt (1 160 km^2 soit 37,39 %) et parcours (122,30 km^2 pour 3,94 %) (DGF, 1995).

[4] La Tunisie est découpée en 24 gouvernorats dont celui de Jendouba, lui-même découpé en neuf délégations dont celles d'Ain draham, de Fernana et de Ghardimaou, qui se subdivisent en imadats (secteurs), qui sont les plus petites unités administratives du pays (INS, 2008).

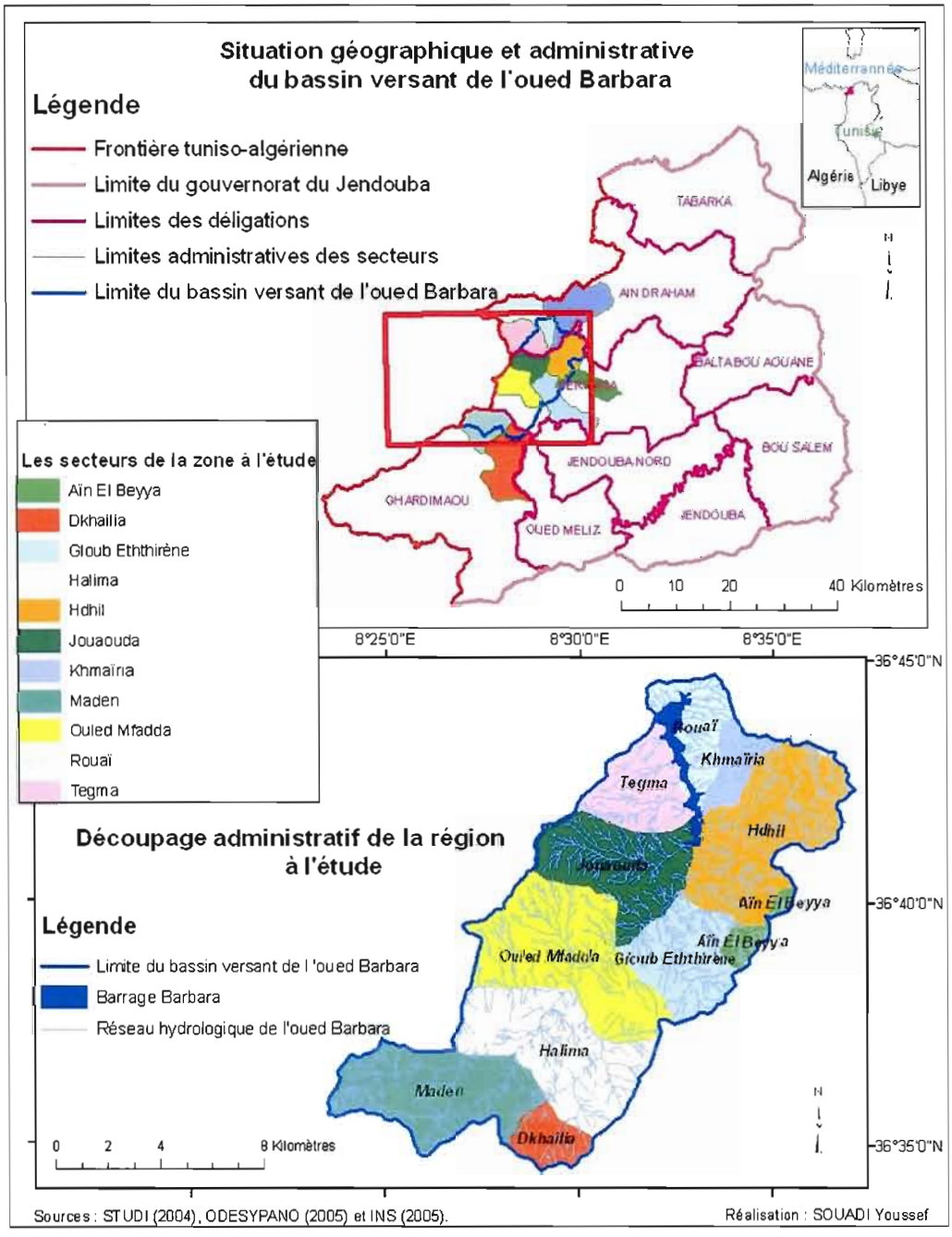


Figure 1.1 Localisation géographique et administrative de la zone de l'oued Barbara[5].

[5] La figure (1.1) est obtenue par fusion d'informations extraites de la carte agricole de la Tunisie (STUDI, 2004), de la carte des régions d'intervention de l'ODESYPANO (ODESYPANO, 2005) et du recensement général de la population tunisienne (INS, 2005).

La population du gouvernorat est de 416 608 habitants soit 4,1 % de la population totale du pays (10 126 300 habitants en 2004). L'accroissement annuel moyen est de 1,9 %, ce taux est relativement faible si on le compare à celui observé au niveau national (2,4 %). La répartition spatiale de la population du gouvernorat montre que la population rurale reste fortement majoritaire 72,7 % contre une population urbaine de 27,3 % (INS, 2005). Sur le plan économique, la région est essentiellement à vocation agricole. L'agriculture y contribue pour 10 % de la production nationale et constitue le principal secteur en matière d'emplois de la région (Tableau 1.1) avec un taux de 38,4 % de la population active totale (environ 45 000 emplois) contre 17,9 % à l'échelle du pays suivie par la commerce et les services avec un taux de 22,1 % et l'industrie et les travaux public de 17, 8 %. Le taux de chômage dans la région est parmi les plus élevés du pays, de l'ordre de 21,7 % contre 12,4 % pour l'ensemble de la Tunisie (INS, 2008).

Tableau 1.1

Contribution sectorielle de la population active (en %)

Secteur d'activité	Gouvernorat de Jendouba	Tunisie
Agriculture	38,4	17,9
Industrie, mines, énergies et travaux publics	17,8	33,1
Commerce et services	22,1	49,0
Taux de chômage	21,7	14,2

Source : INS, 2008.

1.1.1 Caractéristiques démographiques de la zone cible

Selon l'INS de Tunis, en 2004 la population du périmètre à l'étude de l'oued Barbara était totalement rurale, avec une répartition équitable entre les sexes (Tableau 1.2), égalité qui fait défaut pour les villes de Fernana, d'Ain Draham, de Ghardimaou et de Jendouba qui montrent une supériorité relative du sexe féminin.

Cela peut s'expliquer par le fait que les hommes migrent plus que les femmes vers d'autres villes de la Tunisie (Tunis et les villes du Sahel) en vue de chercher des emplois dans des secteurs autres que l'agriculture. Cette migration peut être aussi, considérée comme un indicateur qui reflète la dégradation et l'appauvrissement des terres devenues infertiles et incapables de subvenir aux besoins d'une population en pleine croissance.

Tableau 1.2

Caractéristiques de la population de la région selon le sexe [6]

Lieux	Population totale			Population urbaine			Population rurale		
(Secteurs)	M+F	M	F	M+F	M	F	M+F	M	F
Tegma	2885	1452	1433	--	--	--	2885	1452	1433
Rouai	3895	2015	1880	--	--	--	3895	2015	1880
Khmairia	5106	2593	2513	--	--	--	5106	2593	2513
Ain draham**	40372	19974	20398	8888	4312	4576	31484	15662	15822
Ouled Mfadda	3725	1868	1857	--	--	--	3725	1868	1857
Gloub Eththirène	6702	3277	3425	--	--	--	6702	3277	3425
Hdhil	2176	1064	1112	--	--	--	2176	1064	1112
Jouaouda	3255	1548	1707	--	--	--	3255	1548	1707
Halima	5127	2706	2421	--	--	--	5127	2706	2421
Ain Beyya	2979	1464	1515	--	--	--	2979	1464	1515
Fernana**	52690	25819	26871	3206	1581	1625	49484	24238	25246
Dkhailia	4849	2283	2566	--	--	--	4849	2283	2566
Maden	4770	2366	2404	--	--	--	4770	2366	2404
Ghardimaou**	67955	32771	35184	19688	9161	10527	48267	23610	24657
Jendouba*	416608	203901	212707	113699	55937	57762	302909	147964	154945

M : masculin, F : féminin, ** : délégations, * : gouvernorat.

Source : INS, 2005.

[6] La population totale correspond à celle de l'ensemble du secteur et non uniquement à la population inclus dans la zone cible.

Selon le même recensement de la population de 2004 mené par l'INS, la densité de la population des secteurs de la région de l'oued Barbara est homogène au sein d'un même secteur et elle est de 45 469 habitants répartis en 9 738 ménages avec une moyenne de 4 à 5 personnes par ménage. L'estimation pondérée par rapport à la superficie des secteurs qui sont partiellement inclus dans le périmètre à l'étude (Tableau 1.3) montre que la population demeurant au sein du bassin est de 21 253 habitants, ce qui donne une densité moyenne de 131 habitants/km^2 plus élevée que celle observée à l'échelle régionale pour Jendouba (73 habitants/km^2) et que celle de la Tunisie qui est de 62 habitants/km^2.

Tableau 1.3

Répartition de la population cible[7] au sein de la zone à l'étude de l'oued Barbara

Secteurs	Population totale	Superficie des secteurs en Km^2	Superficie cible en Km^2	Population cible
Tegma	2885	31,14	21,43	1039
Rouaï	3895	41,183	11,23	864
Khmairia	5106	55,31	9,15	465
Ouled Mfadda	3725	27,63	5,05	3668
Gloub Eththirène	6702	35,78	27,23	2489
Hdhil	2176	30,21	13,31	1867
Jouaouda	3255	17,65	25,94	3255
Halima	5127	31,05	17,67	3919
Ain Beyya	2979	20,23	23,73	389
Dkhailia	4849	59,85	2,66	419
Maden	4770	35,37	5,2	2879
Total	45469	385,41	162,60	21253

[7] La population cible est estimée par pondération par rapport à la superficie, car selon l'INS (2005) la densité de la population au sein d'un même secteur est homogène.

1.1.2 Caractéristiques économiques de la zone cible

La région à l'étude est caractérisée par une forte densité démographique et un manque de diversification de l'économie, ce qui a poussé la population à une exploitation excessive des ressources naturelles locales (ELLOUMI M. et SELMI S., 2006). L'aspect économique reflète parfaitement l'aspect rural de la population de la région qui ne compte aucune infrastructure industrielle ou agro-industrielle, ce qui confère à cette zone un aspect essentiellement agricole et la rend étroitement dépendante des villes d'Ain Draham, Fernana, Ghardimaou et surtout du centre de la région : la ville de Jendouba.

Les activités agricoles de la région reposent essentiellement sur des cultures annuelles et elles définissent un mode de culture biennal. Dans ce système, les grandes cultures accaparent les emblavures les plus importantes (Tableau 1.4), soit 82,32 % des terrains agricoles et se localisent sur les versants (Figure 1.2). Les cultures maraichères occupent 6,15 % des superficies, essentiellement de la tomate et du piment, et sont localisées à côté des puits et des rives des oueds pour l'irrigation. À côté de ces cultures annuelles, l'arboriculture ne représente que 9,85 % des superficies agricoles et est représentée surtout par l'olivier qui est l'espèce rustique le mieux adaptée et la plus développée dans la région, avec quelques vergers familiaux de pommiers, de poiriers, de pêchers et de figuiers qui sont introduits sur des superficies limitrophes des oueds et destinés essentiellement à une autoconsommation familiale. À côté de ces spéculations, on trouve également une culture industrielle représentée par le tabac, qui occupe 1,68 % de la superficie agricole totale (STUDI, 2004). Outre la production végétale, on trouve une production animale qui repose essentiellement sur un élevage en mode extensif d'un troupeau d'environ 30 000 têtes des races bovines, ovine et caprine, dont l'alimentation est assurée principalement par des cultures fourragères, pâturage direct des parcours, des forêts et par les résidus des récoltes (ELLOUMI M. et HARZLI T., 1996).

Tableau 1.4

Caractéristiques agricoles de la zone à l'étude de l'oued Barbara

Cultures	Superficies (ha)	Proportion en %
Grandes cultures	6 548,08	82,32
Cultures industrielles	133,21	1,68
Cultures maraichères	489,46	6,15
Arboriculture	783,85	9,85

Source : STUDI, 2004.

L'absence d'une économie diversifiée a donc mis en évidence le fait que les ressources en sols constituent une scène et une cible des activités quotidiennes de la population, que ce soit par le travail des sols ou le pâturage direct du troupeau. Cela a en effet un impact direct sur la stabilité des sols et sur la couverture végétale lesquelles conditionnent fortement le processus érosif.



Figure 1.2 Versant à pente forte exploité par la céréaliculture dans la zone à l'étude (août 2009). (Photo : SOUADI Youssef, 2009)

1.2 MILIEU PHYSIQUE

1.2.1 Le climat

Le bassin versant de l'oued Barbara fait partie de la zone montagnarde de la Kroumirie, qui est la plus arrosée du pays et qui se caractérise par:

- Des températures relativement plus basses, en raison de l'altitude,
- des précipitations relativement abondantes (avoisinantes les 1000 mm),
- une humidité relative assez élevée qui oscille entre un minimum de 71 % en août et un maximum de 86 % en novembre (CNEA, 1997),
- et une évaporation relativement faible.

Les données climatiques analysées ci-dessous sont enregistrées au niveau des stations climatiques les plus proches.

1.2.1.1 La pluviométrie

Les données pluviométriques sont issues des stations de Hammam Bourguiba, d'Ain Debba et d'Ain Beyya pour la période de 1975 à 2005 et des stations d'Ouled Mfadda et de l'Oued Barbara pour la période échelonnée de 1983 à 2005, et ce, pour les précipitations journalières. La pluviométrie de la zone à l'étude est caractérisée par une grande variabilité temporelle et spatiale (Tableau 1.5).

Tableau 1.5

Variation saisonnière de la pluviométrie (en mm)

Saisons / Stations	Automne	Hiver	Printemps	Été	Total	Superficie d'influence (km^2)
Hammam Bourguiba	291,5 (28,4%)	459,7 (44, 7%)	225,9 (22%)	50,7 (4,9%)	1028 (100%)	5,74
Ain Bayya	209 (25%)	384 (46%)	208 (25%)	31 (4 %)	832 (100%)	0,41
Ain Debba	303 (26,4%)	540 (47,2%)	273 (23,8%)	30,08 (2.6%)	1147 (100%)	2,40
Oued Barbara	204,4 (26.1 %)	376,3 (48.1%)	181,2 (23.2%)	20,2 (2.6%)	782 (100%)	65,75
Ouled Mfadda	231 (25.1%)	475 (52%)	202 (21.9%)	14 (2%)	922 (100%)	88,30

N.B. : Les chiffres entre parenthèses indiquent les proportions pluviométriques saisonnières.

Selon la méthode de THIESSEN[8], la pluviométrie moyenne annuelle est de 867 mm. La région est caractérisée par une variation pluviométrique inter-saisonnière très importante. La saison la plus pluvieuse est l'hiver avec des précipitations variant de 44 % à 52 % de la pluviométrie totale. On constate ensuite, un automne et un printemps relativement pluvieux avec environ 25 % des précipitations annuelles. Enfin, la zone est marquée par un été moins pluvieux avec 4 % des précipitations annuelles, mais bien que cette pluviosité estivale soit faible, elle est en réalité la plus agressive pour le sol, car elle est généralement orageuse et tombe avec une forte intensité. On note également que la période automnale (25 % des pluies) est caractérisée par un couvert végétal très faible et un sol sec généralement dénudé après

[8]La méthode de THIESSEN consiste à calculer la moyenne $\boldsymbol{P}$ des précipitations au sein du bassin versant de l'oued Barbara de surface $\boldsymbol{Sb}$ par rapport aux cinq stations pluviométriques. Chaque station pluviométrique définit une surface partielle $\boldsymbol{S_i}$ dans laquelle la précipitation $\boldsymbol{P_i}$ est supposée homogène. À chaque pluviomètre est attribué un pourcentage proportionnel à la surface de sa zone. Les zones définies sont des polygones obtenus en traçant entre les stations prises deux à deux, les médiatrices et présentant ainsi des surfaces partielles. La pluviométrie moyenne est définie par : $\boldsymbol{P} = (1/\boldsymbol{Sb})\sum(\boldsymbol{S_i}^* \boldsymbol{P_i})$, où, $Sb = \sum_{i=1}^{5} S_i$.

une période estivale relativement longue, ce qui accentue alors l'érodibilité[9]des sols. Cependant, la période automnale est généralement la saison du début de la campagne agricole, période où les précipitations sont très bénéfiques pour le démarrage des cultures pluviales appliquées dans la région (céréales et autres). Donc on se trouve dans une situation paradoxale, où les pluies sont à la fois très utiles et « relativement nocives». Pour remédier à cette situation et profiter de cet apport hydrique sans nuire au patrimoine sol, les techniques de conservation des eaux et des sols ont donc un rôle vital à jouer.

1.2.1.2 La température

Vue l'absence de données thermiques à côté des stations pluviométriques situées dans la zone à l'étude, on a examiné celles de la ville d'Aïn Draham (Tableau 1.6), car elle est la plus proche et présente des caractéristiques géographiques similaires à celle du bassin versant de l'oued Barbara. Le régime thermique est frais durant l'hiver et modéré pour le reste de l'année. La température annuelle moyenne est de 14,9°C, alors que la moyenne des maximas du mois le plus chaud (août) est de 30,6°C et celle des minimas du mois le plus froid (janvier) est de 3,9°C. Le minima absolu de la région est enregistré aux mois de décembre et février avec -5°C alors que le maxima absolu est en août avec 43°C.

Lorsque ces températures sont élevées, cela entraine généralement d'importantes pertes en eaux des sols par évapotranspiration. Ces pertes en eaux se traduisent par une réduction de l'humidité au niveau des sols qui s'exprime par une régression du couvert végétal et par conséquent des risques plus élevés à l'érosion hydrique (ROOSE E.et al.2008). Pour une telle situation, où l'aridité est très marquée

[9] L'érodibilité d'un sol est sa sensibilité à l'érosion (WISCHMEIER W.H. et SMITH D.D., 1978).

pendant l'été comme c'est le cas de la région de l'oued Barbara, les techniques de CES comme le paillage[10] (résidus des cultures, etc.) sont très conseillées.

Tableau 1.6

Variation mensuelle des températures (en °C)

Température	Moyenne	Moyenne maximale	Moyenne minimale	Minima absolu	Maxima absolu
Septembre	21,7	27	16,4	8	41
Octobre	16,7	21	12,5	4	39
Novembre	12,1	15,5	8,6	-1	28
Décembre	8,1	11,7	5,5	-5	26
Janvier	6,8	10,9	3,9	-4	22
Février	7,2	11,4	4	-5	24
Mars	9,7	13,6	5,9	-2	29
Avril	12,3	16,7	7,8	0	32
Mai	16,3	21,2	11,3	2	35
Juin	20,1	25,4	14,8	7	42
Juillet	23,7	29,7	17,7	9	43
Août	24,5	30,6	18,4	11	43

Source : CNEA, 1997.

1.2.1.3 L'évaporation potentielle (ETP)

L'évaporation potentielle annuelle dans la zone à l'étude est de l'ordre de 1057 mm. Elle est estimée par la relation empirique de BLANNEY C. (CNEA, 1997) et celle de RIOU C. (1980) dont l'expression est la suivante :

$$ETP = 0,31\left(\frac{\theta n + 2\theta n + 1}{3}\right) - b$$

[10] Le paillage (mulch ou mulching) consiste à ne pas laisser le sol à nu et à le recouvrir par des matériaux organiques comme les résidus des cultures par exemple.

Avec :

ETP : Évaporation potentielle du mois (n) en mm par jours,

θn : Température moyenne mensuelle maximale interannuelle du mois (n) en en °C,

$\theta n+1$: Température moyenne mensuelle maximale interannuelle du mois ($n+1$),

$b = 7,1 - 0,1\ \emptyset$ où $\emptyset$ est la latitude en degrés et en dixièmes,

Tableau 1.7

Variation mensuelle de l'évaporation potentielle ETP (en mm)

Mois	ETP Riou C.	ETP Blanney C.	ETP moyenne	Pluviométrie moyenne
Septembre	110	138,8	124,4	35,10
Octobre	59	95,3	77,15	61,64
Novembre	12	57,7	34,9	121,77
Décembre	-	39,4	19,7	175,32
Janvier	-	36,1	18,05	154,33
Février	12,3	36	24,15	105,8
Mars	43,3	57,7	50,5	82,29
Avril	79,41	74,2	76,8	81,7
Mai	123	113,1	118,1	31,44
Juin	159,08	146,4	152,74	8,59
Juillet	183,9	187,5	185,7	2,39
Août	164	187,1	175,55	6,89
Total	**946**	**1169**	**1057**	**867**

L'évaporation potentielle dans la zone à l'étude est très élevée et dépasse largement les précipitations puisqu'elle est de 1 057 mm (Tableau 1.7). Ce qui aggrave encore la situation, c'est que cette évaporation est minimale durant la saison pluvieuse, période où les eaux de ruissellement sont relativement abondantes, et atteint son maximum pendant la saison estivale où le caractère d'aridité devient très visible et où les eaux deviennent très rares et très précieuses. Pour tenter d'y remédier, on a recours à l'augmentation des stocks d'eau dans les sols, ce qui n'est

possible qu'avec l'adoption des techniques de conservation des eaux et des sols.

1.2.1.4 Les vents [11]

La zone à l'étude est marquée par des vents dominants qui balayent la région de l'Ouest et de Nord-ouest en automne et au printemps, des vents froids en provenance du Nord et du Nord-ouest en hiver, mais surtout les siroccos qui soufflent du sud pendant l'été. Ces derniers très chauds, secs et brûlants ont un impact direct sur l'état des sols et le dessèchement des végétaux et par conséquent une régression du couvert végétal (CNEA, 1997). L'action des vents s'observe surtout à différents niveaux, mécanique par l'arrachement et la chute des feuilles et des fleurs et physiologique par une augmentation de l'évapotranspiration (BALLEUX P. et VAN LEBERGHE P., 2001). Cette situation s'accompagne également par une réduction de l'humidité des sols et une régression du couvert végétal et par conséquent des risques plus élevés par rapport à l'érosion hydrique. Pour remédier à une telle situation, les aménagements de CES dont les reboisements (Brise-vents[12], etc.) deviennent très utiles.

1.2.1.5 L'étage bioclimatique de la région

L'étage bioclimatique est déterminé par le quotient pluviothermique d'EMBERGER qui est le plus utilisé dans la région méditerranéenne. Cet indice de valeur 111,8 a permis de définir et d'inscrire la zone du bassin versant de l'oued Barbara dans l'étage bioclimatique humide inférieur, avec une variante d'hiver doux (Tableau 1.8).

---

[11] L'érosion éolienne dans la région à l'étude est négligeable, car les caractéristiques physiques de la région (lithologie, topographie, écologie, etc.) sont défavorables à un tel phénomène (CNEA, 1997).

[12] Les brise-vents sont des moyens très efficaces utilisés pour réduire la violence des vents afin de minimiser leurs effets indésirables sur les cultures, mais en même temps garder leurs rôles utiles dans la pollinisation et le renouvellement des masses d'air (BALLEUX P. et VAN LEBERGHE P. 2001).

Le quotient d'EMBERGER est défini ainsi (DGACTA, 1995):

$$Q = \frac{2000 * Pa}{M^2 - m^2}$$

Pa : Pluviométrie moyenne annuelle en mm,

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud en degré Kelvin K °,

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid en K °,

Tableau 1.8

Classification des étages bioclimatiques

Étage bioclimatique	Indice d'EMBERGER	Pluviométrie (mm)
Saharien	$Q < 10$	$Pa < 100$
aride	$10 < Q < 30$	$100 < Pa < 300$
Semi-aride	$30 < Q < 70$	$300 < Pa < 600$
Subhumide	$70 < Q < 110$	$600 < Pa < 800$
Humide	$110 < Q < 170$	$800 < Pa < 1200$
Hyper-humide	$Q > 170$	$Pa > 1200$

Source : DGACTA, 1995.

1.2.2 Étude lithologique

1.2.2.1 Structure géologique de la région

Le bassin versant de l'oued Barbara est situé dans la zone des nappes, il a un relief très accidenté, qui s'est essentiellement structuré au cours du Miocène. La zone comprend quatre unités géologiques. En premier lieu, au Nord et au Nord-ouest du bassin, on trouve des formations de type « flysh numidien » qui caractérisent la chaine montagneuse de la Kroumirie et constituent un domaine de grès aux éboulis

sur des marnes, ensemble formé du Lutécien supérieur au Miocène. En second lieu, on trouve la partie Est limitée par les diapirs triasiques (présence du gypse) d'Ain draham. Ensuite, on rencontre la partie centrale suivant l'axe Nord-est/Sud-ouest, occupée par les reliefs d'un anticlinal calcaire marneux d'âge crétacé très disloqué par le même diapir. Enfin, la partie méridionale Est/Sud-est comprend essentiellement le flanc Nord-ouest d'un anticlinal à axe sénonien en marquant ainsi le Crétacé supérieur et présentant un grand développement du complexe lagunaire néogène à base calcaire et argile (BELKHOUDJA K. et al. 1973).

La structure stratigraphique et lithologique, surtout du fait des affleurements marneux qui deviennent plastiques et imperméables avec les premières précipitations, ne favorisent que les ruissellements et confèrent à la région une grande sensibilité à l'érosion hydrique sous ses différentes formes (glissements, ravins, etc.).

1.2.2.2 Structure pédologique du bassin versant de l'oued Barbara

La structure pédologique du périmètre à l'étude de l'oued Barbara (Figure 1.3) reflète parfaitement la structure géologique de la région et présente sept classes de sols (STUDI, 2004).

1.2.2.2.1 Sols minéraux bruts

Ces sols se forment sous l'effet direct de l'érosion. D'une part, on trouve des sols qui correspondent à la roche mère dénudée suite à une érosion intense et sont appelés lithosols si la roche mère est dure et compacte (calcaire) et régosols dans le cas d'une roche-mère tendre (marne). Les régosols et les lithosols couvrent 540,03 ha et se rencontrent essentiellement sur les flancs des collines Est du bassin versant de l'oued Barbara. Ils se développent sur une roche mère tendre marneuse ou bien sur des grès calcaires. La nature de la topographie leur confère un drainage externe élevé.

Ces types de sols sont exploités en parcours par le cheptel de la population locale. De l'autre côté, on trouve des sols minéraux bruts d'érosion, qui couvrent 360,43 ha, qui sont très peu profonds, peu structurés et ont une texture limono-argileuse. Ces sols se rencontrent essentiellement au fond des oueds du bassin versant de l'oued Barbara. Cette classe occupe dans son ensemble 900,47 ha soit 5,53 % de la superficie totale de la zone à l'étude.

1.2.2.2.2 Les sols peu évolués d'apport

Ces sols peu évolués sont de deux types. Ils peuvent être d'apport colluvial, occupent principalement les flancs des collines Est du bassin versant de l'oued Barbara et sont formés en bas des pentes à partir des matériaux arrachés des niveaux supérieurs par l'érosion. Ces sols sont caractérisés par un drainage externe moyen à élevé et sont occupés essentiellement par des céréales (blé). Il peut aussi s'agir de sols peu évolués d'apport alluviaux formés à proximité et caractérisant les dépôts récents réalisés par les oueds qui longent essentiellement l'oued Barbara. Ces sols sont généralement bien structurés, caractérisés par une texture limono-argileuse et un bon drainage externe. Ils sont occupés par des cultures céréalières (blé). Cette classe de sols occupe 5 009,38 ha soit 30,83 % de l'ensemble de la couverture pédologique.

1.2.2.2.3 Les rendzines

Les rendzines sont des sols où l'horizon humifère repose directement sur le substrat calcaire. Ces sols sont très riches en carbonate de calcium et on les trouve au sud du bassin versant de l'oued Barbara. L'horizon humifère est épais, bien structuré, irrégulier ayant une texture limono-argileuse. Ce type de sols est exploité essentiellement en parcours et occupe 540,12 ha soit 3,33 % de la superficie totale du périmètre à l'étude.

1.2.2.2.4 Les vertisols

Ce sont des sols argileux, de couleur sombre, qui se fissurent profondément en été. Bien que leurs caractéristiques physiques rendent leur mise en culture difficile, ils ont un potentiel de production considérable. Les variations de teneur en eau des vertisols s'accompagnent de gonflements et de retraits, leur richesse en argile, dont une grande partie est du type gonflant (par exemple illite), rend ces sols plastiques et collants à l'état humide, alors qu'à l'état sec ils sont durs, compacts et profondément fissurés. Ce type de sols se rencontre au nord du bassin versant de l'oued Barbara, caractérisé par un drainage externe très faible dans le cas des terrains plats et un drainage moyen dans le cas des terrains en pente. Ces sols sont occupés par la culture du blé ainsi que des superficies très restreintes de cultures maraichères. Ils présentent une texture équilibrée à argilo-limoneuse et une structure moyenne, friable, peu poreuse. Cette classe est la moins représentée dans le bassin versant et occupe 16,20 ha soit 0,1 % de la superficie totale de la zone à l'étude.

1.2.2.2.5 Sols brunifiés

Les sols brunifiés occupent essentiellement le versant ouest du bassin versant sur les basses terrasses alluviales. Ils sont caractérisés par une moyenne charge caillouteuse en surface et en profondeur, par un bon drainage externe et sont occupés par des formations forestières (chêne liège, etc.). Ces sols sont caractérisés par une structure particulaire et une texture limono-argileuse. Ils sont occupés par les grandes cultures et quelques plantations arboricoles (olivier). Cette classe occupe 3 009,20 ha soit 18,52 % de la superficie totale du périmètre à l'étude.

1.2.2.2.6 Sols bruns calcaires

Ces sols se développent sur une roche mère calcaire et sont localisés au nord et au sud du bassin versant. Ils sont caractérisés par une texture argileuse. Ces sols sont exploités en parcours et en cultures annuelles et occupent 3 569,07 ha soit 21,97 % de la superficie totale de la zone à l'étude de l'oued Barbara.

1.2.2.2.7 Classe des sols complexes

Cette classe comprend les combinaisons des différents types de sols et se rencontrent partout dans la zone à l'étude, tout en étant localisés surtout à l'Est de l'oued Barbara. Ces sols occupent 3 218,43 ha, soit 19,77 % de la superficie totale.

La majorité des sols du bassin versant de l'oued Barbara (Tableau 1.9) se trouvent sur des terrains très accidentés et ont une texture limono-argileuse, peu perméable à drainage faible. Cette situation favorise alors les ruissellements et expose fortement les sols de la région à l'érosion hydrique, d'où l'utilité du recours aux techniques de conservation des eaux et des sols (CES).

Tableau 1.9

Répartition pédologique de la zone à l'étude de l'oued Barbara

Classe des sols	Superficie (ha)	Proportion pédologique (%)
Sols minéraux bruts	900,47	5,53
Sols peu évolués	5 009,38	30,83
Rendzines	540,12	3,33
Sols bruns calcaires	3 569,07	21,97
Vertisols	16,20	0,1
Sols brunifiés	3 009,20	18,52
Sols complexes	3 218,43	19,81
Total	16 262,85	100%

Source : STUDI, 2004.

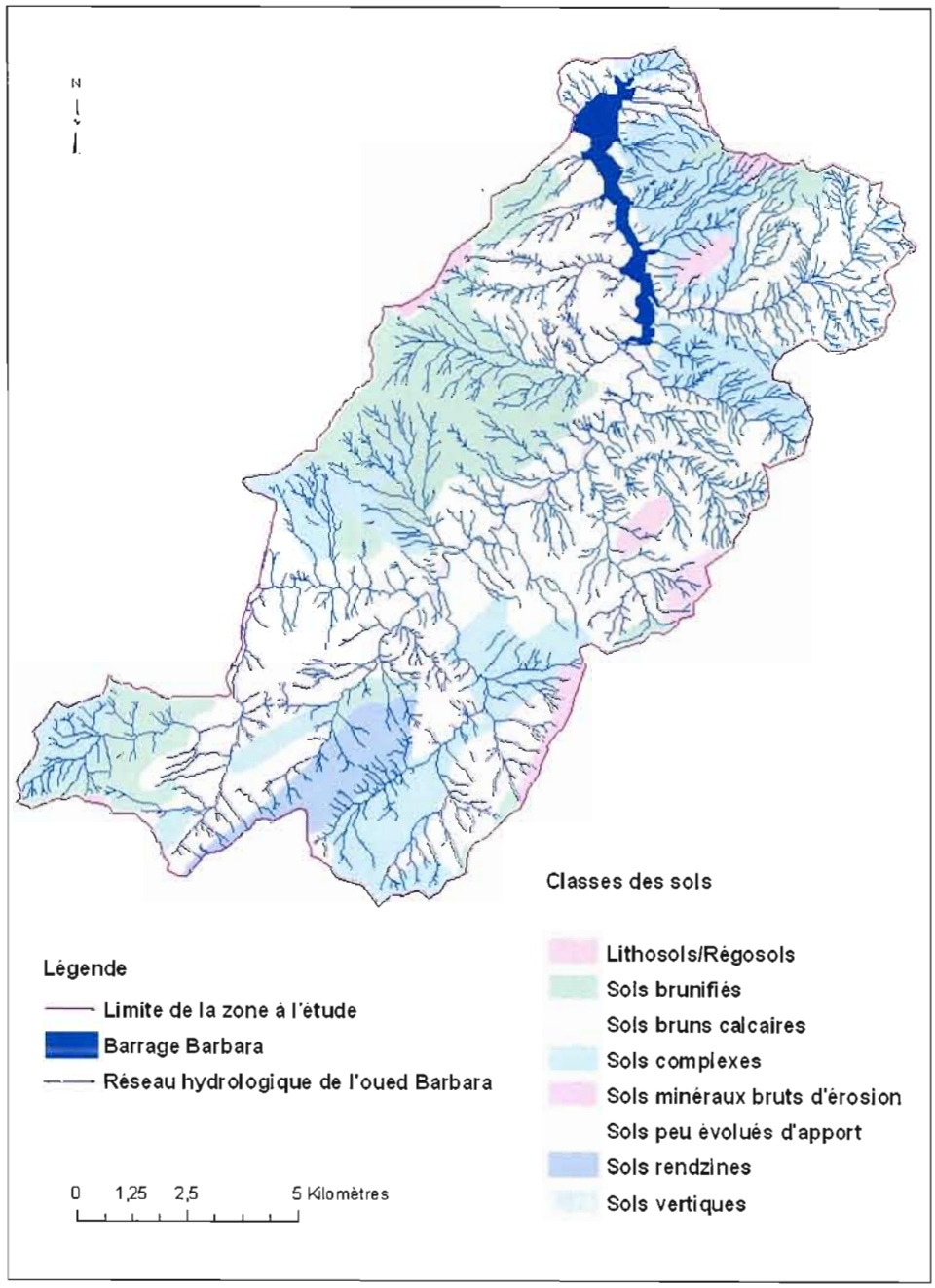


Figure 1.3 Couverture pédologique de la zone à l'étude de l'oued Barbara

1.2.3 Occupation des sols

La couverture écologique (Figure 1.4) est la résultante des caractéristiques géologiques, pédologiques, climatiques, mais surtout anthropiques de la région. À part quelques zones forestières, la plupart des superficies du bassin versant sont dénudées, cultivées ou couvertes de maquis dégradés. La région est caractérisée essentiellement par le chêne Zeen (*Quercus canariensis*) qui se rencontre sur les sommets des montagnes, à des altitudes supérieures à 700 m, car ce sont des essences exigeantes en eau, ainsi que du chêne-liège (*Quercus suber*) accompagné par des sous-bois essentiellement peuplés de lentisques (*pistacia lentiscus*) et de cistes de Montpellier (*cistus monspeliensis*), à des altitudes inférieures à la première (STAMBOULI ESSASSI S. et al., 2007). On trouve aussi de l'olivier lentisque (*olea europea*) à des altitudes plus basses et sur des sols marneux des versants de l'oued Barbara, mais cette série est actuellement en recul, laissant sa place à la céréaliculture (Figure 1.5). D'une façon générale, le bassin versant de l'oued Barbara a été marqué par une forte anthropisation, les forêts ayant subi et subissant encore de fortes pressions au profit des surfaces agricoles et des troupeaux qui les pâturent, rendant leur régénération très difficile et aléatoire, et limitant leur existence aux crêtes.

Dans l'ensemble, l'occupation du périmètre à l'étude de l'oued Barbara (Tableau 1.10) montre que les cultures annuelles accaparent 7 037,54 ha (soit 42,53 % de la superficie totale), l'arboriculture représente 783,85 ha (4,74 %), les forêts occupent 3 473,11 ha (20,99 %), les parcours 4 330,06 ha (6,17 %), tandis que le barrage Barbara et les infrastructures représentent respectivement 283,17 ha (1,71 %) et 638,30 ha (3,86 %) (STUDI, 2004).

On voit donc que 79% de la zone à l'étude de l'oued Barbara sont soumis directement aux activités quotidiennes de la population (agriculture et parcours), alors

que les 21 % restants (forêts)[13] sont relativement protégés. Mais, en réalité, ces forêts sont le théâtre d'une forte pression anthropozoogène (récolte du bois de chauffe, pâturage direct du troupeau, faune sauvage, etc.), rendant leur régénération très difficile et aléatoire (Figure 1.6), ce qui montre bien la gravité de la situation. La végétation est un facteur déterminant du régime de ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention des eaux par le bassin versant de l'oued Barbara. Donc sa présence va jouer le rôle de « régulateur » dans le régime d'écoulement. La résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense et inversement. En général la couverture écologique du bassin de Barbara étant largement dégradé et défriché en montagne par les incendies, par une agriculture extensive et un surpâturage excessif, cela a entraîné d'importantes pertes en sols et une accélération de l'érosion hydrique.

Tableau 1.10

Occupation des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara

Nature d'occupation	Types de couvert	Superficies (ha)	Superficie totale (ha)	Proportion (%)
Cultures annuelles	Céréales	3837,35	7037,54	42,53
	cultures industrielles	133,21		
	cultures fourragères	2577,52		
	cultures maraichères	489,46		
arboriculture	Oliveraies	177,98	783,85	4,74
	Pommeraies, Poiraies	605,87		
Forêts	Eucalyptus	72,59	3473,11	20,99
	Feuillus divers	567,48		
	Résineux	141,61		
	Chêne-liège	2690,57		
	Chêne zen	0,86		
Parcours	végétation naturelle	4330,06	4330,06	26,17
Barrage Barbara	Lac artificiel	283,17	283,17	1,71
Infrastructure	Bâtiments et routes	638,30	638,30	3,86

Source : STUDI, 2004.

[13] Tous les espaces forestiers sont propriété de l'État (DGF, 1995).

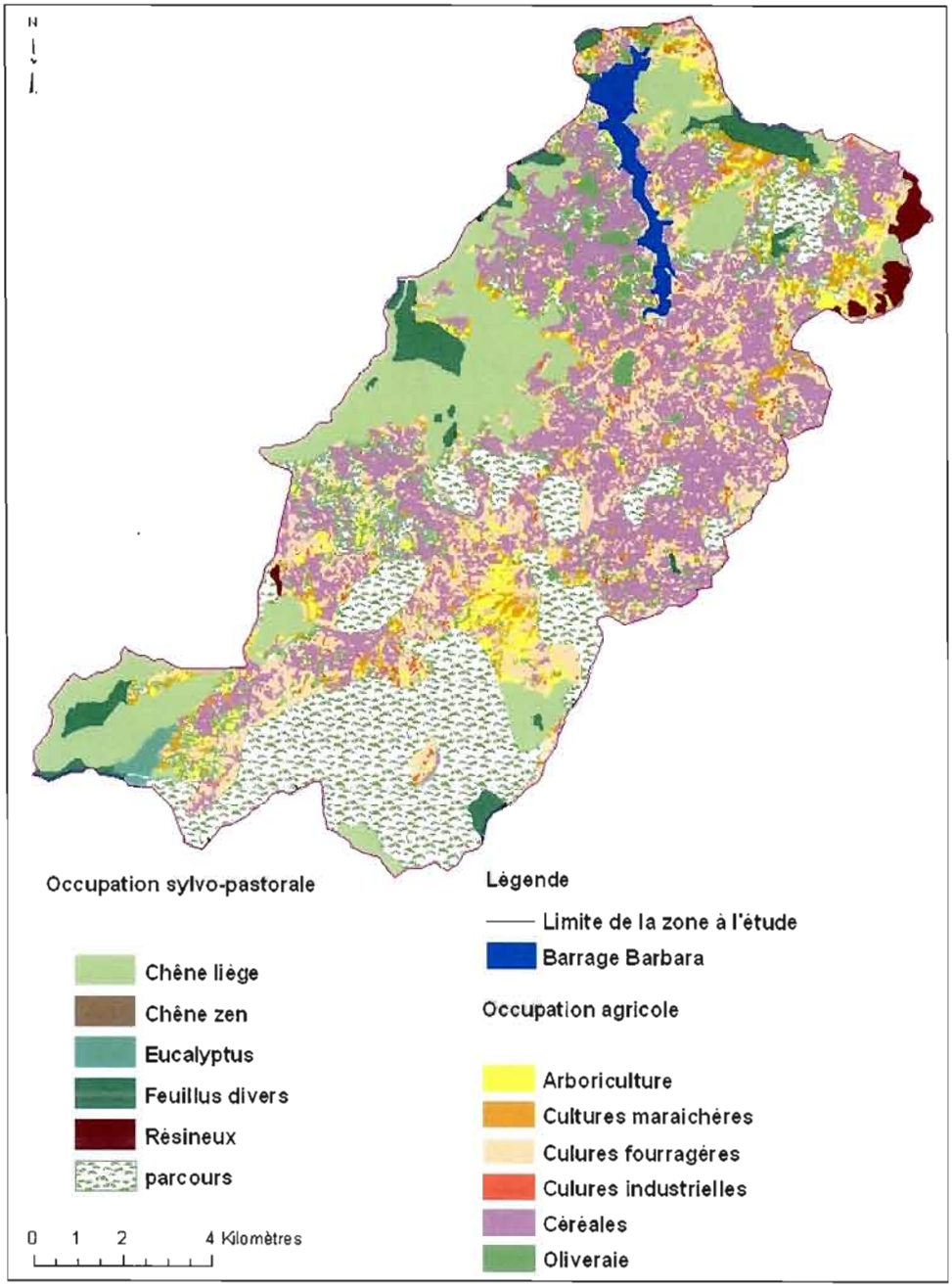


Figure 1.4 Occupation des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara



Figure 1.5 Forêt relique d'*olea europea* à la proximité du barrage Barbara. (Photo : SOUADI Youssef, 2009)



Figure 1.6 Forêt de *Quercus suber* sans régénération naturelle dans le bassin versant de l'oued Barbara[14]. (Photo : SOUADI Youssef, 2009)

[14] La régénération naturelle du chêne-liège est très difficile et aléatoire à cause : (1) des contrastes du climat, (2) de la régression du sous-bois et des plantes accompagnatrices qui assurent la protection des jeunes semis, (3) des pâturages et de la récolte du bois de chauffe, (4) des insectes et des incendies et (5) du ramassage des glands par la population locale pour nourrir le bétail (ABID H. et SELMI K., 1996).

1.3 ÉTUDE HYDROLOGIQUE [15]

Dans cette partie, on se réfère à l'ensemble du bassin versant, dont le débouché est le barrage Barbara[16] (Figure 1.8), soit une superficie totale de 174,8 Km^2, auquel on associe, outre les affluents de l'oued Barbara en territoire tunisien, un autre affluent (oued Guerouaoua) en territoire algérien, en vue de caractériser notre bassin versant et d'évaluer également les apports liquides et le transport solide. Dans l'ensemble, il s'agit d'une zone montagneuse très accidentée, caractérisée par un réseau hydrographique très ramifié et par des ruissellements extrêmement irréguliers (Figure 1.7) et très agressifs. Ce bassin versant de l'oued Barbara constitue de se fait une sous-unité hydrologique de l'oued Ballouta qui lui-même fait partie du grand bassin de l'oued El Kébir (en territoire algérien) dont les écoulements exoréiques se jettent en fin de parcours dans la Méditerranée.



Figure 1.7 Situation hydrologique de l'oued Barbara en période d'étiage (Photo : SOUADI Youssef, 2009)

[15] Dans la présente étude hydrologique, on s'est limité à certaines caractéristiques hydrologiques afin d'identifier leur influence sur le processus érosif de la région et de montrer en même temps leur degré d'exposition vis-à-vis à ce phénomène. Cependant, une étude hydrologique complète dépasse largement ce qui est présenté ici et ne fait pas l'objet de la présente étude.

[16] On a défini le bassin versant de l'oued Barbara par rapport au barrage, car ce dernier est très proche de son exutoire situé à l'oued Ballouta et la différence des superficies du bassin relatives au barrage et l'exutoire est très négligeable (0,405 km^2).

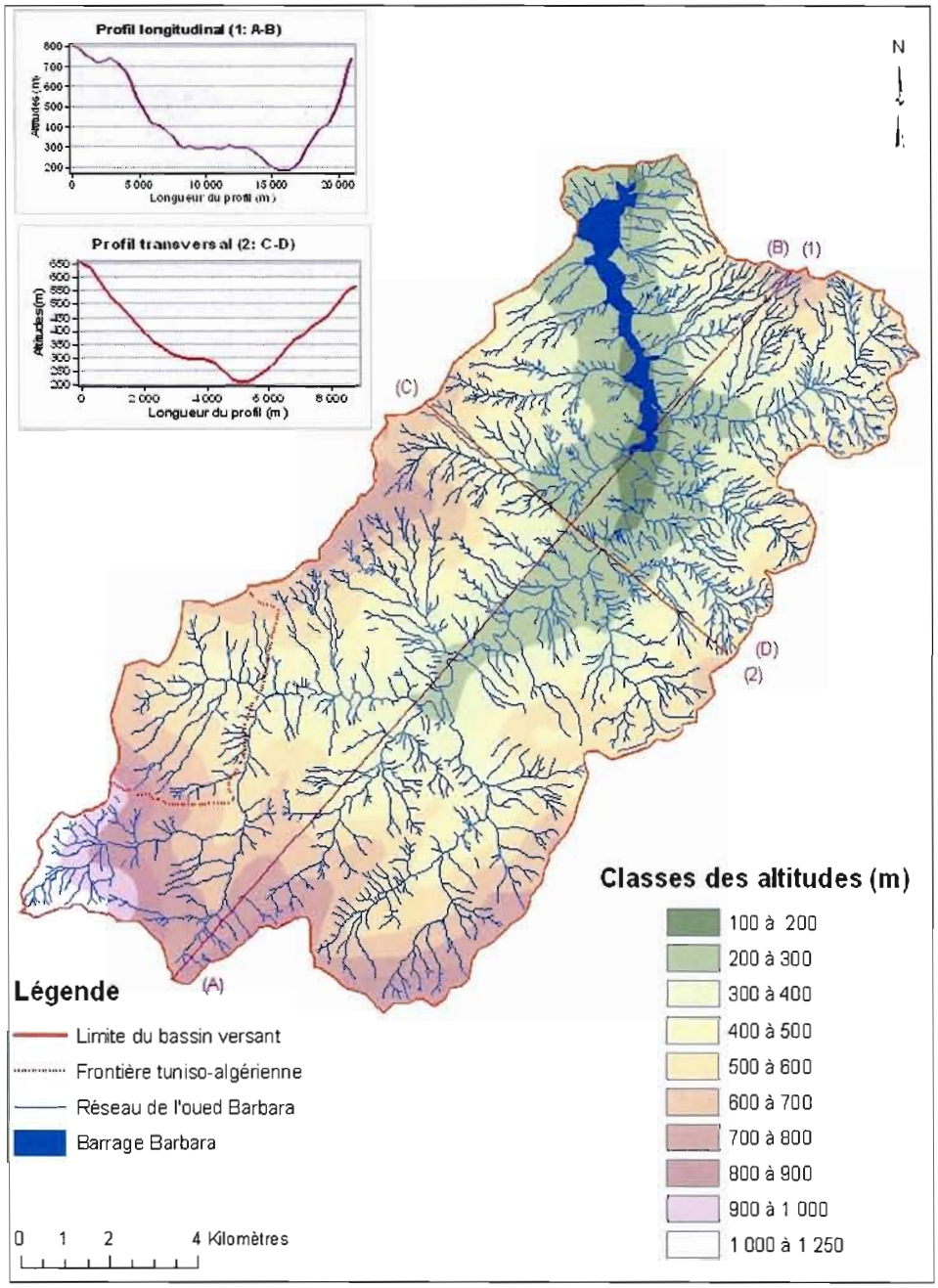


Figure 1.8 Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Barbara

1.3.1 Description physique du bassin versant de l'oued Barbara

La description du bassin versant implique la détermination d'un certain nombre d'indices géométriques et topographiques. Ces derniers vont mettre en évidence et confirmer la sensibilité de la région vis-à-vis du processus de l'érosion hydrique.

1.3.1.1 Indice de forme

Pour une superficie et pour une même averse, l'hydrogramme[17] à l'exutoire d'un bassin versant de forme très ramassée sera différent de celui d'un bassin allongé. On définit ainsi l'indice de compacité de Gravelius (G) qui est proche de 1 si le bassin versant est de forme relativement circulaire et s'éloigne de 1 si le bassin tend vers un aspect allongé (MUSY A. et HIGY C., 2004). Dans notre cas, le bassin versant de l'oued Barbara a un indice égal à 1,8, ce qui traduit une forme relativement allongée.

$$G = \frac{\mathrm{Pr}}{2\sqrt{\pi Sb}}$$

Où,

G : Indice de compacité de Gravelius,

Pr : Périmètre du bassin versant (km),

Sb : Superficie du bassin (km^2).

1.3.1.2 Rectangle équivalent de Gravelius

La notion de rectangle équivalent permet de connaître l'influence des caractéristiques du bassin versant sur l'écoulement. C'est une transformation purement géométrique qui consiste à déterminer la longueur d'un rectangle ayant la

[17] L'hydrogramme à l'exutoire représente la variation de débit de l'écoulement en fonction du temps.

même superficie et le même périmètre que le bassin versant (MUSY A. et HIGY C., 2004).

$$Le = \frac{G\sqrt{Sb}}{1,12}\left(1+\sqrt{1-\left(\frac{1,12}{G}\right)^2}\right)$$

Où,

Le : Longueur du rectangle équivalent (km),

Sb : Superficie du bassin (km^2)

1.3.1.3 Courbe hypsométrique

C'est une représentation graphique qui permet de montrer la répartition en pourcentage de la superficie du bassin versant en fonction de l'altitude afin de nous refléter la topographie du bassin versant (MUSY A., 2005). L'allure de la courbe (Figure 1.9) est forte dans son ensemble et prend de la valeur au fur et à mesure que l'altitude augmente, ce qui montre bien que le relief du bassin versant de l'oued Barbara est très accentué et par conséquent confère à la zone de gros risques face à l'érosion hydrique.

1.3.1.4 Altitude médiane et altitude moyenne

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse pour 50 % de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Elle est ici de 470m. Cette grandeur est très différente de l'altitude moyenne, qui est de 550 m, ce qui montre bien à quel point les pentes du bassin versant sont très hétérogènes (MUSY A., 2005).

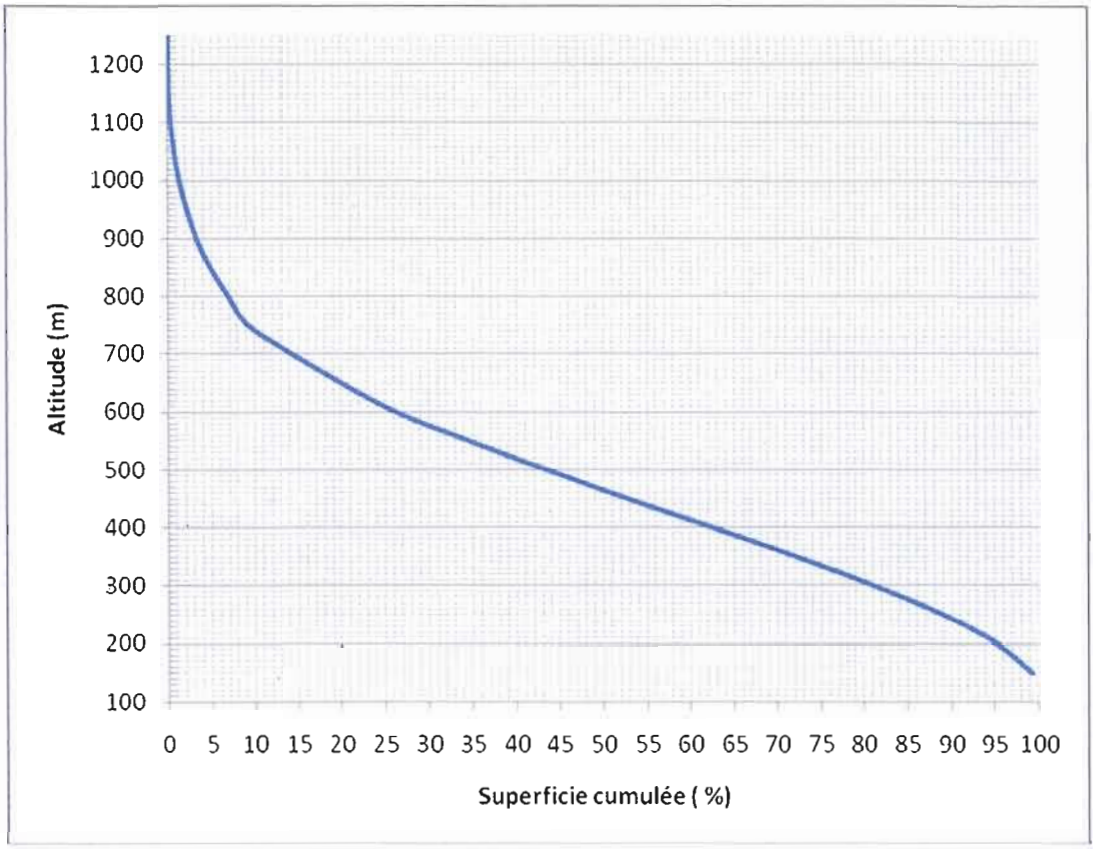


Figure 1.9 Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Barbara

1.3.1.5 Indice global de la pente *Ig*

L'indice global de la pente est défini par la relation suivante (MUSY A., 2005):

$$Ig = \frac{H95 - H5}{Le}$$

Où,

Le : Longueur du rectangle équivalent (km)

$H95$: Cote limitant les 5% des superficies les plus élevées

$H5$: Cote limitant les 5% des superficies les plus basses

Le bassin versant de l'oued Barbara a un indice *Ig* égal à 0,038 et se range selon la classification de l'ORSTOM[18] (Tableau 1.11) dans une classe de relief assez fort.

Tableau 1.11

Classification du relief selon *Ig* par l'ORSTOM

Valeurs de *Ig*	Classe des reliefs
$Ig < 0{,}002$	Relief très faible
$0{,}002 < Ig < 0{,}005$	Relief faible
$0{,}005 < Ig < 0{,}01$	Relief assez faible
$0{,}01 < Ig < 0{,}02$	Relief modéré
$0{,}02 < Ig < 0{,}05$	Relief assez fort
$0{,}05 < Ig < 0{,}5$	Relief fort
$0{,}5 < Ig$	Relief très fort

Source : DGACTA, 1995.

1.3.1.6 Dénivelé spécifique *Ds*

Ce paramètre nous permet de déterminer et de classer les reliefs. Il est défini par la relation suivante (MUSY A., 2005):

$$Ds = Ig * \sqrt{Sb}$$

Où,

Ig : Indice global de la pente,

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

Le bassin versant de l'oued Barbara possède un dénivelé spécifique d'une valeur égale à 510, ce qui lui permet de se classer dans une catégorie correspondant à un relief très fort (Tableau 1.12). Ces deux derniers indices confirment ce qu'on a supposé déjà, à savoir que notre bassin est caractérisé par un relief accidenté qui lui confère alors une grande sensibilité à l'érosion hydrique.

[18] ORSTOM (Office de la recherche scientifique et technique outre-mer) est l'ancienne nomination de l'Institut français de Recherche scientifique pour le Développement (IRD).

Tableau 1.12

Classification du relief selon la *Ds* par l'ORSTOM

Valeurs de Ds	Classe des reliefs
$Ds < 10$ 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

Source : DGACTA, 1995.

1.3.1.7 Temps de concentration des eaux des pluies

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie amont la plus éloignée du bassin versant pour parvenir à l'exutoire. Il est estimé à 5,23 heures, et calculé par la relation de GIANDOTTI (DGACTA, 1995).

$$Tc = \frac{4\sqrt{Sb} + 1{,}5Lt}{0{,}8\sqrt{(\frac{H\,\max - H\,\min}{2})}}$$

Où,

Tc : Temps de concentration (heures)

Sb : Superficie du bassin (km^2)

Lt : Longueur du talweg principal (km)

H max : Altitude maximale en m.

H min : Altitude minimale en m.

Plus ce temps de concentration est élevé, plus les risques associés à l'érosion sont faibles. À l'inverse, si ce temps est faible, cela signifie que les eaux de ruissellement se rassemblent et prennent de l'ampleur rapidement et leur évacuation

se fait avec une vitesse élevée générant également une grande force d'arrachement des particules de sols et risque donc d'avoir un pouvoir érosif plus important. Afin d'affaiblir la violence des ruissellements et par conséquent minimiser les risques d'érosion, il faut, d'une part favoriser l'infiltration de ces eaux dans les sols et d'autre part favoriser un séjour le plus étendu possible et assurer leur évacuation avec des débits non érosifs. Cela n'est possible là encore qu'avec les techniques de conservation des eaux et des sols.

Toutes les caractéristiques morpho-métriques du bassin versant de l'oued Barbara sont résumées dans le Tableau 1.13.

Tableau 1.13

Caractéristiques morpho-métriques du bassin versant

Paramètres	Unités	Valeurs
Superficie	Km^2	174,84
Périmètre	Km	84,95
Indice de compacité	--	1.8
Rectangle équivalent :		
Longueur	Km	16,83
Largeur	Km	10,39
Indice global de la pente	%	3,86
Dénivelé spécifique	-	510
Longueur du talweg	Km	32,79
Altitude maximale	M	1250
Altitude minimale	M	150
Hauteur 5%	M	210
Hauteur 95%	M	860
Hauteur moyenne	M	550
Hauteur médiane	M	470

1.3.2 Estimation des apports liquides et solides

Dans cette partie, on a évalué les apports liquides et le transport solide dans le bassin versant de l'oued Barbara à travers des modèles empiriques le plus souvent utilisés dans la région, en se référant à l'ensemble du bassin versant (174,8 Km^2) et à sa pluviométrie annuelle moyenne pondérée, qui est évaluée par la méthode de THIESSEN à 875 mm.

1.3.2.1 Évaluation de l'apport moyen annuel

L'apport moyen annuel est évalué par la relation suivante (CNEA, 2002) :

$$Al = Sb * Lr$$

Avec:

Al : Apport en eau moyen annuel en m^3

Sb : Superficie du bassin versant en m^2

Lr: Lame d'eau ruisselée en m

1.3.2.1.1 Évaluation de la lame d'eau ruisselée

L'évaluation de la lame d'eau ruisselée au sein du bassin versant de l'oued Barbara est faite en utilisant les modèles empiriques les plus appliqués dans la région de la Kroumirie.

1.3.2.1.1.1 Évaluation de la lame d'eau ruisselée par la formule algérienne

Le modèle connu sous le nom de formule algérienne s'écrit comme suit (CNEA, 2002) :

$$Lr = Pa(1 - 10^{-k(Pa)^2})$$
$$k = 0{,}18 - 0{,}01 Log_{10} Sb$$

Avec,

Lr : Lame d'eau ruisselée en mm

Sb : Superficie du bassin versant en Km^2

Pa : Pluviométrie moyenne annuelle en m

1.3.2.1.1.2 Évaluation de la lame d'eau ruisselée par la formule de TIXERONT et BERKALOFF

La relation de TIXERONT et BERKALOFF est définie ainsi (CNEA, 2002) :

$$Lr = \frac{Pa^3}{3 * ETP^2}$$

Avec:

Lr : Lame d'eau ruisselée en m

ETP: Évapotranspiration potentielle

Pa : Pluviométrie moyenne annuelle en m

1.3.2.1.1.3 Évaluation de la lame d'eau ruisselée par la formule de SAMIE

La relation de SAMIE est définie par (CNEA, 2003) :

$$Lr = Pa^2(293 - 2{,}2\sqrt{Sb})$$

Avec:

Lr : Lame d'eau ruisselée en mm

Sb : Superficie du bassin versant en Km^2

Pa : Pluviométrie moyenne annuelle en m

Les trois modèles donnent respectivement (Tableau 1.14) 212,22 mm, 200,38 mm et 202,056 mm. Ces valeurs sont relativement voisines, et dans ce cas on peut rapporter la lame d'eau écoulée à la moyenne de ces derniers, ce qui donne une lame moyenne de 204,88 mm. Cette lame d'eau écoulée entraine un apport moyen annuel de l'ordre de 35 822 065,4 m^3. Ces écoulements servent en grande partie à l'alimentation du barrage Barbara, dont la capacité est évaluée à 74 millions de m^3 (BAD[19], 2001).

Tableau 1.14

Évaluation de la lame d'eau ruisselée au bassin versant de l'oued Barbara

Modèle empirique	Lame d'eau ruisselée en mm
Modèle algérien	212,22
Modèle de TIXERONT et BERKALOFF	200,38
Modèle de SAMIE	202,056
Lame d'eau moyenne	204,88

1.3.2.1.2 Calcul du coefficient de ruissellement (*Kr*)

C'est le rapport de la lame d'eau écoulée à celle des précipitations.

$$Kr = (\frac{Lr}{Pa}) * 100$$

Avec :

Kr : Coefficient du ruissellement en %

Lr : Lame d'eau ruisselée en mm

Pa : Pluviométrie moyenne annuelle en mm

Le calcul de ce coefficient donne une valeur très élevée de 23,39 %. Cette fraction est fortement influencée par la perméabilité du sol, le couvert végétal, la

[19] BAD : Banque africaine de développement.

topographie et les précipitations elles-mêmes. Cette portion est très importante pour l'alimentation de la nappe, laquelle constituera un réservoir hydrologique surtout pendant l'été durant la pénurie d'eau. Ainsi, les ouvrages de CES s'imposent fortement afin d'améliorer le stockage de ces eaux dans les sols et de ralentir la vitesse d'évacuation des eaux pour minimiser leurs forces d'arrachement et de transport.

1.3.2.2 Le bilan hydrologique

L'équation générale du bilan hydrologique pour un bassin versant donné et une période définie est exprimé par :

$$P_p = LS + E + \Delta S$$

Avec :

P_p : Précipitations (liquide et solide) de la période en question (mm),

LS : Ruissellement de surface et écoulements souterrains (mm),

E : Évaporation (mm),

ΔS : Variation des stocks des eaux souterraines (mm).

Pour une période d'une année et dans le contexte du bassin versant de l'oued Barbara, où les précipitations annuelles sont de 875 mm, l'évaporation est de 1 057 mm et les ruissellements sont de l'ordre de 204,88 mm, on ne peut parler que d'un déficit hydrique. Ce déficit hydrique est à l'origine d'une diminution de l'humidité des sols et par conséquent d'une régression de la cohésion entre ces particules. En outre, ce déficit conduit à une diminution du couvert végétal par un arrêt de croissance et un dessèchement de la végétation herbacée suite à un épuisement des réserves utiles en eau utilisable par les plantes, conduisant ainsi à des terrains dénudés. À cela s'ajoutent les pentes fortes, qui rendent le bassin versant extrêmement sensible à l'érosion hydrique surtout avec les premières précipitations

automnales qui sont orageuses. Ainsi, une amélioration des stocks en eau dans les sols est possible à travers les aménagements de CES qui favorisent le maintien des sédiments et l'infiltration des eaux du ruissellement.

1.3.2.3 Évaluation du transport solide

L'évaluation du transport solide au sein du bassin versant de l'oued Barbara est effectuée ici en ayant recours aux modèles le plus souvent utilisés en Tunisie du nord ainsi que dans d'autres parties de la méditerranée.

1.3.2.3.1 Formule de FOURNIER

La relation de FOURNIER est définie par (REJEB M. M., 1996) :

$$As = \frac{1}{36}(\frac{Ph^2}{Pa})^{2,65}(\frac{h^2}{Sb})^{0,46}$$

Avec :

As : Apport solide spécifique (t/km^2/an)

Ph : Précipitations moyennes mensuelles du mois le plus pluvieux (mm)

Pa : Précipitations annuelles (mm)

$h = \frac{H\max - H\min}{2}$

H max : Altitude maximale en m.

H min : Altitude minimale en m.

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

1.3.2.3.2 Formule de TIXERONT

Le modèle de TIXERONT est défini ainsi (CNEA, 2002) :

$$As = 354 * Lr^{0,15}$$

Avec :

Lr : Écoulement total annuel en mm

As : Apport solide spécifique moyen (tonnes/ Km^2/an).

1.3.2.3.3 Formule de FERSI

La relation de FERSI s'écrit comme suit (CNEA, 2003) :

$$As = 114 * Lr^{1,25}$$

Avec :

Lr : Lame d'eau ruisselée en mm

As : Apport solide spécifique moyen (tonnes/ Km^2/an).

1.3.2.3.4 Formule de FRIGUI H.L.

Le modèle de FRIGUI H.L. est défini par (FRIGUI H.L., 1996) :

$$As = 49{,}8 * Lr^{0,89} * Sb^{-0,26}$$

Avec :

Sb : Superficie du bassin versant en Km^2

Lr : Lame d'eau ruisselée en mm

As : Apport solide spécifique moyen (tonnes/ Km^2/an).

1.3.2.3.5 Formule de SOGREAH [20]

La relation de SOGREAH est la suivante (SOGREAH et ANRH[21], 1989) :

$$As = 350 * Lr^{0,15}$$

Avec :

Lr : Écoulement total annuel en mm

As : Apport solide spécifique moyen (tonnes/ Km^2/an).

---

[20] Société Grenobloise d'études et d'applications hydrauliques, France.
[21] Agence Nationale des Ressources hydrauliques, Algérie.

Tableau 1.15

Estimation des apports solides au bassin versant de l'oued Barbara

Modèle empirique	Transport solide en tonnes/ Km^2/an
Modèle de FOURNIER	11 029,98
Modèle de TIXERONT	786,55
Modèle de FERSI	88 364,80
Modèle de FRIGUI	5 400,41
Modèle de SOGREAH	777,67

Les estimations du transport solide (Tableau 1.15) tirées des modèles de Fournier, de FERSI et de FRIGUI sont très loin des 695 tonnes/ ha/an, valeur du transport solide évaluée pour le bassin versant du barrage Mellègue (CLAUDE J. et CHARTIER R., 1977) lequel se trouve à 40 km et présente des caractéristiques similaires à celles de l'oued Barbara, alors que les estimations de TIXERONT et de SOGREAH sont relativement voisines et se rapprochent plus de la réalité. On peut donc rapporter le transport solide à la moyenne annuelle de ces derniers, ce qui donne une valeur de 782,11tonnes/ Km^2/an soit 136 869,17 tonnes/an pour l'ensemble du bassin versant. Cette énorme quantité de transport de matériau solide provient des couches les plus superficielles, ce qui entraine un amincissement de la partie arable des sols facilement exploités par les racines des plantes. Cela conduit ainsi à une régression de la fertilité potentielle des sols qui s'exprime par une chute des rendements des cultures en amont du bassin versant. Outre cette conséquence désastreuse, ces sédiments contribuent en aval à l'envasement du barrage de l'oued Barbara, diminuant sa longévité et sa capacité de stockage. Des mesures de la turbidité[22] des eaux du barrage Mellègue montrent que les eaux entrantes ont une charge de 38g/l alors que celles sortant des vannes du barrage ont une charge de 5g/l. La différence entre ces concentrations se dépose au fond du barrage. D'autres

[22] La turbidité dans notre cas désigne la teneur des eaux des ruissellements en matières en suspension due à l'érosion hydrique.

mesures faites sur des carottes de sédiments prélevées dans ce même barrage montrent que la densité [23] moyenne des sédiments déposés dans ce barrage est de 1,2. En adoptant ces mesures et en sachant que les apports liquides annuels pour le barrage de Barbara[24] sont de l'ordre de 35 822 065,4 m^3, une évaluation grossière de l'envasement annuel de ce barrage peut être fixée à 1 253 772,29 tonnes de sédiments, soit 1 044 810,24 m^3. Si ce rythme de transport se poursuit et en sachant que la capacité de stockage du barrage est de 74 millions de m^3, ce dernier perd alors, annuellement 1,41 % de sa capacité et on peut prévoir qu'au bout de 70 ans il sera comblé par les sédiments. Pour remédier à cette situation, conserver les sols et leur fertilité en amont, éviter des coûts inutiles associés au dévasement du barrage de l'oued Barbara et augmenter en parallèle sa longévité, les ouvrages de CES s'imposent donc une fois de plus.

1.4 La lutte antiérosive dans la zone à l'étude de l'oued Barbara

Les populations ancestrales de la Kroumirie semblent avoir pris conscience de la fragilité du milieu dans lequel elles vivent et les décisions qu'elles prenaient l'étaient à l'échelle du douar[25] et portaient principalement à la maitrise des écoulements des eaux. Sur les versants, le paysan de la Kroumirie élaborait un système d'irrigation qui lui permettait de gérer les ruissellements. En été, les eaux de source étaient en effet distribuées rationnellement entre les familles à tour de rôle, par remplissage des citernes de stockage situées au débouché des "seguias"[26]. Durant

---

[23] La densité du sédiment est le rapport de sa masse volumique à celle de l'eau. La masse volumique du sédiment étant le rapport de sa masse à son volume.

[24] Le barrage Barbara est aménagé pour contribuer aux efforts de développement socio-économique en milieu rural tunisien. La plus grande partie des eaux mobilisées par cet ouvrage est transférée vers la vallée de la Medjerda (c'est la région agricole la plus productive et la plus fertile de la Tunisie) pour assurer l'irrigation de 97 000 ha. Le reste de ses eaux sert à l'approvisionnement en eau potable de la population riveraine et assurer entre autres l'irrigation de 2 200 ha dans le bassin versant de l'oued Barbara (BAD, 2001).

[25] Un douar est une agglomération rurale.

[26] Une séguia est un canal à ciel ouvert qui sert à l'irrigation.

l'hiver, par contre, il était primordial d'évacuer rapidement les eaux excédentaires pour assurer au mieux leur écoulement superficiel sur les terrains accidentés au moyen de rigoles et éviter la saturation des horizons superficiels qui risquaient de déclencher d'importants mouvements de masse (glissements de terrain). De nos jours, ce système à double fonction servant à l'irrigation en été et au drainage en hiver a complètement disparu pour céder sa place à un système de production extensif. Ce dernier, qui semble lié étroitement aux aléas climatiques est caractérisé par la généralisation de la production céréalière sur des parcelles de petites dimensions dispersées sur l'ensemble des versants. Cela a ouvert la voie à la dégradation des terres sous ses différentes formes (BONVALLOT J., 1983).

Dès son indépendance en 1956, la Tunisie afin de limiter les effets désastreux de l'érosion hydrique a déployé d'importants efforts en matière de CES, efforts qui se sont traduits par des réalisations d'ordre physique, institutionnel et juridique [27] (ACHOURI M., 1995). Malgré la stratégie de CES adoptée par le pays, la région à l'étude de l'oued Barbara n'a connu que des actions de CES ponctuelles sans intégration de la population sur des zones de 4 228,52 ha soit environ sur 26 % de la superficie totale. Ces actions se limitent surtout à des réalisations physiques telles que des seuils et des cordons en pierres sèches ainsi que quelques travaux de

[27]* Les réalisations physiques sont présentées par les techniques de conservation des eaux et des sols.

* Les réalisations institutionnelles reflètent parfaitement l'importance accordée par la Tunisie à la conservation des eaux et du sol qui est accomplie par la création d'une structure administrative qui assure la planification, l'exécution et le contrôle des travaux du CES. Cette structure administrative a évolué d'une unité au sein du département de l'hydraulique et de l'équipement rural (HER) dans les années 1960, à un service puis à une sous-direction de la direction des forêts pendant les années 70 à 80. En 1983, une Direction de Conservation des eaux et du sol a été créée, pour laisser place en 1992 à une direction générale de l'aménagement et de la conservation des terres agricoles (DGACTA) suite à la création de la direction d'aménagement des terres agricoles. Au niveau régional, cette structure est représentée par des arrondissements de CES. En parallèle avec cette structure institutionnelle de gestion, la recherche en matière de CES a débuté en Tunisie dans les années 1960 au centre de recherche du génie rural (CRGR).

* Les réalisations d'ordre législatif reposent sur les textes qui régissent la CES, parmi lesquels : 1) le décret du 29 mars 1956 prévoyant l'utilité publique dans les ouvrages de la CES, 2) La loi N°58-105 du 7 octobre 1958 qui prévoit l'obligation de travailler le sol en courbe de niveau, 3) la loi N° 63-17 du 27 mai 1963, portant sur l'encouragement de l'État au développement de l'agriculture et 4) La loi 95-70 du 17 juillet 1995 relative à la conservation des eaux et des sols. En outre, le code forestier ainsi que le code des eaux régissent certains aspects de CES respectivement dans les domaines forestier et hydraulique de l'État.

végétalisation (fixation des ravins et des berges des oueds par des plantations sylvo-pastorales)[28] qui nécessitent des travaux d'entretien (CRDA, 2008). Ainsi compte tenu de la complexité de l'érosion hydrique, de la nature de la région (physique et humaine) et des textes régissant la conservation des eaux et des sols, le délaissement des traitements ponctuels au profit d'un aménagement antiérosif intégré dans la zone de l'oued Barbara a sans doute une importance capitale dans la protection et la préservation des ressources naturelles de la région notamment les sols et l'amélioration des situations socio-économique et environnementale de la zone cible.

Le diagnostic du système général intégrant ses composantes humaine et physique dans ce coin du Maghreb a révélé que la région de l'oued Barbara est marquée par :

- Une situation socioéconomique dominée par l'agriculture comme principal « moteur » économique de la région et où la population est complètement rurale avec une densité parmi les plus élevées du pays, ce qui explique la pression à laquelle sont soumises les ressources édaphiques.
- Une occupation des sols caractérisée par l'extension des grandes cultures et une grande pression anthropique sur son milieu naturel (pâturage direct dans les forêts, etc.).
- Une structure lithologique caractérisée par des affleurements de roches plastiques et cohérentes et une structure marneuse de la majorité des sols de la région.
- Une structure topographique très accidentée présentant un relief fort.
- Un climat contrasté avec des hivers humides et des étés chauds et secs, marqués par des précipitations orageuses qui se traduisent par des ruissellements très agressifs.

[28] Les réalisations physiques sont définies d'une manière plus approfondies dans le présent rapport au paragraphe (2.2.2.2) : Définition des aménagements antiérosifs retenus et utilisés dans la région.

- Une situation hydrologique alarmante où l'aridité est très marquée surtout pendant l'été, période où les eaux deviennent rares et très précieuses.
- Une mauvaise gestion des ressources en sols.

Ce diagnostic a pu mettre en évidence que la présence de tous ces facteurs du milieu de la région de la Kroumirie réunis sur la même «scène» de l'oued Barbara rend la situation favorable à l'accélération du phénomène de la dynamique érosive et confèrent une grande fragilité aux ressources édaphiques de la région. Afin de remédier relativement cette situation et sauvegarder les ressources naturelles (sols, etc.), une stratégie intégrée de conservation des eaux et des sols a sans doute un grand rôle et permet de :

- maintenir les sols, améliorer leur fertilité et leur productivité;
- réduire l'agressivité des précipitations et des eaux des ruissellements en diminuant leurs forces érosives et en favorisant leur infiltration;
- améliorer le bilan hydrique;
- maintenir les sédiments en amont du bassin versant et minimiser ainsi l'envasement et le colmatage des infrastructures hydrauliques du barrage de l'oued Barbara;
- améliorer la situation socioéconomique et environnementale de la région;
- et enfin assurer une gestion durable des ressources naturelles, notamment des sols.

PARTIE II
ÉTUDE DE L'ÉROSION HYDRIQUE EN KROUMIRIE (TUNISIE SEPTENTRIONALE)

ÉTUDE DE L'ÉROSION HYDRIQUE AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE L'OUED BARBARA

2.1 MÉTHODOLOGIE

Afin d'atteindre les objectifs visés par la présente étude qui débouchent principalement vers la proposition d'un scénario d'aménagement antiérosif pour le périmètre à l'étude de l'oued Barbara, on a effectué en premier lieu une prospection du milieu physique. Il s'agissait d'évaluer les paramètres influençant le processus de la dynamique érosive dans la région à l'étude et de réaliser la carte d'érosion hydrique en utilisant l'équation universelle des pertes en sols (USLE) et la méthode de DF[29]/FAO-SIDA[30], qui ont ensuite servi de «support» aux aménagements antiérosifs projetés[31]. En second lieu, on a essayé de définir et d'identifier à partir des enquêtes et des entrevues menées auprès de la population cible et les intervenants agricoles et environnementaux les remèdes antiérosifs et les adaptations intégrées possibles qui peuvent être utilisées ultérieurement pour contrer ce phénomène. Ainsi pour mener à terme la présente recherche, on a d'abord décrypté les mots clefs qui traitent ce sujet en une liste de variables et d'indicateurs tout en précisant le type de collecte et les différentes sources d'informations utilisés (Tableau 2.1). Dans un second temps, afin de répondre aux objectifs précédemment fixés, on a commencé par une évaluation de ses indicateurs et on a suivi la démarche méthodologique récapitulée par l'organigramme qui suit (Figure 2.1).

---

[29] La direction des forêts (DF) est l'ancienne nomination de la direction générale des forêts.

[30] SIDA : Agence Suédoise pour la Coopération au Développement International (Swedish International Development Cooperation Agency).

[31] La méthode de l'USLE et celle de la DF/FAO-SIDA seront détaillées dans les paragraphes d'évaluation d'érosion hydrique.

Tableau 2.1

Mots clés, variables, indicateurs et nature des données

Mots clés		Les Variables	Les indicateurs	Sources de données
Érosion hydrique	Méthode DF/FAO-SIDA	1.Érosion hydrique forte 2.Érosion hydrique moyenne 3.Érosion hydrique faible	1. Ravinement hiérarchisé, Glissements, etc. 2. Ravinement élémentaire, etc. 3. Décapage superficiel, etc.	-Images satellites Landsat TM 7 (carte agricole) - Parcours du terrain
	Méthode USLE	1. Agressivité des pluies (R)	1. Pluviométrie (annuelle et mensuelle)	- Stations pluviométriques
		2.Érodibilité des sols (K)	2.1. Texture (argile, sable, limon et matière organique) 2.2. Structure des sols (compact, moyenne ou granulaire) 2.3. Perméabilité (rapide, modéré ou lente)	- Carte pédologique de la Tunisie - Profils pédologiques dans la zone à l'étude (Terrain) *
		3. Occupation des sols (C)	3. Type de la couverture végétale (forêts, parcours, etc.)	-Carte agricole de la Tunisie - Parcours du terrain
		4. Facteurs topographiques (LS)	4.1. Pentes (S) 4.2. Longueur de la pente (L)	- Carte topographique
		5. Pratiques agronomiques (P)	5.1. Types d'aménagement de CES 5.2. Pentes	- Aménagements réalisés (DGACTA) - Carte topographique - Parcours du terrain
Gestion intégrée		Enjeux socio-économiques, agricoles et environnementaux	Les aménagements de conservation des eaux et des sols	- Enquêtes (Population) - Entrevues (Gestionnaires) - Bibliographie

*les échantillons de sol prélevés des profils pédologiques sont confiés pour analyse au laboratoire de pédologie du CRDA du Gabès (Tunisie).

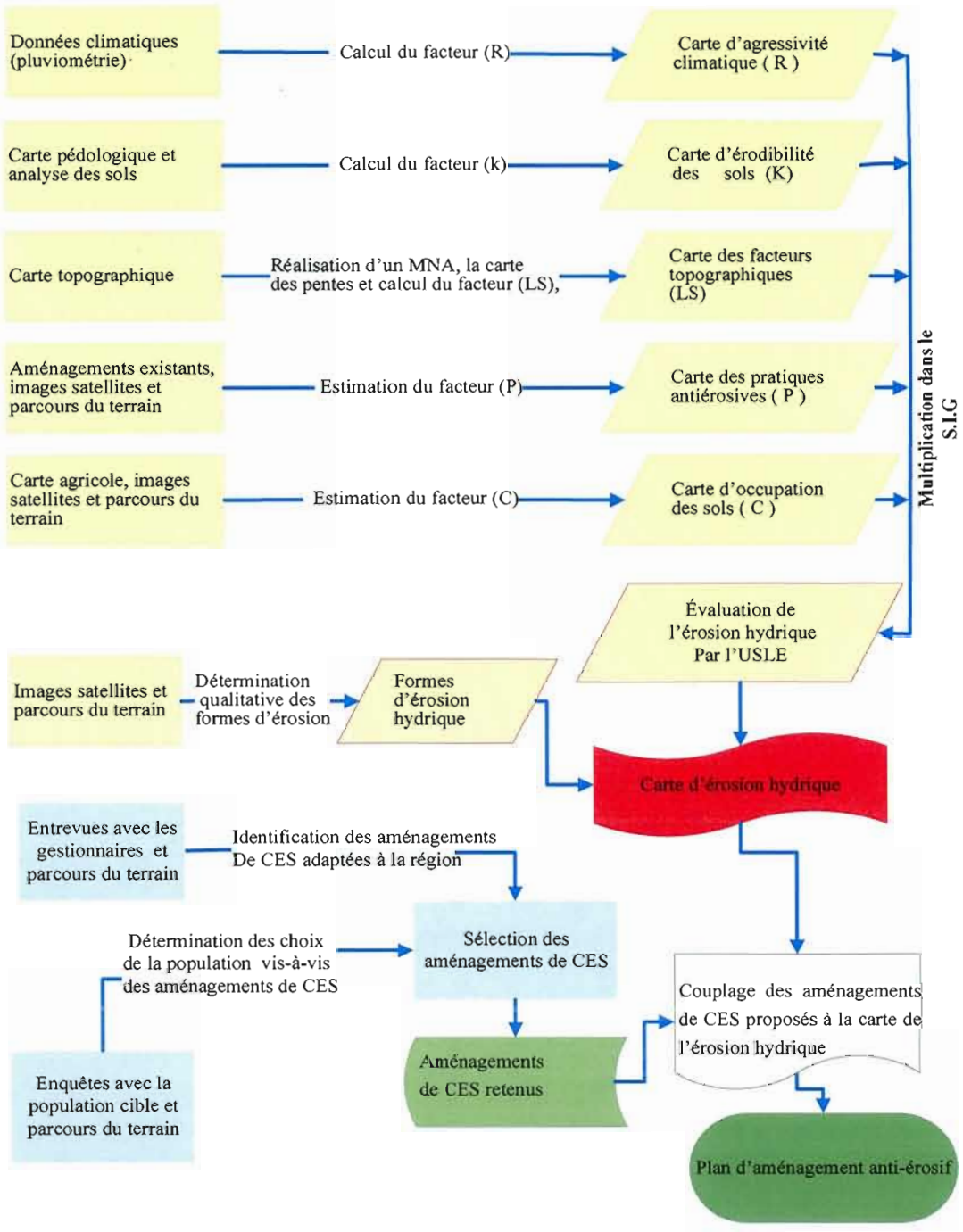


Figure 2.1 Procédure de l'élaboration d'un plan d'aménagement antiérosif pour le périmètre de l'oued Barbara (Tunisie septentrionale)[32]

[32] Dans la présente figure (2.1), les formes géométriques et les couleurs n'ont aucune signification. Ils sont utilisés essentiellement pour faciliter la lisibilité et la lecture de l'organigramme.

2.1.1 Collecte des données

2.1.1.1 Les données climatiques

Les données climatiques ont été obtenues des stations climatiques les plus proches du bassin versant de l'oued Barbara (Tableau 2.2 et figure 2.2). Elles ont permis principalement de déterminer l'agressivité climatique vis-à-vis des sols, de l'étage bioclimatique et de faire les calculs hydrologiques nécessaires afin de montrer l'importance des eaux de ruissellement dans un contexte soumis à un déficit hydrique malgré les précipitations hivernales relativement importantes par rapport au reste du pays.

Tableau 2.2

Caractéristiques des stations pluviométriques

Stations pluviométriques	Code INM[33]	Latitude Nord	Longitude Est	Altitude (m)	Période d'observation
Hammam Bourguiba	1483305901	36°45'	8°33'	224	1975-2005
Ouled Mfadda	1483474501	36°39	8°29'	470	1983-2005
oued Barbara	1483489001	36°40'	8°32'	200	1983-2005
Ain Beya	1485007801	36°39'	8°39'	290	1975-2005
Ain Debba	1485013801	36°41'	8°40'	430	1975-2005

[33] Le code INM, est un identifiant attribué par l'institut national de météorologie de Tunis aux stations pluviométriques.

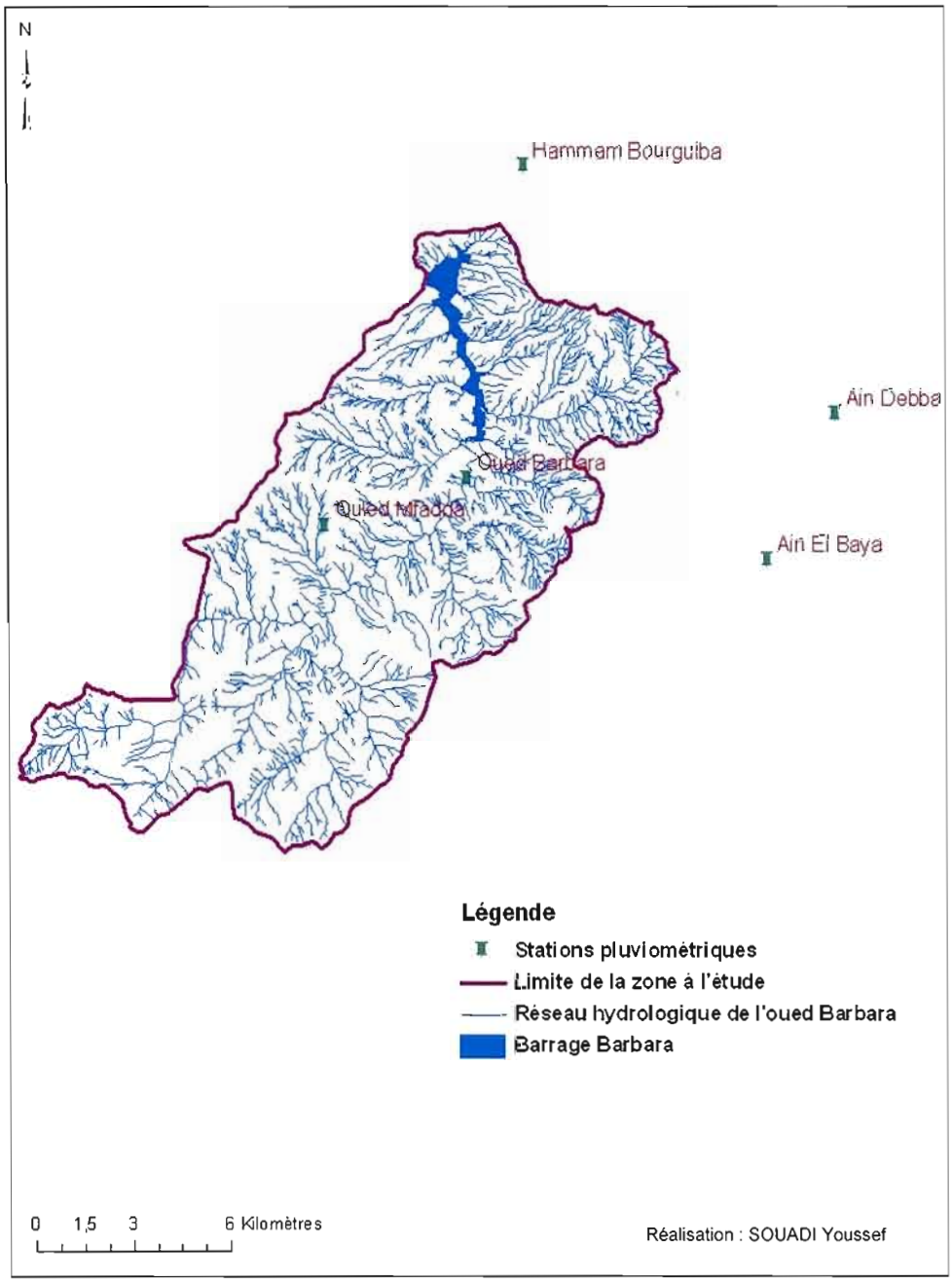


Figure 2.2 Localisation des stations pluviométriques

2.1.1.2 Les données pédologiques

Ces données ont été extraites de la carte pédologique de la région (STUDI, 2004) et complétées par des profils pédologiques[34] (Figure 2.3) creusés au moment de la prospection sur le terrain. En premier lieu, on a identifié sur la carte pédologique les différentes classes des sols constitutifs de la zone à l'étude. En second lieu, on a creusé des profils pédologiques au niveau de chaque classe, profils par lesquels on a prélevé des échantillons des sols à différents niveaux[35]. Ces échantillons ont été analysés au laboratoire des sols du commissariat régional de développement agricole du Gabès afin de déterminer la teneur en matière organique et la composition granulométrique de chaque échantillon. Les résultats de chaque profil sont pondérés[36] pour tout le profil pédologique et la moyenne des profils pédologiques de chaque classe est à leur tour pondérée à la classe du sol elle-même. Le nombre de profils est fixé dès le départ à raison d'un profil pédologique pour environ 5 km^2 car il s'agit ici d'une étude consacrée à l'érosion hydrique et non une étude pédologique.

---

[34] Un profil pédologique est une tranche verticale creusée dans le sol depuis sa surface jusqu'à la roche mère (ou jusqu'au matériau relativement peu altéré). Il exprime l'épaisseur et la succession des différents horizons d'un sol (LEGROS J.P., 2007).

Le sol est la formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques (COÏC Y. et COPPENET M., 1989).

[35] Par manque de temps et vue l'immensité du terrain, les sites des profils pédologiques ont été choisis près des accès (routes, pistes et sentiers).

[36] La pondération des échantillons au niveau d'un profil est faite en fonction de l'épaisseur des couches à la profondeur totale du profil.

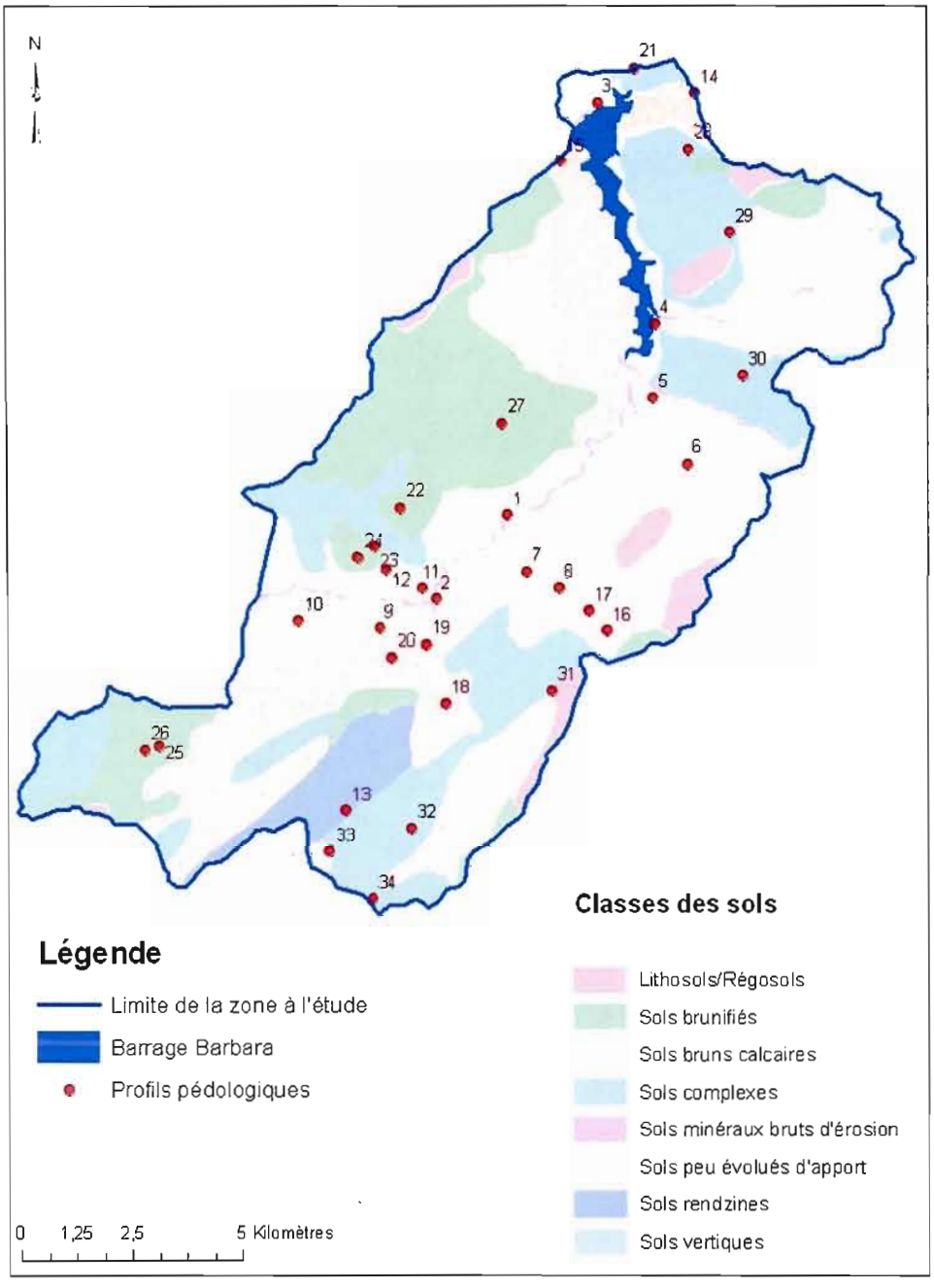


Figure 2.3 Localisation des profils pédologiques dans la zone à l'étude

2.1.1.3 Les données topographiques

Les données topographiques sont issues de la carte topographique de Fernana à l'échelle 1/50 000 (Tunisie, feuille 36-XXIV) produite par l'office de la topographie et de la cartographie de Tunis. Une fois numérisée, cette carte a permis de construire un modèle numérique de terrain dont a été dérivée la carte des pentes afin de caractériser le relief de la zone à l'étude et de calculer les facteurs topographiques (LS) (voir paragraphe 2.1.2.2.3) et certains indices topographiques (courbe hypsométrique, relief, etc.). La classification des terrains en fonction des pentes permet également d'attribuer des valeurs à l'indice des pratiques antiérosives (P) (voir paragraphe 2.1.2.2.5).

2.1.1.4 Carte agricole de la Tunisie[37]

La carte agricole de la Tunisie comporte pour chaque région plusieurs thèmes agronomiques, dont ceux de l'occupation des sols (formations forestières, parcours, terres agricoles, etc.). Cette carte est numérique et comporte également dans sa base de données des images satellites Landsat TM 7 prises en 1999 avec des résolutions de 20 m.

Les cartes thématiques ont servi à établir pour la région de l'oued Barbara les cartes pédologique, d'occupation des sols (C) et des pratiques antiérosives (P) qui seront détaillées par la suite (notamment dans les paragraphes 2.1.2.2.4 et 2.1.2.2.5), alors que la classification et l'interprétation des images satellites ainsi que le séjour de terrain ont permis d'évaluer qualitativement l'érosion hydrique

[37] La carte agricole de la Tunisie est réalisée durant la période 2000-2004 par le groupe STUDI (société tunisienne d'ingénierie) en association avec des partenaires français; SCOT CONSEIL et SODETEG (Société d'études techniques et d'entreprises générales).

2.1.1.5 Enquêtes et entrevues

Les enquêtes[38] ont été effectuées auprès d'un échantillon de la population cible afin de déterminer dans quelle mesure cette population avait conscience de l'érosion hydrique ainsi que ses préférences vis-à-vis des aménagements de conservation des eaux et des sols pour qu'ils soient utilisés ultérieurement dans le cadre d'un scénario d'aménagement antiérosif. Les entrevues ont été menées avec quelques intervenants locaux afin de mettre en évidence les occupations des sols, de savoir les moyens de CES adaptés à la région et d'obtenir leurs points de vue et leurs perceptions sur les axes d'intervention en vue de contribuer à minimiser les impacts de l'érosion hydrique sur les plans agronomique et écologique.

2.1.2 Évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Barbara

Les images satellites, la carte topographique (pentes et réseau hydrologique), la prospection du terrain, l'utilisation de la méthode de la DF/FAO-SIDA et l'application de l'équation universelle des pertes en sols (USLE) ont permis d'évaluer et de connaitre de près le degré d'érosion hydrique au niveau du périmètre à l'étude de l'oued Barbara.

2.1.2.1 Évaluation qualitative de l'érosion hydrique par la méthode de la DF/FAO-SIDA

Afin de définir le processus érosif actif dans la zone à l'étude on a évalué qualitativement les différentes formes d'érosion hydrique et leurs ampleurs en utilisant une méthode très appliquée en Tunisie et qui a été développée en 1978 par la direction des forêts (DF), la FAO et le SIDA (DF/FAO-SIDA, 1978). Cette méthode

[38] Les enquêtes ont été réalisées durant le séjour à l'oued Barbara du 24 juin au 31 août 2009.

consiste à diviser le bassin versant en plusieurs unités dans lesquelles dominent respectivement une forme d'érosion bien définie (ravinement généralisé ou élémentaire, sapements des berges, décapage, etc.). Vient ensuite l'attribution des indices **(1), (2), (3)** et **(4)** désignant respectivement les zones de collecte et de concentration des eaux du ruissellement, les zones d'ablation hydrique, les zones complexes où règnent plusieurs processus érosifs en même temps et les zones d'accumulation des matériaux érodés.

2.1.2.1.1 Les zones de collecte et de concentration des eaux (1)

Les zones de collecte et de concentration des eaux de ruissellement sont les secteurs montagneux qui jouent un rôle de châteaux d'eau et de source d'érosion potentielle pour les secteurs de piémonts. Ce processus de concentration varie d'intensité en fonction des épaisseurs de la formation superficielle, de la pente et du couvert végétal. Trois cas se présentent dans le bassin versant :

- Une concentration et une érosion potentielle faibles **(1.1)** lorsque la formation superficielle est épaisse, la pente faible et le couvert végétal dense.
- Une concentration et une érosion potentielle moyennes **(1.2)** lorsque la formation superficielle est moyenne, la pente moyenne et le couvert végétal moyen.
- Une concentration et une érosion potentielle fortes **(1.3)** lorsque la roche-mère est nue et le couvert végétal est précaire. Dans ce cas, les eaux de ruissellement sont très fortes.

Pour la zone à l'étude de l'oued Barbara, et en fonction de ses caractéristiques physiques déjà définies, on a jugé bon d'attribuer:

- Aux espaces se trouvant aux crêtes occupées par les formations forestières un indice de potentialité érosive faible (**1.1**).
- Aux espaces de parcours se trouvant en amont l'indice **(1.2)** puisque le couvert végétal est relativement pérenne.
- Aux lithosols et aux régosols localisés en amont l'indice **(1.3)** car ses sols sont caractérisés par des affleurements de la roche-mère qui sont généralement à perméabilité faible et où les ruissellements sont élevés.

2.1.2.1.2 Les zones d'ablation hydrique (2)

L'ablation hydrique est l'aspect dè l'érosion hydrique qui va du décapage élémentaire jusqu'au ravinement et aux glissements de terrain. Cette dégradation commence par l'action mécanique des gouttes de pluie sur les particules des sols qui conduisent à la formation d'une pellicule de battance. Empêchant l'infiltration des eaux, cette couche favorise les ruissellements qui décapent et incisent les sols. Si les formations superficielles et les pentes sont favorables, la concentration des eaux se fait rapidement et l'incision des sols prend le dessus sur le décapage. Par approfondissement, les rigoles se transforment en ravins qui évoluent rapidement, soit par érosion régressive lorsqu'elles prennent naissance au niveau des berges des oueds et progressive lorsqu'elles proviennent des massifs montagneux. On distingue trois zones:

- Zone d'enlèvement et de transport faiblement affectée (**2.1**).
- Zone d'enlèvement et de transport moyennement affectée (**2.2**).
- Zone d'enlèvement et de transport très affectée (**2.3**).

Dans le cas du périmètre de l'oued Barbara, on a jugé bon de qualifier :

- Par zone d'enlèvement et de transport très affectée (**2.3**) les périmètres caractérisés par un ravinement généralisé, la présence des glissements et le sapement des berges (ravins et oueds).
- Par zones d'enlèvement et de transport moyennement affectées (**2.2**) les périmètres caractérisés par un ravinement élémentaire, la présence de quelques glissements et/ou quelques sapements des berges.
- Par zone d'enlèvement et de transport faiblement affectée (**2.1**) les périmètres situés sur des pentes faibles et caractérisés par une érosion en nappe (décapage superficiel du sol et présence de rigoles).

2.1.2.1.3 Les zones complexes (3)

Ce sont les zones où on assiste à plusieurs processus érosifs en même temps. Elles sont éparpillées sur l'ensemble de la zone à l'étude.

2.1.2.1.4 Les zones d'accumulation (4)

Dans ce cas, il n'y a pas de perte de matériaux, mais un apport. Les zones d'accueil sont constituées par les dépressions, les basses terrasses et les cônes d'épandage des oueds.

Dans le cas de la zone à l'étude de l'oued Barbara, on a qualifié de zone d'accumulation la dépression occupée par le barrage Barbara au niveau duquel les eaux de ruissellement sont piégées et où ils déposent en grande partie leurs charges solides qui servent à la sédimentation de la retenue du barrage.

2.1.2.2 Évaluation quantitative de l'érosion hydrique par l'équation universelle des pertes en sols (USLE)

Dans la présente étude, l'évaluation quantitative de l'érosion hydrique dans le périmètre à l'étude de l'oued Barbara a porté essentiellement sur une évaluation des pertes en sols par l'équation universelle USLE (WISHMEIER W.H. et SMITH D.D., 1978), modèle empirique qui combine les cinq principaux facteurs contrôlant l'érosion hydrique. Ce modèle exprime l'érodabilité [39] du milieu et permet une quantification des pertes en sol par l'érosion hydrique ainsi qu'une localisation spatiale des zones de grande priorité d'intervention dans la zone à l'étude.

L'équation universelle des pertes en sol (USLE) s'écrit :

$$\mathbf{A = R * K * LS * C * P}$$ où;

A : Perte annuelle de sol en tonnes/acre/an,

R : Indice de l'érosivité des pluies exprimé en MJ.mm/h.an,

K : Érodibilité des sols exprimé en (tonnes.h/acre.MJ.mm),

LS : Facteurs de l'inclinaison et de la longueur de la pente (sans dimension),

C : Facteur de la couverture végétale (sans dimension),

P : Rapport des techniques agronomiques ou antiérosives (sans dimension).

L'application de l'USLE sur la zone à l'étude nécessite l'évaluation des différents facteurs de l'équation universelle sur l'ensemble du périmètre à l'étude et de les exprimer sous forme de cartes thématiques qui sont ensuite numérisées et combinées dans un système d'information géographique (via le logiciel ArcGis9.3) afin d'obtenir une évaluation et une localisation spatiale du taux d'érosion hydrique sur tout la zone à l'étude de l'oued Barbara.

---

[39] L'érodabilité exprime la sensibilité globale d'un milieu (facteurs intrinsèques et extrinsèques du sol) à l'érosion hydrique.

2.1.2.2.1 Agressivité des précipitations (R)

Le facteur d'agressivité des précipitations (ou indice d'érosivité), comme son nom l'indique, présente l'impact ou la force érosive des pluies sur les sols. Selon WISHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1978) l'estimation de cet indice nécessite la détermination des énergies cinétiques (E_C) et l'intensité maximale (I_{30}) sur trente minutes consécutives des gouttes de pluie de chaque averse. L'indice d'érosivité annuelle des pluies s'écrit (RIOU G., 1990):

$$R = \sum_{i=1}^{n} Ri \quad \text{, avec}$$

$$Ri = E_C * I_{30} \text{ et } E_C = 11{,}9 + 8{,}73 \log_{10} I$$

Où,

E_C : Énergie cinétique de l'averse (J/m²/mm).

I : Intensité moyenne de la pluie (mm/h).

i : numéro de l'averse.

n : le nombre total des averses annuelles.

Vu l'inexistence des pluviographes dans les stations pluviométriques, qui auraient permis d'évaluer les durées et les intensités des averses, l'utilisation de la relation précédente s'avère alors impossible. On a alors procédé à l'évaluation de ce facteur d'agressivité climatique (R) par des moyens alternatifs développés par certains auteurs tels que Fournier F., qui a établi une relation n'impliquant que les précipitations moyennes mensuelle (P_h) du mois le plus humide et les précipitations moyennes annuelle (Pa) et qui définit l'agressivité climatique selon la formule suivante (SOUTTER M. et al, 2007) :

$$R = \frac{P_h^2}{Pa}$$

Cette équation a été modifiée par ARNOLDUS H.M.J. (1977), lequel a déterminé un indice climatique pour chaque mois et a utilisé par la suite la somme des douze valeurs obtenues pour construire un coefficient climatique. Cet indice climatique connu sous le nom « d'indice de FOURNIER modifié » a été utilisé dans les études de développement de la FAO un peu partout dans le monde, notamment dans le bassin méditerranéen. Il s'écrit (DGACTA, 1995) :

$$R = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{Pa} \qquad \text{, où}$$

P_i est la précipitation moyenne mensuelle (mm),
Pa est la précipitation moyenne annuelle (mm).

Donc, pour la présente recherche on n'a utilisé que les données pluviométriques moyennes annuelles et mensuelles de chaque station pour déterminer l'agressivité climatique par rapport à chaque station. Les résultats ont été interpolés par la suite sur l'ensemble du bassin versant selon la méthode des polygones de THIESSEN, afin d'obtenir une carte thématique d'agressivité climatique pour la zone à l'étude de l'oued Barbara.

2.1.2.2.2 Érodibilité des sols (K)

Le facteur d'érodibilité (K) d'un sol exprime sa sensibilité à l'érosion hydrique et dépend de ses propriétés intrinsèques à savoir sa texture, sa structure et sa perméabilité[40]. Il se détermine expérimentalement pour un échantillon de sol donné par la relation de WISHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1978) :

[40] La texture d'un sol est définie par sa composition granulométrique (sable, limon, etc.), alors que sa structure est le mode de cohésion entre ces particules : plus un sol est riche en matière organique plus sa structure est stable.

$$100K = 2,1 * M^{1,14} * 10^{-4}(12 - a_m) + 3,25(b_p - 2) + 2,5(c_s - 3)$$

$$M = (Sf + Li)(100 - Ar)$$

Où,

Sf : Fraction du sable fin.

Li : Fraction du limon.

Ar : Fraction de l'argile.

a_m : Pourcentage de la matière organique dans l'échantillon du sol.

c_s : Code de structure de l'échantillon du sol (Tableau 2.3).

b_p : Code de perméabilité de l'échantillon du sol (Tableau 2.4).

Tableau 2.3

Codification de la structure des sols (c_s)

Nature de la structure	code de la structure c_s
très structuré ou particulaire	1
assez structuré	2
peu structuré	3
Non structuré	4

Source: WISCHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1978).

Tableau 2.4

Codification de la perméabilité du sol (b_p)

Degré de perméabilité	code de perméabilité b_p
Rapide	1
modérée à rapide	2
modérée	3
modérée à lente	4
lente	5
très lente	6

Source: WISCHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1978).

La structure des classes des sols et leurs codes respectifs ont été évalués directement à partir des échantillons des sols au moment du creusage des profils, alors que la texture est déterminée à partir de la composition granulométrique des échantillons, et ce, en utilisant le triangle de texture (Figure 2.4). Par contre, les perméabilités des sols et leurs codes respectifs ont été évalués à partir du triangle d'évaluation de la perméabilité à partir de sa texture (Figure 2.5).

Les échantillons pondérés des sols déjà déterminés auparavant ont permis de définir une érodibilité moyenne pour chaque classe des sols, de telle sorte qu'à la fin on a obtenu une carte thématique d'érodibilité des sols de la zone à l'étude, numérisée par la suite dans le SIG.

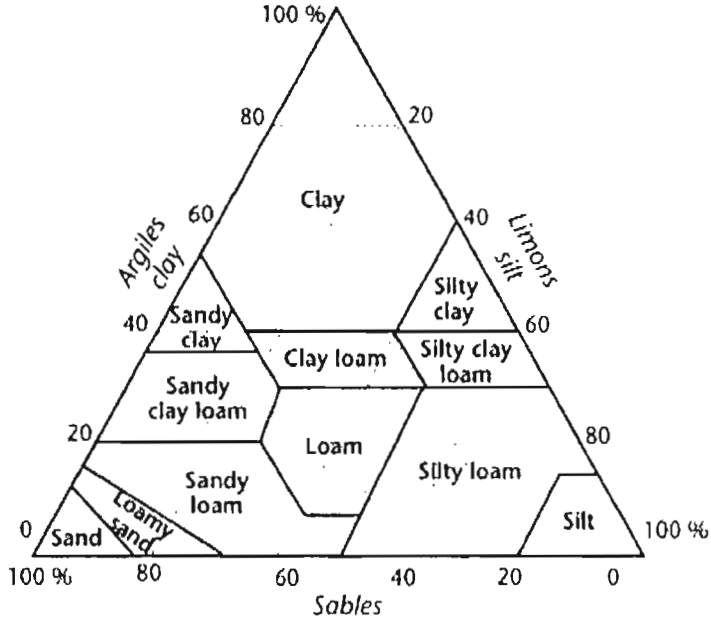


Figure 2.4 Triangle des textures des sols (CALVET R., 2003)

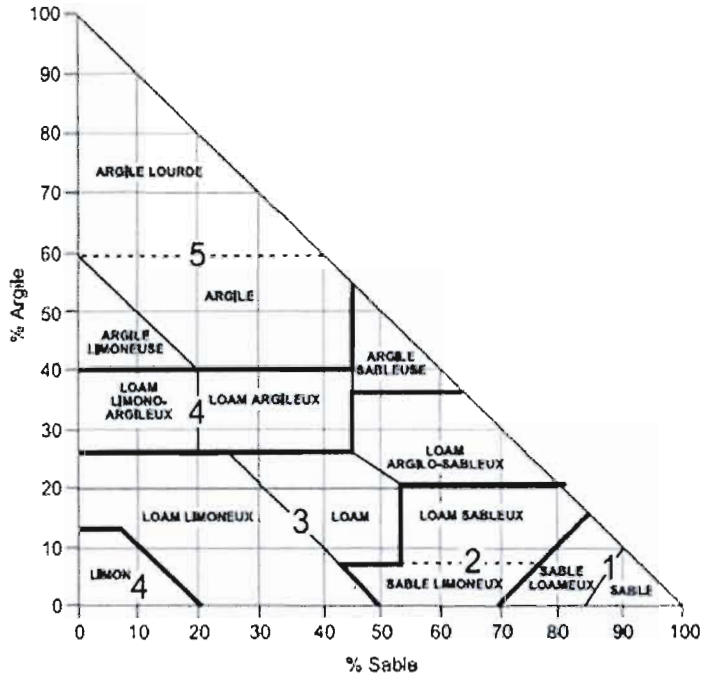


Figure 2.5 Évaluation de la perméabilité par le triangle des textures des sols (COOK D.J. et al, 1985)

2.1.2.2.3 Facteur topographique (LS)

L'indice (LS) exprime l'importance des pertes en sol, pour une pente et une longueur de pente données, relativement à celle d'une parcelle standard ayant une longueur de 22 m, une pente de 9° et un LS de valeur égale à 1. Pour la détermination de ce facteur (LS), il faut tout d'abord dresser la carte des pentes[41] du bassin versant de l'oued Barbara à partir d'un modèle numérique de terrain issu de la carte topographique déjà numérisée de la région. Le facteur (LS) a été par la suite calculé pour chaque parcelle à partir de son inclinaison et la longueur de sa pente par les formules de WISCHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1978) :

[41] Le principe de la carte des pentes consiste à diviser le bassin versant en question en plusieurs secteurs de telle sorte que chacun d'eux présente une pente homogène.

$$L = (\frac{\lambda}{22,13})^{mp}$$

$$S = 0,065 + 0,045 * \sin\theta + 0,065 * (\sin\theta)^2$$

Où,

L : Facteur de la pente,

S : Facteur de l'inclinaison,

λ : longueur de la pente en m,

θ : Angle par rapport à l'horizontale,

mp : Un paramètre qui varie en fonction de la pente (Tableau 2.5),

Tableau 2.5

Valeurs du paramètre (mp) en fonction de la variation de la pente

Valeurs de la pente P_e	valeurs du paramètre m_p
$P_e \geq 5$ %	0.5
3% $\leq P_e < 5$ %	0,4
1% $\leq P_e < 3$ %	0,3
$P_e < 1$%	0,2

Source: WISCHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1978)

Cependant, une évaluation de ce facteur par cette relation s'est révélée très difficile, car la longueur de la pente λ n'est pas constante et une parcelle ayant une pente homogène peut avoir des limites concaves ou convexes ce qui complique et rend alors son estimation imprécise. D'autres auteurs ont introduit des modifications à l'USLE à travers des améliorations du calcul du facteur LS pour l'adapter aux conditions du terrain (RENARD K.G. et al, 1997) et ont l'exprimé par une autre formule baptisée RUSLE (Revised USLE : RUSLE) :

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13}\right)^{m}$$

$$m = \frac{\beta}{1+\beta}$$

$$\beta = \left(\frac{\sin\theta}{0,0896}\right) / \left(3 * (\sin\theta)^{0,8} + 0,56\right)$$

$S = 10,8\sin\theta + 0,03$ Pour les pentes <9%

$S = 16,8\sin\theta - 0,50$ Pour les pentes ≥9%

θ : Angle par rapport à l'horizontale.

Dans cette étude, on a appliqué la méthode de la RUSLE en prenant comme longueur de pente la résolution des cartes des pentes (soit 10 m) étant donné que chaque pixel présente des caractéristiques de pente relativement homogènes et appropriées pour le pixel en question[42].

2.1.2.2.4 Facteur d'occupation des sols (C)

L'indice (C) représente le ratio du taux de perte de sol pour un terrain avec un couvert végétal et des pratiques culturales donnés sur le taux de perte de sol d'une parcelle labourée et laissée à nu. Cet indice est le plus complexe à déterminer, sa variation repose essentiellement sur le type d'assolement[43], de rotation[44] , la nature, la densité et le stade végétatif des cultures. Autrement dit, il s'agit essentiellement d'évaluer la protection offerte au sol par la couverture végétale vis-à-vis des averses,

[42] Il y a une autre méthode d'évaluation du facteur LS très facile à intégrer dans un système de SIG, basé sur la concentration des eaux du ruissellement et appliquée pour des pentes inferieurs à 14°. (MOORE I. et BURCH G., 1986). Certains auteurs négligent le seuil de pente de 14° et utilisent ce modèle. Dans notre cas ce modèle a généré des valeurs de LS très élevés (au voisinage des 1000), valeurs qui font défaut de la réalité du terrain et par conséquent ce modèle a été écarté dès le départ.

[43] L'assolement est la répartition des cultures dans l'espace.

[44] La rotation est la succession des cultures dans le temps sur une même parcelle.

estimation qui repose essentiellement sur l'occupation des sols pendant la saison pluvieuse. Pour cela, on s'est référé à la carte agricole de la Tunisie qui comporte plusieurs cartes thématiques, notamment les cartes des formations forestières, des parcours et des terres agricoles de la région. La carte d'occupation des sols de l'oued Barbara a été extraite essentiellement de la carte agricole de la région tout en utilisant les outils d'ArcGis (ArcToolBox : Merge, Clip, etc.). Une fois cette dernière est réalisée, on a effectué les estimations par rapprochement aux résultats des études faites en Tunisie tels que celles de CORMARY Y. et MASSON J. (1964), de CHAIBI N. (2001) et de WISCHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1978) qui fournissent des valeurs pour différents types de couverture végétale (Tableaux 2.6 et 2.7).

Tableau 2.6

Variation de (C) en fonction des stades de la couverture végétale

Occupation des sols	Juillet-août	Octobre	Février	Avril
Parcours	0,6	0,6	0,25	0,25
Légumineuses	0,6	0,6	0,45	0,35
Maraichage	0,6	0,6	0,45	0,35

Source : CHAIBI N. (2001).

Tableau 2.7

Variation de (C) en fonction de la couverture végétale

couverture végétale	C annuel moyen
sol nu (pas de végétation)	1
Forêt dégradée	0,01
forêt non dégradée	0,001
Arboriculture fruitière	0,9
Oliveraie	0,65
Assolement biennal : Fourrages, blé.	0,6
Blé	0,71
Fourrages	0,47

Source : WISCHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1978) et CORMARY Y. et MASSON J. (1964)

2.1.2.2.5 Facteur des pratiques antiérosives (P)

Les cultures en courbes de niveau, les plantations en banquettes [45] sont des pratiques très efficaces de conservation des eaux et des sols. Selon WISHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1965), les valeurs de (P) sont inférieures ou égales à (1). La valeur (1) est attribuée aux terrains sur lesquels il n'y a pas de pratiques antiérosives. La valeur de (P) varie en fonction des pratiques adoptées et selon la pente des terrains (Tableau 2.8). Donc, pour déterminer le facteur (P), il a suffi de superposer la carte des pentes à celle des aménagements en CES du périmètre à l'étude de l'oued Barbara et par la suite de faire les évaluations par rapport aux valeurs attribuées par des études notamment celle de WISHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1965). La carte des aménagements de CES réalisés au sein du bassin versant de l'oued Barbara a été obtenue sous forme numérique auprès de la DGACTA.

Tableau 2.8

Variation de (P) en fonction des pratiques antiérosives

Types d'aménagements antiérosifs	Valeurs de la pente en %	Valeurs de P
(a) Labours en courbes de niveau (WISCHMEIER W.H. et SMITH D.D., 1965)	1,1 à 2	0,6
	2,1 à 7	0,5
	7,1 à 12	0,6
	12,1 à 18	0,8
	18,1 à 24	0,9
(b) Aménagement des banquettes (ROOSE, E. 1994)	2 à 7	0,1
	8 à 12	0,12
	13 à 18	0,16
	19 à 24	0,18

[45] Les banquettes sont des aménagements des versants qui permettent une rétention partielle des eaux de ruissellement dont leur confection consiste à creuser un canal et de mettre le remblai en ados conduit perpendiculairement à la pente du terrain. La fonction de ces ouvrages est de réduire la longueur de la pente, d'intercepter le ruissellement de surface avant d'atteindre une vitesse érosive et d'évacuer le surplus d'eau avec une vitesse faible et non érosive. Les banquettes permettent également de lutter contre les inondations en augmentant le temps de concentrations des eaux de ruissellement dans le bassin versant (ALBERGEL J. et MANSOURI M., 2000).

Les aménagements de CES peuvent être inertes (banquettes, cordons en pierres sèches, etc.) ou des traitements biologiques (végétalisation) qui constituent un moyen de lutte antiérosive très efficace. Ces notions ont permis de définir quatre unités dans la zone à l'étude de l'oued Barbara:

Une première zone agricole aménagée par des cordons en pierres sèches qui sont des aménagements réalisés sur les versants en courbes de niveaux comme les banquettes. Les variations de la valeur du facteur (P) dans cette unité, outre que cette dernière est définie par le type d'aménagement de CES utilisé (cordons en pierres sèches), il dépend des valeurs de la pente. La zone a donc été divisée en fonction des classes des pentes déjà établies au tableau précédent (Tableau 2.8.b), en utilisant les fonctions d'analyse spatiale d'ArcGis (Raster calculator) afin d'attribuer les valeurs de (P) aux classes de pentes qui lui correspondent[46].

Une deuxième zone agricole se trouve être dépourvue de pratiques antiérosives, mais les enquêtes y ont révélé que les exploitants disent labourer leurs terrains en courbes de niveau, informations relativement niées par contre par certains intervenants locaux. Ici, afin de faciliter les estimations, on a supposé que les labours se faisaient en courbes de niveau. Les variations de la valeur du facteur (P) dans cette unité, outre que ce dernier est défini par les labours en courbes de niveau, sont conditionnées par les valeurs de la pente. Il a donc fallu diviser cette zone en utilisant également les classes des pentes déjà établies au tableau précédent (Tableau 2.8.a) via les mêmes fonctions d'analyse spatiale d'ArcGis que précédemment (Raster calculator) et attribuer ainsi les valeurs adéquates de (P) aux classes de pentes.

Une troisième zone est constituée par des unités sylvicoles qui assurent le maintien des sols par les systèmes racinaires des essences forestières et brisent en

[46] On a adopté les valeurs des banquettes, car il n'ya aucune étude qui à été faite sur les cordons en pierres sèches.

même temps la vitesse des eaux de ruissellement (en amortissant la force d'arrachement des particules des sols). Ces unités ont donc été considérées comme si elles avaient été aménagées par végétalisation et ont reçu la valeur la plus faible, soit 0,1.

Une quatrième zone comprend des unités pastorales, mais dégradées, complètement dénudées par endroits, se trouvant en général en des lieux marqués par des pentes très fortes et sans aucun aménagement de CES. On leur a attribué la valeur 0,9.

2.1.3 Association de la population à la gestion des ressources en sols du bassin versant de l'oued Barbara

L'utilisation des méthodes de la DF/FAO-SIDA et l'USLE a mis en évidence le fait que pour limiter l'érosion hydrique il faut agir sur les facteurs de l'occupation des sols (amélioration du couvert végétal), l'érodibilité des sols (amélioration de la structure des sols), les pratiques antiérosives (aménagement des travaux en CES) et la longueur de la pente (L) alors que l'action sur les facteurs des pentes (S) s'avère très difficile (très onéreuse) et celle de l'agressivité climatique (R) est impossible. C'est dans ce contexte qu'on a adopté une approche qui permet l'intégration et la participation de la population cible comme acteur principal à la gestion des ressources en sols du bassin versant de l'oued Barbara à travers le contrôle des quatre premiers facteurs. Cette approche repose sur le fait que le bassin versant est constitué par la juxtaposition des terrains agricoles appartenant à différents propriétaires et où chacun d'eux veille à garder et à entretenir ses propres terrains contre l'érosion hydrique. L'implication de la population cible dans la gestion durable des ressources en sols dans la présente étude a été faite à une échelle restreinte en se limitant à des enquêtes (voir appendice C) auprès d'un échantillon de cette population en vue de détecter les aménagements de CES appréciés par ces derniers dans le cadre d'un éventuel projet

de développement et de conservation des terres agricoles en vue de réaliser un scénario antiérosif pour le bassin versant de l'oued Barbara.

2.1.4 Analyse des résultats

Les analyses des résultats sont faites à la fois quantitativement et qualitativement, et ce, à trois niveaux. Un premier niveau représenté surtout par les cartes thématiques relatives à l'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Barbara. Ces dernières constituent en quelque sorte notre «champ d'action». Un second niveau se rapporte à l'analyse des enquêtes, des entrevues et des autres informations techniques (aménagements CES), socio-économiques et environnementales, recueillies au moment de notre diagnostic de la zone à l'étude. Cela a permis d'obtenir une autre couche d'information qui constituera notre « outil d'action». Enfin, le dernier niveau consiste en quelque sorte en un couplage entre les deux premiers niveaux afin d'établir un scénario d'un plan d'aménagement antiérosif.

2.2 RÉSULTATS

2.2.1 Évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Barbara

2.2.1.1 Évaluation qualitative de l'érosion hydrique

L'application de la méthode de la DF/FAO-SIDA pour caractériser l'érosion hydrique a permis d'obtenir la carte des zones à potentialité érosive (Figure 2.6) qui montre (Tableau 2.9) que les zones de collecte et de concentration des eaux du ruissellement couvrent 4 491,71 ha soit 25,77 % de la superficie totale, les zones d'accumulation représentées par la retenue du barrage couvrent 283,17 ha (1,74 %), celles affectées par l'ablation hydrique 10 231,98 ha (72,92%), contre 1 555,98 (9,57 %) pour les zones complexes, ce qui reflète bien l'ampleur de l'érosion hydrique et la gravité de la situation au sein du bassin versant de l'oued Barbara.

Tableau 2.9

Répartition des zones d'érosion hydrique

Nature de la zone	Superficies (ha)	Superficies (%)
Zones de collecte et de concentration des eaux du ruissellement	4 491,71	25,77
Zones d'ablation hydrique	10 231,98	62,92
Zones complexes	1 555,98	9,57
Zones d'accumulation	283,17	1,74

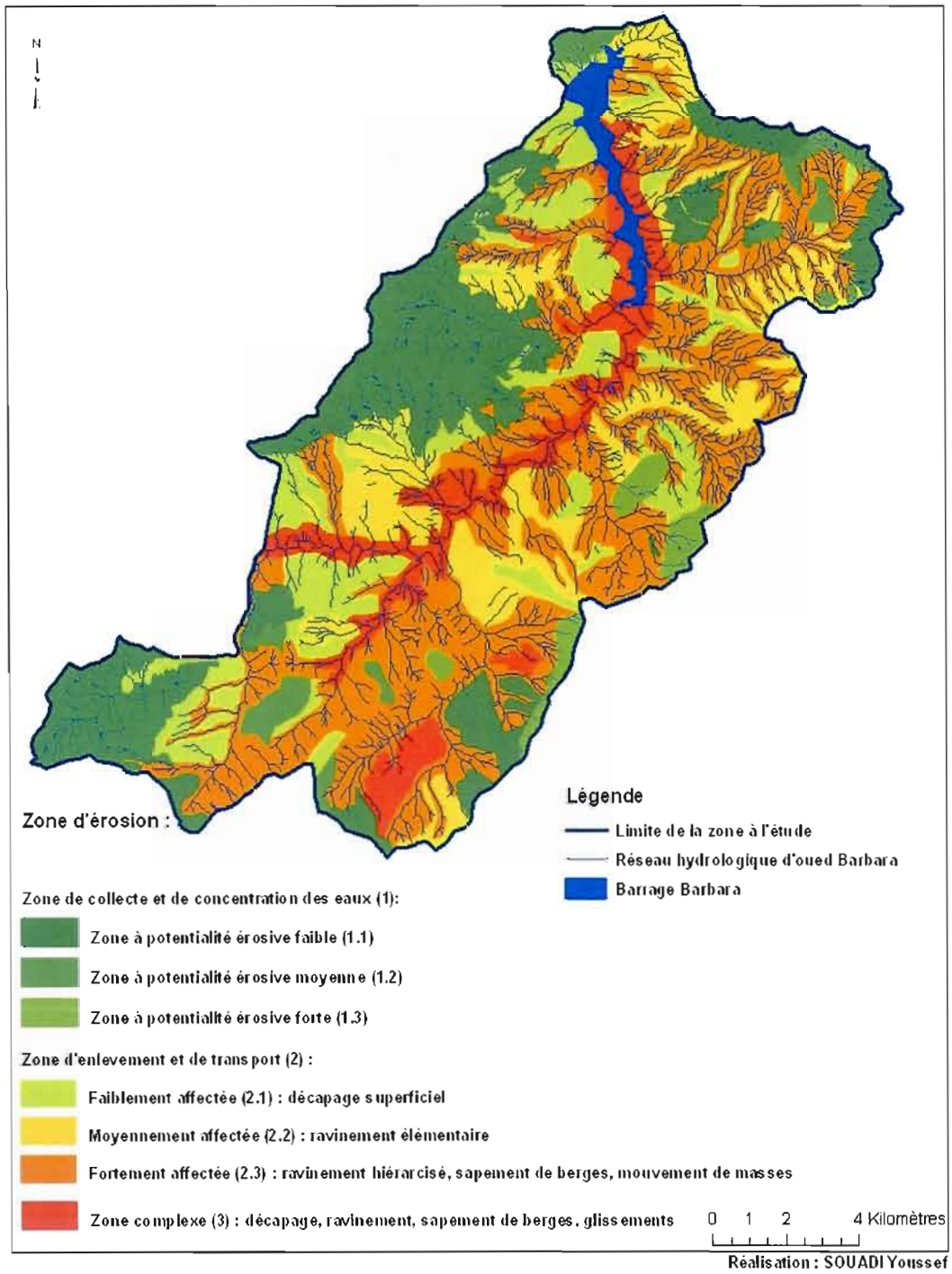


Figure 2.6 Zones de potentialité érosive du périmètre à l'étude de l'oued Barbara.

La combinaison des zones selon leurs potentialités érosives respectives a permis de définir trois unités d'érosion hydrique (Tableau 2.10).

Tableau 2.10

Répartition des niveaux d'érosion hydrique

Niveau d'érosion	Faible	Moyen	Fort
Unités d'érosion	**(1.1)** et **(2.1)**	**(1.2)** et **(2.2)**	**(2.3)** et **(3)**
Superficie (ha)	5 623,32	2 665,57	7 690,78
Superficie en %	35,19	16,68	48,13

2.2.1.1.1 Les zones d'érosion forte

Elles regroupent les zones très affectées qui se caractérisent par un ravinement généralisé et hiérarchisé (Figures 2.7 et 2.8), par de nombreux mouvements de masse ou de sapement de berges, se trouvant principalement sur le versant Est et tout au long de l'oued Barbara. Les terrains affectés par ce type d'érosion sont généralement à matériaux tendres, dépourvus de végétation à la fin de la campagne agricole et localisés sur des pentes fortes. La superficie concernée par ce type d'érosion représente 7 690,78 ha, soit 48,13 % de la superficie totale.



Figure 2.7 Cas de ravinement généralisé dans le bassin versant de l'oued Barbara. (Photo : SOUADI Youssef, 2009)



Figure 2.8 Cas de ravinement hiérarchisé dans le bassin versant de l'oued Barbara. (Photo : SOUADI Youssef, 2009)

2.2.1.1.2 Les zones d'érosion moyenne

Elles regroupent les zones moyennement affectées et présentées surtout par les zones à potentialité érosive moyenne où il y'a surtout un décapage superficiel moyen et quelques ravinements élémentaires (Figure 2.9). Ces zones se rencontrent le plus souvent sur les versants à pente moyenne et à matériaux plus ou moins résistants. La superficie affectée par ce type d'érosion est d'environ 2 665,57 ha, soit 16,68 % de la superficie totale.



Figure 2.9 Ravin sillonnant une parcelle agricole dans le bassin versant de l'oued Barbara. (Photo : SOUADI Youssef, 2009)

2.2.1.1.3 Les zones d'érosion faible

Elles regroupent les zones à potentialité érosive faible qui se caractérisent surtout par un décapage superficiel faible associé ou non à un ravinement individualisé. Ces zones correspondent généralement à des terrains qui se trouvent sur de faibles pentes. La superficie touchée par ce type d'érosion hydrique est de 5 623,32 ha, soit 35,19 % de la superficie totale.

2.2.1.2 Évaluation de l'érosion hydrique par l'équation universelle des pertes en sols USLE

2.2.1.2.1 Agressivité des précipitations (R)

L'application des relations de FOURNIER et celle d'ARNOLDUS aux données pluviométriques a permis d'obtenir les résultats présentés dans le tableau 2.11.

Tableau 2.11

Valeurs de l'agressivité climatique du périmètre à l'étude de l'oued Barbara

Unités géographiques	Agressivité de Fournier	Agressivité d'Arnoldus	Agressivité climatique	Superficie d'influence (ha)
Hammam Bourguiba	30,92	98,72	64,82	1223,42
Ouled Mfadda	40,77	127,90	84,34	8934,12
Oued Barbara	28,39	99,60	63,99	5895,17
Ain El Baya	23,55	100,84	62,20	32,85
Ain Debba	37,72	146,07	91,89	183,16

Les deux méthodes donnent des valeurs très éloignées, avec des écarts variant de 68,12 % à 76,65 %. Une agressivité climatique moyenne a donc été estimée à

partir de la moyenne des deux méthodes, ce qui nous permet de distinguer cinq zones définies chacune par sa station pluviométrique de référence (Figure 2.10). Une première zone définie par la station de Hammam Bourguiba couvre une superficie de 1 223,42 ha soit 7,52 % de la superficie totale et est soumise à une agressivité climatique de 64,82. Une seconde zone est associée à la station de l'oued Barbara et couvre une superficie de 5 895,17 ha (36,24 %). Elle est marquée par une agressivité climatique de 63,99. Une troisième unité liée à la station d'Ain El Bayya couvre la superficie la plus faible, soit 32,85 ha (0,20 %). C'est aussi la zone de plus faible agressivité climatique : 62,20. Une quatrième unité est définie par la station d'Ouled Mfadda et couvre la plus grande superficie, 8 934,12 ha (54,92 %). Elle est soumise à une agressivité climatique de 84,34. Enfin, une dernière zone est associée à la station pluviométrique d'Ain Debba et couvre une superficie de 183,16 ha (1,13 %). L'agressivité climatique y est la plus forte, soit 91,89.

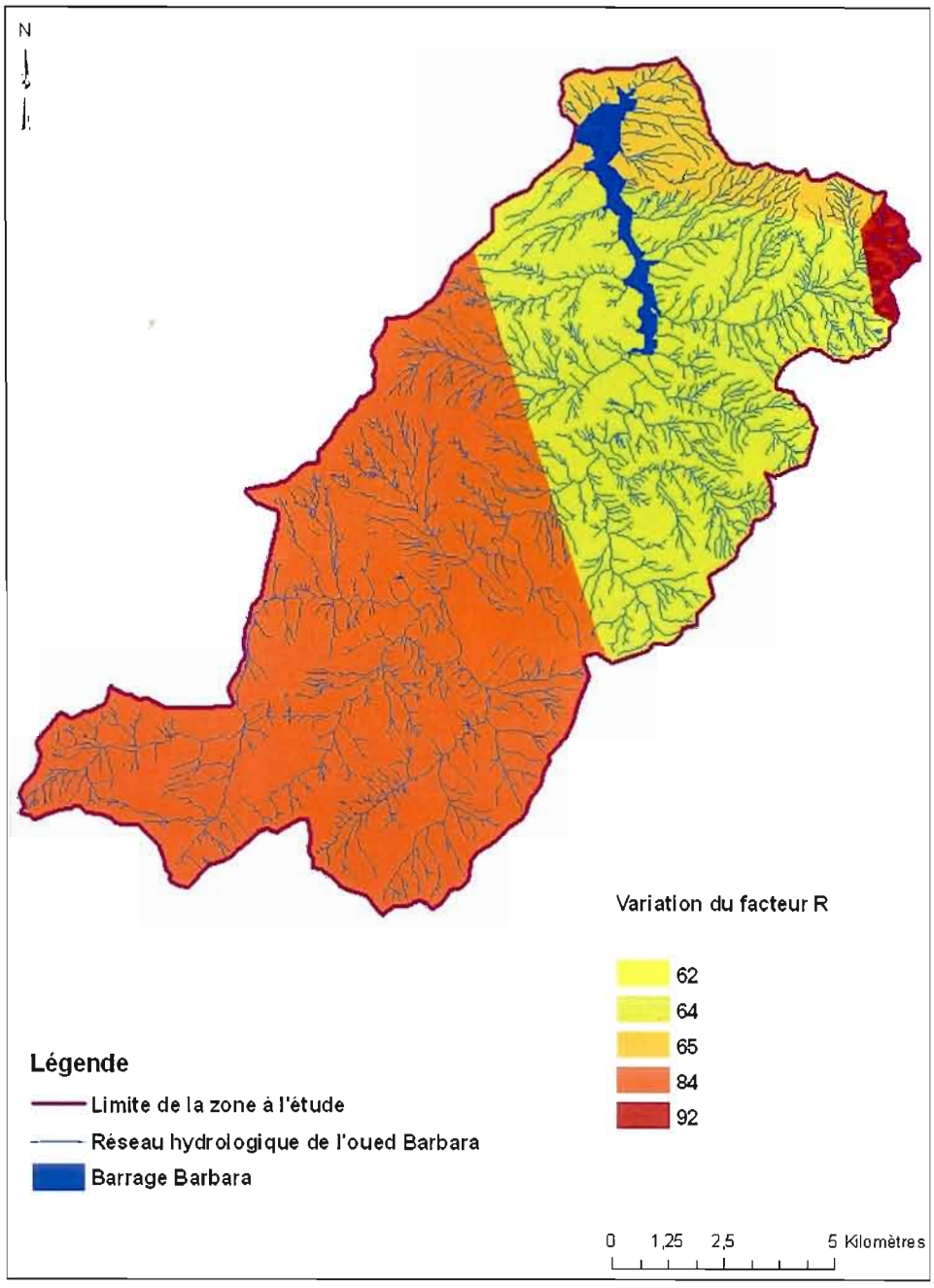


Figure 2.10 Variation du facteur d'agressivité climatique (R) dans le périmètre à l'étude de l'oued Barbara.

2.2.1.2.2 Érodibilité des sols (K)

La synthèse des analyses des 99 échantillons réparties sur les 34 profils pédologiques des sols est présentée dans les tableaux 2.12 et 2.13. Ces analyses ont permis de déterminer la composition granulométrique, le taux de la matière organique et de définir ainsi la structure, la texture et la perméabilité des différentes classes des sols constitutifs du périmètre à l'étude de l'oued Barbara.

Tableau 2.12

La texture des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara

Classe des sols	A	LF	LG	SF	SG	MO	Texture
Lithosols/Régososls	-	-	-	-	-	-	-
Minéraux bruts d'érosion	24,25	18,8	20	19,1	16,5	0,15	Limoneux
Peu évolués	33,3	23,45	17,2	15,12	10,79	0,56	Limono-argileux
Rendzines	29,37	27,54	17,5	13,31	11,82	1,46	Limono-argileux
Vertisols	43,51	27,78	12,3	11,47	4,42	0,88	Argilo-limoneux
Sols brunifiés	22,63	14,2	13,1	33,5	16,66	0,26	Limono-argileux
Sols complexes	30,32	19,65	16,1	20,06	13,54	0,35	Limono-argileux
Sols bruns calcaires	63,78	13,82	6,81	6,82	8,22	0,94	Argileux

A : argile, LF : Limons fins, LG : Limons grossiers, SF : Sable fin, SG : Sable grossier, MO : Matière organique.

Tableau 2.13

Perméabilité et structure des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara

Classe des sols	Perméabilité	b_p	Structure	c_s
Lithosols/Régososls	imperméable	-	Compact/tendre	-
Minéraux bruts d'érosion	peu perméable	4	peu structuré	3
Peu évolués	peu perméable	4	moyenne	3
Rendzines	peu perméables	4	bien structuré	2
Vertisols	imperméables	5	moyenne	3
Sols brunifiés	zone perméable	3	particulaire	2
Sols complexes	peu perméables	4	moyenne	3
Sols bruns calcaires	imperméables	5	non structuré	4

b_p : Code de la perméabilité, c_s : Code de la structure.

Les résultats ont montré que :

- Les lithosols et les régososls qui présentent respectivement des affleurements d'une roche mère calcaire dure et marneuse tendre sont imperméables et non structurés.
- Les sols des minéraux bruts d'érosion sont généralement limoneux, peu structurés (3) et peu perméables (4).
- Les sols peu évolués sont limono-argileux, à structure moyenne (3) et peu perméable (4).
- Les rendzines sont limono-argileux, bien structurés (2) et peu perméables (4).
- Les sols vertiques sont argilo-limoneux, à structure moyenne (3) et imperméables (5).
- Les sols brunifiés sont limono-argileux, à structure particulaire (2) et perméable.
- Les sols complexes sont limono-argileux, à structure moyenne (3) et de perméabilité faible.
- Les sols bruns calcaires sont argileux, non structurés (4) et imperméables.

L'application de l'équation d'érodibilité de WISCHMEIER à ces données a permis d'obtenir des valeurs qui indiquent que les sols bruns calcaires ont la plus faible érodibilité (0,18), alors que la plus forte érodibilité s'observe au niveau des sols minéraux bruts d'érosion (0,418) (Tableau 2.14).

Tableau 2.14

Érodibilité des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara

Classe des sols	Facteur d'érodibilité K
Lithosols/Régososls	-
Minéraux bruts d'érosion	0,418
peu évolués	0,347
Rendzines	0,333
Vertisols	0,305
Sols brunifiés	0,386
Sols complexes	0,367
Sols bruns calcaires	0,183

La classification des valeurs de facteur K selon les études faites en Tunisie et notamment celle de CORMARY Y. et MASSON J. (1964) montre que 78% de la superficie de la zone à l'étude présente de forts risques d'érosion contre 22% où les risques sont faibles (Tableau 2.15 et figure 2.11).

Tableau 2.15

Classification de l'érodibilité des sols du périmètre à l'étude de l'oued Barbara

Classe d'érodibilité	Classe des sols	Superficies (ha)	Proportion
$0,1<K\leq0,2$	Sols à faibles risques d'érosion	35,64	21,94 %
$0,2<K\leq0,3$	Sols à moyens risques d'érosion	0,1609	0,1 %
$0,3<K\leq0,4$	sols à forts risques d'érosion	117,63	72,42 %
$0,4<K$	Sols à très forts risques d'érosion	9,0046	5,54 %

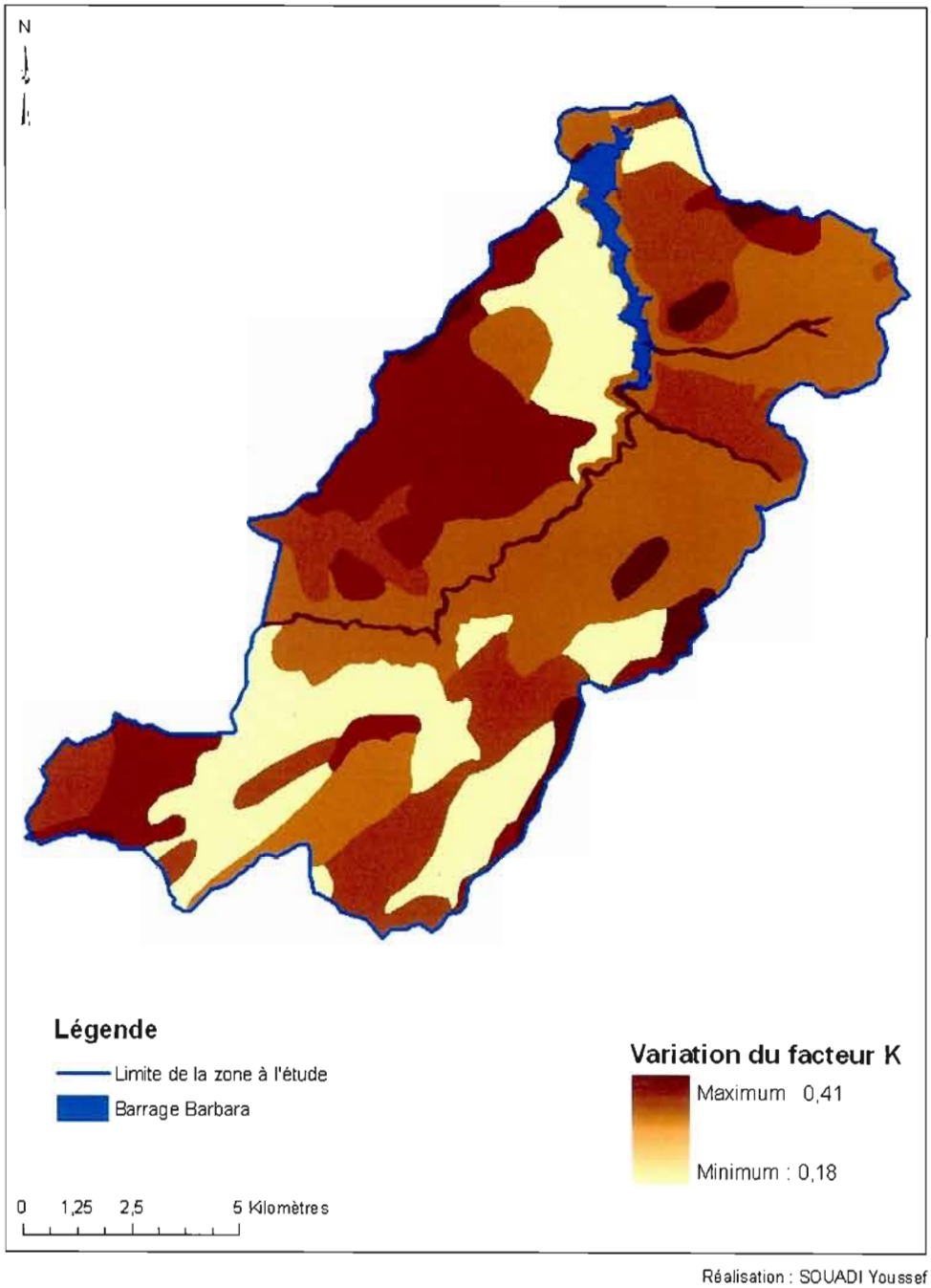


Figure 2.11 Variation du facteur d'érodibilité des sols (K) dans le périmètre à l'étude de l'oued Barbara.

2.2.1.2.3 Facteur topographique (LS)

L'application du modèle de RUSLE donne des valeurs de LS variant de 0 à 8,91. Les valeurs les plus élevées s'observent au niveau des cours d'eau, où les pentes sont élevées et la concentration des eaux de ruissellement est maximale. Ces ruissellements génèrent une énergie mécanique croissante qui provoque l'arrachement des particules des sols au fur et à mesure qu'il y a accumulation des eaux et là où les pentes sont de plus en plus sévères. La figure 2.12 présente la répartition spatiale de l'indice topographique LS généré dans le SIG qui met bien en évidence l'ampleur de l'érosion ravinante qui sillonne le bassin versant de l'oued Barbara.

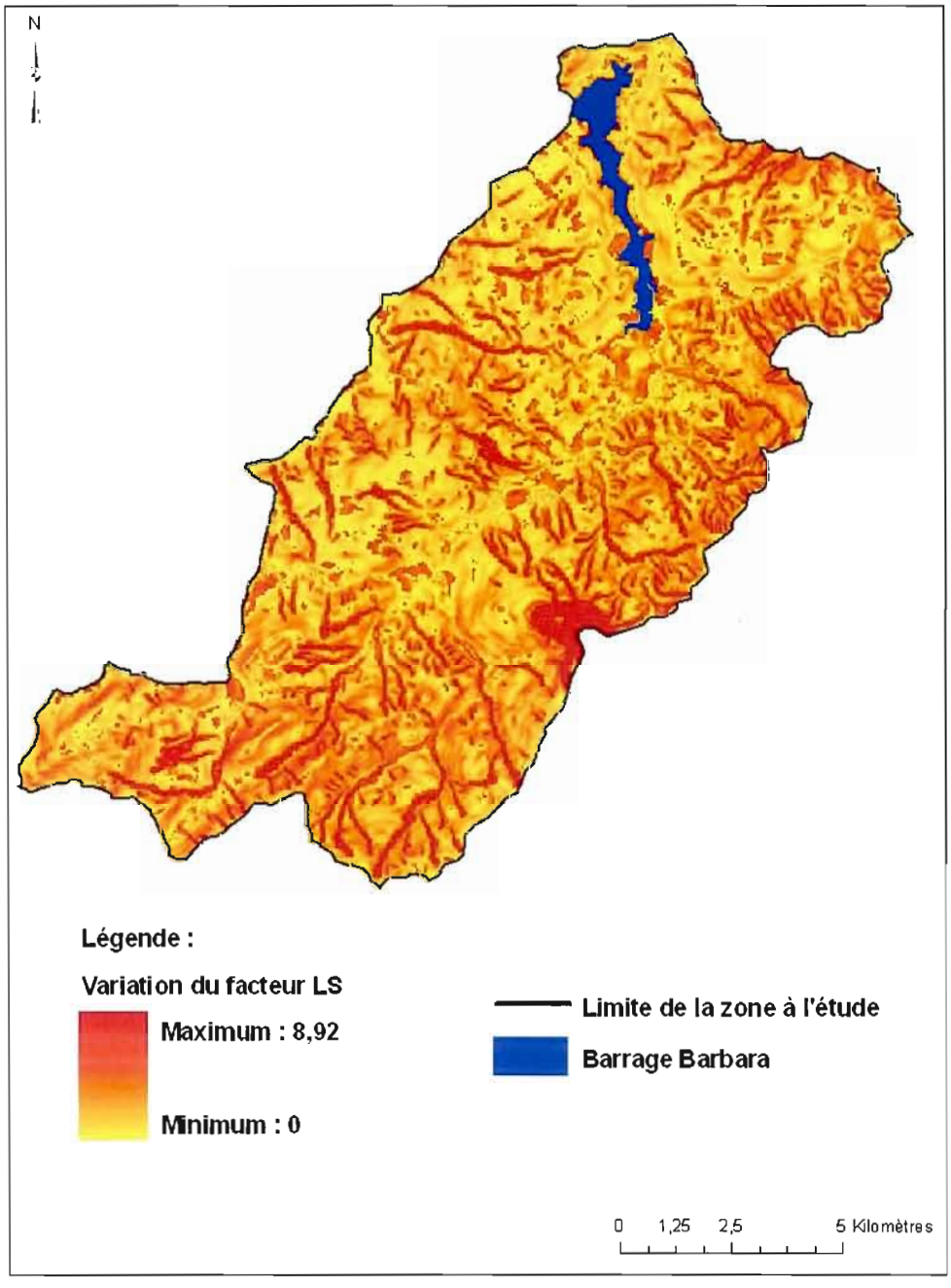


Figure 2.12 Variation du facteur topographique (LS) dans la zone de l'oued Barbara

2.2.1.2.4 Facteur d'occupation des sols (C)

Ce facteur est estimé à partir des différents travaux réalisés en Tunisie, lesquels nous ont permis d'obtenir le facteur d'occupation des sols de la zone à l'étude de l'oued Barbara (Tableau2.16 et figure 2.13).

Tableau 2.16

Facteur d'occupation des sols (C) au périmètre à l'étude de l'oued Barbara

Occupation des sols	Types de couvert	Superficies (ha)	Facteur C
Cultures annuelles	céréales	3837,35	0,58
	cultures industrielles	133,20	0,35
	cultures fourragères	2577,52	0,58
	cultures maraichères	489,46	0,5
arboriculture	oliveraies	177,98	0,65
	Pommeraies, Poiraies	605,87	0,9
Forêts	Eucalyptus	72,59	0,01
	Feuillus divers	567,48	0,001
	Résineux	141,60	0,001
	chêne-liège (Strates basses dégradées)	2610,57	0,01
	chêne zen (Strates basses dégradées)	0,86	0,01
Parcours	végétations naturelles	4613,23	0,425
Barrage Barbara	-	283,17	-

Ces résultats montrent que les valeurs les plus faibles (0,01 et 0,001) correspondent à une meilleure protection des sols et sont offertes par les formations forestières où l'anthropisation est faible alors que ces valeurs remontent graduellement avec les activités agricoles, pour atteindre un maximum à 0,9. Dans le la zone à l'étude de l'oued Barbara, 21,44 % des sols sont relativement protégés alors que le reste, soit 78,56 % sont faiblement protégés.

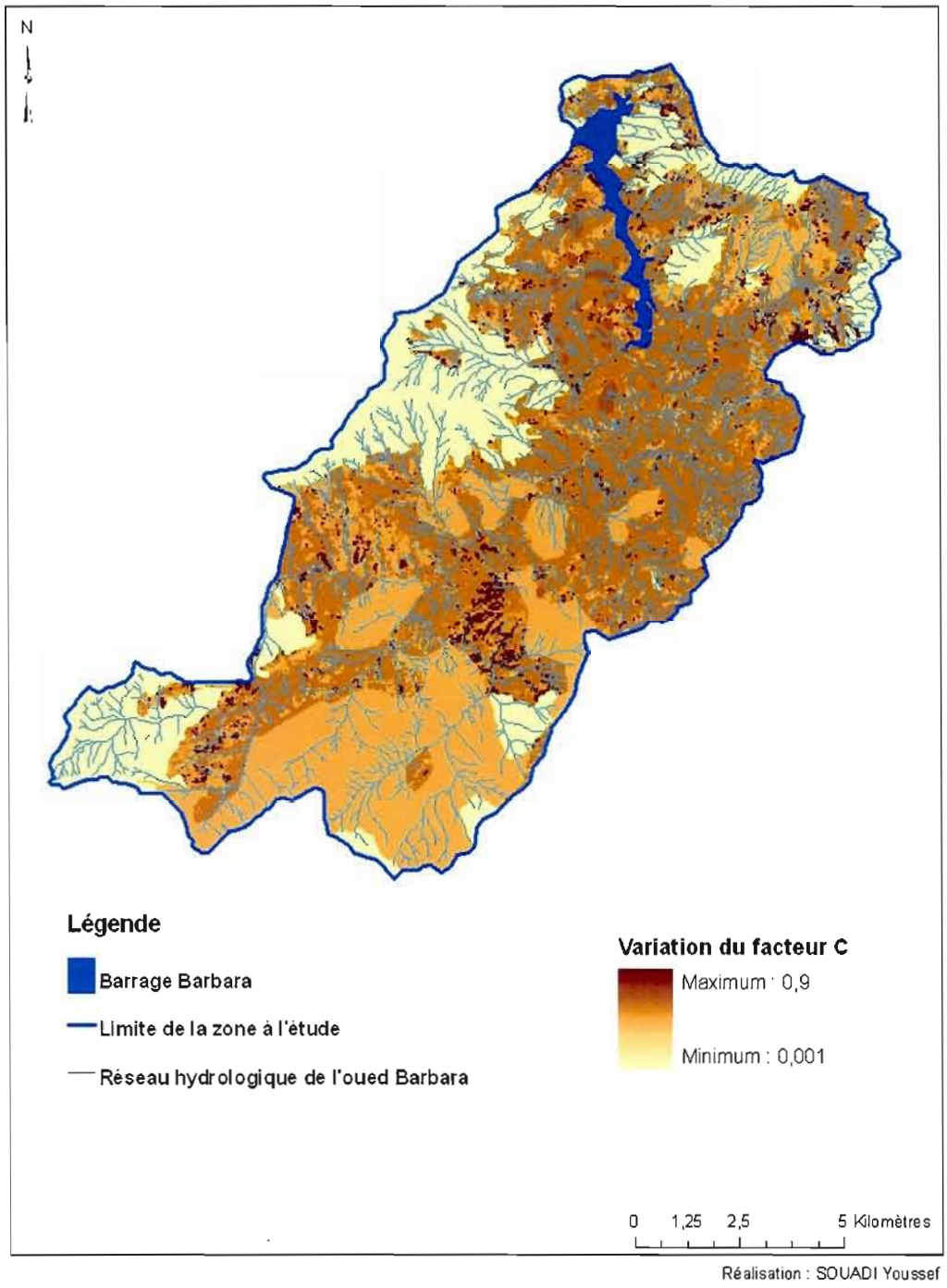


Figure 2.13 Variation du facteur d'occupation des sols (C) dans le périmètre à l'étude de l'oued Barbara.

2.2.1.2.5 Facteur des pratiques antiérosives (P)

Ce facteur est estimé à partir les différents travaux de WISCHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1965) qui nous ont permis d'obtenir les valeurs du facteur des techniques antiérosives pour la zone à l'étude (Tableau 2.17 et figure 2.14).

Tableau 2.17

Facteur des pratiques antiérosives (P) au périmètre à l'étude de l'oued Barbara

Variation du facteur P	Superficies (ha)	Proportion (%)
0,1	3 954,44	24,31
0,12	851,62	5,23
0,16	948,70	5,83
0,18	1 450,20	8,91
0,5	676,23	4,16
0,6	1 694,79	10,42
0,8	1 469,37	9,03
0,9	3 661,79	22,51
1	1 561,56	9,60

Ce tableau montre que 44,29 % de la superficie de la zone à l'étude sont relativement protégés alors que le reste, soit 55,71 % sont exposés à de très forts risques d'érosion hydrique.

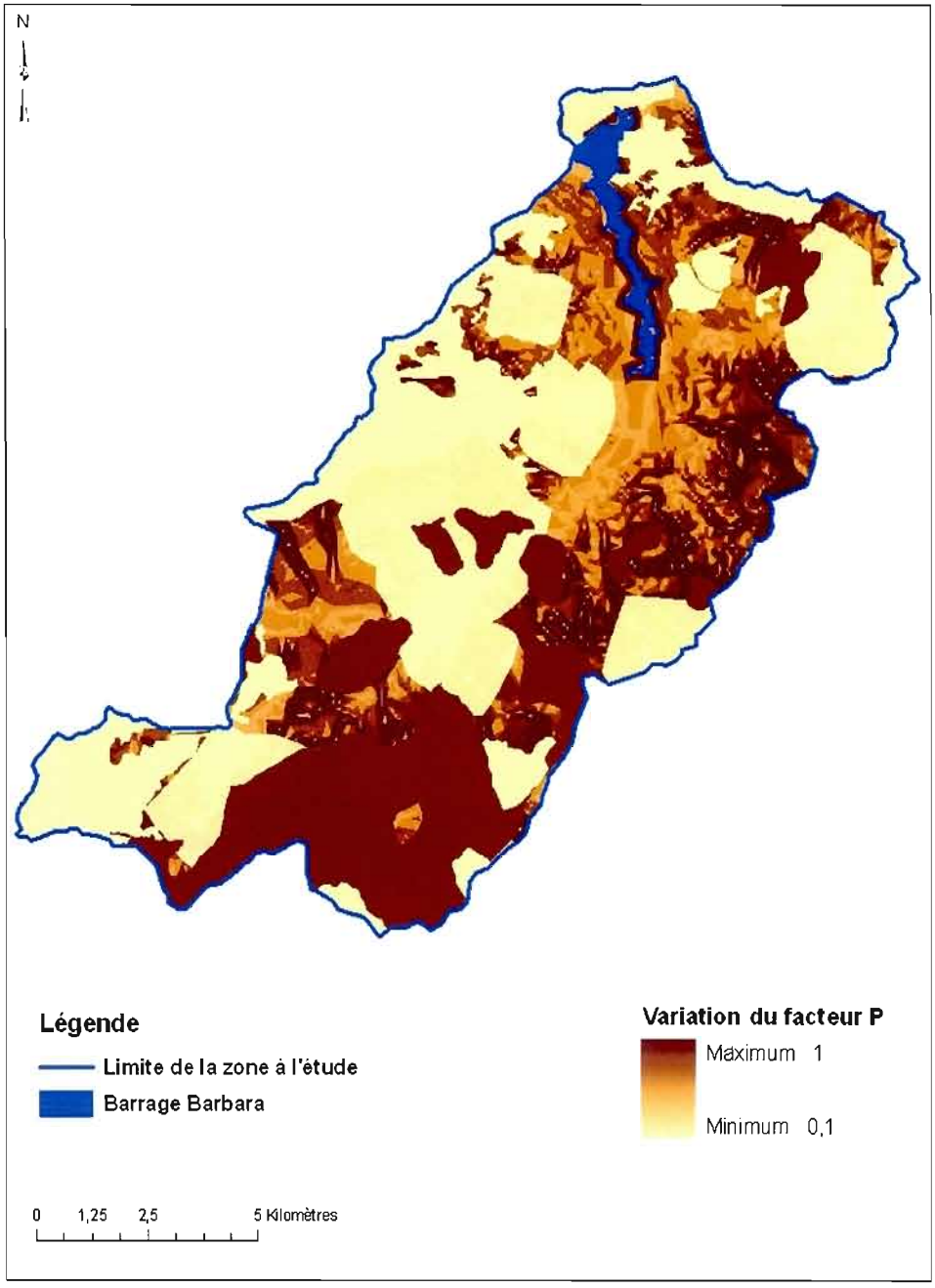


Figure 2.14 Variation du facteur des pratiques antiérosives dans la zone de l'oued Barbara.

2.2.1.2.6 Résultat de l'équation USLE

La multiplication de différentes couches thématiques des facteurs de l'équation de l'USLE déjà déterminés ci-avant a aidé à produire la carte d'érosion hydrique (Figure 2.15). Cette carte montre une nette variabilité spatiale des risques d'érosion hydrique au sein du la zone à l'étude de l'oued Barbara, le versant Est étant plus exposé que le versant Ouest et que les terrains à pentes fortes et dépourvues de végétation sont plus vulnérables à l'érosion hydrique. Une classification de l'érosion hydrique (Tableau 2.17) montre une superficie de 2 825,37 ha soit 17,84 % de la superficie totale est soumise à un taux de pertes des sols inférieur à 20 tonnes/ha/an, une seconde unité couvrant 8 611,03 ha (54,36 %) soumise à des pertes en terres qui oscillent entre 20 et 40 tonnes/ha/an, une troisième unité couvrant 1 222,56 ha (7,72 %) soumise à des pertes en terres variant entre 40 et 60 tonnes/ha/an et une quatrième unité de 3 180,35 ha (20,08 %) qui montre des taux d'érosion qui dépassent les 60 tonnes/ha/an et où elles peuvent atteindre les 568 tonnes/ha/an.

Tableau 2.18

Classes des pertes en sols (A) dans la zone de l'oued Barbara

Classe des pertes en sols A (tonnes/ha/an)	Superficies (ha)	Taux d'érosion en %
$A \leq 20$	2 825,37	17,84
$20 < A \leq 40$	8 611,03	54,36
$40 < A \leq 60$	1 222,56	7,72
$A > 60$	3 180,35	20,08

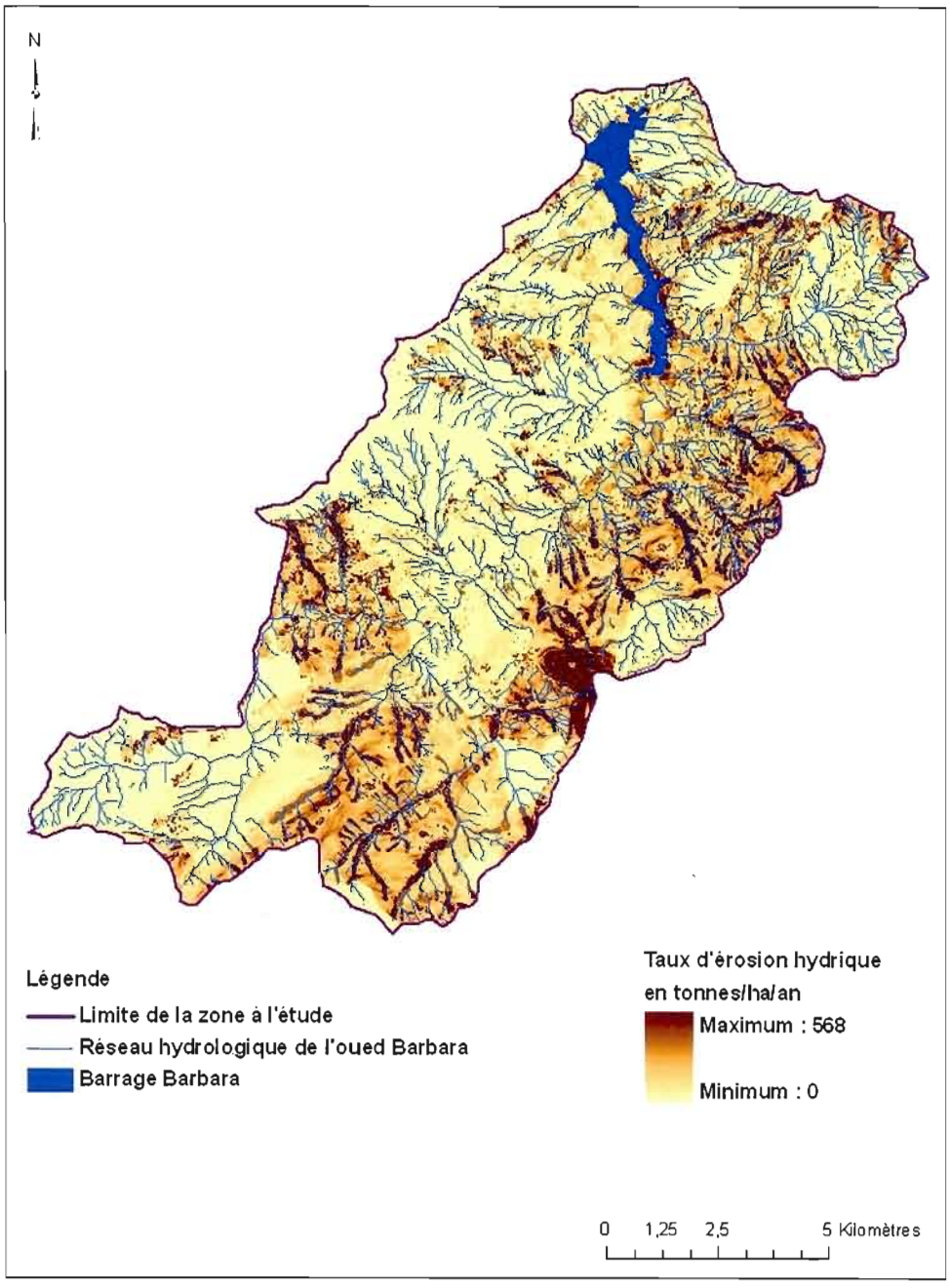


Figure 2.15 Évaluation des pertes en sols par USLE au sein du périmètre à l'étude de l'oued Barbara.

2.2.2 Intégration de la population à la gestion des ressources en sols du bassin versant de l'oued Barbara

L'intégration de la population à la gestion des ressources en sols vise à réduire l'érosion hydrique, à améliorer le bilan hydrique, à contrôler les ruissellements, à augmenter la fertilité des sols et améliorer la situation socioéconomique et environnementale de la région. Bien que les choix des pratiques antiérosives ne posent pas de problèmes aux aménagistes de conservation des eaux et des sols de la région de Jendouba, l'intégration du facteur humain continue à être à l'origine de l'échec de certains projets de CES (ACHOURI M., 1995).

2.2.2.1 Perception des aménagements antiérosifs par les exploitants de la zone à l'étude

Les réponses aux questionnaires d'un échantillon aléatoire de 79 exploitants (Tableau 2.19) rencontrés pendant le séjour de terrain dans la zone à l'étude ont révélé l'ampleur et la gravité de la situation vis-à-vis de l'érosion hydrique et de l'urgence de faire face à ce fléau. Le questionnaire a montré que l'attitude des agriculteurs vis-à-vis des aménagements de CES a été positive. Lors des rencontres, tous les agriculteurs ont démontré qu'ils sont conscients de l'agressivité de l'érosion hydrique, ils étaient enthousiastes vis-à-vis d'un éventuel projet d'aménagement antiérosif du bassin versant de l'oued Barbara, attitude positive confirmée par les réponses affirmatives de 100% des enquêtés aux questions «Connaissez-vous ce que fait l'érosion hydrique à vos terrains?», «Aimeriez-vous qu'il y ait des projets de CES dans la région ?» et «désirez-vous réaliser des aménagements de CES dans votre exploitation ? ». Ces taux sont des indicateurs de deux phénomènes : d'une part de l'ampleur et la diffusion de l'érosion hydrique dans la zone à l'étude et d'autre part de la conscience des agriculteurs de l'urgence d'aménager leurs parcelles pour freiner la progression de ce fléau.

Tableau 2.19

Résultats des enquêtes

QUESTIONS		Réponses*
1. Connaissez-vous ce que fait l'érosion hydrique à vos terrains?		100%
2. Comment labourer votre terrain par rapport à la pente?	2.1. en parallèle	0%
	2.2. Perpendiculaire	100 %
3. Votre terrain est-il aménagé contre l'érosion hydrique?		11,4% (9)
4. Désirez-vous réaliser des aménagements de CES dans votre exploitation ?		100%
5. Désirez-vous avoir des parcours collectifs ?		100%
6. Que préférez-vous comme pratiques antiérosives ?	6.1. Plantation forestière	0%
	6.2. Plantation arboricole	73%(58)
	6.3. Plantation sylvo-pastorale	27%(21)
	6.4. Cordons en pierres sèches	100%
	6.4. Seuil en pierres sèches	100%
	6.4. Seuil en gabions	100%
7. Aimeriez-vous qu'il y ait des projets de CES dans la région ?		100%

* : Les réponses présentées sont des réponses affirmatives.
Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de réponses affirmatives.

Source : Enquête réalisée par l'auteur auprès de la population riveraine dans la zone à l'étude durant la période du séjour du 24 juin au 31 août 2009.

Tous les agriculteurs interviewés ont demandé, comme type d'aménagement, les seuils en gabions, les seuils en pierres sèches et les cordons en pierres sèches. Les plantations d'arbres fruitiers (oliviers, figuiers, etc.), en association avec les ouvrages de CES, ont été choisies par 73% des enquêtés comme type d'aménagement et de consolidation. Les 27 % restants ont choisi des plantations pastorales (*Acacia sp.*, *cactus sp.* et *atriplex sp.*). Bien que les plantations forestières assurent une bonne protection des sols contre l'érosion hydrique, les enquêtés ont refusé farouchement leur utilisation par peur qu'elles soient en fin de compte soumises au régime du code

forestier qui interdit l'usage de ces essences sauf autorisation des services forestiers[47]. Cette autorisation est en effet selon les enquêtés très difficile à obtenir et ne constitue à leurs yeux qu'un prétexte pour l'État pour mettre la main sur leurs terres.

La perception des exploitants vis-à-vis des pratiques antiérosives au bassin versant de l'oued Barbara a été partiellement mise en évidence par les enquêtes[48]. La faisabilité de ces pratiques est confirmée lors des rencontres avec les intervenants locaux en se basant sur la question «Quels moyens de lutte contre l'érosion hydrique conviennent à la région et quels sont les plus utilisés par la population?».

2.2.2.2 Définition des aménagements antiérosifs retenus et utilisés dans la région

Les aménagements proposés répondent aux exigences techniques et proviennent des recherches bibliographiques, mais aussi des idées de la population de la région et des intervenants agricoles et environnementaux.

2.2.2.2.1 Aménagement des versants

2.2.2.2.1.1 Cordons en pierres sèches

Ce sont des murets en pierres sèches confectionnés et disposés suivant les courbes de niveau. Derrière cet obstacle perméable, les eaux de ruissellement et les travaux du sol accumulent progressivement des sédiments sur lesquels vont se développer des arbres de consolidation (arbres arboricoles ou arbustes fourragers). C'est une technique moins couteuse, qui contribue aux ralentissements des

---

[47] En Tunisie tous les arbres forestiers se trouvant que se soit en domaine de l'État ou en domaine privé, sont soumis au régime du code forestier (DGF, 1996).

[48] Les 79 enquêtés correspondent de ce fait à 79 ménages de la zone à l'étude qui comprend en moyenne 4781 ménages. Ce qui rend la taille de l'échantillon n'est que 1,65 % du total.

ruissellements et au piégeage des sédiments, tout en servant au nettoyage des terrains des pierres (BERGAOUI M. et CAMUS H., 1995).

2.2.2.2.1.2 Bandes enherbées

Ce sont des bandes de cultures pérennes (espèces fourragères, etc.) plantées en courbes de niveau afin de fractionner la longueur de la pente et ainsi diminuer l'énergie générée par les ruissellements qui arrachent les particules des sols (STITI M., 2009).

2.2.2.2.2 Les traitements des cours d'eau

Les traitements des cours d'eau constituent sans doute dans le scénario antiérosif la mesure la plus importante, car le ravinement est la forme d'érosion la plus intense et la plus grave dans la zone à l'étude. Outre qu'ils freinent les ravinements, ils permettent la recharge de la nappe de la région et de gagner d'autres superficies très utiles susceptibles d'être exploitées par des plantations arboricoles par le remblaiement progressif des ravins.

2.2.2.2.2.1 Les seuils en pierres sèches

Ces ouvrages (Figure 2.16) permettent d'arrêter l'érosion latérale provoquée par les crues et de stabiliser les lits des ravins érodés par le creusement vertical. Il s'agit d'ouvrages filtrants qui servent à piéger les sédiments et à ralentir le ruissellement (BERGAOUI M. et ALBERGEL J., 2000).



Figure 2.16 Seuil en pierres sèches implanté sur un ravin dans le bassin versant de l'oued Barbara. (Photo : SOUADI Youssef, 2009)

2.2.2.2.2.2 Les seuils en gabions

Ce sont des ouvrages filtrants implantés transversalement dans les lits des ravins. Ils servent à ralentir les ruissellements et permettent la rétention d'une grande partie des sédiments (ACHOUR M. et VIERTMANN W., 1984).

2.2.2.2.3 Les plantations de consolidations

Ces actions sont complémentaires et servent à stabiliser les actions physiques (cordons et seuils). Il s'agit de consolider ces ouvrages par des plantations arboricoles rustiques (oliviers, figuiers, etc.) ou par des plantations sylvo-pastorales (*acacia*, *atriplex*, *cactus*, etc.) pour améliorer leur durée de vie (Figure 2.17). En plus de leur fonction de consolidation, ces plantations constituent des sources de revenu supplémentaire pour les exploitants, notamment grâce aux fruits. Les plantations sylvo-pastorales fournissent du bois de chauffe et constituent une source fourragère très utile surtout pendant les périodes de disette.



Figure 2.17 Fixation d'un ravin dans le bassin versant de l'oued Barbara par des plantations *d'acacia cyanophylla*[49] (Photo : SOUADI Youssef, 2009)

2.2.2.2.4 Mise en défens et création de parcours collectifs

La mise en défens et la création des parcours collectifs sont des actions parallèles qui visent à diminuer la pression du troupeau sur les parcours, faciliter la régénération et exploiter rationnellement ces espaces.

2.2.2.2.5 Reboisement

Dans ce cas, il s'agit de réaliser des plantations forestières (Feuillus et résineux) dans les zones qui font partie du domaine de l'État et également des brise-

[49]Les *acacias* sont des légumineuses qui ont la capacité de fixer au niveau de leurs nodosités l'azote atmosphérique N_2 (l'air renferme environ 78 % d'azote) non assimilable par les plantes et le transformer en ammoniaque NH_3 facilement assimilable sous forme de NH_4^+, contribuant ainsi à l'enrichissement des sols en azote biologique non polluant très utile pour les cultures. Les nodosités sont le siège de réactions d'oxydoréduction catalysées par une enzyme (la nitrogénase) produite par des bactéries de genre rhizobium qui assurent la transformation de l'azote de sa forme atmosphérique à sa forme minérale et qui vivent en symbiose avec ces légumineuses (SOUADI Y., 1999).

vents dans les terrains privés.

2.2.2.3 Réalisation d'un Scénario d'aménagement antiérosif

Le scénario antiérosif est obtenu par la projection des remèdes de CES déjà définis sur la carte d'érosion hydrique. Cependant, une intégration de la population à la réalisation d'un tel plan d'aménagement nécessite de ce fait la réalisation d'un plan parcellaire montrant les différentes parcelles avec leurs propriétaires[50] correspondants et en même temps faire des enquêtes auprès de tous les propriétaires afin de tenir compte de leurs choix de pratiques antiérosives. Autrement, ce sont les exploitants qui définissent ce qu'ils veulent effectuer comme pratiques antiérosives. Ainsi, vu les dimensions de la zone à l'étude, l'exiguïté et le morcellement accentué des terres, les densités élevées de la population et la configuration du relief, la réalisation de cette tâche dans le cadre de la présente recherche aurait été très difficile, car elle aurait nécessité un long séjour sur le terrain et une coordination avec les pouvoirs locaux. Cela ne peut se faire en fait que dans le cadre de projets de développement.

Afin d'obtenir un scénario antiérosif, on a superposé les pratiques antiérosives aux cartes d'érosion en fonction des critères suivants :

- Les zones de collecte et de concentration à potentialité érosive forte qui provoquent une intense érosion à l'aval doivent faire l'objet de traitement en seuils des pierres sèches, lesquels peuvent être entrepris sur substrat cohérent alors que sur substrat tendre la végétalisation semble le traitement le plus efficace.

---

[50] Généralement, la réalisation d'un plan parcellaire se heurte à des problèmes fonciers, vu que certains exploitants ne possèdent pas de titres de propriété et dans ce cas refusent de collaborer par peur de perdre leurs terres héritées, ce qui complique encore la tâche. D'où l'utilité de la sensibilisation avant la réalisation d'un tel projet (ACHOURI M., 1995).

- Les zones de collecte et d'érosion moyenne à forte doivent simplement faire l'objet de traitements similaires, mais de façon plus intense, en incluant dans ce cas des seuils en gabions dans les secteurs où domine le ravinement.

- Les zones de décapage faible doivent être traitées par des pratiques culturales qui se résument surtout aux bandes enherbées, aux labours et aux plantations en courbes de niveau.

- Les zones à érosion très intense doivent faire l'objet de traitements intensifs de seuils, de végétalisation et éventuellement une mise en défend (contre le pâturage, l'exploitation illicite, etc.).

Cependant, suite aux discussions avec des responsables de la DGACTA, des mesures antiérosives dans la zone à l'étude seront prises par le gouvernement Tunisien dans les années à venir dans le cadre des projets de développement. Donc afin d'obtenir un scénario antiérosif, on a veillé à la combinaison de ces informations (aménagements projetés) avec les aménagements déjà proposés ci-dessus (Figure 2.18), afin de prévoir des actions antiérosives sur 12 130,35 ha (Tableau 2.20), ce qui représente 74,56 % de la superficie totale de la zone à l'étude.

Tableau 2.20

Composantes d'un scénario antiérosif de la zone à l'étude

Actions	Importance (ha)
Cordons en pierres sèches et plantations de consolidations	3780,49
Mise en défens (Plantations sylvo-pastorales et correction des ravins)	1841,75
Plantations sylvo-pastorales et correction des ravins	1762,69
Reboisement	200,65
Bandes enherbées et/ou cordons en pierres sèches	4 544,77

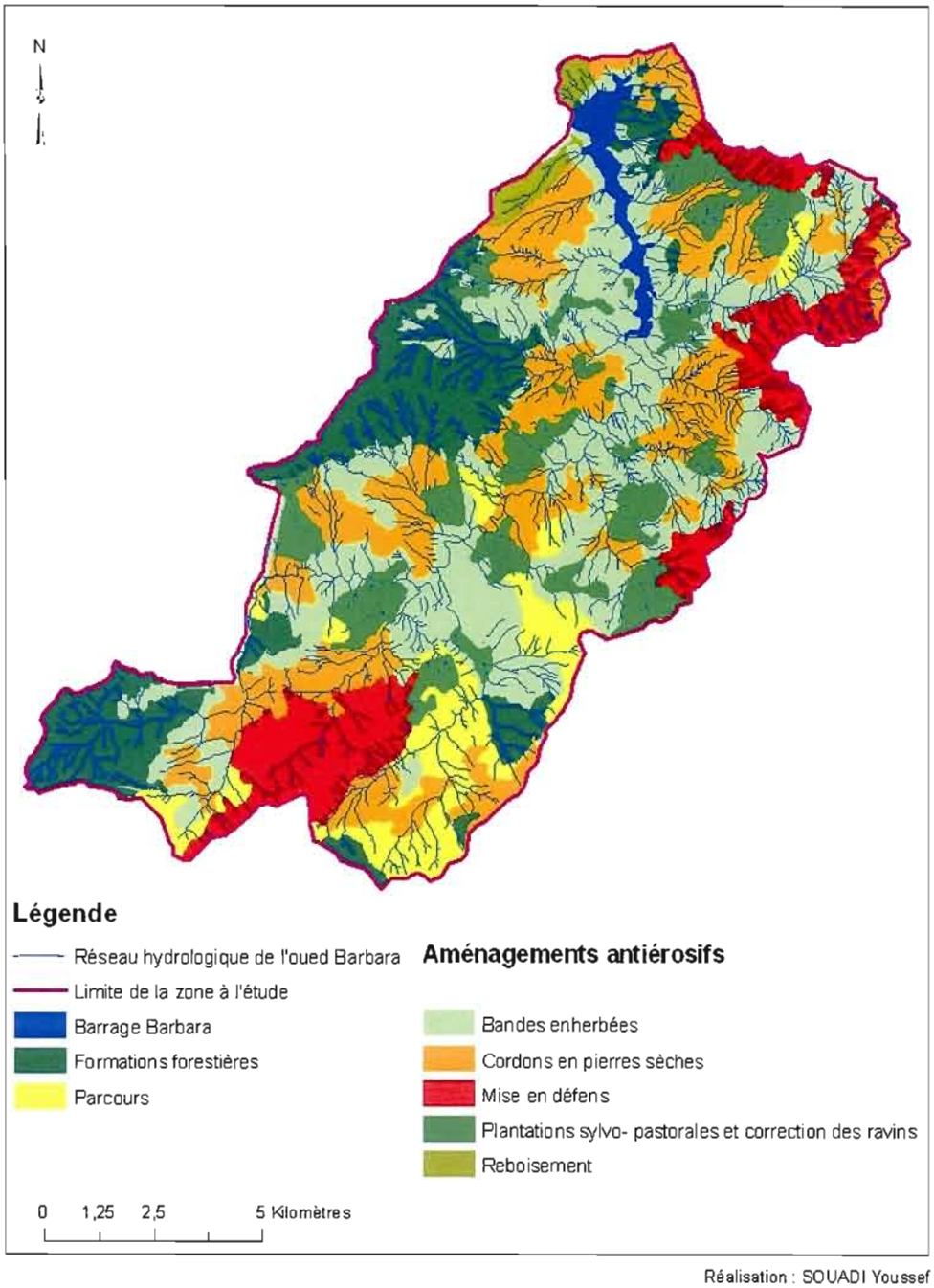


Figure 2.18 Scénario d'un plan d'aménagement antiérosif pour le périmètre à l'étude de l'oued Barbara.

2.2.2.4 Recommandations

À l'instar des aménagements de CES proposés, des actions complémentaires sur le milieu humain doivent avoir lieu afin d'assurer la bonne gestion des ressources en eau et en sol. Les services de vulgarisation de la région doivent contribuer d'une manière continue à travers la sensibilisation des exploitants sur les techniques culturales et les plantations de consolidation. En effet, pour mieux intégrer la population cible à la gestion de ces ressources, il est nécessaire que ces actions aient lieu à travers la création de groupements ou d'associations d'utilisateurs qui prendra en charge l'animation, la promotion de l'action participative et assurera le contrôle des travaux d'entretien et d'aménagements, et ce, en coordination avec les organismes locaux.

2.2.2.4.1 Techniques culturales

Parmi les techniques culturales qui se dégagent à la suite du diagnostic physique et qui contribuent à la stabilité des sols et par conséquent confèrent une meilleure résistance aux phénomènes érosifs, on peut citer :

- Les labours et plantations suivant les courbes de niveau.

- L'application d'un assolement et d'une rotation convenables pour ne pas épuiser le sol et éviter d'avoir des sols squelettiques tout en gardant une structure stable et équilibrée.

- Choisir les cultures convenables (minimiser les cultures sarclées[51]).

[51] Les cultures sarclées sont des plantations qui exigent durant leur cycle de développement plusieurs travaux du sol, favorisant son émiettement et augmentant ainsi sa sensibilité vis-à-vis à l'érosion hydrique.

- L'apport de la fumure organique (fumier, etc.).

- Enfouiller les résidus des cultures dans le sol afin d'augmenter la teneur en matière organique et améliorer ainsi la cohésion entre ses particules.

2.2.2.4.2 Plantations de consolidation

Pour mieux valoriser et exploiter les plantations de consolidation (plantation arboricole ou plantation pastorale), ces dernières nécessitent d'être entretenues, à savoir procéder à la taille et aux traitements phytosanitaires pour les espèces arboricoles et les coupes d'exploitation pour les espèces sylvo-pastorales, en vue d'obtenir une bonne production et en même temps augmenter leur longévité et en en parallèle celle des ouvrages de CES.

2.3 DISCUSSION

La lithologie de la zone à l'étude présente des formations dominantes constituées essentiellement de couches tendres, peu perméables et très peu résistantes à l'érosion hydrique (marnes) en alternance avec des bancs plus durs (calcaires). Cela explique l'ampleur du ruissellement qui entaille les sols et montre l'importance des matériaux transportés conduisant à la naissance des ravins hiérarchisés et généralisés. Cette situation est encore aggravée par le relief très accidenté de l'ensemble du bassin versant. Cela coïncide avec la situation de la région d'Ain-draham où les ravinements et les glissements sont des phénomènes très spectaculaires qui, outre qu'ils provoquent des pertes en terre considérables, nuisent au bien-être des populations, en diminuant les superficies cultivables et en menaçant les implantations humaines (KASSAB A., 1976).

L'occupation des sols présentée surtout par la couverture végétale a bien montré son influence sur la régression de l'érosion hydrique du fait que les zones les plus touchées sont les moins couvertes et inversement. Cela confirme que la présence de la végétation améliore la stabilité structurale des sols (cohésion entre les particules des sols) et par conséquent une meilleure résistance au ruissellement. L'interception de la pluie par les végétaux ne fait que minimiser le choc causé par les averses sur les sols. De plus, les racines fissurent les sols et créent une sorte réseau de canalisation souterraine qui ne fait qu'augmenter l'infiltration des eaux dans le sol minimisant ainsi les ruissellements de surface. Selon M'HIRI (1970), la végétation constitue par ses résidus une source de matière organique très utile qui améliore la fertilité des sols et les rend moins sensibles à la dégradation. Cette amélioration est assurée par l'humus qui est la fraction colloïdale de la matière organique, et qui en s'associant avec l'argile forme une entité plus stable; «le complexe argilo-humique » (DAVET P., 1996) et procure au sol de nouvelles propriétés physico-chimiques favorables à sa fertilité. Ce complexe, caractérisé par une structure aérée, favorise un stockage

hydrique suffisant et permet d'éviter le compactage du sol et par conséquent une diminution des ruissellements. Cela favorise également la rétention des éléments nutritifs indispensables aux plantes (MUSY A. et SCOUTTER M., 1991), car ce complexe a un pouvoir anionique (chargé négativement) qui empêche la lixiviation (le lessivage) des éléments cationiques (chargés positivement : $NH4^+$, H^+, etc.) ce qui est très utile pour la nutrition de la plante (BRIAND C., 2000).

L'extension spectaculaire de la dynamique érosive révèle de plus en plus des aspects inquiétants, voire catastrophiques dans le bassin versant de l'oued Barbara. Elle exprime une situation alarmante, se soldant surtout par la réduction continue de la fertilité des sols en amont. Cette régression est confirmée par les taux de pertes en sols dont la moyenne annuelle est de 36,13 t/ha dépassant largement les pertes en sols tolérées[52] par l'érosion hydrique qui oscille selon certains auteurs américains entre 2,5 t/ha/an à 12,5 t/ha/an et cela en fonction du climat, du type de roche et de l'épaisseur des sols (CORMARY Y. et MASSON J., 1964). Ce taux de perte confirme aussi l'envasement du barrage Barbara en aval. De ce fait, cette notion de tolérance des sols à l'érosion doit être développée pour les sols tunisiens et par extension les sols maghrébins en tenant compte de leur vitesse de pédogenèse pour servir de seuil à ne pas dépasser au champ et cela pourrait être utilisée pratiquement dans le choix des techniques les plus efficaces de CES.

La méthodologie présentée ici montre qu'au sein d'un même bassin versant l'érosion hydrique est une fonction complexe qui intègre plusieurs facteurs (physiques et humains) et présentant une grande variabilité spatiale et temporelle. De

[52]Dans la réalité, l'érosion hydrique est un processus naturel qui sans doute, transporte les matériaux des montagnes en appauvrissant les terres des sommets pour former et enrichir les plaines fertiles en aval. Une suppression totale de ce phénomène s'avère impossible, les pertes de sols tolérés par l'érosion hydrique visent de ce fait à ce que ces pertes soient inférieures à la vitesse d'altération de la roche mère en question (ROOSE E., 1994). Dans la lutte antiérosive on doit donc veiller à fixer comme seuil de tolérance ces valeurs qui varient d'une région à une autre. Ces valeurs de pertes tolérées doivent faire objet d'une étude pédologique approfondie.

ce fait, le développement d'une stratégie de lutte contre l'érosion hydrique commence sans doute par la recherche d'un modèle d'évaluation qui exprime le diagnostic réel d'une telle situation afin de préconiser les remèdes antiérosifs les plus efficaces. Le modèle utilisé dans la présente étude pour réaliser un plan d'aménagement antiérosif constitue une approche qui peut être améliorée scientifiquement. La méthode de la DF/FAO-SIDA exprimant les différentes formes d'érosion et leurs ampleurs est purement qualitative et moins précise surtout à grande échelle comme le cas de l'oued Barbara, alors que le modèle USLE est relativement quantitatif, puisqu'il est basé sur des données statistiques provenant des expériences réalisées aux États-Unis d'Amérique (USA) sur de petites parcelles et appliqué surtout pour exprimer l'érosion par décapage (nappes et rigoles). Son extrapolation à des échelles plus grandes où règnent différentes formes d'érosion (ravins, glissements, etc.) ce qui est le cas du bassin versant de l'oued Barbara montre donc bien ces limites. On se trouve donc confronté à des problèmes d'échelle lorsqu'on tente de prévoir des valeurs régionales d'érosion et surtout de transport solide sur de vastes bassins versants afin d'évaluer l'envasement ou la réalisation de certaines infrastructures hydrauliques (barrage, etc.), car ces modèles n'abordent pas le facteur du ruissellement et de transport solide. En Tunisie, certains auteurs, comme DUMAS J. (1965) avaient montré que le modèle USLE de WISCHMEIER ne tenait pas compte d'un certain nombre de caractéristiques spécifiques aux sols de l'Afrique du Nord, plus précisément la charge caillouteuse. Ces mêmes conclusions ont été confirmées en Espagne, en Grèce et au Maroc. En plus de la texture, la charge en éléments grossiers, la teneur en calcaire actif et la salinité expliquaient l'érodibilité des sols (ALOUSSI M.N., 1994). En outre, le manque des données pluviométriques graphiques (continues dans le temps) a constitué une contrainte à l'application de la relation d'agressivité climatique de WISCHMEIER, ce qui a conduit à utiliser d'autres alternatives. De même, le nombre de profils pédologiques creusés dans le bassin versant de l'oued Barbara est très limité, autrement un nombre plus élevé de profils auraient pu permettre une meilleure interpolation spatiale et réaliser ainsi une carte d'érodibilité des sols plus

représentative. Tout cela ne fait que souligner les faiblesses de l'évaluation par l'USLE dans la présente étude.

Bien que la méthode de la DF/FAO-SIDA repose surtout sur un aspect purement qualitatif, facile et moins onéreux et que celle de l'USLE tend plus vers le quantitatif, les deux méthodes montrent une certaine concordance vers les sites les plus vulnérables à l'érosion hydrique. Elles se complètent et chacune apporte sa part d'informations : celle de la DF/FAO-SIDA montre les différentes formes d'érosion et leur potentialité érosive, alors que l'autre apporte un argument quantitatif visant à illustrer la sensibilité de la zone à l'étude vis-à-vis de l'érosion hydrique. Ainsi, le couplage des deux méthodes d'évaluation précédentes, même si elles présentent des failles, a permis de caractériser grossièrement, qualitativement et quantitativement l'ampleur de l'érosion hydrique et par conséquent d'illustrer la situation catastrophique des sols dans la zone de l'oued Barbara. Dans ce cas, l'utilité d'agir sur ce milieu nécessite surtout l'intégration du facteur humain afin de mieux cerner ce fléau et sauvegarder ces ressources pour les générations futures. L'intégration de ce facteur dans la gestion des ressources en sols commence sans doute dans un contexte global du bassin versant de l'oued Barbara, unité géographique bien définie, et ce, à travers un plan d'aménagement antiérosif intégré et participatif afin d'assurer la bonne gestion de ces ressources.

La gestion intégrée et participative des sols s'avère donc indispensable. Cependant, un tel plan d'aménagement ne peut se faire adéquatement que dans le cadre des projets de développement. Il ne peut de ce fait, se mettre en œuvre qu'après la réalisation et la présentation de plusieurs scénarios débattus dans des séances de sensibilisation et d'informations rassemblant différents partenaires : acteurs agricoles et environnementaux, institutions de recherches, représentants du gouvernement et population cible, le tout en vue de sélectionner le scénario qui répond aux exigences techniques, scientifiques, environnementales et socio-économiques globales. La

réalisation d'un tel plan aura sans doute des impacts directs et indirects sur le milieu. Pour ce qui est des impacts directs, ils résident dans le fait que les chantiers des travaux de CES pour l'aménagement des terres menacées par l'érosion hydrique du bassin versant vont constituer pour la majorité des petits agriculteurs de la région, une source d'emploi temporaire leur apportant des revenus supplémentaires. Quant aux impacts indirects, ils s'observent surtout au niveau du maintien des sols et de l'augmentation de leur fertilité qui s'exprime par une meilleure productivité au niveau des cultures. Dans ce contexte, une étude faite en Tunisie dans la région de Siliana[53] sur l'effet des banquettes a montré que le rendement de blé a augmenté de 24% sur des parcelles traitées en banquettes consolidées par la luzerne arborescente par rapport à celles labourées dans le sens de la pente. On note également que les mesures directes faites par l'arrondissement de la conservation des eaux et du sol de Jendouba à l'exutoire du bassin versant de l'oued Raghai (délégation de Ghardimaou) ont montré que l'aménagement de 17 % de ce bassin par des banquettes a permis de réduire les transports solides de 40 % (STITI M., 2009) ce qui a un impact direct sur la longévité des infrastructures hydrauliques comme par exemple le cas du barrage de l'oued Barbara.

[53] Siliana est une région administrative (gouvernorat de Siliana) qui appartient au Nord-ouest de la Tunisie. Elle se trouve juste au Sud-est de la région Jendouba.

CONCLUSION

L'évaluation quantitative et qualitative de l'érosion hydrique dans ce coin du Maghreb montre une grande fragilité de ces milieux. L'étude qualitative a montré que le processus érosif par ravinement est la forme d'érosion hydrique la plus répandue et la plus grave, qui touche l'ensemble de la zone à l'étude de l'oued Barbara. Cette première évaluation a révélé également que 7 690,78 ha soit 48,13 % de la superficie totale sont fortement affectés par l'érosion hydrique, 2 665,57 ha (16,68 %) sont moyennement affectés et 5 623,32 ha (35,19%) faiblement affectés. De son côté, l'évaluation quantitative par USLE a montré que le périmètre à l'étude perd en moyenne 36,13 t/ha/an. Cette valeur correspond à une érosion très importante, favorisée par un climat agressif avec des précipitations irrégulières à caractère orageux. L'agressivité du climat présente des valeurs qui oscillent entre 62,20 et 91,89. Les vastes surfaces de terrains dénudés où les sols ont été décapés et affectés par des ravinements généralisés en témoignent. À cette situation déjà préoccupante viennent s'ajouter les autres facteurs de l'érosion qui se combinent aussi pour en accélérer les effets. Ainsi, l'érodibilité des sols (K) montre que 78 % de la superficie du la zone à l'étude présente de forts risques d'érosion alors que 22 % seulement présente des faibles risques. Cela montre bien la fragilité de la lithologie de la région où domine la structure marneuse. Le facteur topographique (LS) présente quant à lui une grande variabilité spatiale qui varie entre 0 et 8,91 ce qui montre que la concentration des eaux de ruissellement est rapide et par conséquent les forces d'arrachement des particules des sols sont relativement puissantes, surtout avec la structure lithologique tendre. Le facteur d'occupation des sols (C) varie graduellement de 0.001 à 0,9 et montre que 21,44 % des superficies sont relativement protégés alors que le reste, soit 78,56 % sont faiblement protégés. Cela reflète le degré d'anthropisation et la situation alarmante du couvert végétal du bassin versant de l'oued Barbara. Le facteur des pratiques antiérosives (P) varie de 0,1 à 1. Il montre que 44,29 % de la superficie de la zone à l'étude sont relativement protégés alors que

le reste, soit 55,71 % sont fortement exposés à aux risques d'érosion hydrique, mais en réalité les superficies les mieux protégées sont des terrains forestiers qui appartiennent à l'État alors que la majorité des terrains privés sont non aménagés et nécessitent des interventions rapides.

Bien que la validité d'évaluation des deux méthodes soit sujette à discussion, elles apportent une aide importante aux décideurs et aux aménagistes pour simuler des scénarios d'évaluation antiérosif à la région et planifier les interventions de lutte contre l'érosion. Elles permettent également de suivre l'impact de l'utilisation des sols et des aménagements. Les deux méthodes d'évaluation qualitative et quantitative ont mis en évidence l'effet catastrophique de l'érosion hydrique et ont montré une certaine convergence vers les sites prioritaires les plus sensibles et les plus affectés par l'érosion hydrique. Par conséquent, elles facilitent toutes les interventions de lutte antiérosives. L'intégration de la population cible à un éventuel scénario antiérosif s'avère donc primordiale.

Les enquêtes menées auprès d'un échantillon (79 individus) de la population cible a montré que la population est consciente de l'agressivité de l'érosion hydrique dans la zone à l'étude. Elles ont dans le même temps montré l'urgence d'aménager leurs parcelles pour freiner ce fléau. Cela a permis de définir et de proposer des aménagements de CES qui ont été confirmés par les intervenants locaux. La projection de ces aménagements sur la carte d'érosion a permis de définir un scénario d'aménagement antiérosif qui cible surtout 12 130,35 ha soit 74,56 % de la superficie totale de la zone à l'étude. Ce plan ne constitue donc que le point de départ d'une lutte antiérosive, car sa réalisation n'est possible que dans le cadre des projets de développement.

De tout ce qui précède a pour but de protéger et préserver les ressources naturelles, notamment les sols pour les générations futures :

- Il est primordial que l'État essaye de lancer dans la zone à l'étude des alternatives économiques à l'agriculture afin de diminuer les pressions anthropiques sur ces ressources.

- Il faut que les responsables et la population de la région continuent à «combattre» l'érosion avec tous les moyens actuellement disponibles dans le cadre des projets de développement ou en dehors de ces projets par la sensibilisation sur les conséquences désastreuses de ce fléau.

- Il est fondamental que la recherche contribue par l'apport d'un modèle permettant l'évaluation de l'érosion hydrique avec toutes ces formes (décapage, ravinement, etc.) spécifiques à la région. Un tel modèle servira sans doute ultérieurement comme moyen efficace de diagnostic du milieu en question, diagnostic qui permettra d'agir aux endroits opportuns par l'apport des remèdes antiérosifs les plus propices.

ANNEXES

APPENDICE A

DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES DE LA RÉGION À L'ÉTUDE

Tableau A.1 Données pluviométriques mensuelles de la station d'Oued Barbara.....117

Tableau A.2 Données pluviométriques mensuelles de la station de Hammam Bourguiba.....118

Tableau A.3 Données pluviométriques mensuelles de la station d'Ain Bayya.....119

Tableau A.4 Données pluviométriques mensuelles de la station d'Ain Debba.... 120

Tableau A.5 Données pluviométriques mensuelles de la station d'Ouled Mfadda.....121

Tableau A.1

DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES MENSUELLES [54]
STATION : Oued Barbara
Années : 1983-2005

Mois	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Janvier	66,4	139,5	183	257	234,1	103,4	39,7	69,1	69,1	103,9	110	83,1
Février	0	144,9	59,9	90,5	205,8	86,6	66,8	7,7	7,7	86,5	104	23,4
Mars	109,1	141,3	40,4	57,8	163,6	169,6	81,3	36,7	36,7	103,8	66,4	82,3
Avril	2	32,7	34,6	111,9	64,7	15,7	111	29,5	29,5	56,4	144	23,6
Mai	13,1	0	5,6	0,5	55,4	6,2	0,6	65,7	65,7	26	134	27,9
Juin	15	1,4	3	0	0	25,3	18,4	0	7	0	3,3	0
Juillet	4	0	0	7,1	0	16,1	0	1	0	0	18,4	0
Août	0	2,5	0	10	0	0	3,3	0	0	0	0	0
Septembre	83,6	47,9	0	76,5	11,9	39,7	2,9		10,8	75	0	8,9
Octobre	105,4	71,7	4,9	69	3,7	7,2	86,3	10,8	128	141,9	67,7	31
Novembre	132,8	51,8	34,6	154,1	127	59,9	61,6	128	293	71,8	102	17
Décembre	100,6	211,7	41,8	146,5	10,2	135,9	51,2	293	104	63,8	172	90,9

(Suite Tableau A.1)

Mois	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Janvier	181	89	184	177	124	49,4	203	53,8	85	212	148
Février	1,5	240	80,3	51	120	65,5	128	61,4	132,3	15,7	144
Mars	114	92	23,4	63	44,4	8,4	49,9	38,8	23,8	76,5	51,8
Avril	21,5	187	61,4	67	36,5	43,8	87,3	77	117,4	89	174
Mai	0	62	26,2	30	31,7	42,9	48,7	18,9	56,5	37	9,9
Juin	48,7	11	8,3	18	0	5,3	2	0	0	54,2	0
Juillet	0	0	0	0	0	0	0	10,6	0	0	0
Août	5,1	2,9	17	53	0	0	0	78,3	0	0	11,3
Septembre	96,3		37,9	106	59,1	17,8	24,1	2,1	24	56,9	4,2
Octobre	21,1	89	103	46	13,9	130,7	3,4	49,7	34	34,9	28,6
Novembre	124	65	188	84	250	11,4	44,1	244,2	37,2	195	24,5
Décembre	68,4	71	209	4,2	210	93,8	86,4	444,8	348,7	176	179

[54] Toutes ces données pluviométriques sont calculées à partir des observations journalières.

Tableau A.2

DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES MENSUELLES (1975-2005)
STATION : Hammam Bourguiba

Mois	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Janvier	54	81,1	106	184	133,5	48,8	56,4	75	101	214	159
Février	176,5	96	57,3	154	181	86,3	54,1	147,2	0	164	50
Mars	98	104,1	38,7	135	80,9	127,9	30,6	127,9	81,1	157	29,6
Avril	49,7	50,9	114	8,7	196,5	118	55,2	144	18,7	38,2	29,3
Mai	54,3	0	35,6	34	36,3	70,5	63,6	25	17	0,8	51,4
Juin	2,1	4,5	72,4	0	31,6	10	25,4	0	10	0	0
Juillet	0	73,4	0	0	0	1	0	11	0	7	0
Août	0	5,7	0	0	2,6	0,2	0	31,7	5	0	1,5
Septembre	1,4	16,8	3,9	1,6	54,9	0	0,1	20	83,6	79,7	0
Octobre	27,2	163,4	23,4	116	40,7	46	38,8	126,9	152	91,1	5,3
Novembre	213,1	279,6	196	64,3	265,5	159	40,8	191,9	168	52,5	48,4
Décembre	93,4	29	43	30,6	18	244	35	85	96,4	457	90,1

(Suite Tableau A.2)

Mois	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Janvier	222	254	123,4	43,8	80	170	135	168	216,6	314,8
Février	122	206	56,3	27,2	5,5	73,4	81	101	287,3	3,4
Mars	75,9	129	122,7	96,9	33,4	126	111	95	1,4	110,2
Avril	61,1	61,5	18,4	141	54,4	51,2	75	76	127,9	56,8
Mai	0	42,5	10,4	13,3	80,3	39,2	125,6	50	18,8	0
Juin	0	0	40,7	0	0	2,3	142	31	0	32,3
Juillet	0	0	26,7	0	0	0	96,3	12	0	1
Août	0	0	4	8,6	0	4,3	199,2	5	6,4	2,1
Septembre	83,3	12,3	47,6	0,7	21	71	4,3	52,6	66,2	186,3
Octobre	61	19,9	13,6	143,4	41,6	257	16,3	33,7	193,2	34,6
Novembre	179	309	58,5	72,3	185	105	0	38,8	15	185,8
Décembre	184	47,6	161,3	43,8	270	40,5	120	175,3	185,9	158,4

(Suite Tableau A.2)

Mois	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Janvier	106,2	232,6	157,3	178	58,2	316,6	68,6	127	456,9	206,3
Février	499,5	83,9	76,5	169,7	91,9	181,1	66,3	242,5	36,6	285,9
Mars	215,2	35,9	73,1	82,7	16,2	57,4	52,9	45,4	127,2	68,7
Avril	359,4	68,2	56,5	47,3	46,7	104,6	83,6	246,8	87	323,2
Mai	71,1	43,1	70,6	39,6	72,1	73,6	33,4	62	97,2	15,3
Juin	57,7	31,5	9,5	4,1	9,2	3,5	6,5	1,5	1,2	16,7
Juillet	12	1,6	2	23,1	0	0	21	17	6	10,3
Août	23,6	28,7	110,3	2,6	16	25	59,5	0	136,7	23,5
Septembre	12,4	71	97,2	46	53,6	17,5	64,5	21	52,1	41,5
Octobre	135,3	207,9	92,6	21,6	223,1	10,3	96,1	46,1	305,7	8,9
Novembre	160,8	214,3	287,6	337,3	47,9	176,2	484,8	69,8	311,9	49,4
Décembre	67,8	216,7	129,8	226,7	185,5	176,2	840,2	492,5	301	283,6

Tableau A.3

DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES MENSUELLES (1975-2005)
STATION : Ain Bayya

Mois	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Janvier	47,2	76,8	97	180,6	103	37,6	101	151	81,7	180,3	190,2
Février	142,9	91	40,8	218,9	182	102	97	103	0	159,8	57,2
Mars	87,2	86	30,8	100,1	44,2	102	26	141	127	143	54
Avril	17,3	38,3	93,2	8,7	162	82,8	47	152	3,9	38,7	33,8
Mai	85	110	40,5	20,1	28,1	46,3	17	33,5	0	6,6	21,1
Juin	0	20,2	35,3	15	40	6	26	7	0	5	0
Juillet	0	22,1	0	0	2	1,5	0	0	1	0	0
Août	25,2	20,6	15,8	0	3	0	0	9	0	0	5,1
Septembre	5,1	35,7	5	1,5	86,2	19,5	0	19,5	56,9	50,6	0
Octobre	10	95,6	22,5	99	34,5	54,7	34	73,7	106	23,9	14,8
Novembre	174,3	186	144	110	248	126	72	182	93,1	53,9	20,5
Décembre	71,7	73,8	26,6	27,9	22,9	205	115	187	123	358,3	64,4

(Suite Tableau A.3)

Mois	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Janvier	233	230,4	113,5	43,8	54,6	98,2	135	87,9	163,5	170,6
Février	91,8	225,1	77	74,9	8,2	81,1	121,5	18,5	260	1,5
Mars	60,7	184,8	172,3	127,9	41,9	177,4	76,6	79,5	1,5	79,3
Avril	73,3	87	14,6	108,2	53,9	94,1	136,2	27,1	94,7	21,7
Mai	0	71,3	21,9	17,1	68,3	49,7	174,3	41,2	12	0
Juin	18	0	12	19	0	1,5	14,8	0	0	51,1
Juillet	9,9	0	18,8	0	0	0	15,5	0	0	0
Août	0	0	0	4,5	52,6	3,7	0	0	0	5,4
Septembre	50,5	16	34,2	10		111,8	0	14,6	27,6	110,5
Octobre	47,5	21	6,4	84,3	26,7	108,4	87,3	39,6	153	24,5
Novembre	106	164,7	47,2	65,4	124	126,9	98,6	17,8	57,3	135,8
Décembre	171	22,8	136,6	46,9	271	77,3	192,1	95,4	97,5	86,4

(Suite Tableau A.3)

Mois	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Janvier	73,7	193,3	184	355	40,5	256	54,6	165	235	150
Février	203	67,8	44,2	199	44,4	134,2	32,5	195	14,5	198
Mars	106	23	126	338	16	55,5	61	32	71,5	48
Avril	165	45,5	51	54,5	43,2	79	52	98,5	75	151
Mai	40	28	28	311	37	35,5	9	38	21	11
Juin	28	19,5	14	17	10	2	0	0	49,4	2
Juillet	0	0	0	2	0	0	15,5	0	1	0
Août	3,5	3	233		10		29,8	0	6	29
Septembre	33,5	123	69	34,5	21,7	31,7	35,5	45	73	8
Octobre	48,2	120,8	63	0	140	10	52	38,5	28,5	12
Novembre	87,4	197	201	244	22,5	54,3	227	39,5	197	48
Décembre	65,7	188,8	131	147	117	99,9	480,5	345	196	98

Tableau A.4

DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES MENSUELLES (1975-2005)
STATION : Ain Debba

Mois	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Janvier	41,9	111	121	275,4	119	73	187,2	216,5	107	256	330,5
Février	221,2	127	80,9	45,4	236	144	100	118,5	0	187,5	65,5
Mars	128,9	217	52,5	122,4	60	158,8	41	236,5	218,5	231	37
Avril	37,7	68,5	137	23,5	257	124,5	39,5	167	5	106	37,5
Mai	121	145	44,5	24,5	60	70,5	3	42	20	4	15,5
Juin	7,8	29,2	45,3	0	29	3	25	0	0	1,5	0
Juillet	0	30,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Août	36,4	32,9	21,1	0	0	0	0,4	17	0	1,2	0
Septembre	5,8	60	13	0	50	43,5	0	17,5	68,5	83	0
Octobre	23,2	217	27,2	65,5	48	110	39,5	112	148,4	45	8
Novembre	249,7	303	177	138,5	456	156,5	46	298	156,3	73	62,5
Décembre	92,4	84,2	51,3	69,1	24	298,5	156,8	225	141	496,5	125,5

(Suite Tableau A.4)

Mois	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Janvier	348	394	178,5	70	72	216,5	155	130	290	242
Février	148	354	127	123,5	9	148,5	119	41	338	1
Mars	83	196	278,5	160	58,5	208,5	108	97	0	125
Avril	156	127	22	184	83,5	122	245	44	156	36
Mai	3	106	21,5	30,5	69	22	184,5	66,5	16,5	0
Juin	0	0	16	37	0	0	18	0	1	57
Juillet	11	0	9,7	0	0	0	21	5	0	0
Août	0	0	0	6	0	0,5	1	0	1	23
Septembre	87	17	52,5	16		179	2	27,5	63,5	142
Octobre	67	19,5	10,5	139	44	153	106,5	49	167	27,5
Novembre	159	225	69,5	61	247	174	158	25,5	64	179
Décembre	288	37,5	192	61	374	120	283	127	173	114

(Suite Tableau A.4)

Mois	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Janvier	117	230	253	438	47	270,5	88	201	284	190,5
Février	344	110	72	177	83	120,5	108	244,5	28	239,5
Mars	131,5	39,5	115	91,5	7,5	68	113	32	88	73,5
Avril	262,5	110	77	71	48	110	75,5	134,5	95	242
Mai	55	18,5	58	33	59,5	46	48	41	45	20
Juin	48	43	16	1	7,5	0	4,5	1	99	3
Juillet	0	0	0	6	0	0	18	0	0	0
Août	11	12	119,5	0	5	0	40,5	0,5	0	9,5
Septembre	48	92,5	80,5	42,5	31	20	41	75	135,5	21,5
Octobre	106,5	153	92,5	17	251	11	92	43	29	4
Novembre	116,5	326	303,5	216	32,5	96,5	485	50	247	97,5
Décembre	84	302	184,5	173	169	139	830,5	510,5	280,5	254

Tableau A.5

DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES MENSUELLES (1983-2005)
STATION : Ouled Mfadda

Mois	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Janvier	212	177,5	219	268	232	42,5	68	96,5	196	187	152	186
Février	5	209,5	32,5	119	191	69,4	76,5	7,5	90,5	87	33	308
Mars	186	165,5	76,5	105	124	103	84,5	79	207	78,5	105	0
Avril	2	46	29,5	145	71	6	123	64,5	84,5	0	5	149
Mai	0	4	51	0	45	0	16,5	94	31	0	0	9
Juin	0	6	0	14	0	31,5	26	5	0	0	0	0
Juillet	0	0	0	15	0	4,5	0	0	0	0	0	5
Août	0	0	0	15	0	0	4	2	0	0	0	0
Septembre	93	9	0	59,5	15	24,5	10,3	27	73,5	0	28	32
Octobre	98,5	36,5	29,5	100	7,5	8,5	114	53,5	93	98,5	45	89
Novembre	267	60,5	33,5	166	156	72,5	75,5	224	101	126	30	28
Décembre	70,5	517,4	30,5	188	21	175	69,5	363	86,5	197	139	84,5

(Suite Tableau A.5)

Mois	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Janvier	210	69,5	181	215	230	40	257	64	95	319	159
Février	0	314	98	55	109	64	199	79	212	12	232
Mars	85,5	100	0	61	69	12,9	70	85	28	110	92
Avril	0	176	37	96	45	41,5	97	125	187	155	277
Mai	0	58,5	0	57,5	18,5	119	79,5	5	46,5	0	23,5
Juin	0	0	4	0	0	6,5	0	6,5	0	60	0
Juillet	0	0	0	0	2,7	0	0	14	0	0	0
Août	0	0	0	29	0	26	0	28	0	0	9
Septembre	65,5	17,5	0	59	49	30,5	26	59	33	61	10
Octobre	10,5	68,5	159	52	13	170	9,5	69	28	42	18
Novembre	161	50	166	303	350	43,4	90	294	36	238	63,5
Décembre	80	34	279	134	221	124	125	588	410	284	248

APPENDICE B
RÉSULTATS DES ANALYSES DES ÉCHANTILLONS DES SOLS

Classe des sols	Np	Code	Ne	A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)	MO (%)
minéraux bruts	2	1	1	15,5	12	20	27,1	23	0,2
		2	1	33	25,6	20	11,1	10	0,1
		3	3	50,95	19,81	10,72	11,92	5,81	0,42
		4	3	47	26,12	13,71	10,21	5,65	0,52
		5	3	42,52	20,18	16,25	11,42	9,25	0,45
peu évolués	10	6	3	29,36	28,9	17,61	16,71	7,18	0,67
		7	3	32,13	30,3	15,52	16,25	5,14	0,72
		8	3	37,08	23,26	20,83	11,32	6,99	0,61
		9	2	15,38	18,75	24,1	26,77	14,38	0,58
		10	4	15,22	17,84	10,75	17,67	38,41	0,64
		11	2	36,65	30,1	16	11,6	5,1	0,45
		12	2	26,76	19,24	26,04	17,34	10,07	0,55
Rendzines	1	13	3	29,37	27,54	17,5	13,31	11,82	1,46
Vertisols	2	14	3	40,02	28,84	13,67	11,84	5,16	0,82
		15	3	47	26,73	10,94	11,1	3,69	0,94
		16	3	73,22	10,4	3,82	6,38	5,7	1,1
		17	3	57,96	12,76	5,76	8,15	15,15	1,42
		18	3	65,06	12,13	4,54	7,84	9,83	0,57
bruns calcaires	7	19	3	40,55	18,9	16,75	12,3	11	0,45
		20	4	58,91	21,57	9,75	5,18	4,22	1,32
		21	4	68,26	11,86	4,4	5,65	8,78	1,1
		22	4	82,55	9,15	2,65	2,29	2,9	0,65
		23	2	23,2	10	13,2	45,3	7,6	0,14
		24	3	39,5	16,79	12,18	17,53	13,75	0,13
Sols brunifiés	6	25	3	34,15	15,3	14,55	16,9	19,1	0,17
		26	3	8,76	12,08	11,48	64,52	2,4	0,4
		27	3	12	13,66	13,33	27	33,33	0,43
		28	3	18,16	17,37	13,83	29,75	20,58	0,33
		29	3	41,63	28,09	13,63	10,18	6,09	0,52
		30	3	40,55	18,9	16,57	12,3	10,8	0,45
complexes	6	31	3	16,12	22,83	18,45	39,04	3,54	0,33
		32	3	12,8	13,05	15,85	26,5	31,15	0,46
		33	3	31,08	18,58	13,58	18,83	17,91	0,15
		34	3	39,75	16,5	18,25	13,5	11,75	0,18

Np : nombre de profils pédologiques, **Code** : identifiant du profil, **Ne** : nombre d'échantillons, **A** : Argile, **LF** : Limon fin, **LG** : limon grossier, **SF** : Sable fin, **SG** : Sable grossier, MO : matière organique.

APPENDICE C

QUESTIONNAIRE DE L'ENQUÊTE

1. Connaissez-vous ce que fait l'érosion à vos terrains? Oui..... Non.....

2. Comment labourer votre terrain par rapport à la pente? .....

Parallèle.....

Perpendiculaire.....

3. Votre terrain est-il aménagé contre l'érosion hydrique? Oui.....Non.....

4. Désirer vous réaliser des aménagements de CES dans votre exploitation ?

Oui.....Non.....

5. Désirez-vous avoir des parcours collectifs ?

6. Aimer vous qu'il y'aurait des projets de CES dans la région ? Oui.....Non.....

7. Que préférez-vous comme moyens de lutte contre l'érosion ? :

Moyens biologiques :

Plantation forestière (feuillus ou résineux) Oui.....Non.....

Plantation arboricole (olivier, figuier, etc.) Oui.....Non.....

Plantation sylvo-pastorale (atriplex sp., acacia sp.) Oui.....Non.....

Moyens mécaniques :

Banquettes.....

Seuil en gabions.....

Cordons en pierres sèches.....

Autres :.....

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABID H., SELMI K.1996., La subéraie tunisienne: importance et orientations pour une gestion durable. In: Actes de séminaire méditerranéenne sur la régénération des forêts de chêne liège, Tabarka (Tunisie) 22–24 octobre 1996, Annales INRGREF, 1998. pp. 63–72.

ACHOUR, M. et VIERTMANN, W. 1984. Les aménagements antiérosifs recommandés par le projet TU.81/14, leurs caractéristiques et les possibilités de leur application. Kairouan (Tunisie). p. 65.

ACHOURI, M. 1995. La conservation des eaux et du sol en Tunisie : bilan et perspectives. In Agriculture, sustainability and environment, sous la dir. ZEKRI S. et LAAJIMI A. Éditions du Centre Internationale de Hautes Études Agronomiques Méditerranéenne et l'Institut Agronomique Méditerranéen de Zaragoza. pp. 35-45.

AGENCE DE PRESSE XINGHUA, 2008. L'érosion du sol menace la Chine, [En ligne]. http://french.china.org.cn/china/txt/2008-11/21/content_16804446.htm. Page consultée le 15 Février 2009.

AGHRAB, A. 2004. Une méthodologie pour caractériser la sécheresse. Éditions le manuscrit, paris. pp. 17-18.

ALBERGEL, J. et MANSOURI, M. 2000. Influence de l'aménagement en banquettes sur les crues d'un petit bassin versant en Tunisie Centrale. Bulletin : Réseau Érosion n°20. pp. 153-165.

ALOUSSI, M.N. 1994. Établissement d'un système d'information géographique pour la gestion régionale des données pédologiques et de la sensibilité à l'érosion. Mémoire de troisième cycle en agronomie. Institut agronomique et vétérinaire HASSAN II, Maroc. 76 p.

AUCLAIR L. et GARDIN J., 2004. La gestion d'un milieu forestier : Entre intervention publique et stratégies paysannes (la Kroumirie, Tunisie). In Environnement et sociétés rurales en mutation : Approches alternatives, sous dir. CORMIER-SALEM M. C. Éditions IRD. pp. 291-306.

BANQUE AFRICAINE DE DEVELOPPEMENT (BAD), 2001. Rapport d'achèvement de projet : aménagement de l'oued Barbara (République de Tunisie). BAD, Abidjan (Côte d'Ivoire). 16 p.

BELKHOUDJA K. et al. 1973. Sols de Tunisie : Les sols de la Tunisie septentrionale. Bulletin de la division des sols n° 5, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie. 186 p.

BALLEUX P. et VAN LEBERGHE P., 2001.Guide technique : le boisement des terres agricoles. Institut pour le développement forestier, Paris. p. 13-16.

BEN MAMMOU, A. et LOUATI, M. H., 2007. Évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie. In Journal of Water Science, volume 20, n° 2, 2007. Sous dir. Michel BAUDU M. et CAMPBELL P. Éditeur : Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE). p. 201-210

BERGAOUI, M. et CAMUS, H. 1995. Impact des travaux antiérosifs sur les crues et les transports solides de 3 micro-bassins semi-arides tunisiens. Bulletin : Réseau Érosion n°15. pp. 362-381.

BERGAOUI, M. et ALBERGEL, J. 2000. Effets des aménagements en pierres sèches sur la forme des crues de l'oued Zroud, Tunisie. Bulletin : Réseau Érosion n°20. pp. 23-38.

BONVALLOT, J. 1983. Conditions géographiques de la lutte contre l'érosion dans la région d'Ain draham (Tunisie du Nord-ouest). Direction des ressources en eaux et en sols (D.R.E.S.) - O.R.S.T.O.M., Tunis. 55 p.

BRIAND, C. 2000. Ma culture biologique. Éditions Cheminements, France. pp. 33-37.

CALVET, R., 2003. Le sol : propriétés et fonctions, Tome 1 : Constitution et structure, phénomènes aux interfaces. Éditions France Agricole. p. 143.

CNEA, 1997. Projet de création d'un périmètre irrigué à partir des eaux du barrage Barbara, pp. 12-15.

---------, 2002. Étude d'avant projet détaillé pour la réalisation du lac collinaire oued Saidane, Tunisie. pp. 15-21.

--------, 2002. Étude d'avant projet détaillé pour la réalisation du lac collinaire oued Zitoune, Tunisie. pp. 14-17.

---------, 2003. Étude d'aménagement antiérosif du bassin versant oued Bou Seyyala à B'ni Hassen, Tunisie. pp. 17-24.

---------, 2003. Étude d'aménagement antiérosif du bassin versant oued El Marjine à Sfax, Tunisie. pp. 13-22.

CHAIBI, N. 2001. Modélisation spatialisée du transport solide au niveau du bassin versant du lac collinaire Kamech (Cap Bon). Mémoire du diplôme d'études approfondies. Université de Tunis EL-Manar, Faculté des sciences de Tunis, Département de géologie. p. 45.

CLAUDE, J. et CHARTIER, R. 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie. Cahiers de l'ORSTOM, série d'Hydrologie., volume XIV, n° 1. pp. 3-35.

COÏC, Y. et COPPENET, M. 1989. Les oligo-éléments en agriculture et élevage. INRA, Paris. p. 23.

COOK, D.J. et al. 1985. GAMES : Guelph model for evaluating the effects of agricultural management systems on erosion and sedimentation- User's manual, School of Engineering, Univsersity of Guelph, Technical report, Guelph, Ontario. pp. 126-171.

CORMARY, Y. et MASSON, J. 1964. Étude de conservation des eaux et du sol au centre de Recherches du génie rural de Tunisie: Application à un projet-type de la formule de perte de sols de Wischmeier. Cahier ORSTOM, Série pédologie, Paris, Volume II, Fascicule 3. pp. 3-26.

CRDA, 2008. Rapport annuel d'avancement des travaux de CES dans le gouvernorat de Jendouba. CRDA de Jendouba (Tunisie), 13 p. (Traduction de l'arabe).

DAVET, P. 1996. Vie microbienne du sol et production végétale. INRA, Paris. p.26.

DGF, 1995. Résultats du premier inventaire forestier et pastoral national en Tunisie. Ministère de l'agriculture de la Tunisie, Tunis. 88 p.

DGF, 1996. Le code forestier. Ministère de l'agriculture de la Tunisie, Tunis. p. 6.

DGACTA, 1995. Guide de conservation des eaux et des sols. Ministère de l'agriculture de la Tunisie, Tunis. 273 p.

----------, 2003. Deuxième plan national pour la conservation des eaux et des sols (2002-2011). Ministère de l'agriculture, Tunis. pp. 1-23. (Traduction de l'arabe).

DIRECTION DES FORETS FAO-SIDA, 1978. Étude qualitative et quantitative de l'érosion dans le nord et le centre de la Tunisie- Projet FAO- SIDA TF / TUN 5 ET 13SWE. Direction des Forêts. Tunis. 72 p.

DUMAS, J. 1965. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. Cahiers ORSTOM. Série Pédologie, Volume III, Fascicule 4. pp. 307-333.

ELLOUMI, M. 2005. Les nouvelles formes de gouvernance et de gestion des ressources naturelles en Tunisie. Acte du colloque "Les institutions du développement durable des agricultures du Sud" (SFER, 7-9 novembre, Montpellier, France).

ELLOUMI, M. et al. 2006. Développement local, institutions et gestion des ressources naturelles (Tunisie) : Le cas de la communauté d'Ouled H'lel dans la délégation de Aïn Draham. In Sustainable rural development policies in the Mediterranean countries in the context of the EU's neighbourhood policies Montpellier, sous la dir.CHASSANY J. P. et PELLISSIER J. P. Éditions du Centre Internationale de Hautes Études Agronomiques Méditerranéenne de Montpellier (France). pp.67-77.

ELLOUMI M. et HARZLI T. 1996. Les stratégies paysannes dans l'économie de ménage. Rapport provisoire de consultation, ODESYPANO, Tunisie. pp. 1-31.

FRIGUI, H.L. 1995. Dégradation spécifique en Tunisie. In États de surface du sol et risques de ruissellement et d'érosion. Sous dir. NONI G., LAMACHÈRE J.M.d. et ROOSE E. pp. 251-256.

Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la lutte contre la Désertification, Royaume du Maroc. L'érosion au Maroc, 2008. [En ligne]. http://eaux.unidev.biz/eaux/eaux/corporates/view/183. Page consultée le 15 Février 2009.

HOPKINS W.G. et HÜNTER N.P., 2003. Introduction to Plant Physiology. Édition Wiley et Sons Inc., New York (USA), p. 54.

INS, 2005. Recensement général de la population et de l'habitat de 2004 : Principales caractéristiques démographiques de la population tunisienne. 258 p. (Traduction de l'arabe).

-----, 2008. Annuaire statistique de la Tunisie. Édition n°51. 346 p. (Traduction de l'arabe).

INSTITUT FRANÇAIS DE L'ENVIRONNEMENT, 2005. Érosion des sols, un phénomène à surveiller. [En ligne]. http://www.ifen.fr/publications/le-catalogue-des-publications/le-4-pages/2005/l-erosion-des-sols-un-phenomene-a-surveiller.html?print=1. Page consultée le 05 Février 2009.

KASSAB, A.1976. Agriculture et ressources en eau en Kroumirie. Actes du IV colloque de géographie maghrébine. Cahier n° 4 du CERES (Centre d'Études et de Recherches économiques et sociales), Tunis. pp. 207-220.

LEGROS, J.P. 2007.Les grands sols du monde. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne (Suisse). pp. 1-7.

MEYA, K. 2007.Recherche participative au Malawi: la gestion par bassin versant axée sur la communication. In Eau, terre et vie : communication participative pour le développement et gestion des ressources naturelles, sous la dir. GUY B. Les presses de l'Université Laval (Centre de Recherches pour le Développement International). pp. 108-117.

M'HIRI A., 1970. Stabilité structurale des horizons de surface de quelques sols du Nord de la Tunisie. Thèse de doctorat de 3ème cycle. Faculté des sciences de paris. pp. 6-120.

MOORE I. et BURCH G., 1986. Physical Basis of the length slope factor in the universal soil equation. Soil science society of America journal n° 50. pp. 1294-1298.

MUSY, A. et SOUTTER, M. 1991. Physique du sol. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne (Suisse). pp. 17-19.

MUSY, A. et HIGY, C. 2004. Hydrologie, une science de la nature. Presses polytechniques universitaires et romandes. Lausanne (Suisse). pp. 69-105.

MUSY, A. 2005. Cours d'hydrologie générale. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM). Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement. École polytechnique fédérale de Lausanne. [En ligne]. http://echo2.epfl.ch/e-drologie/general/tdmchapitres.html

ODESYPANO, 2005. Carte des régions d'intervention de l'ODESYPANO à l'échelle 1: 50 000. Tunisie.

OFFICE DE LA TOPOGRAPHIE ET DE LA CARTOGRAPHIE DE TUNIS (OTC), 1993. Carte topographique de Fernana à l'échelle 1/50 000 (feuille 36-XXIV), Tunisie.

PREMIER MINISTÈRE DE LA TUNISIE, 1995.Journal officiel de la république tunisienne (JORT) volume 138, n° 59. pp. 1567-1569.

REJEB, M. M. 1996. Contribution à l'étude de l'érosion et de l'envasement de la retenue collinaire dans le basin versant de Sadine (Tunisie) à l'aide du système d'information géographique. Université catholique de Louvain. Faculté de sciences agronomiques. 173 p.

REMINI, W. REMINI B. 2003. La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord. Éditeur : Larhyss Journal, Algérie. pp. 45-54

RENARD, K.G. et al. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Agricultural Handbook, 703. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 404 p.

RIOU, C. 1980.Une formule empirique simple pour estimer l'évapotranspiration potentielle moyenne en Tunisie. In Cahier. O.R.S.T.O.M., Série d'hydrologie, vol. XVII, n° 2. pp. 129-137.

RIOU, G. 1990. L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux. MASSON Paris. p. 70.

ROOSE, E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). FAO, Bulletin pédologique n° 70, Rome. 420 p.

ROOSE E.et al. 2008. Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieu semi-arides. Agence universitaire de la francophonie (AUF), éditions des archives contemporaines (EAC) et IRD éditeurs, Paris. pp. 278-279.

SOGREAH et ANRH.1989. Étude méthodologique sur l'hydrologie des retenues collinaires et mise au point d'outils de calculs pratique à l'usage des directions de l'hydraulique. Rapport technique n° 5, Grenoble. p. 156.

SOUADI, Y. 1999. Caractérisation phénotypique et performance symbiotique des souches de rhizobiums isolées *d'acacia tortilis*. Mémoire de fin d'études de l'institut national agronomique de Tunis. 50 p.

SOUTTER, M. et al. 2007. Ingénierie des eaux et du sol, Processus et aménagements. Presses polytechniques et universitaires romandes. p. 124.

STAMBOULI-ESSASSI S. et al. 2007. Évolution de la végétation et du climat dans le Nord-ouest de la Tunisie au cours des 40 derniers millénaires. Geo-Eco-Trop : Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicales, n°31. pp. 17 –214.

STITI, M. 2009. Étude de l'érosion hydrique et de la Fertilité du Sol dans une Topo-séquence à El M'rassen, délégation de Ghardimaou. Mémoire de mastère. École supérieure d'agriculture du Kef (Tunisie). 128 p.

STUDI, 2004.Cartes agricoles régionales de la Tunisie.

United Nations (UN). 2002. Global environement outlouk GEO-3.[En ligne].http://www.unep.org/geo/geo3/french/index.htm . Page consultée le 20 Janvier 2009.

WISCHMEIER, W.H. et SMITH, D.D. 1965.Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation. U.S.Department of Agriculture. Agriculture Handbook 282, 47 p.

WISCHMEIER, W.H. et SMITH, D.D. 1978.Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. United States. Department of Agriculture. Agriculture Handbook 537, 58 p.