

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Cartographie de l'érosion par télédétection et SIG et validation par le radio-isotope césium-137 dans le bassin versant de l'Oued Mina (ALGEIRE) .

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 8-0003-13

APA Citation (توثيق APA):

Toumi, Samir. (2013). Cartographie de l'érosion par télédétection et SIG et validation par le radio-isotope césium-137 dans le bassin versant de l'Oued Mina (ALGEIRE) [Thèse de doctorat, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، بيداغوجية، مقالات الدوريات، كتب....) و بنه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



THESE DE DOCTORAT ES-SCIENCES
DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE
Présentée par
Monsieur TOUMI Samir
pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE

En :

Hydraulique

Sujet de la thèse :

**Cartographie de l'érosion par télédétection et SIG
et validation par le radio-isotope Césium-137 dans
le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie)**

Thèse présentée et soutenue à Blida le ...12/11/2013..... devant le jury composé de :

M. KHETAL T.
M. MEDDI M.
M. MAHE G.
M. MIHOUBI M.K.
M. REMINI B.
M. DEBABECHE M.

MCA. ENSH
Professeur ENSH
Direct. Rechr Montpellier
MCA ENSH
Pr. U.de Blida
Pr. U.de Biskra

Président
Directeur de thèse
Co-Directeur de thèse
Examineur
Examineur
Examineur

Année Universitaire 2012/2013

Cette thèse a été réalisée dans le cadre du projet :



Cartographie de l'érosion par télédétection et SIG et validation par le radio-isotope Césium-137 dans le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie)

Samir TOUMI

Table des matières

Résumé	
Remerciements	
Liste des symboles et des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

CHAPITRE 1

1. INTRODUCTION	2
1.1. Enjeux	2
1.2. Objectif général de la thèse.....	5
1.3. Domaine d'application, les limites et les grandes lignes de la thèse.....	6
1.3.1. Domaine d'application.....	6
1.3.2. Limitations	6
1.3.3. Plan de la thèse :.....	6

CHAPITRE 2

2. Erosion hydrique : concepts et quantification	9
2.1. Introduction.....	9
2.2. Illustration de l'évaluation de l'érosion	11

CHAPITRE 3

3. Théorie et principe de la télédétection et des SIG	18
3.1. Introduction.....	18
3.2. Principe de la télédétection	19
3.2.1. Le spectre électromagnétique.....	20
3.2.2. Interactions du rayonnement avec l'atmosphère	21
3.2.3. Interactions du rayonnement avec la cible	21
3.2.4. Signatures spectrales des principales surfaces naturelles.....	21
3.3. Télédétection multi spectrale	24
3.4. Image numérique de télédétection	26
3.4.1. Structure d'une image de télédétection :.....	26
3.5. Résolution d'une image et notions de l'échelle en télédétection.....	29
3.5.1. Données à haute résolution et très haute résolution spatiale.....	31
3.5.2. Données à basse résolution spatiale	33
3.5.3. Données à moyenne résolution spatiale	33
3.6. Interprétation et l'analyse des données de télédétection	34
3.7. Traitement des images numériques.....	35
3.8. Principe d'un SIG	36
3.9. Méthodes d'intégration entre la télédétection et les SIG.....	37
3.10. Apport de la télédétection et des SIG à l'étude de l'érosion.....	37

CHAPITRE 4

4. Description de la région d'étude	40
4.1. Introduction.....	40
4.2. Situation géographique de la région d'étude	40
4.3. Description biophysique du bassin	42
4.3.1. Climat :.....	42

4.3.2. Topographie et paramètres physiographiques.....	48
4.3.3. Ressources en eau souterraines	52
4.3.4. Ressources en eau superficielles	54
4.3.5. Végétation	55
4.3.6. Périmètre d'irrigation de la Mina.....	56
4.3.7. Zones géographiques.....	59
4.3.8. Aspects orographiques	59
4.3.9. Lithologie	61
4.4. Description socio-économique de la région d'étude.....	62
4.4.1. Evolution de l'emploi dans le secteur agricole par wilaya entre 2000 et 2004.....	65
4.5. Conclusion	67

CHAPITRE 5

5. Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina par télédétection et SIG

5.1. Introduction.....	69
5.1.1 Modélisation spatiale.....	70
5.1.2. Méthodes d'évaluation de l'érosion des sols et des risques	70
5.2. Méthode d'évaluation de l'érosion utilisée	72
5.3. L'équation universelle de perte en sol USLE	74
5.3.1. Domaines d'application de l'USLE	75
5.4. Traitement des images satellitaires	76
5.4.1. Elaboration de données	76
5.4.2. Prétraitement des images satellitaires	82
5.4.2.1. Les restaurations des données satellitaires.....	83
5.4.2.2. Les modifications visuelles des images.....	85
5.4.2.3. Transformation des images et production d'images non spectrales.....	87
5.4.2.4. Regroupement de l'information (classification).....	89
5.4.2.5. Génération de masques	97
5.5. Résultats et discussion	97
5.5.1. Facteur d'érosivité des précipitations.....	97
5.5.2. Erodibilité des sols (K).....	99
5.5.3. Occupation des sols (C).....	104
5.5.4. Facteur LS :.....	108
5.5.5. Pratiques agricoles et conservation du sol (P).....	110
5.5.6. Risque érosif.....	110
5.6. Analyse statistique de différents Facteurs.....	112
5.7. Conclusion et discussions	119
5.7.1. Comparaison avec les études déjà faites sur le bassin versant de l'Oued Mina....	119

CHAPITRE 6

6. Evolution de l'occupation du sol.....	122
6.1.Introduction.....	122
6.2. Détection des changements.....	123
6.3. Evolution temporelle et spatiale des changements de l'occupation du sol.....	123
6.3.1. Variation annuelle	123
6.3.2. Variation saisonnière.....	126
6.4. Etude de la dynamique de la végétation à l'aide de NDVI de SPOT-VEG.....	128
6.4.1.Prétraitement des séries temporelles du NDVI	129

6.4.2. Variation annuelle	129
6.4.3. Variation mensuelle.....	131
6.5. Tendance annuelle de la végétation	132
6.6. Conclusion	134

CHAPITRE 7

7. Evaluation de l'érosion par le Césium-137	138
7.1. Introduction.....	138
7.2. Principe de la technique	140
7.3. Stratégie d'échantillonnage.....	145
7.4. Echantillonnage du sol et mesure de Cs-137	146
7.5. Système d'analyses	148
7.6. Résultats et discussions.....	149
7.7. Conclusion	150

CONCLUSION GENERALE.....	152
---------------------------------	------------

Références bibliographiques.....	157
Annexes.....	172

Résumé

Dans cette étude, on a fait appel à la télédétection et aux SIG pour évaluer et cartographier l'érosion hydrique en utilisant l'équation universelle des pertes en sol USLE dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie. Ce bassin est caractérisé par une grande irrégularité dans les précipitations, une forte pente, une lithologie essentiellement marneuse et une couverture végétale très faible ce qui le rend très vulnérable à l'érosion. L'USLE est la combinaison de six facteurs spécifiques qui décrivent les caractéristiques du bassin versant. Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG sont utilisés pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement. L'intégration des cartes thématiques des facteurs du modèle USLE dans le SIG permet de cerner l'impact de chaque facteur dans les pertes en sol, de classer par importance relative les zones d'érosion, et de quantifier les pertes en sol dans le bassin. Une autre méthode basée sur la distribution de radio-isotope Cs-137 a été utilisée afin de valider les résultats obtenus par la télédétection et les SIG. D'après les profils de l'activité en Cs-137 dans deux sites différents, on a constaté que ces régions représentent une accumulation du sol car l'activité de ces derniers en Cs-137 est supérieure au site de référence. En utilisant le modèle de Kachanoski, on a pu estimer le taux d'accumulation qui est de 0.935 t/h/an en moyenne.

Abstract

In this study, remote sensing and GIS are implemented in order to map and assess water erosion using the Universal Soil Loss Equation (USLE) in the Wadi Mina watershed in Algeria. The study area is characterized by a great irregularity in rainfall which is mainly generated during storm events. The region is also known for its steep slopes, a marly lithology and a very low vegetation cover, which makes it more exposed and vulnerable to erosion. The USLE model can be described as the combination of six factors that feature the specific characteristics of the watershed. Data from multi-temporal remote sensing analysis and GIS are used to individually assess and map each factor. The integration of thematic maps for the USLE factors in the GIS is used to identify the impact of each factor on soil loss, as well as to rank the relative importance of the erosion zones, and further to quantify the soil loss for the investigated region. Another method based on the distribution of radio-isotope Cs-137 was used to validate the results obtained by remote sensing and GIS. According to the profiles of Cs-137 activities in two different sites, it was found that these regions exhibit an accumulation of soil. It is because the Cs-137 activity of the latter is higher than that of the reference site. Moreover, making use of Kachanoski's model, it was estimated on average that the rate of accumulation is equal to 0.935 t /ha/year.

ملخص

تم في هذه الدراسة استعمال تقنية الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية لتحديد وتقييم انجراف التربة باستخدام معادلة فقدان التربة العالمي (USLE) في حوض وادي مينا. هذا الأخير يتميز بانتشار غير منتظم في سقوط الأمطار والتي تكون بشدة كبيرة خاصة خلال العاصفة. وكما هو معروف فالمنطقة شديدة الانحدار و ذات خصائص صخرية تسهل عملية الانجراف كما ان الغطاء النباتي منخفض جدا ، مما يجعله أكثر عرضة لانجراف التربة. يجمع النموذج المستعمل بين ستة عوامل تميز خصائص الحوض و قد استخدمت بيانات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية لتقييم كل عامل من هذه العوامل على حدى ثم تم دمجهم في نظام المعلومات الجغرافية لتحديد تأثير كل عامل على فقدان التربة ، فضلا عن ترتيب المناطق حسب أهمية و نسبة الانجراف. تم استخدام أسلوب آخر يتمثل في دراسة توزيع النظير المشع CS- 137 في التربة للتحقق من صحة النتائج المتحصل عليها بواسطة الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية. وفقا لقيم اشعاع CS-137 في موقعين مختلفين، تم التوصل الى ان هذه المناطق تمثل مواضع تراكم التربة بمعدل يساوي 0.935طن / هكتار / سنة بعد استعمال نموذج Kachanoski.

Remerciements

C'est avec grand plaisir que je saisis cette occasion pour remercier toutes les personnes qui, de diverses manières, ont contribué à la production de cette thèse. Ce sont d'abord et avant tout les membres de ma famille et surtout mon père, ma mère et ma femme qui ont sacrifié leurs temps, leurs argents et leurs sentiments pendant les longues périodes où j'ai travaillé sur cette thèse.

Je remercie tout particulièrement mes encadreurs :

Professeur Mohamed MEDDI et Gil MAHE. Je tiens à leur exprimer ma profonde reconnaissance pour le soutien avec lequel ils m'ont guidé et encouragé, et pour m'avoir permis de terminer ce travail dans les meilleures conditions.

Le professeur Meddi est remercié pour son engagement et son soutien fidèle. Il a tiré la ligne du chemin que j'ai suivi au cours de ce travail. Il m'a aidé et m'a fourni de précieux conseils, non seulement pour bien finaliser cette thèse, mais aussi pour arriver à réaliser tous mes buts dans la vie, comme un père, qui veille toujours sur son fils pour bien vivre.

Le professeur Mahé m'a donné des encouragements, des conseils techniques et m'a renvoyé à la littérature récente qui ont énormément moulé ce qui a été réalisé dans cette thèse. J'apprécie sincèrement sa direction technique, sa vision et ces orientations qui ont grandement contribué à ce qui a été finalement réalisé dans cette thèse.

Une pensée particulière est adressée au professeur Yao Téléphore Brou, professeur à l'Université d'Artois en France puis à l'Université de La Réunion, qui m'a guidé dans le traitement des images satellitaires et les choix à faire concernant les données de télédétection.

Je souhaite également remercier monsieur Hakiki et ces collègues de la conservation des forêts et la direction de l'hydraulique de la Wilaya de Rélizane pour m'avoir fourni l'ensemble des données et pour m'avoir accompagné sur le terrain.

Je tiens à mentionner et remercier les institutions suivantes qui m'ont permis de mener sereinement et jusqu'au bout ce travail. Ce sont l'école nationale supérieure d'hydraulique (ENSH) et le laboratoire de génie de l'eau et de l'environnement (GEE) qui ont bien accueilli et accepté ce thème de recherche ; L'AUF (Agence Universitaire de la Francophonie) et l'institut de recherche pour le développement (IRD), à travers le projet SIGMED, qui m'ont fourni des fonds pour acheter les données satellitaires, pour financer ma formation à l'université d'Artois en France et pour financer aussi les charges de la publication de l'article ; l'Institut National de la conservation du Sol, de l'Irrigation et de Drainage (INSID) qui m'a permis de réaliser des analyses de matière organique dans des échantillons de sol ; L'université d'Artois de France qui m'a accueilli lors de ma formation sur le traitement des images satellitaires, elle m'a fourni un espace de travail confortable, informatique et logiciels, et m'a donné de la chaleur humaine lors de mon séjour.

Enfin je remercie tous les ami(e)s qui ont aidé de près ou de loin à la réalisation de cette étude.

Liste des symboles et des abréviations

ABH : Agence Nationale de Basin Hydrographique

ACP : Analyse en Composantes Principale

ANB : l'Agence Nationale des Barrages

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques

AUF : Agence Universitaire de la Francophonie

CCT : Centre Canadien de Télédétection

CES : Conservation de l'Eau et des Sols

CN : Compte Numérique

DRS : Défense et Restauration des Sols

DSA : Direction des Services Agricoles

ETM : Enhanced Thematic Mapper

EVI : Enhanced vegetation index

GCES : Gestion et Conservation de l'Eau et des Sols

GPI : Grand Périmètre d'Irrigation

GTZ : Gesellschaft für technische Zusammenarbeit

INRF : l'Institut National Algérien pour la Recherche Forestière

INSID : Institut National de l'étude du sol, d'irrigation et de drainage

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

MIR : Moyen Infrarouge

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MSS : Multi-Spectral Sensor

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

ONID : Office National d'Irrigation et de Drainage

ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (actuellement IRD)

PIR : Proche Infrarouge

REM : Radiation Electromagnétique

RTM : Restauration des Terrains de Montagne

RUSLE : Reserved Universal Soil Loss Equation

RVB : Rouge, Vert et Bleu

S.M.B.A : Sidi M'hamed Ben Aouda

SAU : Surface Agricole Utile

SIG : Système d'Information Géographique

SIGMED : Approche Spatialisée de l'Impact des activités agricoles au Maghreb

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission ou images satellitaires optique et radar

SWAT : Soil and Water Assessment Tool

THRS : Très Haute Résolution Spatiale

TM : Thematic Mapper

USA : United States of America

USLE : Universal Soil Loss Equation

VIS : Visuel

WMS : Watershed Modeling System

Liste des figures

Fig. 1:Le principe de la télédétection.	19
Fig. 2 : Le spectre électromagnétique source.	20
Fig. 3 : Signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen.	22
Fig. 4: Comportement spectrale de la végétation dans le domaine du visible et l'infrarouge. Les longueurs d'onde bleue et rouge sont absorbées par la chlorophylle. Les vertes sont très faiblement réfléchies par la feuille. Le rayonnement infrarouge (IR), lui, est fortement réfléchi par le parenchyme.	22
Fig. 5: Comportement spectrale de l'eau dans le domaine du visible et l'infrarouge.	23
Fig. 6: Exemple de la signature spectrale de la végétation, du sol nu et l'eau. Composition colorée produite à partir des bandes originales de l'imagerie Landsat TM du 24/06/2009 sur le bassin de l'Oued Mina. Bande TM 2, 3,4 assignées respectivement aux couleurs primaires bleue, verte et rouge.	25
Fig. 7 : L'image numérique et ses éléments	27
Fig. 8 : Affichage des quatre bandes spectrales de Landsat TM de la région de Tiaret (au sud-est du bassin versant de l'Oued Mina) en ton de gris, en vrais couleurs et en fausses couleurs en combinaison les bandes dans le système RVB.	28
Fig. 9 : schéma représentatif des différentes résolutions utilisées en télédétection.....	31
Fig. 10: Limites et unités géographiques de la région d'étude. Les chiffres correspondent aux unités géographiques et les étoiles correspondent aux villes.	41
Fig. 11 : Population des principales agglomérations sur le bassin, le relief et les isohyètes des précipitations de la région d'étude.	43
Fig. 12: Courbes annuelles des précipitations moyennes mensuelles aux stations sélectionnées dans la région d'étude.....	45
Fig. 13: Evapotranspiration potentielle et les précipitations dans le cycle annuel (1998-1999) des stations de Tiaret et Kermis.	46
Fig. 14: Courbes annuelles des débits moyens mensuels des crues.	47
Fig. 15: limites du bassin et les sous bassins déterminées par WMS.	49
Fig. 16: Sous bassins des barrages existant dans la région d'étude et le réseau hydrographique (les barrages sont considérés exutoires).	49
Fig. 17: Sous bassins versants délimités suivant les caractéristiques topographiques et morphologiques de la région d'étude.	50
Fig. 18: Profil du cours d'eau principal du bassin versant.	51
Fig. 19: Courbe hypsométrique de l'Oued Mina.	52
Fig. 20: Unités hydrogéologiques du bassin versant de l'oued Mina à la confluence du Cheliff.	53
Fig. 21: Evolution de la morphologie de la cuvette et de la surface en eau libre du barrage Sidi M'Hamed Benaouda (Remini et Bensafia, 2011).	54
Fig. 22: Photo du barrage de S.M.B. Aouda (Toubel, 2012).	55
Fig. 23: Photo : Extension du périmètre d'irrigation de la Mina.	57
Fig. 24: Occupation du sol du périmètre d'irrigation de la Mina (Source INSID).	57
Fig. 25: Répartition d'occupation du sol du périmètre d'irrigation de la Mina selon la surface (Source INSID).	58
Fig. 26: Répartition des surfaces utilisées par wilaya. Les SAU occupent environ 95% de la superficie de la wilaya de Relizane, suivi par la wilaya de Mascara avec un pourcentage de SAU de 86 %.	58
Fig. 27: Les principales zones géographiques de la région d'étude.	60
Fig. 28: Carte des classes des pentes élaborée à l'aide du MNT.	61

Fig. 29: Carte géologique de la région d'étude élaborée suite à une digitalisation de la carte géologique de 1 : 50000.	62
Fig. 30: Répartition des wilayas dans la région d'étude.	63
Fig. 31: Répartition des wilayas selon le nombre d'habitant.	63
Fig. 32: Population du bassin versant de l'Oued Mina répartie par commune. Représentation du grand périmètre d'irrigation (GPI) et les ressources en eau superficielles (barrages).	64
Fig. 33: Evolution de l'emploi dans le secteur agricole par wilaya entre 2000 et 2004.	65
Fig. 34: Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Mina.	73
Fig. 35: Résultat de la modélisation hydrologique du bassin versant de l'Oued Mina. Représentation du MNT en Shaded Relief. Et le réseau hydrographique élaboré par « WMS ».	74
Fig. 36: Superposition de la carte topographique de 1/50000 sur le MNT téléchargé.	77
Fig. 37: Vue en 3D du modèle numérique de terrain bassin versant de l'Oued Mina.	78
Fig. 38: Préparation des images satellitaires. a) Mosaïque des deux scènes couvrant la partie Nord et la partie Sud du bassin versant. b) Extrait d'images Langsa en composition colorée RVB 321 représentant la zone d'étude.	79
Fig. 39: Représentation de la superposition des scènes de Langsa TM5 et la carte géologique du bassin versant de l'Oued Mina.	80
Fig. 40: Comparaison des valeurs du compte numérique (CN) des pixels situés dans la zone de la mosaïque des scènes.	81
Fig. 41: Deux types de la couverture du sol A et B mesurés sous deux longueurs d'onde : (a) sur un graphe en une seule dimension qu'on ne peut pas distinguer entre les deux types du couvert, (b) sur un plan en deux dimension, les deux types d'occupation du sol peuvent être facilement séparés.	81
Fig. 42: Valeurs de la réflectance de la bande TM3 en fonction de la réflectance de la bande TM4 pour la séparation de la végétation (en vert), l'eau (en bleu) et le sol nu (en rouge).	82
Fig. 43: Exemple d'une image Landsat TM5 calibrée (représentation en fosses couleurs (RBV : TM4, TM3, TM2). (a) les données brutes avec le profil du compte numérique. (b) les données calibrées à l'aide du module « Landsat Calibration » d'ENVI.	84
Fig. 44: La bande TM1 de l'imagerie Landsat TM du 24/06/2009 sur la région de Relizane. En monochrome.	85
Fig. 45: Compositions colorées produites à partir des bandes rehaussées de l'imagerie Landsat TM du 24/06/2009 sur la région de Relizane. Bandes TM 2, 3, 4 assignées respectivement aux couleurs primaires bleue, vert et rouge. (a) changement linéaire du contraste. (b) étalement de l'histogramme de l'image sur la plage 0-255. (c) changement Gaussien du contraste. (d) changement Racine carrée du contraste. (e) changement Logarithmique du contraste.	86
Fig. 46: Différentes méthodes de classification utilisées.	91
Fig. 47: Exemple la signature spectrale de l'eau, la végétation et le sol nu.	92
Fig. 48: Résultats de la classification, a) classification de l'image Landsat TM du 24 juin 2009 par la méthode non supervisée (Isodata), b) Combinaison des classes thématique.	92
Fig. 49: Composition colorée produites à partir des composantes principales de l'imagerie Landsat TM du 24 juin 2009 sur le bassin versant de l'Oued Mina. Composantes principales 1, 2, 3 assignées respectivement aux couleurs rouge, verte et bleue.	93
Fig. 50: Composition colorée produites à partir des deux premières composantes principales et l'NDVI de l'imagerie Landsat TM du 24 juin 2009 sur le bassin versant de l'Oued Mina. Composantes principales 1, 2 et NDVI assignées respectivement aux couleurs rouge, verte et bleue. a) choix des zones d'échantillonnage. b) définition des classe thématiques.	94
Fig. 51: Résultats de la classification, a) classification supervisée de l'image Landsat TM du 24 juin 2009 par la méthode « Maximum de Vraisemblance », b) Combinaison des classes thématiques.	94

Fig. 52: Matrice de confusion de la classification supervisée de l'image Landsat TM du 24 juin 2009 par la méthode « Maximum de Vraisemblance ».....	95
Fig. 53: Zonage de l'image prise le 24 juin 2009 par segmentation de l'indice NDVI.....	96
Fig. 54: Extraction des données à partir d'un masque.....	97
Fig. 55: Carte d'érosivité des pluies.....	98
Fig. 56: Carte des classes lithologiques élaborée suite à une classification du sol à partir d'une image Landsat après suppression du caractère de la végétation.	100
Fig. 57: Nomogramme de l'érodibilité des sols (Foster <i>et al.</i> , 1981, Foster <i>et al.</i> , 1982).....	101
Fig. 58: Codes de perméabilité basé sur la classification des textures (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)	102
Fig. 59: Carte d'érodibilité du sol.....	103
Fig. 60: Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'imagette Landsat du 24 juin 2009.....	105
Fig. 61: Carte de la classification de l'occupation du sol dans la région d'étude.....	106
Fig. 62: (a) Diagramme expérimental d'estimation du facteur C de Gitas <i>et al.</i> , (2009), b) relation entre le facteur « C » et le NDVI.....	107
Fig. 63: Carte du facteur « C ».....	108
Fig. 64: Carte du facteur LS	109
Fig. 65: Carte du risque érosif.....	111
Fig. 66: Valeurs moyennes du facteur R en MJ.mm/ha.h.an par sous bassin versant.....	114
Fig. 67: Valeurs moyennes du facteur K en t.ha/MJ.ha.mm par sous bassin versant.....	115
Fig. 68: Valeurs moyennes du facteur C par sous bassin versant. Fig. 69: Valeurs moyennes du facteur LS par sous bassin versant.....	116
Fig. 70: Valeurs moyennes du risque érosif en t/ha/an par sous bassin versant.....	118
Fig. 71: Cartes des gains, pertes, et persistance de la végétation, de l'eau et du sol nu entre 1987 et 2009.....	124
Fig. 72: Statistiques de la classification d'occupation du sol des imagettes Landsat TM prises durant les mois de juin 1987, 2002, 2007, 2009, le mois de novembre 2009 et le mois de janvier 2010.	126
Fig. 73: Carte de croisement des classes de sols couverts et de sols nus entre la saison hivernale et la saison estivale.....	127
Fig. 74: Variation annuelle du NDVI _{max} et de la moyenne annuelle du NDVI _{max} au cours de la période 1999-2010.....	130
Fig. 75: Différence de la moyenne du NDVI _{max} entre deux années voisines.	130
Fig. 76: Variation décadaire du NDVI _{max} du grand périmètre d'irrigation (GPI) et du NDVI _{max} du bassin.....	131
Fig. 77: Variation mensuelle du NDVI _{max} durant deux années 1999 et 2010	131
Fig. 78: Dynamique du NDVI _{max} mensuel et les précipitations mensuelle au cours de la période d'étude (1999-2010).	132
Fig. 79: Tendence du NDVI _{max} dans la région d'étude au cours de la période 1999-2010.	133
Fig. 80 : Bilan annuel de la moisson et le battage entre au niveau du périmètre d'irrigation de l'Oued Mina (Source : DSA de Relizane).	135
Fig. 81 : Rendement des différents types de la céréaliculture en quinte/ha au niveau du périmètre d'irrigation de la Mina (Source DSA de Relizane).	135
Fig. 82 : Carte du risque érosif contre la carte de l'évolution saisonnière de la végétation dans le bassin de l'Oued Mina.....	136
Fig. 83 : Calendrier des essais nucléaires en atmosphère et le bilan des retombées de Cs-137 aux moyennes latitudes de l'hémisphère Nord (en Bq/m ² , Cambray <i>et al.</i> , 1985).	138
Fig. 84 : Carte des pentes (%) établie à partir du MNT.....	141

Fig. 85 : Valeurs du NDVI de juin 2009.	142
Fig. 86 : Superposition de la carte des pentes inférieures à 10% avec celle des valeurs du NDVI supérieures à 0.25.	143
Fig. 87 : Carte de Croisement de la carte des pentes inférieures à 10% avec celle des valeurs du NDVI supérieures à 0.25.	144
Fig. 88: Localisation géographique des points d'échantillonnage.	145
Fig. 89 : Broyage et pesages des échantillons du sol prélevés.	147
Fig. 90 : Préparation des échantillons : après homogénéisation, les échantillons sont passés au travers d'un tamis de largeur de pores 2 mm.	147
Fig. 91 : Séchage des échantillons à 100°C durant 24 h.	147
Fig. 92: Système d'analyse du Césium-137 et le détecteur Gamma hyper pur.	148
Fig. 93: Répartition verticale du Cs-137 dans trois profils de sol (site 1, 2 et le site de référence S3).	149

Liste des tableaux

Tableau 1: Les longueurs d'onde des principales régions spectrales utilisées pour la télédétection (CCT : http://www.rncan.gc.ca)	29
Tableau 2: Caractéristiques du capteur Landsat Source http://nilerak.hatfieldgroup.com	32
Tableau 3: Caractéristique du capteur SPOT (source : http://nilerak.hatfieldgroup.com).	32
Tableau 4: Moyennes, écarts-types et coefficients de variations des stations sélectionnées.....	44
Tableau 5: Stations hydrométriques retenues :.....	47
Tableau 6: Les principales caractéristiques physiographiques du bassin.....	52
Tableau 7: Liste des communes couvrant le bassin versant de l'Oued Mina avec les codes attribués à la figure 32.	64
Tableau 8: Mains d'œuvre destinée à l'agriculture (rapport sur la situation du secteur agricole (2004) (entre 2000 2004) source(DSA)	65
Tableau 9: Répartition des terres agricoles suivant le statut juridique (Source : DSA).	66
Tableau 10: Caractéristiques des bandes spectrales.	76
Tableau 11: Les images satellitaire disponible et couvrant la région d'étude.....	79
Tableau 12: Quelques formules des indices utilisés pour l'étude de la végétation (Girard et Girard, 1999, Girard, 1995)	88
Tableau 13: Tableau récapitulatif des traitements préliminaires effectués sur les données disponibles du capteur Langsa TM.....	96
Tableau 14: Code des perméabilités différentes facies Source: Adapté par Stone et Hilborn (2000). 102	
Tableau 15: Valeur minimale et maximale de chaque facteur ainsi que la moyenne et l'écart-type. . 112	
Tableau 16: Corrélation spatiale entre les facteurs.....	112
Tableau 17 : Valeurs moyennes du risque érosif et des facteurs R, K, LS et C par sous bassin versant.	112
Tableau 18: Résultat de la classification de l'occupation du sol pour les années 1987, 2002 et 2009 125	
Tableau 19: Récapitulatif des résultats du calcul des changements d'occupation du sol entre les trois années : 1987, 2002 et 2009.	125
Tableau 20: Croisement des classes de sols couverts et de sols nus permettant de déterminer l'occupation et l'utilisation hivernale des sols :	126
Tableau 21: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du sol.....	146

1

Introduction

1. INTRODUCTION

1.1. Enjeux

L'érosion hydrique est un phénomène géologique naturel qui a façonné la surface de la terre au cours des âges géologiques (White, 1986). Les changements climatiques et des paysages sous l'influence de la pression démographique et l'extension des cultures d'exploitation, ont contribué à l'augmentation de l'exposition des terres au processus de ruissellement, et par conséquent, à la dégradation des sols par l'érosion (Vezena et Bonn, 2006). Diverses sortes d'activités humaines, pratiques agricoles, exploitations forestières, pâturages, construction des routes et bâtiments tendent à modifier les phénomènes d'érosion, en l'accéléralant souvent de façon considérable (Wachal, 2007).

L'érosion est reconnue comme une menace pour l'agriculture depuis l'ancienne civilisation selon Bennett (1939), il y avait des terrasses construites avant même l'époque du Christ pour protéger les oliviers contre l'érosion dans le bassin méditerranéen. C'était cependant pas jusqu'à la fin du 19^e siècle et au début du 20^e siècle que le problème est devenu sérieux au Canada et aux États-Unis. Depuis des siècles, les géographes ont considéré la zone du bassin méditerranéen comme très sensible à l'érosion sous toutes ses formes (Okoth, 2003). En effet, le passage de civilisations successives a entraîné le développement de ports de commerce, le défrichement des forêts pour construire les flottes et les villes, la dégradation de la végétation par les feux et le pâturage extensif et l'extension des cultures pour nourrir les nouvelles colonies et les populations des métropoles. Dans un pays, l'agriculture se développe d'abord sur les terres à potentiel élevé. Mais, lorsque la demande à la nourriture augmente avec l'augmentation de la population, il est alors nécessaire de travailler les terres qui sont moins appropriées à l'agriculture et dont les conditions climatiques sont moins favorables (Roose, 1993).

En Algérie, l'érosion est un problème majeur. Elle devient dangereuse dès qu'elle dépasse le seuil tolérable et son intensité varie d'une zone à l'autre. Elle a été reconnue comme un problème environnemental dans les années 1930 par les colons et les agronomes (Aubert, 1986). Plus de 120 millions de tonnes de sédiments sont rejetées en mer chaque année, réduisant ainsi la durée de vie des barrages (Demmak, 1982). Ces effets sont néfastes aussi sur à la fertilité des sols et à la qualité des eaux (Roose, 1994). À la fin des années 1980, un projet de coopération s'est développé entre le Ministère de l'Agriculture Algérien et la Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Ce regroupement a utilisé le bassin versant de l'Oued Mina comme zone-test pour développer un schéma directeur d'utilisation des sols pour favoriser la conservation des sols et de l'eau en Algérie. En 2004 et dans le cadre de la protection des bassins versants alimentant les barrages en réalisation et en exploitation, l'Agence Nationale des Barrages (ANB) a réalisé une étude pour identifier et préciser les mesures à mettre en œuvre pour lutter adéquatement contre l'envasement des retenues de barrages.

D'après Demmak (1982) et Achite, *et al.*, (2006), le taux de sédimentation a évolué ces dernières années, du fait de la forte érosion des bassins versants, particulièrement à l'Ouest du pays où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres. Au début des années quatre-vingt, environ 120 millions de tonnes de sédiments arrachés annuellement au niveau des bassins versants du nord algérien (Demmak, 1982). Une partie de cette masse se dépose dans les-65 grands barrages que détient l'Algérie.

Face à ce problème, plusieurs études de quantification de l'érosion à diverses échelles, ont été menées par des chercheurs sur des parcelles d'une centaine de m² ou des micro-bassins de quelques hectares, à de grands bassins versants de milliers de km² (Arabi, 1991, Roose *et al.*, 1993, Touaïbia *et al.*, 2001, Touaïbia et Achite 2003, Sadiki *et al.*, 2004). Ces derniers ont utilisé des modèles pour estimer les concentrations (ou charges) de sédiments dans les oueds. Touaïbia et Achite (2003) ont pu cartographier l'érosion dans des zones à l'aide d'outils de géostatistiques en utilisant des valeurs provenant de l'exutoire. Cette approche ne concerne pas uniquement les taux d'érosion relatifs aux bassins versants mais elle inclut également les sapements des berges. Si l'on choisit des parcelles individuelles comme éléments spatiaux pour évaluer l'érosion. Le processus d'érosion dépend de la couverture, la gestion de la parcelle, l'inclinaison de la pente et l'érodibilité du sol à l'intérieur de la parcelle individuelle. En dehors de leurs propriétés intrinsèques, les variations de l'érosion sur différentes parcelles peuvent également dépendre, par exemple, de l'orientation des parcelles (longueur parallèlement ou perpendiculairement à la pente), les relations aux limites des parcelles adjacentes, la position de la parcelle sur le relief (amont, aval ou mi-pente), etc. La mesure ponctuelle de l'érosion sur parcelles au fil des années ne permet pas de spatialiser les risques sur les versants, (car on isole les parcelles et on supprime donc les effets cumulatifs). Par contre, la prévision quantitative ou qualitative de l'érosion, par le biais de ses facteurs, fournit un aperçu sur le risque d'érosion (Roose et Lelong, 1976). Le risque d'érosion est défini comme la chance pour laquelle l'érosion des sols aura lieu sur n'importe quelle unité de la terre avec une pluviométrie donnée et en fonction de certains facteurs déclenchant (Podmanicky, *et al.*, 2009). Un bassin versant peut être composé d'un regroupement de plusieurs parcelles de terrain, les boisés, les forêts, les zones bâties ou tous les différents thèmes de classification. L'érosion dans chacun de ces composants élémentaires du paysage procède différemment. En fait, certains pourraient même constituer des obstacles contre la translocation des particules du sol par l'eau pour atteindre les cours d'eau. Le plus important est de savoir comment les propriétés du sol, du climat et même de l'occupation et l'utilisation du sol, peuvent influencer l'érosion des sols. Ces propriétés peuvent être consultés à partir des facteurs de l'érosion tels que présentés par Wischmeier et Smith(1978). Les facteurs influençant l'érosion hydrique peuvent être représentés par différents paramètres. Ces derniers peuvent être déterminés à l'aide de la télédétection et des données additionnelles (Boukheir *et al.*, 2001). Ces facteurs sont divisés en deux parties : ceux qui sont quasi-statiques (infiltration, érodabilité et morphologie) et ceux qui sont variables dans le temps tels que le couvert végétal, l'utilisation du sol, l'intensité des pluies et les pratiques agricoles (Roose et Lelong, 1976, Vrieling, 2005, Boukheir *et al.*, 2006).

La cartographie de l'érosion est un outil fondamental pour connaître la répartition et l'ampleur géographique du phénomène, ainsi que pour sa caractérisation qualitative (Boardman, 2006). Grâce à la cartographie de l'érosion, il est possible d'incorporer ce phénomène comme facteur dans le processus d'aménagement du territoire, et plus particulièrement dans le processus de la gestion intégrée (Desmet *et al.*, 1995). La capacité d'intégrer les deux méthodologies, la cartographie de l'érosion et la gestion intégrée, dans les systèmes d'informations géographiques (SIG) facilite l'application de ces deux éléments comme outil perfectionné pour orienter les décisions en matière d'aménagement du territoire (Okoth, 2002).

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont aussi un outil précieux pour spatialiser les risques d'érosion en prenant tout à la fois en compte les facteurs et les indicateurs de l'érosion (Tribak *et al.*, 2006 ; Mlaouhi, 2003). En effet, Les développements récents dans les systèmes d'information géographique (SIG) ont permis de modéliser et de représenter des phénomènes géographiques réels de bases de données spatiales informatisées à travers laquelle ils peuvent être stockés, analysés et affichés (Burrough, 1986; Deursen, 1995). L'utilisation des SIG comprend entre autres la modélisation spatiale du paysage, l'analyse de l'utilisation des terres, la modélisation de l'érosion, et la planification environnementale (Janssen, 1994; Suryana, 1997; Droesen, 1999). Un des buts scientifiques des SIG est d'extraire les informations significatives d'une interaction infiniment complexe des phénomènes et des processus géographiques de la nature.

Le modèle USLE permet l'estimation du potentiel érosif à long terme dans le bassin versant. Mais seule l'érosion en nappe et en rigole sont estimées, la sédimentation et le taux de déposition ne sont pas prédit. Ces derniers, figurent aussi bien importants que le détachement des particules (dégradation) (Zapata *et al.*, 2002). Afin de cerner cette lacune, une autre méthode alternative et complémentaire a été utilisée. Elle est basée sur l'étude de la redistribution du radio isotope le Césium 137 (Cs-137) dans l'environnement. La méthode du Cs-137 est un moyen de mesure de la quantité de sédiments érodés dans les champs, redistribué et accumulé en aval. Cette technique de dépistage des radionucléides fournit des informations sur taux d'érosion moyen terme sur environ 40-50 ans. L'isotope Cs-137 a été produit par les essais d'armes nucléaires dans les années 60, où il a été distribué à l'échelle mondiale avec la stratosphère et déposé dans le monde entier comme les retombées de radionucléides (Playford *et al.*, 1993, Cambray *et al.*, 1989). En mesurant la quantité de Cs-137 dans le sol, la redistribution des sédiments peut être déterminée et les taux d'érosion du sol et/ou de dépôt pour des domaines spécifiques, pentes ou de petits réservoirs peuvent être calculés (Collins *et al.*, 2001). Cette approche permet aussi validation des résultats obtenus par la technique de la télédétection et les SIG.

Cette technique de quantification de l'érosion a été largement utilisée dans le monde :

Aux Etats Unies d'Amérique (Ritchie et McHenry, 1973, 1990), en Australie (Elliott *et al.*, 1990, Wallbrink *et al.*, 1993), au Canada (Kachanoski, 1993, Pennock *et al.*, 1995) en Angleterre (Walling *et al.*, 1991), au Maroc (Nouira *et al.*, 2003, Lahlou, 1997, Benmansour *et al.*, 2000). L'apport de cette approche est considérable dans le suivi et la quantification de

l'érosion et/ou la sédimentation à différentes échelles tel qu'a été montré par (Walling et Quine, 1993, Bernard *et al.*, 1990, Zhiyanski *et al.*, 2008, Mian *et al.*, 2009).

La première étape de l'approche Cs-137 consiste à sélectionner des sites de référence non perturbés qui doivent être plats, et bien couverts. La stratégie d'échantillonnage adoptée dépend des conditions environnementales (par exemple à plat de terrain, morphologie complexe, les conditions d'utilisation des terres).

1.2. Objectif général de la thèse

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet SIGMED (Approche Spatialisée de l'Impact des activités agricoles au Maghreb sur les transports solides et les ressources en eau de grands bassins versants) qui a pour objectif général : l'étude de la relation entre les activités humaines et en particulier agricoles, les transferts d'eau et le transport de sédiments dans les bassins-versants de deux grands barrages : le Bouregreg au Maroc et l'Oued Mina en Algérie. (Mahe et al., 2013).

Le bassin versant de l'oued Mina est confronté à un grave problème de dégradation du sol, comme pratiquement toute la région du tell occidental Algérien. L'érosion hydrique est plus forte dans cette région, en partie au fait que, les précipitations proviennent majoritairement de pluies d'orages, très intenses et qui ont un fort pouvoir érosif en début de saison de pluies. Cela s'explique aussi par la présence d'un couvert végétal peu dense. Ce problème provoque l'envasement rapide du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda situé dans la partie septentrionale du bassin et du barrage de Bakhada situé au sud du bassin. Cela touche également l'agriculture locale, en provoquant des pertes énormes en terres cultivables, ce qui amène les paysans à l'exode rural. Les facteurs naturels (précipitations, topographie, géologie, lithologie et végétation) ont joués un rôle important dans les processus érosifs dans la région d'étude, mais, il n'en demeure pas moins que l'accélération de ces phénomènes dépend largement des formes de gestion et de l'utilisation de l'espace (Mahé *et al.*, 2013).

L'objectif général de cette thèse est de développer et de présenter une méthode qui peut être utilisée pour évaluer le risque d'érosion hydrique dans les différents niveaux du système de paysage en utilisant l'équation universelle des pertes en sol USLE dans le bassin versant de l'Oued Mina. L'approche utilisée est basée sur l'intégration des données issues du traitement d'images satellitaires des capteurs « Thematic Mapper » TM4 et TM5 du satellite Landsat, et des données cartographiques dans un système d'information géographique (SIG) pour l'identification et la cartographie des zones à risques d'érosion. La méthodologie suivie repose sur l'utilisation des données de la télédétection pour une analyse spatiale et temporelle des causes et des facteurs intervenant dans le processus érosif (occupation et utilisation des sols, couvert végétal, etc...). Ces données qui peuvent être analysées avec d'autres types de données (terrain, cartes géologiques et lithologiques, MNT..) et croisées dans un système d'information géographique permettent de définir les zones d'intervention prioritaire (Boukheir *et al.*, 2008).

L'utilisation du modèle prédictif USLE à une échelle unique dans un environnement SIG offre une opportunité pour l'évaluation des risques d'érosion. Les données sur l'érosion par rapport à certains indicateurs sont collectées, calibrées et sont entrées dans une base de données SIG, après quoi ils seront spatialement modélisés pour représenter le risque d'érosion des sols dans n'importe quel élément du paysage.

Il a été remarqué dans plusieurs études que le modèle « USLE » n'était pas tout à fait adapté aux régions semi-arides, du fait que cette équation a été élaborée dans les plaines des USA où les processus érosifs sont différents. Cependant, l'USLE est une étape importante dans une approche de compréhension des mécanismes érosifs, et permet une comparaison avec les résultats obtenus dans de nombreux endroits du monde. L'utilisation d'images satellitaires pour déterminer les différents facteurs rentrants dans l'équation, pour le bassin versant de l'Oued Mina, est une approche nouvelle, qui va compléter utilement des travaux déjà réalisés sur ce bassin. En effet, La télédétection fournit des données homogènes sur de vastes régions et peut donc contribuer à l'évaluation régionale de l'érosion (Siakeu et Oguchi, 2000).

Ce travail montre explicitement l'intérêt des images satellitaires pour la cartographie des états de surface et l'érosion hydrique qui devient de plus en plus incontournable dans les régions arides et semi-arides.

1.3. Domaine d'application, les limites et les grandes lignes de la thèse

1.3.1. Domaine d'application

Cette thèse présente une méthode à travers laquelle l'érosion des sols peut être évaluée à l'échelle d'un bassin versant et le risque d'érosion peut être modélisé à l'aide des données de la télédétection et des systèmes d'information géographique. Le risque d'érosion se définit comme la possibilité ou la probabilité que l'érosion des sols aura lieu dans n'importe quel environnement. Un environnement est considéré comme à risque lorsque l'un des facteurs atténuants l'érosion sur le terrain (par exemple, la couverture de surface, la pente, la gestion des terres, l'érodibilité) favorise la création de l'érosion des sols. Les facteurs de risque changent en fonction des conditions artificielles ou naturelles: la couverture de la surface du sol, l'utilisation des terres, raideur de la pente, érodibilité du sol, le type de gestion, structures de conservation, etc.

1.3.2. Limitations

Les résultats présentés dans cette thèse sont dépendants et doivent donc être testés et validés pour de nouvelles zones avant d'être adopté pour utilisation ailleurs. L'érosion comme décrit dans la thèse est limitée à l'eau et à la gravité. La modélisation par l'USLE prédictif de l'érosion ne prend compte que l'érosion en nappe ou en rigole.

1.3.3. Plan de la thèse :

Ce document se décompose en sept chapitres. Le premier, qui représente une introduction générale, expose les enjeux et les objectifs de la thèse.

Le chapitre 2 est consacré à la présentation de la problématique et dresse, à partir de l'analyse de la littérature scientifique, un état des données et des méthodes permettant d'estimer l'érosion hydrique. Ainsi, il traite certaines méthodes utilisées en Algérie en générale et à l'échelle du bassin versant de l'Oued Mina.

Le chapitre 3 dresse une synthèse bibliographique. Celle-ci présente brièvement quelques informations sur la télédétection, sur les satellites d'observation de la terre et sur les possibilités qu'offrent ces derniers pour traiter de grandes zones. Cette mise au point vise à livrer les éléments clés pour la lecture du reste du travail. Ce chapitre aborde aussi, les théories et les concepts du traitement des images satellitaires et les systèmes d'information géographique.

Le chapitre 4 brosse un portrait sur les caractéristiques climatique, hydrologique, socio-économique du bassin versant ainsi que la morphologie afin d'extraire les grandes unités géomorphologiques à partir des images satellitaires combinées avec le modèle numérique de terrain. Ce qui convient pour fixer les limites du bassin et choisir des critères adaptés à l'établissement de ces limites.

Le chapitre 5 présente une vue d'ensemble y compris les procédures détaillées de la méthodologie développée pour l'estimation de différents facteurs interagissant l'érosion hydrique. Il abordera les différentes étapes de traitements numériques que nous avons suivi depuis les prétraitements, la création de la composition colorée adaptée, les post-traitements jusqu'à la classification.

Le chapitre 6 est consacré à l'analyse des changements détectés à l'échelle du bassin versant, en détaillant les dynamiques spatio-temporelles interannuelles et intra-annuelles d'indicateurs de l'occupation et d'utilisation des sols relatifs à la couverture végétale. L'objectif poursuivi dans ce chapitre est d'identifier l'origine des changements détectés, qu'il s'agisse de facteurs liés au climat ou de facteurs socio-économiques.

Le chapitre 7 concerne la validation des résultats obtenus dans la première partie. Les résultats de l'estimation de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina par la télédétection et les SIG seront comparés avec ceux obtenus par la technique isotopique, par l'utilisation du radio-isotope le Césium-137.

2

Erosion hydrique : concepts et quantification

2. Erosion hydrique : concepts et quantification

Dans ce chapitre, les concepts et les théories utilisés à l'étude de l'érosion hydrique. Les méthodes de l'évaluation et l'estimation de l'érosion sont aussi présentées dans le monde et au niveau du bassin versant de l'Oued Mina.

2.1.Introduction

L'érosion du sol peut être définie comme le détachement et la translocation des particules de sol en le déplaçant par l'eau ou le vent à partir de leur emplacement d'origine à de nouvelles zones de dépôt. L'érosion des sols est communément reconnue par des incisions ou des sédimentations qui se forment à la surface de la terre (Laflen et Roose, 1997).

En dehors de la pluie et le vent, l'érosion du sol peut aussi être causée par l'intensification de l'utilisation des terres, travail du sol, les structures de construction, le surpâturage, l'utilisation des terres et la déforestation (Roose *et al.*, 1993). La destruction des terres par l'érosion hydrique a été reconnue par de nombreuses personnes au fil du temps. Beaucoup le reconnaît comme un réel problème et une menace pour la production agricole (Bennett, 1939, Kilewe, 1984, Lal, 1988, Dregne, 1982, Nill *et al.*, 1996; Gachene, 1995 et Laflen et Roose, 1997).

L'érosion des sols en termes réels met en danger la sécurité alimentaire, la productivité subsistance du sol, la surface stockage de l'eau, la qualité de l'eau de surface, la beauté du paysage et l'équilibre écologique naturel. Sa solution réside dans l'adaptation des pratiques de conservation. L'érosion des bassins versants est très répandue dans la région du Maghreb (Remini, 2011), puisque toutes les conditions sont réunies pour déclencher et développer un tel processus : les irrégularités climatiques, la faible densité du couvert végétale, la nature des sols qui est peu résistante à l'écoulement et la violence des crues. La saison hydrologique peut être répartie en deux saisons: sèche et humide. La période sèche est caractérisée par de faibles précipitations et les oueds sont à sec, et s'étend du mois d'avril au mois de novembre. La saison humide est caractérisée par précipitations intenses de courtes durées.

L'Algérie présente un climat méditerranéen caractérisé par des pluies torrentielles irrégulières aussi bien dans l'espace que dans le temps. Ces pluies sont nettement fréquentes en automne lorsque le couvert végétal est absent et le sol, formé de plus de 70% d'argile et limon, se trouve ameubli par les labours, le transport solide atteint ces valeurs maximales (Arabi *et al.*, 1989). Ainsi, les pressions humaines et animales ont entraîné une dégradation des sols par l'érosion et une détérioration de la qualité des eaux de surface, déjà en quantité limitée (Herket, 2010) L'érosion moyenne varie entre 2000 et 4000 T /Km²/an (Demmak, 1982), et le taux d'envasement est supérieur à 15% (Achite *et al.*, 2000). L'Algérie est de ce fait l'un des pays menacés dans le monde par ce phénomène naturel.

En l'Algérie, l'érosion est un problème majeur, son intensité varie d'une zone à l'autre, elle devient, en effet, dangereuse dès qu'elle dépasse le seuil tolérable et ses effets sont importants : La diminution de la fertilité des sols et la perte des surfaces cultivables; la dégradation de la qualité des eaux et la diminution des capacités de stockage des ouvrages hydrauliques existants entre autres. Et le déplacement des sédiments provoquant l'envasement des ouvrages hydrauliques ; Plus de 120 millions de tonnes de sédiments sont rejetées en mer chaque année réduisant la durée de vie des barrages (Demmak, 1982).

D'après Demmak (1982) et Achite *et al.*, (2006), Le taux de sédimentation a évolué ces dernières années, du fait de la forte érosion des bassins versants, particulièrement à l'Ouest du pays où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres. Au début des années quatre-vingt, environ 120 millions de tonnes de sédiments arrachés annuellement au niveau des bassins versants du nord algérien (Demmak, 1982). Une partie de cette masse se dépose dans les 57 grands barrages que détient l'Algérie. Remini et Hallouche, (2007) ont estimé le dépôt sédimentaire annuellement dans ces barrages à 45 millions de m³.

Pour faire face à ces graves problèmes d'érosion, une stratégie faisant appel à des équipements hydrauliques lourds fût développée par l'Administration des Eaux et Forêts pendant la période 1940 à 1980. La DRS, Défense et Restauration des Sols, tient à la fois de la RTM (Restauration des Terrains de Montagne) et de la CES (Conservation de l'Eau et des Sols). Le principal objectif était de retarder l'envasement des barrages et de protéger les terres et les équipements. Elle comprend :

- la reforestation des hautes vallées (800000 ha depuis 1962, selon Mazour, 1992),
- la correction torrentielle dans les périmètres de protection des barrages,
- le terrassement des champs cultivés (350000 ha de banquettes d'après Heusch, 1986).

Depuis 1980, la DRS a été suspendue, suite aux critiques des chercheurs, au rejet des paysans, et surtout, aux difficultés économiques (Lefay, 1986). Les terres ne cessent de se dégrader, les paysans rejettent le système des terrasses de diversion et refusent de l'entretenir, la production de bois est restée faible et le taux d'envasement des barrages demeure très élevé. Depuis, la lutte antiérosive a été restreinte à la protection des ouvrages d'art, à la reforestation, à la végétalisation des ravines et à la construction des grands barrages. Ces derniers semblent dangereusement menacés par l'envasement (Heusch, 1986). Leur durée de vie ne dépasserait guère 30 ans car le taux d'érosion spécifique des bassins versants d'Algérie serait parmi les plus élevés du monde (2000 à 4000 t/km²/an) (Demmak, 1982).

L'analyse de la CES et de la DRS a montré que les terrassements n'ont guère intéressé les paysans car ces travaux exigent beaucoup de travail d'entretien, réduisent la surface cultivable de 5 à 15%, mais n'améliorent pas la productivité des terres, ni les revenus des paysans (Lefay, 1986).

Une nouvelle approche participative de la lutte antiérosive a été développée depuis 1985 par une douzaine de chercheurs en collaboration avec l'Institut National Algérien pour la Recherche Forestière (INRF) et l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM). Le but de leurs travaux est de développer un programme de formation et de recherche sur les causes et les facteurs de différents processus d'érosion et pour tester dans les montagnes méditerranéennes semi-arides d'Algérie. L'approche développée comprend la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Cette approche procède d'une logique aval qui vise avant tout la protection des équipements et de la qualité des eaux. La majorité des aménagements ne sont donc pas entretenus par les paysans et sont même détruits progressivement par le labour (Roose *et al.*, 1994).

Au niveau du bassin versant de l'Oued Mina, un projet de coopération, à la fin des années 1980, s'est développé entre le Ministère de l'agriculture Algérien et la Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ). Ce regroupement utilise le bassin versant de l'Oued Mina comme zone-test pour développer un schéma directeur d'utilisation des sols pour favoriser la conservation des sols et de l'eau en Algérie. Ils ont tracé une carte de danger d'érosion en synthétisant des résultats obtenus à partir des cartes thématiques (lithologie, pédologie, pentes et couvert végétal) et des travaux sur terrain. Le danger d'érosion a été divisé en 5 classes (très faible, faible, élevé, important et très important). Pour caractériser les classes, ils ont utilisé les moyennes d'érosion de longue période d'observation.

Remini (2011) a proposé une approche de lutte contre l'envasement par l'emplacement des obstacles émergés dans le cours d'eau principal à l'amont d'un barrage. Il a fait plusieurs expérimentations menées dans un canal rectangulaire dans le fond est équipé d'obstacles de différentes dimensions. Les résultats obtenus montrent que la disposition des obstacles en forme de chicane obtient le meilleur rendement. 69% des sédiments fins drainés sont déposés de part et d'autre des obstacles sous l'effet des tourbillons créés par ces derniers placés dans le canal.

2.2. Illustration de l'évaluation de l'érosion

Pour illustrer la question de l'évaluation de l'érosion des sols, des exemples suivants sont présentés :

Arabi (1991) a démontré que l'érosion en nappe observée sur les parcelles et calculée par l'équation universelle est faible même sur la pente élevée à une plus grande échelle où toutes les formes d'érosion sont présentes démontrant ainsi l'importance d'étudier l'érosion à grande échelle. Dans le cadre d'une thèse de doctorat, Arabi (1991) a examiné la relation entre les différents paramètres de l'équation universelle et l'érosion des sols mesurée pour 15 parcelles combinant trois types de sol (vertisol, fersiallitique et brun calcaire) et quatre systèmes de production (agro-pastoral, vigne, arboriculture et sylvo-pastoral). Pour ce qui a trait au facteur R, Arabi (1991) a distingué deux types de pluie : les pluies automnales d'intensité

élevée mais de faible fréquence et les pluies hivernales et printanières moins intenses que celles de l'automne, mais plus fréquentes. Pour le facteur K, Arabi (1991) a remarqué que les vertisols sont les sols les plus résistants. Il n'a pas observé de liens significatifs entre l'érosion et les facteurs R et LS représentant l'agressivité des pluies et la pente.

Roose *et al.*, (1993) ont présenté une synthèse des mesures de ruissellement, d'érosion en nappe et de production de biomasse sur un réseau de 50 parcelles (de 100 m²) réparties dans quatre régions méditerranéennes montagneuses (pentes de 10 à 45 %) s'étageant de 400 à 900 m d'altitude et recevant de 300 à 650 mm de pluie. De 1986 à 1995 furent comparés les comportements de jachères nues (risque maximal), de systèmes de production régionaux (blé, fève, vigne, fourrages, verger, parcours) et de systèmes améliorés (fertilisation, semences sélectionnées, pesticides et herbicides, rotation céréales-légumineuses, cultures associées au verger, enrichissement des parcours).

Les résultats de leurs travaux montrent que Le ruissellement a été très modeste sous végétation naturelle ou cultivée ($K = 1$ à 11 %), sauf lorsqu'une grosse averse est tombée sur des terres saturées, tassées, dénudées ou encroûtées, auquel cas il a pu atteindre 30 à 85 % et causer beaucoup de dégâts en aval. L'érosion a été modérée tant en milieu cultivé que naturel ($E = 0,1$ à 3 t/ha/an) ; elle a atteint 20 t/ha sur sol fersialitique rouge sur un versant nu de 35% de pente. La faiblesse de l'érosion s'explique partiellement par les pluies déficitaires, mais surtout par la remarquable résistance des sols à l'érosion en nappe ($K = 0,002$ à $0,02$) due à la richesse des sols en cailloux et en argile saturée en calcium. Autre observation importante : la pente n'est pas le facteur essentiel du risque érosif. Malgré des versants très raides (10 à 45%), les risques d'érosion en nappe ont été très modestes. Durant deux à six ans, les risques d'érosion ont été mesurés dans le milieu naturel et dans le milieu cultivé traditionnel ou amélioré, dans 50 parcelles d'érosion sur des versants raides (10 à 45 %) de petite montagne (altitude de 400 à 900 m), en climat méditerranéen (pluies de 350 à 650 mm).

Bourouba, (1994) a fait un comparatif entre le bilan de l'érosion actuelle dans deux bassins versants de l'Algérie orientale (le Seybouse et le Djendjen). Il a trouvé que les deux bassins-versants étudiés présentent des comportements hydrologiques différents et des bilans d'érosion dissemblables. La dégradation spécifique calculée à partir des mesures de transports en suspension met en relief les disparités hydro-morphologiques entre les milieux physiques drainés par l'oued Djendjen, à l'ouest, et l'oued Seybouse, à l'est.

Touaïbia *et al.*, (2001) ont examiné à l'échelle mensuelle les relations reliant les débits solides (Q_s) aux débits liquides (Q) pour bassin versant de l'Oued El-Haddad et le bassin versant de l'Oued El-Abtal. Parmi les différents modèles explorés, le modèle de puissance ($Q_s = aQ^b$) était le plus performant avec des valeurs des coefficients a et b fluctuant selon le mois et le bassin versant. L'érosion spécifique atteint son maximum en automne pour chaque bassin versant.

Gomer et Touaibia (1991) ont utilisé un simulateur de pluies afin d'obtenir une simulation de l'érosion hydrique avec les pluies de différentes intensités sur trois types de sol présentant des

pentés et des couvertures végétales différentes. Cette simulation a été appliquée sur le bassin versant de l'Oued Mina. Ils ont trouvé que le couvert végétal a joué le rôle de protecteur contre l'érosivité des pluies.

Ghader *et al.*, (1991) ont utilisé la télédétection pour une carte des sols dans la zone des marnes à l'échelle du bassin versant de l'Oued Mina. Cette étude avait pour but de vérifier la faisabilité d'une carte des caractères physiques et des vocations des sols à partir de traitements numériques des données satellitaires, contrôlés sur le terrain.

Guettoche (1991) a exploré l'utilisation de la télédétection par le traitement d'images SPOT afin de cartographier l'érosion rapidement et à faible coût pour la région de Médéa. Sa méthode lie l'intensité de l'érosion des sols (nulle, moyenne, forte) à l'intensité du couvert végétal.

Vogt et Gomer (1992) ont modélisé la concentration moyenne des sédiments en suspension à l'échelle de la crue pour l'oued Mina en cartographiant l'humidité des sols par la télédétection (Landsat TM). Gomer et Vogt (2000) ont par la suite raffiné leur approche en greffant aux données de télédétection un modèle basé sur les lois de la physique. Dans un premier temps, leur modèle divise le territoire en cellules. Pour chacune d'elle, on estime la quantité de particules arrachées à la surface du sol par le battement des gouttes de pluie. Par la suite, le programme modélise le déplacement de ces particules d'une cellule à l'autre jusqu'au cours d'eau. Le transport de ces particules est associé à celui de l'eau de ruissellement dont les volumes et le trajet sont également modélisés. Le modèle tient également compte du fait que le dépôt de ces particules puisse survenir lors du transport de la cellule d'origine jusqu'à l'exutoire. En comparant les résultats obtenus par leur modèle avec une cinquantaine de mesures prises lors d'un seul événement pluviométrique, les auteurs ont démontré l'efficacité du modèle. Toutefois, le modèle nécessite une foule de données qui ne sont pas toujours disponibles.

Kouri (1993) a développé, dans le cadre de sa thèse de doctorat, un modèle pour déterminer la sensibilité des terrains marneux au ravinement à l'aide d'un SIG. Il a utilisé des facteurs stables c'est-à-dire non contrôlés par l'homme (nature des marnes, dénivelé, exposition des versants, distance par rapport aux oueds et altitude) et les facteurs variables qui sont influençables par l'homme tels que l'utilisation des terres (GTZ, 1994).

Kouri *et al.*, (1993) ont permis d'élaborer, à partir des paramètres classifiés, la carte de sensibilité au ravinement des terrains marneux de la partie occidentale de l'Oued Mina. Il en ressort une prédominance des terrains sensibles aux processus d'érosion linéaire (57% de la superficie). 25% des terrains sont très fortement et fortement sensibles à l'incision, et sont localisés pour l'essentiel sur la rive droite de l'Oued Mina et le secteur aval de la rive gauche de l'Oued Haddad. 32% de la superficie sont fortement sensibles à la solifluxion et 32% sont moyennement sensibles à l'incision.

Kouri *et al.*, (1997) ont montré que dans la zone des marne de la région de l'oued Mina, les facteurs influençant l'érosion en ravines sont le type de marne, la pente, l'exposition des versants, l'utilisation du sol et la morphologie des parois des ravines. Ils ont démontré que l'érosion en ravines et les glissements de terrain sont les types d'érosion les plus actifs sur les terrains marneux.

Bourouba (1998) a analysé graphiquement les variations des transports solides et leurs relations avec les précipitations à l'échelle du bassin versant de Medjerda (Algérie orientale). Les résultats de ces travaux montrent que l'existence de deux saisons de forte érosion : l'hiver et le printemps et une forte corrélation entre l'écoulement et le transport solide à l'échelle annuelle.

Meddi *et al.*, (1998) ont employé la régression multiple "pas à pas" afin d'établir les relations entre la dégradation spécifique (variable expliqué) et les paramètres explicatifs: le débit liquide moyen annuel et la superficie des bassins versants étudiés. Ce modèle permet d'estimer le transport solide au nord de l'Algérie.

Selon Touaibia *et al.*, (1999), l'érosion spécifique estimée par l'Agence Nationale des Barrages (ANB) à 3.26 t/ha/an dans le bassin de Sidi M'Hamed Ben Aouda et que l'érosion calculée dans les micro-bassins, la zone des marnes, d'une superficie de 1000 km², devrait contribuer à la quasi-totalité des apports de sédiments dans la retenue (16 t/ha/an).

Morsli *et al.*, (2000), au niveau des monts de Béni-Chougrane, ont utilisé une approche méthodologique qui repose sur l'analyse du ruissellement, de l'érosion et de la dynamique du carbone au niveau des parcelles expérimentales de cent mètres carré de type Wischmeier (1978).

Morsli *et al.*, (2001) ont observé que l'évolution du couvert végétal durant la saison des pluies et son interaction avec les techniques culturales influencent profondément l'aptitude du sol au ruissellement et à l'érosion. Ces observations ont été confirmées par les résultats obtenus par sous pluies simulées.

Meddi *et al.*, (2001) ont observé que les pertes en terre sont généralement liées aux pluies, à la couverture végétale et aux états de surface du sol et que la relation entre ruissellement et érosion n'est pas stable durant l'année, elle varie au cours des saisons. Dans le cas des monts de Beni Chougrane, des coefficients de corrélation significatifs sont obtenus entre l'érosion, la lame d'eau écoulée et les précipitations si les données sont séparées en trois saisons.

Touaibia et Achite (2003) ont utilisé deux approches différentes pour étudier le lien entre l'érosion et plusieurs facteurs favorisant ou limitant l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina : l'approche statistique (ACP et régression multiple) qui a permis de trouver des relations fonctionnelles hautement significatives entre l'érosion et les deux facteurs (la surface et la densité du couvert végétal). Une approche cartographique qui a permis de déceler deux

zones distinctes dans le bassin versant de l'Oued Mina. Une zone située dans la partie nord du bassin, caractérisée par une érosion importante marneuse et appauvrie en végétation; et une autre, située dans la partie sud du bassin, moins érodée.

Benkhaled et Remini (2003) ont examiné les fluctuations des paramètres a et b de la relation $Q_s = aQ^b$ à diverses échelles temporelles pour le bassin versant de l'oued Wahrane. Leur étude a démontré qu'entre les saisons le paramètre « a » est relié à la pluviométrie moyenne et qu'à l'intérieur d'une saison, ce même paramètre est relié à l'état du sol avec les valeurs les plus faibles lorsque les sols sont saturés. Pour sa part, le coefficient « b » est relié aux caractéristiques de l'écoulement tels que le débit maximal quel que soit l'échelle temporelle.

Sadiki *et al.*, (2004) ont intégré des cartes thématiques des différents facteurs de l'Equation universelle de pertes en sol dans le système d'information géographique qui a permis de hiérarchiser les différentes zones du bassin versant, en produisant une carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion dans le Rif oriental (Maroc) , de déterminer le taux d'érosion par le ruissellement en nappe (estimé à 55,35 t/ha/an en moyenne) et d'établir les facteurs décisifs qui contrôlent l'érosion hydrique qui sont, par ordre d'importance, la pente, l'érodibilité des sols et la couverture végétale.

Bouaichi et Touaibia (2006), ont constaté que les principales zones productrices de sédiments se situent dans le haut et moyen Cheliff, ainsi que dans la partie sud de l'Oued Mina.

El Garouani *et al.*, (2007) ont étudié l'apport de la Télédétection et du SIG pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol et de l'érosion nette dans le bassin de l'Oued Tlata (Maroc). Les pertes de sol ont été estimées par le module RUSLE intégré dans le SIG Idrisi. Les évaluations spatiales statiques des pertes de sol ont été ensuite utilisées dans un algorithme de sédimentation qui modélise le mouvement de ces pertes en sol vers l'exutoire. Ces mouvements spatiaux ont été alors évalués pour estimer l'érosion nette. Les résultats obtenus permettent l'identification des secteurs à l'échelle du bassin où les interventions sont nécessaires pour limiter le processus de la dégradation des sols.

Dans le cadre de la protection des bassins versants des barrages en réalisation et en exploitation en Algérie, l'Agence Nationale des Barrages (ANB) en collaboration avec un bureau d'études Canadien (TECSULT) a fait une étude en 2004 pour identifier et préciser les mesures à mettre en œuvre pour lutter adéquatement contre l'envasement des retenues. Cette dernière est tous sujette à un envasement issu de l'érosion des bassins versants.

L'objectif de l'étude est la conception d'aménagements et d'ouvrages antiérosifs qui assureront :

- une meilleure conservation des sols sur le bassin versant dominant la retenue;
- la réduction éventuelle du taux de transport des sédiments vers la retenue;
- la réduction du taux de sédimentation et d'envasement de la retenue;
- et, conséquemment, la prolongation de la vie utile de la retenue.

Pour cela, deux approches ont été utilisées dont la première a fait appel à sept formules régionales de production, de transport ou d'apport solides adaptées au contexte algérien.

La charge solide a été également estimée au moyen d'une méthode analogique en comparant le bassin versant étudié avec un autre bassin versant algérien dont les caractéristiques du milieu (sol, pente, végétation, utilisation des sols) sont similaires et pour lequel le débit solide est connu.

Dans la seconde approche, la cartographie des zones de production de sédiments a été effectuée au moyen de trois modèles. Ces modèles seront l'équation universelle des pertes de sols (RUSLE), le modèle ICONA et finalement le modèle de Gavrilovic (1992). Pour des fins d'illustration cartographique et de détermination de stratégies d'aménagement, l'état érosif des versants a été divisé en quatre classes principales de vulnérabilité des sols, soient les niveaux "négligeable", "modéré", "élevé" et "très élevé".

Par ailleurs, les modèles utilisés sont utiles pour estimer les concentrations (ou charges) de sédiments dans les oueds et certains d'entre eux permettent une classification des bassins versants selon les taux d'envasement aux barrages. En plus, la cartographie de l'érosion dans des zones à l'aide d'outils géostatistiques en utilisant non pas des valeurs provenant de mesures de terrain, mais plutôt d'exutoires ne reflète pas uniquement les taux d'érosion dans les champs puisque d'autres phénomènes influencent la charge sédimentaire dans un cours d'eau telles que l'érosion des berges et la sédimentation des particules de sol. Ainsi, pour cartographier précisément les zones les plus touchées par l'érosion, il faut utiliser des modèles développés dans les champs. Ramdane (1989) a souligné que les bassins versants utilisés pour élaborer ces modèles ne sont pas toujours représentatifs, engendrant ainsi des difficultés d'extrapolation lorsqu'ils sont utilisés à un ensemble national. De plus, Smati (1996) a invoqué un autre problème avec ces modèles car selon lui les formules de transport décrites plus haut, même améliorées en fonction des paysages, ne sont pas adéquates pour des bassins de plus de 100 km².

Ainsi, La majorité des études antérieures consacrées à l'érosion en Algérie ou en Afrique du nord par la cartographie avait été axée sur l'aspect qualitatif (classes de vulnérabilité), utilisant divers modèles de prévision des pertes en sols. En effet, la bibliographie montre que chaque auteur a utilisé sa propre légende, du risque d'érosion le plus faible au plus élevé, ce qui limite tout effort d'extrapolation des résultats.

3

Théorie et principe de la télédétection et des SIG

3. Théorie et principe de la télédétection et des SIG

Dans ce chapitre, on présente les principaux aspects utiles à la compréhension du principe de télédétection, puis, on introduit la notion de réflectance et le principe de sa mesure. Dans un deuxième temps, on décrit les principaux satellites d'observation de la terre à basse et haute résolution spatiale. Dans un troisième temps, nous exposons le principe des systèmes d'information géographique (SIG) ainsi que la synergie entre les SIG et la télédétection. Dans un quatrième temps, nous discutons des exemples d'application de la télédétection et les SIG ayant pour objet l'étude de l'érosion hydrique. Cette présentation nous permet d'approfondir le sujet et la démarche de la thèse.

3.1.Introduction

La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la terre sans contact direct avec celle-ci (CCT : <http://www.rncan.gc.ca>). La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information.

La technologie de la télédétection a évolué progressivement vers l'intérêt scientifique après la seconde guerre mondiale. Le début de son développement a été conduit principalement par des usages militaires. Plus tard, les données de télédétection sont devenues largement utilisées pour des applications civiles. La gamme des applications de télédétection comprend l'archéologie, l'agriculture, la cartographie, génie civil, la météorologie et de la climatologie, des études côtières, la foresterie, la géologie, les systèmes d'information géographique, les risques, l'utilisation des terres et du couvert végétal, les catastrophes naturelles, l'océanographie et les ressources en eau (Bannari *et al.*, 1995).

D'un point de vue application, et surtout pour l'observation de la Terre, la télédétection est un outil de collecte des données raster ou des images. Les images de télédétection représentent un enregistrement objectif du spectre qui concerne les propriétés physiques et la composition chimique des matériaux de la surface de la Terre (Liu et Philippa, 2009). Le traitement d'image devient ainsi un outil indispensable pour l'extraction des informations thématiques et/ou quantitatives de l'image. Pour une analyse plus complète, les images doivent être analysées en conjonction avec d'autres données complémentaires, telles que les thématiques existants : Les cartes de la topographie, la géomorphologie, la géologie et l'utilisation des terres, ou avec géochimiques et géophysiques, données d'enquête ou de données «réalité de terrain», logistiques et des outils d'information, là où un système d'information géographique (SIG) entre en jeu. Les SIG contient des outils très sophistiqués pour la gestion, l'affichage et l'analyse de tous les types d'information à référence spatiale (Longley *et al.*, 2009).

Pour les études globales d'environnement, les mesures par satellites sont en effet les seules qui puissent à la fois réaliser une couverture spatiale suffisante, particulièrement dans des régions

dépourvues de systèmes d'observation, et à des pas de temps acceptables pour des études dynamiques et sur des périodes continues. La connaissance de ces phénomènes est indispensable pour de multiples applications (Dagorne, 1990).

3.2.Principe de la télédétection

Le principe de la télédétection est similaire à celui de la vision de l'homme. La télédétection est le résultat d'interaction de trois éléments fondamentaux :

- La cible qui est l'élément ou la portion de la surface terrestre observée par le satellite.
- La source d'énergie qui éclaire la cible en émettant une onde électromagnétique.

Trois sources d'énergie sont utilisées en télédétection. La première, la plus commune et la plus utilisée est le soleil qui illumine la surface terrestre. La partie du rayonnement réfléchi par la surface de la Terre est alors captée et enregistrée par le capteur satellitaire. Ce processus illustre la télédétection optique, dans les domaines du visible et du proche infrarouge. Mais la source d'énergie n'est pas forcément le rayonnement solaire. La surface terrestre se comporte également comme source d'énergie en émettant un rayonnement qui peut être capté et enregistré par les capteurs satellitaires. Cette situation correspond à la télédétection dans le thermique ou dans le domaine des micro-ondes passives. Enfin, le capteur satellite peut lui-même être source d'énergie en émettant grâce à une antenne, un rayonnement vers la surface terrestre, puis en enregistrant la partie du rayonnement rétrodiffusé. Ce processus est celui de la télédétection active dans le domaine des hyperfréquences.

- Le capteur ou plateforme de télédétection mesure l'énergie réfléchi par la cible.

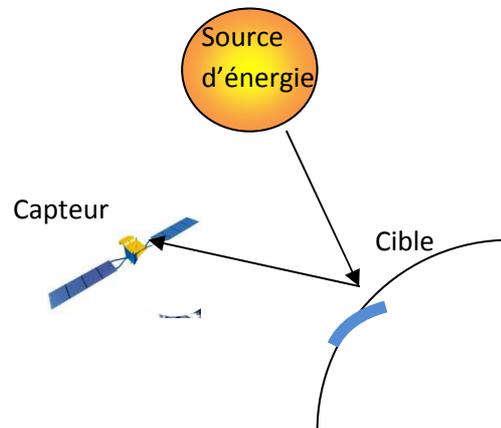


Fig. 1:Le principe de la télédétection.

Lorsque le satellite ne fait que capter le signal réfléchi, on parle de la télédétection passive et lorsque le satellite émet une onde vers la cible et enregistre l'écho, on parle de la télédétection active. Ces plateformes peuvent être situées près de la surface terrestre, comme par exemple au sol, dans un avion ou un ballon ; ou à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, comme par exemple sur un véhicule spatial ou un satellite.

3.2.1. Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie (figure ci-dessous).

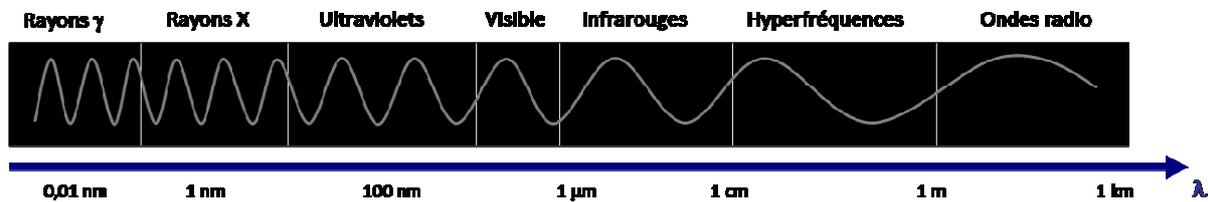


Fig. 2 : Le spectre électromagnétique source (<http://e-cours.univ-paris1.fr>).

Le spectre électromagnétique s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio).

Deux fenêtres spectrales sont principalement utilisées dans notre étude :

- Le domaine du visible. La fenêtre du visible qui s'étend entre 0,4µm et 0,7µm est la seule fenêtre du spectre électromagnétique qui est perceptible par l'œil humain.
- Le domaine des infrarouges (proche IR, IR moyen et IR thermique)

Le domaine de l'infrarouge est relativement étendu puisqu'il couvre les longueurs d'onde de 0,7µm à 100µm.

Le proche infrarouge

Le proche infrarouge (0,7µm à 1,6µm) est la partie du spectre électromagnétique qui vient juste après le visible (couleur rouge). Ce domaine du spectre électromagnétique est très utilisé en télédétection pour différencier les surfaces naturelles qui se caractérisent par de très importantes variations de la réflectance à cette longueur d'onde. Il permet également l'étude des surfaces continentales, et notamment de distinguer les surfaces végétalisées des surfaces minérales car les surfaces couvertes par la végétation se distinguent par une forte réflectance dans les longueurs d'onde du proche infrarouge, alors qu'elles réfléchissent peu le rayonnement dans le visible.

L'infrarouge moyen

L'infrarouge moyen (1,6µm à 4µm) permet de façon générale d'étudier les teneurs en eau des surfaces. Il est très utilisé en foresterie et en agriculture, notamment pour cartographier les couverts végétaux en état de stress hydrique.

L'infrarouge thermique

Dans ce domaine spectral (4µm à 15µm), le rayonnement dépend des propriétés d'émissivité des surfaces et les capteurs satellitaires mesurent la température apparente des objets. En effet une partie du rayonnement visible et proche infrarouge parvenant à la surface de la terre est absorbée par les objets, puis réémise sous forme de chaleur à une plus grande longueur d'onde.

3.2.2. Interactions du rayonnement avec l'atmosphère (CCT :<http://www.rncan.gc.ca>)

Lors de son trajet depuis la source (le soleil) vers la cible (surface terrestre), puis de la cible vers le capteur, le rayonnement électromagnétique subit des interactions avec les molécules gazeuses et les particules (aérosols, gouttelettes d'eau, poussières) présentes dans l'atmosphère. Deux phénomènes essentiels se produisent : l'absorption et la diffusion atmosphériques. Les molécules gazeuses et particules présentes dans l'atmosphère vont provoquer un blocage et/ou une déviation du rayonnement, diminuant ainsi l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique.

Le rayonnement qui n'est pas absorbé ou diffusé dans l'atmosphère peut atteindre et interagir avec la surface de la Terre. Lorsque l'énergie atteint la cible, la surface peut absorber l'énergie, la transmettre ou réfléchir l'énergie incidente. En mesurant l'énergie réfléchie ou émise par la cible avec une variété de longueurs d'onde, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet.

3.2.3. Interactions du rayonnement avec la cible

Lorsque le soleil éclaire la surface terrestre, des interactions se produisent entre le rayonnement et la cible illuminée. En fonction des propriétés et des caractéristiques de la cible, une partie du rayonnement est réfléchi vers le capteur satellitaire. Chaque objet ou chaque surface possède ainsi une réponse spectrale bien précise à une longueur d'onde donnée. L'ensemble des réponses spectrales à différentes longueurs d'onde constitue ce que l'on appelle la signature spectrale d'une surface. Chaque type de surface peut ainsi être caractérisé et identifié sur une image.

3.2.4. Signatures spectrales des principales surfaces naturelles

La signature spectrale d'un objet correspond à l'expression de la réflectance (rapport, exprimé en %, de la luminance mesurée par le satellite sur le rayonnement incident) de l'objet en fonction de la longueur d'onde. Chaque domaine spectral apporte une information bien particulière sur la nature du corps observé (Maurel, 2002).

En fonction de la nature et des caractéristiques intrinsèques des objets et des surfaces, le rayonnement incident interagira avec la cible selon l'une ou l'autre des propriétés citées précédemment, ou de manière générale selon une combinaison de ces propriétés. Chaque surface possède ainsi une signature spectrale - quantité d'énergie émise ou réfléchi en fonction de la longueur d'onde - qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires. La figure 3 présente la signature spectrale des principales surfaces naturelles.

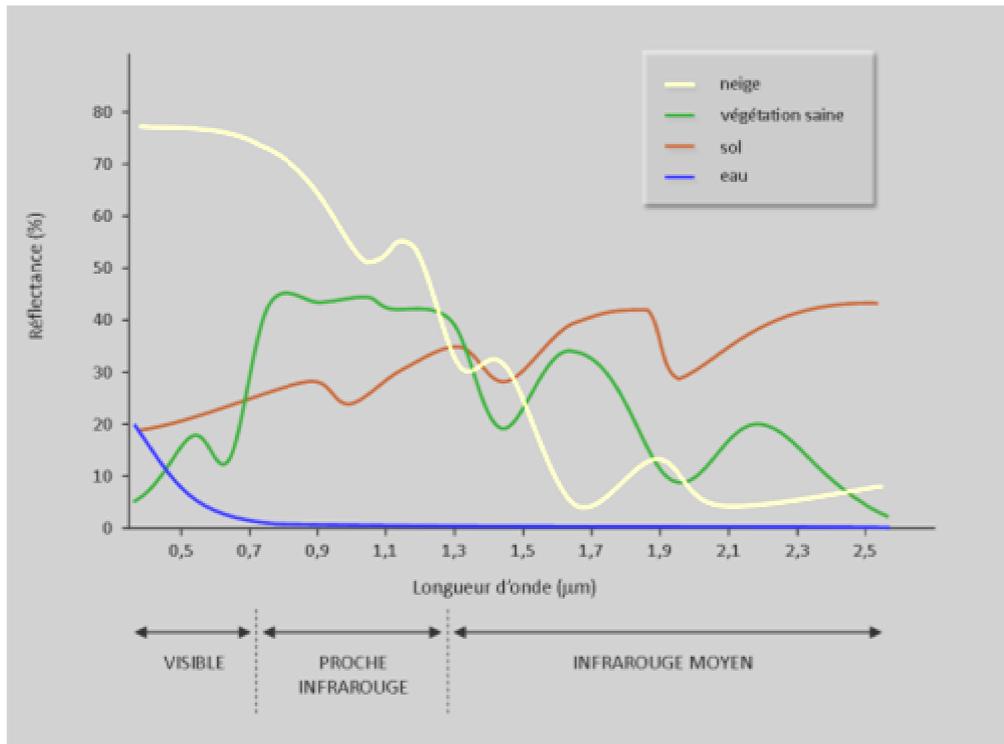


Fig. 3 : Signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen (Source : <http://e-cours.univ-paris1.fr>).

La végétation : La structure anatomique des feuilles joue un rôle très important dans la signature spectrale de la végétation. Si les pigments chlorophylliens absorbent la majeure partie du rayonnement visible qui leur parvient, ils sont en revanche totalement transparents au rayonnement de plus grande longueur d'onde. La structure interne des feuilles en santé agit comme un excellent réflecteur diffus pour les longueurs d'onde de l'infrarouge.

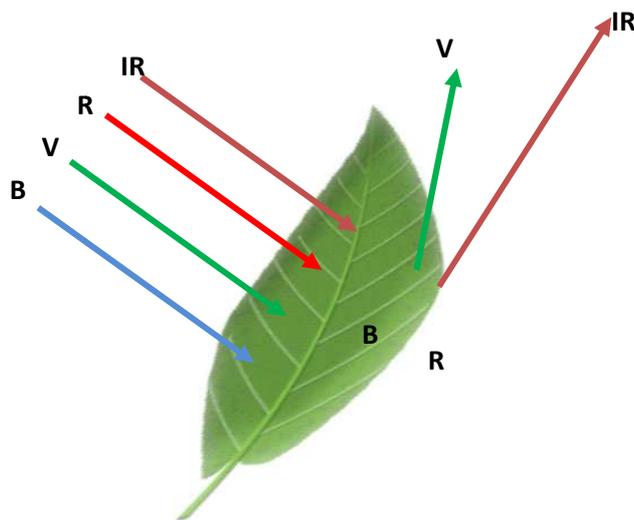


Fig. 4: Comportement spectral de la végétation dans le domaine du visible et l'infrarouge. Les longueurs d'onde bleue et rouge sont absorbées par la chlorophylle. Les vertes sont très faiblement réfléchies par la feuille. Le rayonnement infrarouge (IR), lui, est fortement réfléchi par le parenchyme.

Le comportement spectral varie non seulement en fonction des types de végétaux, mais également selon l'état de santé d'une plante. La teneur en eau des feuilles est aussi un facteur qui va fortement influencer la signature spectrale de la végétation, dans les longueurs d'onde de l'infrarouge moyen. Plus la teneur en eau est forte, plus la réflectance de la végétation diminue, en particulier aux longueurs d'onde 1450 nm et 1900 nm qui correspondent aux bandes d'absorption de l'eau. Ce domaine de longueur d'onde est très utile en télédétection des couverts végétaux, il permet notamment de détecter les plantes en état de stress hydrique (Sanderson, 2011).

Le sol : En ce qui concerne la signature spectrale des sols, on note un accroissement régulier de la réflectance au fur et à mesure qu'on se déplace vers les grandes longueurs d'onde. Les discontinuités que l'on observe dans le proche infrarouge et l'infrarouge moyen sont dues aux bandes d'absorption de l'eau. L'étude des propriétés spectrales des sols est toutefois particulièrement complexe car elle doit tenir compte de la nature hétérogène du sol qui contient à la fois des matières minérales et organiques, mais aussi une composante liquide ; tous ces éléments vont influencer la réflexion du rayonnement.

L'eau : L'eau a une réflectance très faible dans toutes les longueurs d'onde, elle absorbe cependant un peu moins les ondes les plus courtes, d'où sa couleur bleue. Sa signature spectrale dépend à la fois des molécules qui la constituent, mais aussi des éléments dissous ou en suspension dans la colonne d'eau, comme les organismes phytoplanctoniques, les sédiments ou les substances jaunes. Lorsque la couche de surface contient de fortes concentrations en phytoplancton, on observe une augmentation de la réflectance dans les longueurs d'onde du vert et l'eau nous paraît par conséquent plus verte (figure 5). Plus l'eau est turbide, plus elle contient de matériaux sédimentaires, plus sa réflectance augmente dans toutes les longueurs d'onde et notamment pour les ondes les plus longues - rouge.

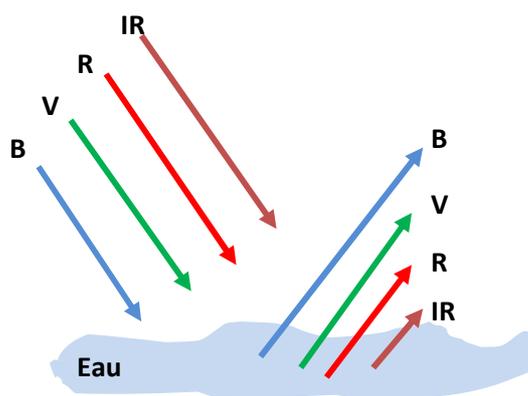


Fig. 5: Comportement spectral de l'eau dans le domaine du visible et l'infrarouge.

3.3.Télédétection multi spectrale

Les images de télédétection sont acquises par le capteur à bord des avions et des satellites, tels que les satellites d'observation de la Terre. Les systèmes optiques Multi-spectrale sont des capteurs passifs qui utilisent le rayonnement solaire comme la principale source d'éclairage pour l'imagerie.

L'utilisation de plusieurs bandes spectrales vise à exploiter des "vues" différentes de la cible pour en faciliter l'identification. Plusieurs études ont été faites pour identifier les meilleures bandes spectrales pour l'identification et l'analyse de cibles spécifiques.

En mesurant l'énergie réfléchié ou émise par la cible avec une variété de longueurs d'onde, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet. En comparant les signatures de différents objets, nous pouvons les distinguer les uns des autres, alors que nous ne pourrions peut-être pas les distinguer si nous les comparions seulement avec une longueur d'onde.

Par exemple, l'eau et la végétation peuvent avoir une signature spectrale similaire aux longueurs d'onde visibles, mais sont presque toujours différenciables dans l'infrarouge. Les signatures spectrales peuvent être très variables pour la même sorte de cible et peuvent aussi varier dans le temps et dans l'espace. Pour interpréter correctement l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la surface, il est important de savoir où regarder dans le spectre et de comprendre les facteurs qui influencent la signature spectrale de la cible.

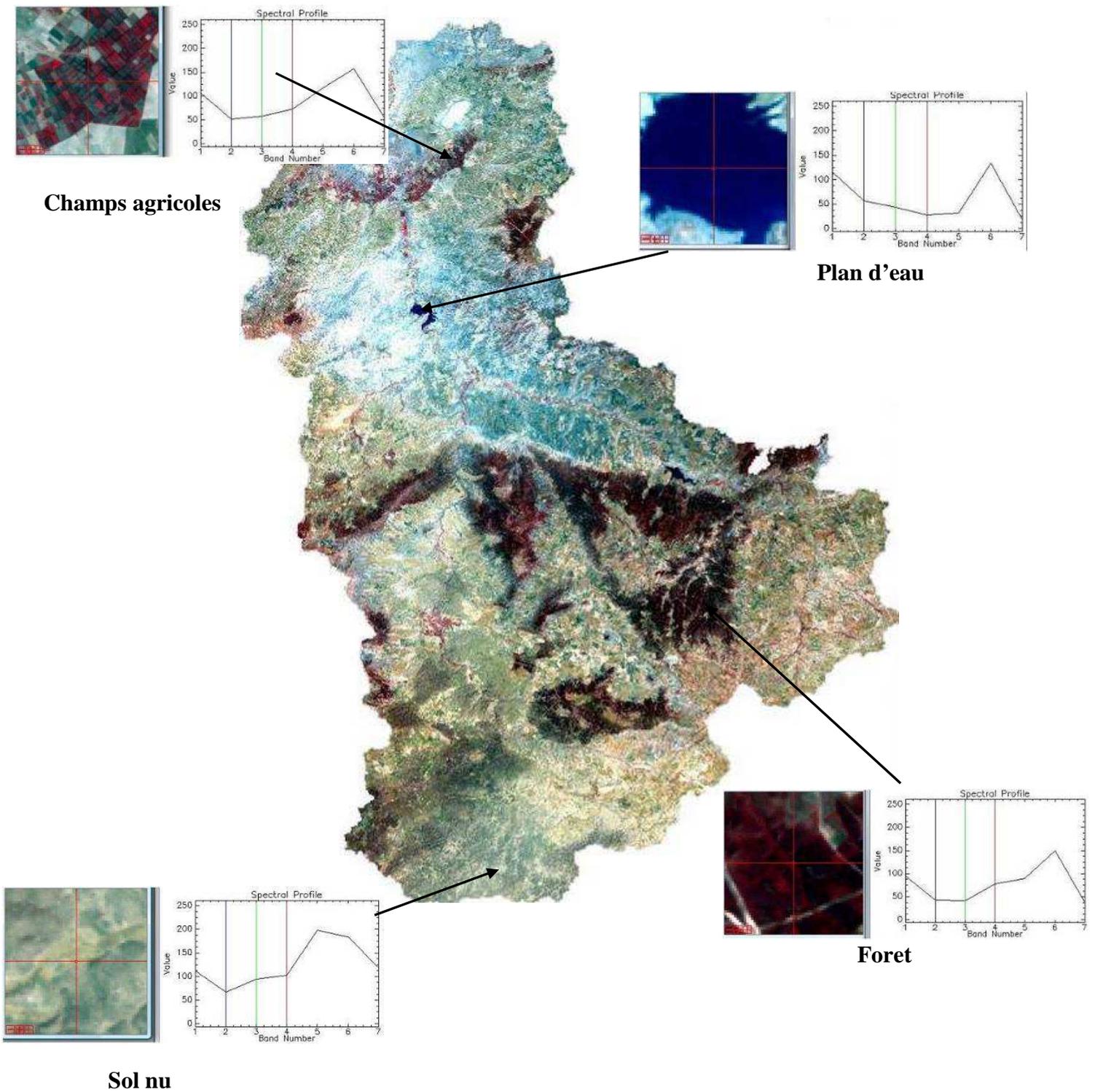


Fig. 6: Exemple de la signature spectrale de la végétation, du sol nu et l'eau. Composition colorée produite à partir des bandes originales de l'imagerie Landsat TM du 24/06/2009 sur le bassin de l'Oued Mina. Bande TM 2, 3,4 assignées respectivement aux couleurs primaires bleue, verte et rouge.

3.4. Image numérique de télédétection

Une image de photographie est toute forme de représentation en deux dimensions. L'image numérique est divisée en petits morceaux de taille et de forme égale, que nous nommons pixels. La luminosité de chaque pixel est représentée par une valeur numérique (CN). L'ordinateur affiche chaque valeur numérique comme un niveau de luminosité.

L'objectif est de représenter une portion de l'espace géographique. Dans son principe, l'élément de l'image numérique exprime une grandeur physique, la luminance exprimant l'énergie réfléchie ou émise. L'image ne contient qu'une mesure relative de luminance exprimée en ton de gris (un nombre compris entre 1 et 255). A ce contenu de luminance s'ajoute celui de son positionnement dans la dimension spatiale.

3.4.1. Structure d'une image de télédétection :

En deux dimensions (2D), une image numérique est constituée de données dans des lignes et des colonnes. Une telle disposition de données, sans les coordonnées x et y, sont généralement appelées données raster. Comme les images numériques sont rien de plus que des matrices de données, les opérations mathématiques peuvent être facilement réalisées sur le nombre d'images numériques (figure 7).

Les opérations mathématiques sur les images numériques sont appelées traitement numérique des images. Les données des images numériques peuvent également avoir une troisième dimension: couches. Les couches sont des images de la même scène, mais contenant des informations différentes. En images multi-spectrales, les couches sont les images de différentes gammes spectrales appelées bandes ou canaux.

La structure de l'image numérique de télédétection est en tout point semblable à celle d'un fichier en mode image (raster) tel qu'il est défini en système d'information géographique (SIG). Elle est divisée en deux parties : l'en-tête et la matrice numérique de n lignes et m colonnes.

L'en-tête contient la métadonnée ou méta-information, c'est-à-dire toutes les informations que le producteur de l'image juge utile de fournir à l'utilisateur : les informations relatives aux résolutions spatiale, spectrale et radiométrique, aux caractéristiques du radiomètre, à l'orbite du satellite ainsi qu'à la date de la prise de vue. Le traitement d'image ne porte pas sur ce fichier qui n'intervient que pour l'interprétation et la mise en géoréférence. Le tableau 1 présente un extrait des informations fournies par le producteur pour une image Landsat TM. Le reste des informations qui concernent les autres images utilisées dans le cadre de notre travail, sont représentées dans l'annexe.

La matrice numérique est généralement formée de nombres entiers compris entre 0 et 255. Chaque élément correspond, en mode discret, à une luminance spectrale relative à une portion élémentaire du sol, le pixel.

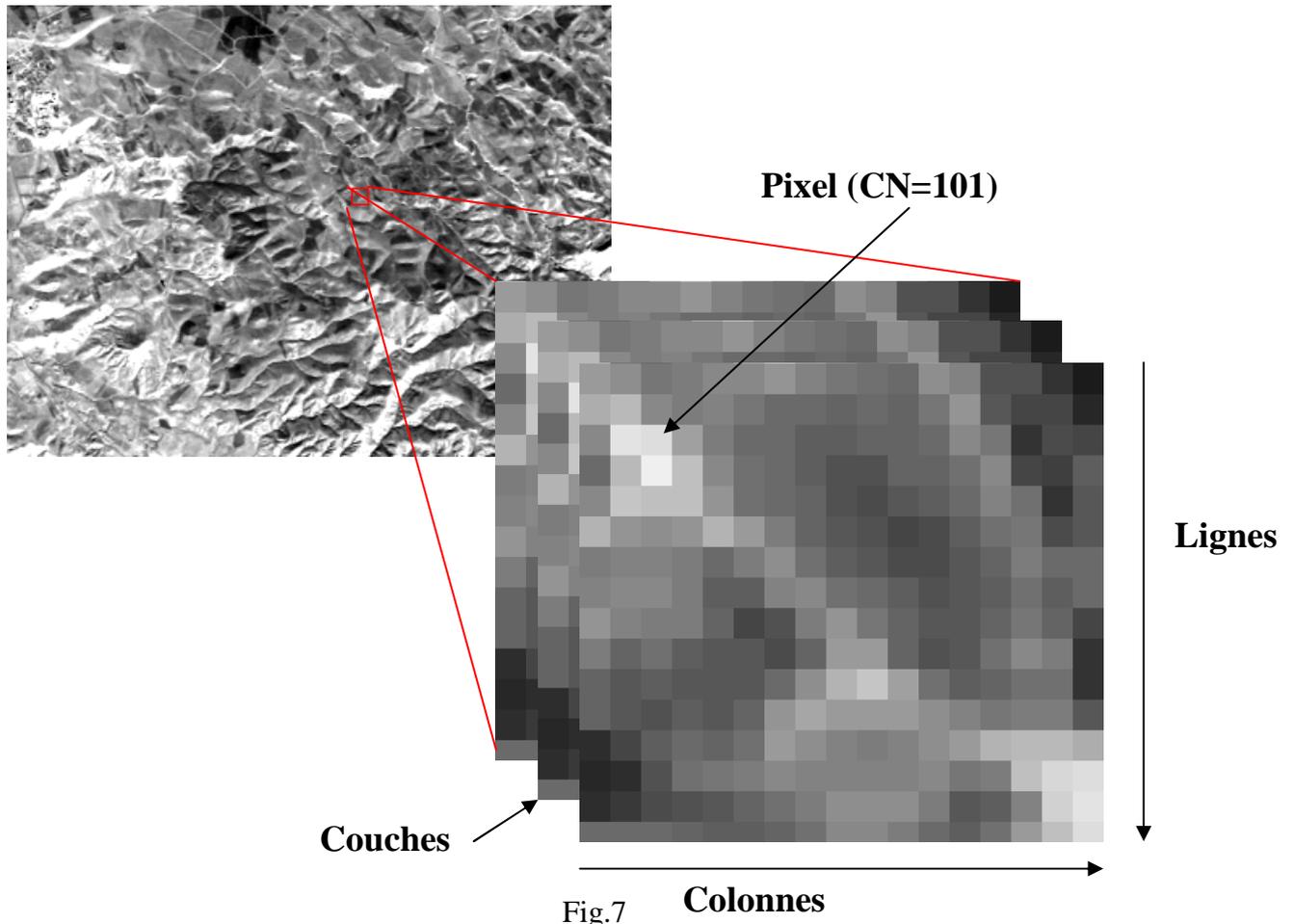


Fig.7

Colonnes

Fig. 7 : L'image numérique et ses éléments

Affichage de l'image numérique

La télédétection permet d'enregistrer, sur une grande partie d'une large gamme spectrale, que la capacité visuelle humaine peut visualiser comme des images en noir et blanc ou en couleur à l'aide d'un dispositif électronique tel qu'un écran d'ordinateur. L'affichage d'une image numérique en ton ou en couleur est des représentations visuelles de l'information enregistrée comme valeur numérique (CN). Toute image, que ce soit une image panchromatique ou multi-spectrale, peuvent être affichées en noir et blanc. L'affichage est mis en œuvre par la conversion des valeurs numériques des signaux électroniques dans une série de niveaux de gris (luminosité) du noir au blanc. Les systèmes de traitement des images prennent en charge un affichage graphique 8 bits, ce qui correspond à 256 niveaux de gris, et affichent NA de 0 (noir) à 255 (blanc).

L'affichage couleur de l'image numérique est entièrement basé sur la théorie de la couleur trichromatique. Un écran couleur, comme un téléviseur couleur, est composé de trois canons, à savoir le rouge, vert et bleu. Dans le canon rouge, les pixels d'une image sont affichés dans différentes intensités (rouge foncé, rouge clair, etc.) en fonction de leurs valeurs numériques (CN). La même chose pour les canons verts et bleus. Ainsi, si le rouge, le vert et le bleu des

bandes d'une image multi-spectrale sont affichés en rouge, vert et bleu simultanément, une image en couleurs est générée (figure 8), dans lequel (laquelle) la couleur d'un pixel est générée par les CNs de rouge, vert et bleu. Cette combinaison est appelée la composition colorée dans le système RVB.

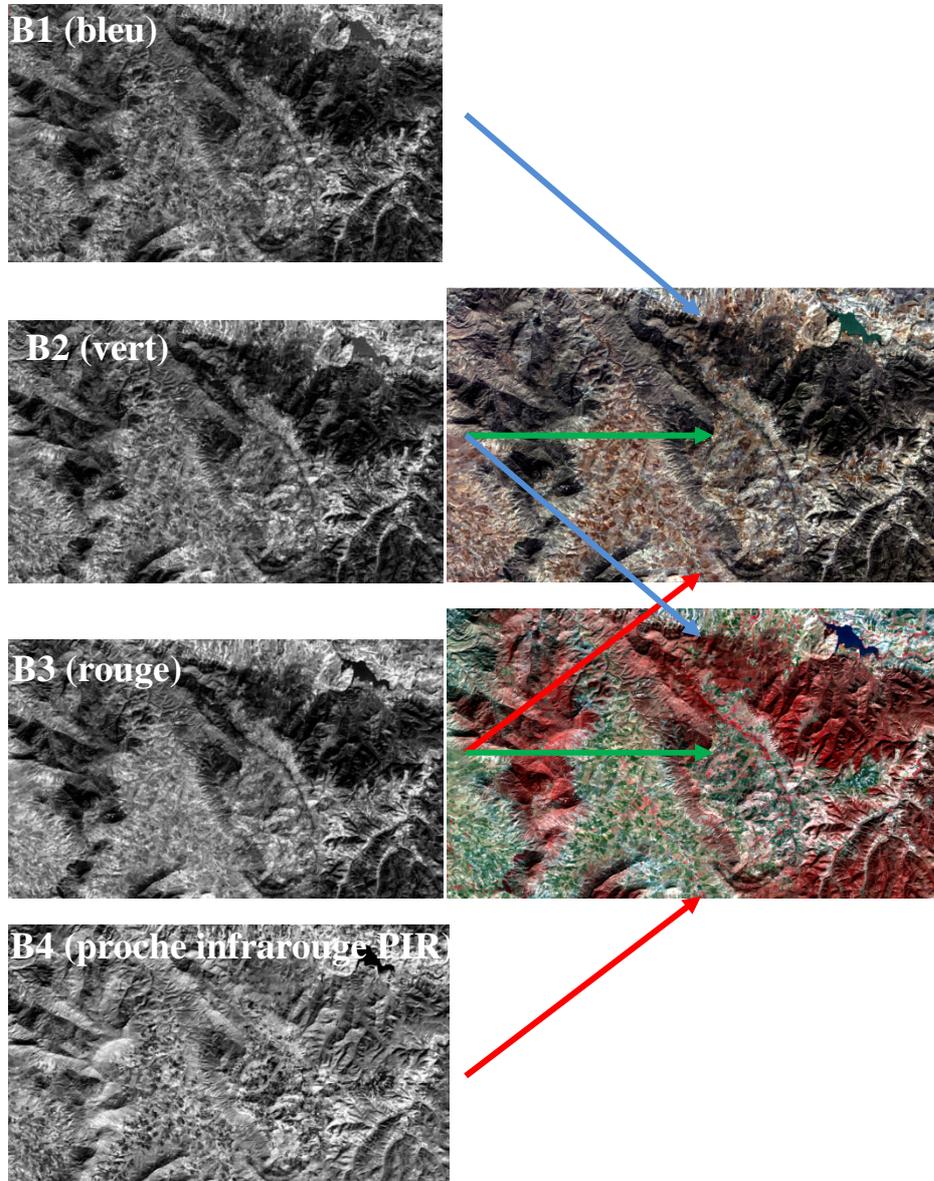


Fig. 8 : Affichage des quatre bandes spectrales de Landsat TM de la région de Tiaret (au sud-est du bassin versant de l'Oued Mina) en ton de gris, en vrais couleurs et en fausses couleur en combinaison les bandes dans le système RVB.

Si une image est affichée en RVB dans les gammes spectrales de rouge, vert et bleu, une vraie composition couleur est générée. Dans le cas contraire, si les bandes de l'image affichée en rouge, vert et bleu ne correspondent pas à des spectres de ces trois couleurs primaires, une composition fautive couleur est produite. Si on affiche, par exemple, la bande verte en bleu, bande rouge à bande verte et le proche infrarouge en rouge, une composition fautive couleur standard est produite, comme indiqué en bas à droite sur la figure 8.

Les longueurs d'onde des principales régions spectrales utilisées pour la télédétection sont énumérées ci-dessous:

Tableau 1: Les longueurs d'onde des principales régions spectrales utilisées pour la télédétection (CCT : <http://www.rncan.gc.ca>)

Lumière visible (VIS)	0.4–0.7 μm
Bleu (B)	0.4–0.5 μm
Vert (V)	0.5–0.6 μm
Rouge (R)	0.6–0.7 μm
Infrarouge photographique visible	0.5–0.9 μm
Infrarouge réfléchi (IR)	0.7–3.0 μm
Proche infrarouge (PIR)	0.7–1.3 μm
Infrarouge d'ondes courtes (SWIR)	1.3–3.0 μm
Infrarouge thermique (TIR)	3–5 μm
Micro-onde	0.1–100 cm

3.5. Résolution d'une image et notions de l'échelle en télédétection

Les images numériques de télédétection peuvent être entrées directement dans un SIG pour l'exploitation; les données analogiques peuvent également être utilisés dans les SIG par une conversion analogique-numérique ou par Scan (Jensen, 2000). Le plus souvent, les données de télédétection sont d'abord interprétées et analysées par divers méthodes d'extraction d'information afin de fournir des couches nécessaires de données pour les SIG. Le succès de la collecte de données à distance à partir de l'imagerie captée nécessite une compréhension de quatre résolutions de base, à savoir, la résolution spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle (Jensen, 2000).

La résolution spatiale désigne la taille minimum des objets pouvant être distingués et mesurés au sol (Robin, 2001). La résolution spatiale est définie comme le pouvoir de séparation spatiale ; elle correspond au produit de la résolution angulaire par la distance entre le capteur et la surface terrestre. Toutefois, dans la majeure partie des études de télédétection, la résolution spatiale fait référence au pas d'échantillonnage ou taille d'un pixel d'une image. Plus la résolution spatiale diminue, plus il est difficile d'identifier des limites d'objets, le mélange de différents types d'occupation et d'utilisation du sol ayant tendance à augmenter au sein des pixels.

Les images sur lesquelles seuls les grands éléments sont visibles ont une résolution "grossière" ou "basse". Les images à résolution fine ou élevée permettent l'identification d'éléments de plus petites dimensions. La résolution spatiale est fonction de l'altitude du capteur, détecteur taille, taille focal, et la configuration du système (Jensen, 2005). Elle peut inclure un grand nombre de pixels mixtes, où plus d'un type de couverture terrestre peuvent être trouvés. Alors que pour la fine résolution spatiale, le problème de pixel mixte peut être réduit. Une résolution plus élevée présente la nécessité d'un plus grand stockage de données et un coût plus élevé et peut entraîner des difficultés dans le traitement de l'image pour une vaste région d'étude.

La relation entre l'échelle géographique d'une zone d'étude et la résolution spatiale de l'image de la télédétection a été explorée (Quattrochi et Goodchild, 1997). De manière générale, à l'échelle locale, les images à très haute résolution spatiale, est la plus efficace. À l'échelle régionale, les images d'une résolution spatiale moyenne, comme celle employant les données de Landsat TM /ETM + et ASTER, sont utilisées le plus fréquemment. Sur l'échelle continentale ou mondiale, les images à une résolution spatiale grossière, telles que les images de MODIS et sont les plus appropriées.

Ajoutons que la résolution spatiale évolue de façon inversement proportionnelle à la taille de la superficie totale au sol couverte par la scène satellitale. Chaque résolution spatiale est donc adaptée à un type d'étude. Plusieurs méthodes permettent d'identifier la résolution spatiale optimale pour identifier des objets au sol (Lecerf, 2008).

La résolution spectrale, qui se rapporte aux intervalles spécifiques des longueurs d'ondes dans le spectre électromagnétique qu'un senseur puisse enregistrer (Lecerf, 2008). Plus l'intervalle est large dans le spectre électromagnétique, plus la résolution spectrale est petite et vice-versa. Par exemple, le senseur SPOT-P est considéré comme ayant un spectre de résolution spectral grossier puisqu'il enregistre la radiation électromagnétique REM entre 0.51 et 0.73 μm tandis que le senseur Landsat TM3 lui, a une résolution plus fine, car il enregistre le REM entre 0.63 et 0.69 μm (Jensen, 1986).

La résolution radiométrique, qui se réfère au rayon d'action dynamique ou le nombre possible de valeurs dans chaque bande, et ce, par le nombre de bits par lequel l'énergie enregistrée est répartie dans le fichier image. Par exemple, des données 8-bits sont celles ayant 28 valeurs, soit 256 niveaux de brillances allant de 0 à 255. Les observations issues de la télédétection spatiale sont également caractérisées par leur résolution temporelle ou encore la répétitivité des observations. La résolution temporelle dépend du cycle orbital d'un capteur. Ce cycle définit la période de revisite, à savoir le temps que met un capteur pour observer un même point de la surface de la terre dans les mêmes conditions de visée. Il est par exemple de 16 jours pour Landsat et de 26 jours pour SPOT.

La résolution temporelle ou répétitivité désigne la fréquence avec laquelle un capteur acquiert une image sur un même site d'étude. La résolution temporelle et la résolution spatiale des capteurs sont fortement dépendantes l'une de l'autre et dépendent directement du champ de visée du capteur. Pour un champ de visée réduit correspondant à une trace au sol inférieure à 200 km, on obtient une image à forte résolution spatiale et ayant une faible résolution temporelle. A l'inverse, pour des capteurs ayant un champ de visée correspondant à une trace au sol de plus de 2000 km, la résolution spatiale est généralement faible avec une résolution temporelle journalière ou de deux jours. Ainsi, plus la résolution spatiale des images est grossière, plus le champ de visée des capteurs est élargi et, en conséquence, la fréquence d'acquisition des images augmente. Par conséquent, la résolution temporelle a une implication importante dans la détection des changements et le suivi environnemental. De nombreux phénomènes environnementaux changent constamment au fil du temps, comme la végétation,

climat, les incendies des forêts, éruptions volcaniques, etc. La résolution temporelle est un élément important considération dans la télédétection de la végétation, car la végétation se développe selon des cycles phénologiques quotidiens, saisonniers et annuels.

Entre la résolution faible et la haute résolution, existe une résolution moyenne apparue avec le lancement du capteur MODIS « Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer », dont la résolution spatiale avoisine 250-300 m. Cette résolution, qui avoisine les 250 m, a été définie par Townshend *et al.*, (1988) comme étant adaptée à l'étude des changements en paysages fragmentés. En comparant l'impact de différentes résolutions spatiales, allant de 125 à 1000 m, sur l'information acquise pour différents types de paysages, Townshend (1981) déduit que plus la résolution spatiale est meilleure plus la représentation des transformation des terres est bonne, en particulier pour les zones avec de petites unités de changement.

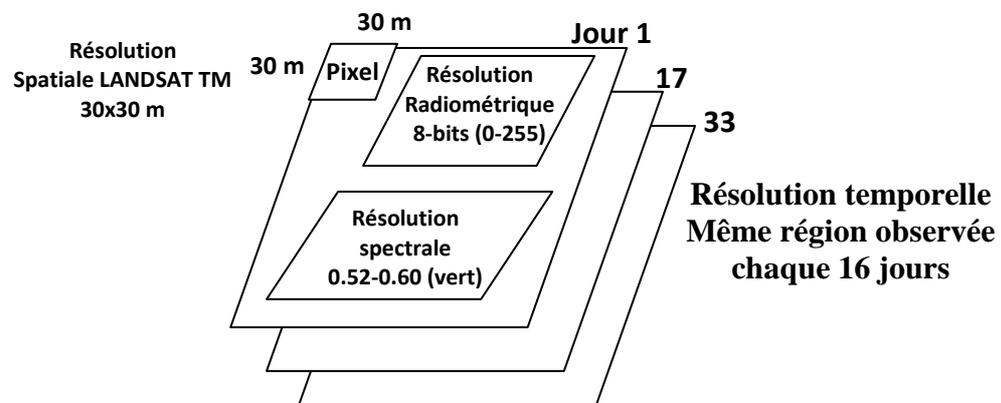


Fig. 9 : schéma représentatif des différentes résolutions utilisées en télédétection.

3.5.1. Données à haute résolution et très haute résolution spatiale

Les capteurs fournissant des images haute résolution permettent d'observer des objets spatiaux de petites tailles et d'en suivre l'évolution. Ces capteurs, tels que LANDSAT, SPOT ont de manière générale une résolution spatiale inférieure à 30 m. Ils permettent d'observer des paysages hétérogènes et d'envisager un suivi spatial détaillé des objets. Le champ de visée des capteurs à haute résolution spatiale étant réduit, leur résolution temporelle est relativement faible.

Le capteur LANDSAT

Le premier satellite civil d'observation de la Terre a été Landsat en 1972. Les trois premières missions étaient équipées des capteurs à résolution hectométrique MSS (Multi-Spectral sensor). A partir de 1982 et de l'envoi de Landsat 4, les missions embarquent les capteurs Thematic Mapper qui observent dans sept bandes spectrales dont six dans le visible et le proche et moyen infrarouge. La résolution des images TM est de 30 m pour une scène de 185 km de côté. Le capteur ETM+ (Enhanced Thematic Mapper), dont est équipée la dernière mission (Landsat-7), possède une bande panchromatique complémentaire à la résolution de 15 m (Tableau 2).

Tableau 2: Caractéristiques du capteur Landsat Source <http://nilerak.hatfieldgroup.com>.

Satellite	Date de lancement	Altitude moyenne	Cycle orbital	Fauchée	Capteurs, canaux et résolution spatiale
Landsat 1	juillet 1972	910 km	18 jours	185 km	Caméra RBV (3 canaux, 80 m) Radiomètre MSS (4 canaux, 80 m)
Landsat 2	Janvier 1975	910 km	18 jours	185 km	Caméra RBV (3canaux, 80 m) Radiomètre MSS (4 canaux, 80 m)
Landsat 3	mars 1978	910 km	18 jours	185 km	Caméra RBV (3 canaux, 80 m) Radiomètre MSS (5 canaux, 80 m)
Landsat 4	juillet 1982	705 km	16 jours	185 km	Radiomètre MSS (5 canaux, 80 m) Radiomètre TM (7 canaux, 30 m)
Landsat 5	Janvier 1984	705 km	16 jours	185 km	Radiomètre MSS (5 canaux, 80 m) Radiomètre TM (7 canaux, 30 m)
Landsat 6	oct. 1993	Détruit : après lancement			
Landsat 7	avril 1999	705 km	16 jours	185 km	Radiomètre ETM + (7 canaux, 30 m, plus canal panchro, 15 m)

Le capteur spot

Le système SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) est un système d'imagerie optique spatiale à haute résolution. Il est opérationnel depuis 1986, avec 5 missions lancées (SPOT -1 à 5), dont 3 sont encore opérationnelles de nos jours (SPOT-2, 4 et 5). Ils opèrent depuis une orbite quasi-polaire héliosynchrone à une altitude d'environ 830 km. Chaque mission comporte deux instruments dont le champ de vue est de 60 km et la résolution spatiale de 20 m pour SPOT-4 et de 10 m pour SPOT-5. Chaque instrument peut indifféremment acquérir des images en mode panchromatique (P) ou multi spectral (XS) de façon indépendante ou simultanée. Un grand atout du système SPOT est la capacité de dépointage du système imageur principal de part et d'autre de la trace au sol du satellite (d'environ 30°). Ceci permet d'augmenter considérablement la fréquence des acquisitions (sous des conditions de visée variables). On présente ici les caractéristiques du capteur HRVIR embarqué sur la plateforme SPOT-4 (Tableau 3).

Tableau 3: Caractéristique du capteur SPOT (source : <http://nilerak.hatfieldgroup.com>).

	SPOT 1 - 3	SPOT 4	SPOT 5
Altitude	822 km	822 km	822 km
Résolution	20 m (MS) 10 m (Pan)	20 m (MS) 10 m (Pan)	10 - 20 m (MS) 5 - 2.5 m (Pan)
Largeur de fauchée	60 km (>80 km oblique)	60 km (>80 km oblique)	60 km (>80 km oblique)
Méthode de balayage	longitudinale	longitudinale	perpendiculaire
Délai de ré-observation	26 jours	26 jours	26 jours
Caractéristiques spectrales	B1 (0.50-0.59 µm) Vert B2 (0.61-0.68 µm) Rouge B3 (0.79-0.89 µm) PIR Pan (0.50-0.73 µm)	B1 (0.50-0.59 µm) Vert B2 (0.61-0.68 µm) Rouge B3 (0.79-0.89 µm) PIR B4 (1.58-1.7µm) IRCL Pan (0.50-0.73 µm)	B1 (0.50-0.59 µm) Vert B2 (0.61-0.68 µm) Rouge B3 (0.78-0.89 µm) PIR B4 (1.58-1.7µm) IRCL Pan (0.48-0.71 µm)

3.5.2. Données à basse résolution spatiale

La basse résolution spatiale désigne, dans le cadre de cette étude, des capteurs ayant une taille de pixel supérieure ou égale au kilomètre. L'angle d'ouverture de ces capteurs permet d'obtenir des observations tous les 1 à 2 jours en fonction de la latitude. Toutefois, la fréquence d'acquisition des images étant beaucoup plus élevée que celle des images à haute résolution spatiale, les probabilités d'obtenir des scènes sans couverture nuageuse sont beaucoup plus importantes.

SPOT VEGETATION est un instrument multi spectral embarqué à bord des satellites Spot 4 et Spot 5. Ses images ont une résolution constante de 1 km sur toute la largeur d'un champ de 2400 km. Le principal intérêt de SPOT VEGETATION est sa haute résolution temporelle, offrant un accès quasi-quotidien à l'ensemble du globe et des synthèses décennales calibrées géométriquement et radio métriquement. Parmi les quatre bandes spectrales, on trouve 3 bandes caractérisant la végétation (rouge, proche-infrarouge et moyen-infrarouge) autorisant des études couplées et des interprétations à plusieurs échelles spatiales et temporelles.

Les principales missions de VEGETATION sont d'assurer un suivi continu, régional et global de la biosphère continentale et de fournir des mesures précises sur les principales caractéristiques du couvert végétal, notamment dans le domaine des productions agricoles et des conséquences de la déforestation.

Parmi les produits Spot Végétation, les indices de végétation (NDVI), calculés à partir des synthèses journalières ou décennales sont disponibles. Deux types de produits standard ont été définis :

1. une synthèse journalière (VGT-DS), avec la réflectance du sol et un NDVI calculé à partir de la réflectance du sol ;
2. et une synthèse décennale (sur 10 jours, VGT-PS) des valeurs maximales de NDVI.

Les synthèses ont été réalisées en sélectionnant la meilleure mesure acquise sur un jour ou sur une période de 10 jours : le composite est réalisé en utilisant les valeurs de NDVI les plus élevées, l'indice NDVI étant calculé en utilisant la réflectance au sol.

3.5.3. Données à moyenne résolution spatiale

La moyenne résolution spatiale est définie ici comme une résolution intermédiaire entre la haute résolution spatiale et la basse résolution kilométrique. A l'heure actuelle, seuls les capteurs MERIS et MODIS peuvent être qualifiés de capteur à moyenne résolution au sens où celle-ci a été définie. La taille du pixel, avoisinant les 250-300 m, devrait permettre d'envisager une étude des paysages fragmentés (Townshend *et al.*, 1988).

Les images MODIS de Terra et Aqua (<http://www.usgs.gov/>) : Le capteur MODIS a été placé sur la plate-forme EOS-AM1 (Terra) mise en orbite au début de l'année 2000 et sur la plate-forme EOS-PM1 (Aqua) lancée en mai 2002. La résolution temporelle du capteur MODIS est équivalente de celle des capteurs basse résolution, avec une fréquence d'acquisition de 1 à 2

jours en fonction de la latitude. MODIS possède 2 bandes spectrales à 250 m de résolution, 5 bandes à 500 m de résolution et 29 bandes à 1 Km de résolution. Seules les bandes rouge et proche infrarouge ont une résolution de 250 m, permettant ainsi d'effectuer des suivis de la couverture végétale avec une précision spatiale supplémentaire par rapport à la basse résolution. Les bandes à 500 m de résolution sont également dédiées à l'observation des surfaces terrestres dans le domaine du visible et de l'infrarouge. Les bandes spectrales à 1 km de résolution sont quant à elles destinées à l'observation des océans, de l'atmosphère et s'étendent du domaine visible à l'infrarouge thermique (Justice *et al.*, 1998).

Les indices globaux de végétation MODIS sont conçus pour fournir des informations spatiales et temporelles de l'état de la végétation. La réflectance des bandes Bleu, rouge et proche infrarouge centré à 469 nanomètres, 645-nanomètres, et 858 nanomètres, respectivement, sont utilisées (est utilisée) pour déterminer les indices de végétation quotidiens. L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) de MODIS est un produit qui assure la continuité des séries chronologiques pour les applications historiques. MODIS comprend également un nouvel indice de végétation amélioré (EVI) qui minimise les variations de la canopée de fond et maintient la sensibilité sur les conditions de végétation dense. L'EVI utilise également la bande bleue pour éliminer la contamination atmosphère résiduelle causée par la fumée et sous-pixels nuage et nuages minces. Les produits NDVI et EVI de MODIS sont calculés à partir de la correction atmosphérique des surfaces bidirectionnelles qui ont été masqués pour (par) l'eau, les nuages, les aérosols et les ombres lourdes nuages.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les données MOD13Q1 de MODIS AQUA qui sont fournies gratuitement tous les 16 jours à 250 mètres de résolution spatiale dans la projection sinusoidale. Les indices de végétation de MOD13Q sont utilisés pour la surveillance mondiale de l'état de la végétation et sont utilisés dans les domaines portant la couverture terrestre et les changements de la couverture terrestre. Ces données peuvent être utilisées comme entrée pour la modélisation des processus biogéochimiques globaux et hydrologiques et le climat mondial et régional. Ces données peuvent également être utilisées pour caractériser les propriétés de surface des terres biophysiques et processus, y compris la production primaire et la transformation du couvert végétal (<http://www.usgs.gov/>).

3.6. Interprétation et analyse des données de télédétection

Les données de télédétection peuvent être utilisées pour extraire l'information thématique et métrique, ce qui en fait prêt pour l'entrée dans un SIG. Les informations thématiques fournissent des données descriptives sur les caractéristiques de la surface de la terre. Un thème peut être aussi diversifié que leurs domaines d'intérêt, tels que le sol, l'eau, et la couverture végétale. Les informations Métriques: localisation, zone de hauteur, et leurs dérivés, tels que, le volume, l'angle de pente, et longueur de pente. Les informations thématiques peuvent être obtenues grâce à l'interprétation visuelle des images de télédétection ou par un traitement automatique par un ordinateur.

L'interprétation est définie comme le fait d'examiner les photographies aériennes à des fins d'identification d'objets et de jugement de leur importance (Colwell, 1997). Les activités des interprètes peuvent inclure : (1) la détection / identification, (2) la mesure, et (3) la résolution des problèmes. Dans le processus de détection et d'identification, l'interprète identifie les objets, les caractéristiques, les phénomènes et les processus de la photographie et transmet sa réponse par l'étiquetage. Sept éléments sont utilisés couramment dans l'interprétation des images aériennes : (1) modèle de ton / couleur, (2) la taille, (3) la forme, (4) la texture, (5), (6) l'ombre, et (7) l'association.

3.7.Traitement des images numériques

L'analyse d'imagerie de télédétection nécessite l'identification de différentes cibles sur une image. Ces cibles peuvent être des structures naturelles ou artificielles, faites de divers points, lignes ou surfaces. Les cibles peuvent être définies en fonction de la manière dont elles diffusent le rayonnement. L'intensité du rayonnement est mesurée et enregistrée par un capteur pour être ensuite transformée en un produit utilisable tel qu'une photo aérienne ou une image satellite.

La reconnaissance des cibles est la clé de l'interprétation et de l'extraction d'information. L'observation des différences entre les cibles et leurs arrière-plans implique la comparaison entre différentes cibles en se basant sur une combinaison des caractéristiques suivantes : ton, forme, taille, patron, texture, ombre et association.

Le traitement de l'image satellitaire comprend quatre catégories :

- Prétraitement
- Rehaussement de l'image
- Transformation de l'image
- Classification et analyse de l'image

Les opérations de prétraitement se divisent en corrections radiométriques et en corrections géométriques. Les corrections radiométriques comprennent entre autres, la correction des données à cause des irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur ou à l'atmosphère, et de la conversion des données afin qu'elles puissent représenter précisément le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur. Les corrections géométriques comprennent la correction pour les distorsions géométriques dues aux variations de la géométrie Terre-capteur, et la transformation des données en vraies coordonnées (par exemple en latitude et longitude) sur la surface de la Terre.

Les fonctions de rehaussement ont pour but d'améliorer l'apparence de l'imagerie pour aider l'interprétation et l'analyse visuelles. Les fonctions de rehaussement permettent l'étirement des contrastes pour augmenter la distinction des tons entre les différents éléments d'une scène, et le filtrage spatial pour rehausser (ou éliminer) les patrons spatiaux spécifiques sur une image.

Les transformations d'images sont des opérations similaires à ceux de rehaussement de l'image. Cependant, alors que le rehaussement de l'image qui est normalement appliqué à une seule bande de données à la fois, la transformation de l'image combine le traitement des données de plusieurs bandes spectrales.

Les opérations de classification et d'analyse d'image sont utilisées pour identifier et classer numériquement des pixels sur une image. La classification est habituellement faite sur des banques de données multi spectrales, et ce procédé donne à chaque pixel d'une image une certaine classe ou thème basé sur les caractéristiques statistiques de la valeur de l'intensité du pixel.

3.8.Principe d'un SIG

L'apparition de systèmes d'information géographique (SIG) dans la mi-1960 reflète les progrès de la technologie informatique et de l'influence de la révolution quantitative en géographie. Le SIG a évolué de façon spectaculaire comme un outil de cartographie automatisée et la gestion des données au début, et comme un espace capable de traiter des données après, et récemment, il est impliqué dans science de l'information géographique. Une première définition par Calkins *et al.*, (1977) stipule que:

Un système d'information géographique est un progiciel intégré conçu spécifiquement pour être utilisé avec des données géographiques et qui peut effectuer une gamme de tâches de gestion de ces données. Ces tâches comprennent la saisie de données, stockage, l'extraction et la production, en plus d'une grande variété de processus descriptifs et analytiques.

D'après cette définition, on constate que les SIG gère les données géographiques, qui comprennent à la fois la position géographique et les d'attributs (attributs) qui décrivent les caractéristiques géographiques. Le point fort des SIG est la superposition de données à référence spatiale dans des couches, ce qui permet de délimiter leurs relations spatiales. Les domaines d'application des SIG sont aujourd'hui beaucoup plus (larges).

Dans les SIG, des modèles sont utilisés pour convertir la variation géographique en un objet discret. Il Ya généralement deux grands types de modèles: raster et vecteur. Un modèle raster divise la zone d'étude dans une grille régulière de cellules dans un ordre spécifique (similaire aux pixels numériques), chaque cellule contenant une valeur unique. Au sein d'une couche raster, il peut y avoir être de nombreuses zones (également appelées, régions et polygones), avec chaque zone étant un ensemble d'emplacements contigus qui présentent la même valeur. Toutes les zones individuelles qui ont les mêmes caractéristiques forment une classe d'une couche raster.

Le vecteur est le modèle de données traditionnel basé sur les vecteurs. Son élément fondamental est un point. Les lignes sont créées en reliant les points et les zones sont définies par des ensembles de lignes.

La création d'une base de données vectoriel implique principalement trois étapes: (1) l'entrée de données spatiales, (2) l'entrée de données d'attribut, et (3) lien entre les données spatiales et d'attribut. Les données spatiales sont entrées via des points et des lignes numérisées, ou à partir d'autres sources numériques. Les attributs sont des données qui décrivent les caractéristiques spatiales et qui peuvent être saisies ou importés à partir d'une autre base de données numériques.

3.9.Méthodes d'intégration entre la télédétection et les SIG

Wilkinson (1996) résume les trois principales façons dont, la détection et du SIG peuvent être combinés pour se renforcer mutuellement: (1) la télédétection est utilisée comme un outil de collecte de données pour les utiliser dans SIG, (2) les données du SIG sont utilisés comme information auxiliaire pour améliorer les produits provenant de la télédétection, et (3) la télédétection et les SIG sont utilisés ensemble pour la modélisation et l'analyse.

La combinaison des informations provenant d'images satellitaires avec d'autres sources d'information géographique, biologique ou écologique est idéalement gérée au sein d'un SIG. Un S.I.G. peut également être utilisé comme la base de données à partir de laquelle on peut déduire des relations en utilisant des méthodes statistiques de modélisation.

3.10. Apport de la télédétection et les SIG à l'étude de l'érosion

Traditionnellement, la télédétection a été utilisée dans des études de recherche sur l'érosion des sols par interprétation de photos aériennes, à la fois, pour la détection des caractéristiques d'érosion et l'obtention de données d'entrée des modèles. À partir de 1972 avec le lancement de Landsat-1, l'imagerie satellitaire est devenue de plus en plus à la disposition des scientifiques. Au cours des 30 dernières années, de nombreuses études ont été publiées appliquant imagerie satellitaire pour l'évaluation de l'érosion des sols avec de nombreuses façons différentes. Principalement, la télédétection est utilisée pour détecter l'érosion et l'évaluation des facteurs qui la contrôlent. Les systèmes satellitaires optiques ont le plus souvent été appliqués dans les recherches sur l'érosion (Vrieling, 2006).

L'application de la télédétection pour les études de l'érosion suit deux axes de recherche: d'une part, le contrôle des signaux qui décrivent des variations spatio-temporelle des caractéristiques de surface du sol, et d'autre part, des améliorations majeures dans les méthodes utilisées pour relier ces signaux surveillés avec hydrologiques et géomorphologiques variables pertinentes des modèles utilisés pour étudier les processus d'érosion. Travailler avec des images à plusieurs résolutions différentes permet d'observer un territoire et ces éléments. Chaque gamme d'objets observés peut être restituée à l'échelle d'analyse la plus adaptée. Par exemple, les Îlots de végétation peuvent être observés et restitués à l'échelle régionale et mis en relation avec le phénomène d'érosion, tandis que les parcelles agricoles, peuvent être observées et restituées à l'échelle locale. Le choix des capteurs de télédétection est guidé par leur résolution spatiale afin de l'adapter au mieux à la taille des objets observés et l'échelle de restitution souhaitée.

Plusieurs chercheurs ont utilisé la télédétection comme sources de données et les SIG pour la gestion et l'analyse de ces données afin d'estimer et cartographier l'érosion hydrique, parmi eux, nous citons : (Graciela *et al.*, 1996, Van Der Knijff *et al.*, 2000, Koirala *et al.*, 2007, El Garouani *et al.*, 2007, Terranova *et al.*, 2009, Bou Kheir *et al.*, 2006, Meusburger *et al.*, 2010, Rejaour *et al.*, 2009, Hickey, 2000, Sanjay *et al.*, 2002, Rakotondraompiana *et al.*, 2011, King *et al.*, 2005, Ustun, 2008, El Bouqdaoui *et al.*, 2005, Shbeli, 2005, Abaoui *et al.*, 2005, Bachaoui *et al.*, 2005, Sadiki, 2004, Engel, 2003).

La télédétection a permis, dans ces travaux, d'évaluer les facteurs nécessaires au fonctionnement des modèles (ULSE, RSLE..), tels que la longueur de pente et la pente (LS) à l'aide des modèles numériques de terrain (MNT). Ils ont aussi exploité les images satellitaires pour estimer le facteur d'occupation et de l'utilisation des terres (C) et les pratiques de conservation (P).

La télédétection a permis aussi de produire la cartographie des réseaux hydrographiques, de diverses caractéristiques géomorphologiques de terrain ainsi que la cartographie géologique et son analyse structurale (failles et linéaments).

Les images satellitaires permettent d'obtenir aussi des informations pédologiques telles que la couleur, les teneurs en matière organique et calcaire.

Les systèmes d'information géographiques regroupent tous les facteurs déterminés par les images satellitaires afin de les stocker, analyser et les modéliser. Les données obtenues peuvent être introduites selon trois catégories :

- Les entrées du modèle sont des facteurs stables (ou évoluant sur une période longue) : sol, morphologie, géologie, hydrographie, pente.
- Les entrées événementielles comme l'intensité de la précipitation, ou saisonnières comme l'évolution de la végétation et l'état de surface des sols.
- On intègre les interventions de l'homme (incendies des forêts, urbanisation, la conservation des sols)

4

Description de la région d'étude

4. Description de la région d'étude

Cette partie est consacrée à une description générale du bassin versant de l'Oued Mina ainsi que les différents sous bassins analysés afin de donner les indications géographiques et biophysiques, bases indispensables à la future compréhension des mécanismes de l'érosion hydrique. En effet, la pente et la forme d'un bassin versant reliées à la lithologie et l'état de sa surface renseignent sur le type de réponse hydrologique du bassin. Les principales caractéristiques biophysiques et géomorphologiques d'un bassin versant étudié ont une importance majeure car elles interviennent, et souvent d'une façon combinée, dans les modalités de l'écoulement superficiel.

4.1.Introduction

Le bassin de l'Oued Mina est exposé à un climat semi-aride méditerranéen (pluie d'hiver, sécheresse estivale). Ses pluies sont torrentielles et irrégulières aussi bien dans l'espace que dans le temps. Mais les averses orageuses de forte intensité sont particulièrement fréquentes en automne lorsque le couvert végétal est absent (Arabi et Roose, 1989). Les roches dominantes sont les marnes (partie amont du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda), d'âge tertiaire avec des grès et des calcaires intercalés.

De part de son climat, sa géologie, son relief et les facteurs anthropiques qui ont largement contribué à l'accélération des processus érosifs, le bassin de l'Oued Mina est soumis à une érosion intense. Elle est la cause principale de l'envasement des ouvrages de stockage de l'eau dans la région, en particulier le barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda et le barrage de Bekhada, et de plusieurs retenues collinaires qui se trouvent abandonnées, du fait d'un taux d'envasement élevé qui atteint 100 % pour une majorité (Agence du Bassin Hydrographique Chélif-Zahrez, 2004).

4.2.Situation géographique de la région d'étude

Le bassin de l'Oued Mina se situe dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie. Il fait partie du grand bassin versant « Chélif » et compte parmi les principaux affluents de l'Oued Cheliff. D'une superficie de 8200 km², il est encadré par le moyen Chélif à l'est, le bassin de la Macta à Ouest, le massif de Dahra au Nord et le Chott Ech-Chergui au Sud. La partie septentrionale s'insère dans le Tell occidental et comprend la retombée sud-orientale de l'Ouarsenis, à l'est. À l'Ouest, il est limité par les Monts des Béni Chougrane. Il est situé entre les latitudes Nord de 36° 1' et 34° 41' et les longitudes est de 0° 16' et 1° 30'.

L'altitude, variant entre 1 300 m et 30 m, décroît vers le nord. Le relief est très contrasté, constitue de plateaux entaillées et de versants raides, seuls 12 % de la surface sont occupées par des plaines. Le bassin versant de l'oued Mina est soumis à un climat de type méditerranéen contrasté, avec une aridité estivale marquée et un hiver froid, présentant un régime pluviométrique fortement influencé par les orages.

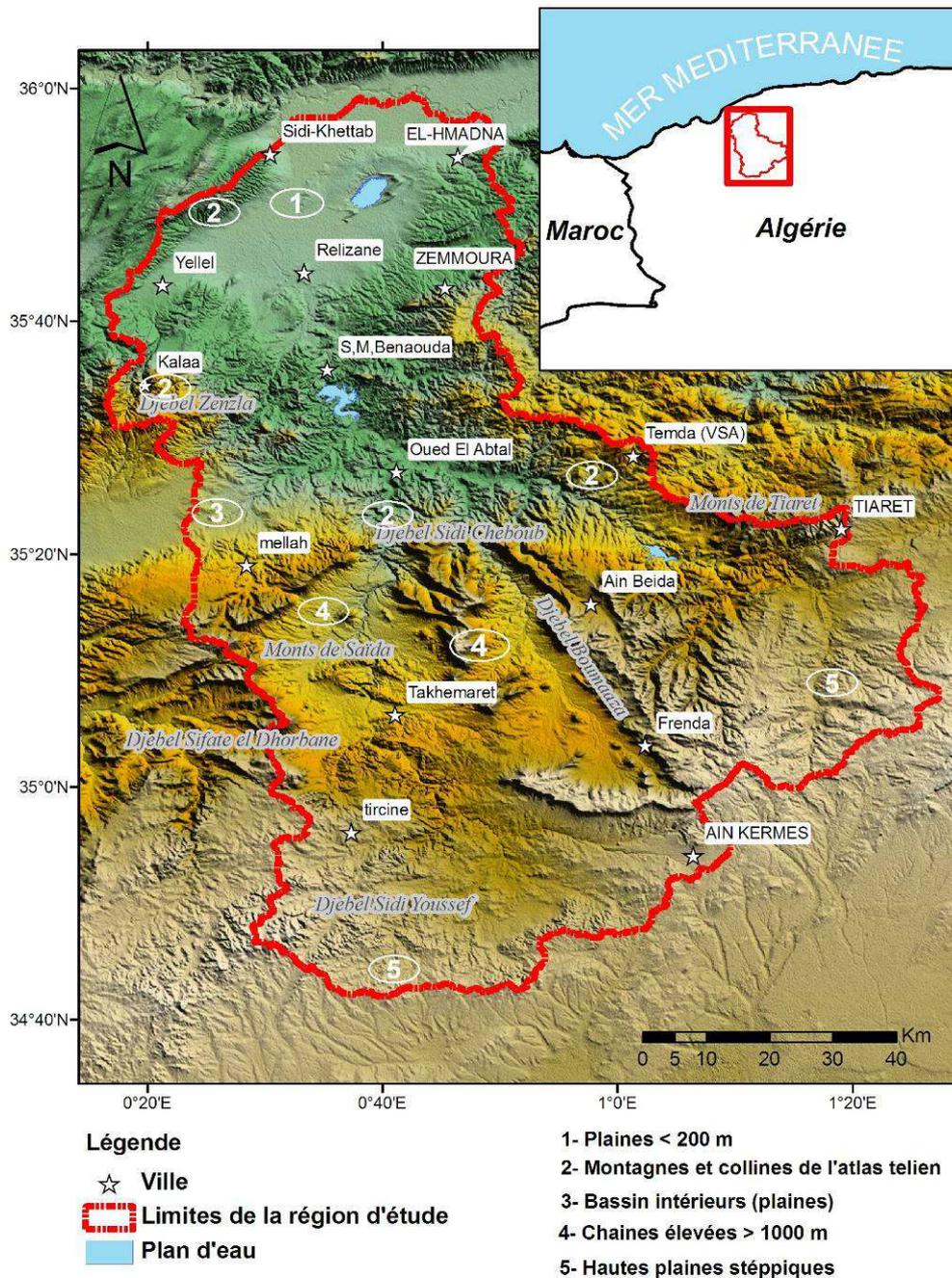


Fig. 10: Limites et unités géographiques de la région d'étude. Les chiffres correspondent aux unités géographiques et les étoiles correspondent aux villes.

Deux barrages ont été construits sur l'Oued Mina; Bakhadda, mis en service en 1936 sur le cours supérieur qui draine un sous bassin de 1300 km² et le barrage de S.M. Ben Aouda en aval de Bakhadda avec une capacité de 237 millions de m³. Ce dernier doit répondre à des besoins d'approvisionnement en eau potable des villes en aval et des besoins agricoles par le développement de l'irrigation sur un périmètre de 23000 hectares situés dans la plaine de la Mina et du Bas Chélif.

4.3. Description biophysique du bassin

4.3.1. Climat :

Pluviosité :

La pluie est un facteur important en ce qui concerne l'érosion du sol. La quantité et l'intensité d'une pluie déterminent et influencent l'érosion linéaire et l'érosion en surface du sol. L'averse d'une intensité donnée agit comme source d'énergie pour la séparation des particules du sol et l'écoulement généré par la pluie comme moyen de leur transport. En outre, les précipitations et l'écoulement ont une importance fondamentale pour la végétation naturelle et agricole. Cette dernière peut jouer le rôle protecteur contre l'érosion. En effet, le couvert végétal peut diminuer l'énergie des pluies en arrivant à la surface du sol, comme il peut amortir l'écoulement torrentiel au cours d'une averse. Donc les précipitations peuvent être, à la fois, un facteur jouant à la faveur de l'érosion, comme elles peuvent être un facteur protecteur pas le biais de la végétation.

Le taux d'érosion des sols dépend des états de surface et du mode d'utilisation des terres (White, 1986). La figure 11 montre la distribution des agglomérations dans le territoire en fonction des précipitations. Les précipitations annuelles varient entre 220 et 530 mm en moyenne dont les plus élevées sont dans la partie Sud-Est du bassin (en amont du barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda). La population dans cette zone est importante et les terrains sont favorables à l'agriculture pluviale. Ces derniers, sont situés le plus souvent sur une forte pente. Dans la partie Nord, les précipitations annuelles varient entre 200 et 300 mm en moyenne. La pression de l'agriculture est importante, le relief est plat (plaine du Bas Chélif), sans érosion et, par conséquent, avec beaucoup de surface agricole utile (grands périmètres d'irrigation). Les précipitations moyennes mensuelles varient de 5 mm au mois de juillet à 51 mm au mois de mars. Sur une base annuelle, la précipitation journalière maximale dans la région du bassin versant de S.M. Ben-Aouda atteint en moyenne 30 mm.

Les stations qui ont servi à l'élaboration de la carte des précipitations annuelles (figure 11) et qui ont permis l'analyse statistique de la pluviosité mensuelle sont représentées au tableau 4:

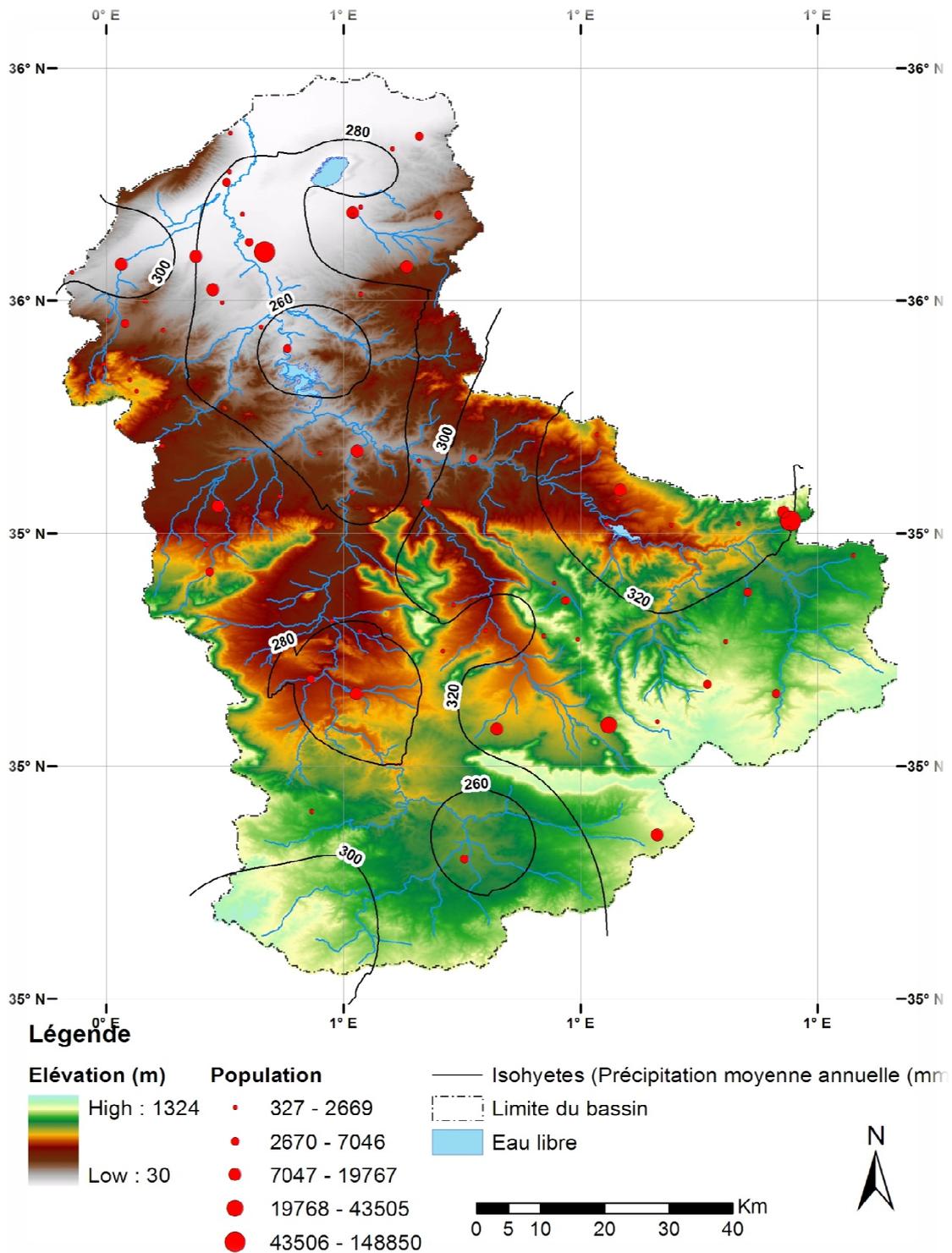


Fig. 11 : Population des principales agglomérations sur le bassin, le relief et les isohyètes des précipitations de la région d'étude.

Tableau 4: Moyennes, écarts-types et coefficients de variations des stations sélectionnées.

Code de la station	Nom de la station	Moyenne (mm)	écart-type (mm)	Coefficient de variation
PL012901	BAKHADA BGE	318	84	0,26
PL012908	TIARET DHW	531	142	0,27
PL012915	LOUHOU	354	125	0,35
PL013001	KEF MAHBOULA	358	94	0,26
PL013002	FRENDA	398	119	0,30
PL013004	AIN EL HADID	313	94	0,30
PL013005	MEHAOUDIA	277	70	0,25
PL013103	SIDI BAKHTI	500	140	0,28
PL013201	AIN KERMES	299	89	0,30
PL013202	ROSFA	219	147	0,67
PL013203	TRICINE	279	82	0,30
PL013204	SIDI YUCEF	312	140	0,45
PL013302	AIN AMMARA	266	78	0,29
PL013304	TAKHMERT DH0	256	77	0,30
PL013401	SIDI AEK DJILLALI	267	50	0,19
PL013407	HACHAM	321	120	0,37
PL013410	SIDI MED BEN AOUDA	228	56	0,24
PL013503	OUED EL DJEMAA	312	80	0,26
PL013504	SALINE OUED DJEMAA	264	77	0,29
PL013505	RELIZANE ANRH	273	68	0,25
PL013506	EL MATMAR DRS	257	73	0,28
PL013507	HILLIL	312	110	0,35

Frenda et Kef Mahboula représente la partie humide modérée (moyenne annuelle : 398 et 358 mm), Rosfa représente les haut plateaux semi-arides (moyenne annuelle : 219 mm).

La figure 12 représente les courbes annuelles des précipitations moyennes mensuelles aux stations sélectionnées dans la région d'étude. Pour ces stations, l'observation a été réalisée à la même époque (1968-2001).

Les stations de Tairret et Louhou enregistrent de forte précipitation de décembre à mai, avec un maximum en décembre et en mars pour la station de Tairret et de Louhou respectivement. A la station de Rosfa, le passage des précipitation est moins important durant l'année. On remarque aussi que la baisse des précipitations enregistrée pendant les mois d'avril à aout est frappante indiquant une saisan très sèche correspond à la période des basses eaux, où les besoins en eau d'irrigation sont assurés par les réserves.

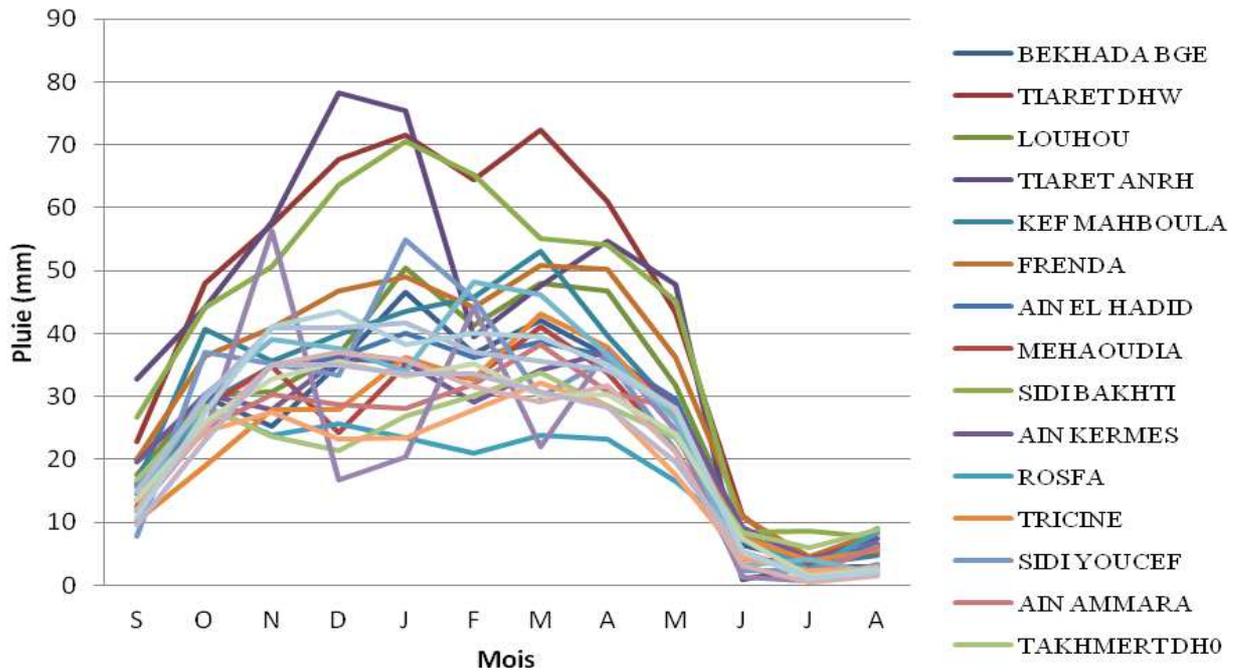


Fig. 12: Courbes annuelles des précipitations moyennes mensuelles aux stations sélectionnées dans la région d'étude.

L'évapotranspiration :

L'évapotranspiration représente l'action conjuguée de l'évaporation du sol et de la transpiration de la plante; c'est la restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre, quel que soit sa source (sols, végétaux, eaux libres). Les données des évapotranspirations sont relevées à partir des cartes des évapotranspirations mensuelles et annuelles éditées par les services de l'agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH, 2002).

Le total potentiel évaporatoire annuel serait de 1200 à 1600 mm, soit plus du double du total pluviométrique, avec un maximum de 1626 mm à la station de S.M. Ben Aouda. En saison froide, l'évapotranspiration décroît progressivement jusqu'au moment où elle atteint des valeurs inférieures à celles des précipitations. La Figure 13 précise les évapotranspirations moyennes mensuelles pour le bassin versant de Tiaret et d'Ain Kermis. La superposition des valeurs de pluviosité à celles de l'évapotranspiration potentielle permet de repérer les mois déficitaires en eau. En effet, pour le bassin versant de Tiaret et d'Ain Kermis, les mois de février à novembre présentent un déficit hydrique. Ce déficit représente un manque d'eau de près de 1 000 mm. Les mois de décembre et janvier ont un léger surplus d'eau, soit à peine 18 mm.

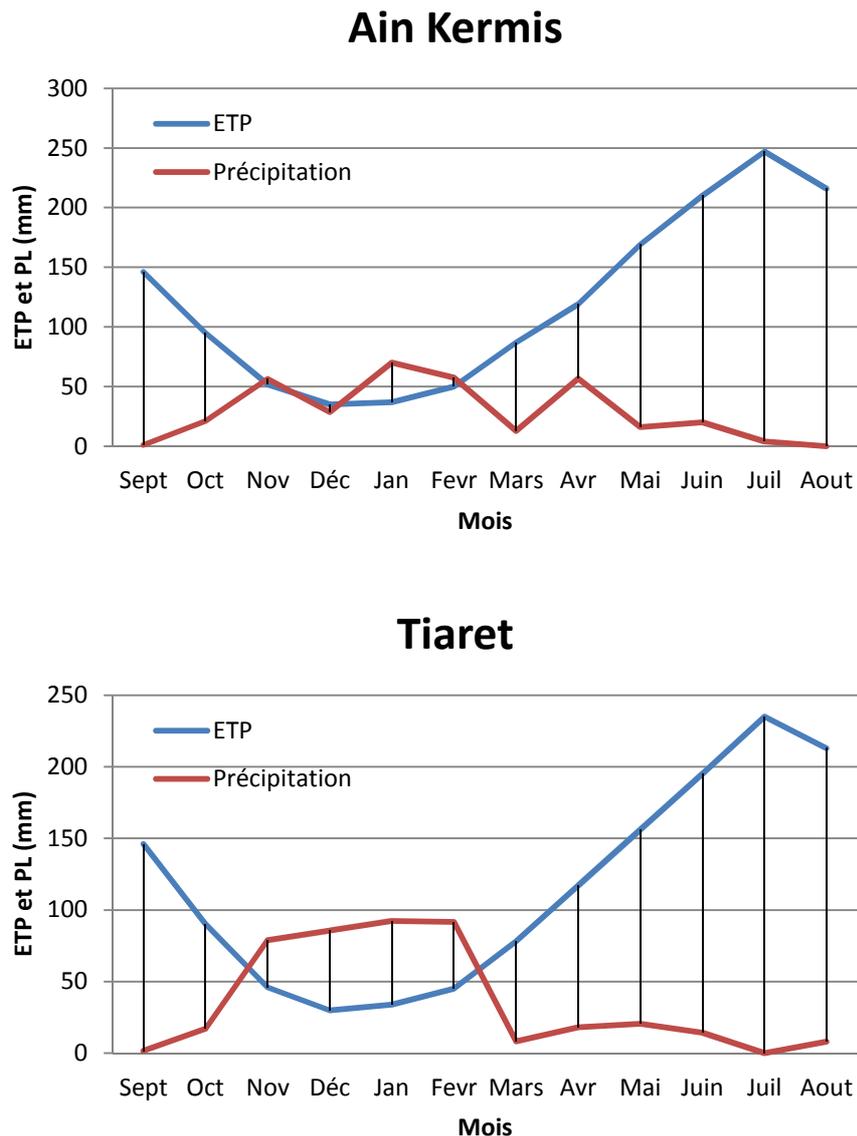


Fig. 13: Evapotranspiration potentielle et les précipitations dans le cycle annuel (1998-1999) des stations de Tiaret et Kermis.

Température

Avec la pluviométrie, la température de l'air est une caractéristique importante du climat. Les températures moyennes de la région subissent des variations régionales et saisonnières. Le contraste saisonnier est bien marqué entre l'hiver et l'été. Les minima thermiques sont généralement atteints en janvier, les maxima en juillet / août. Les données disponibles sont relevées à partir des cartes de températures moyennes mensuelles éditées par l'ANRH. Les températures moyennes annuelles les plus élevées sont enregistrées dans les plaines du nord du bassin, elle est de 17 degrés à Relizane. Les plus basses sont enregistrées dans les altitudes ; elle atteint 13°C. Les valeurs mensuelles maximales et minimales moyennes sont respectivement de 27°C et 10°C.

L'Hydrologie

D'après les études antérieures dans le bassin versant de S.M. Ben Aouda, les apports du barrage sont estimés à 120 hm^3 et le débit moyen annuel est de $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour le barrage de Bakhada, l'apport annuel est de 61.4 hm^3 . Pour une évaluation hydrologique du territoire, c'est-à-dire, une analyse comparative des bassins hydrologiques, nous avons délimité les bassins versants représentés dans la figure 14. La sélection des stations est faite selon la disponibilité des données limnimétriques. Autres stations ont été éliminées car elles sont influencées par les barrages. Les trois affluents de l'Oued Mina, l'Oued Haddad, l'Oued Abd et l'Oued Tat drainent jusqu'à leurs stations hydrométriques. Les stations retenues dans notre étude sont :

Tableau 5: Stations hydrométriques retenues :

Cours d'eau	Nom de la station	Code de la station	Période de calcul
Oued Mina	Sidi Ali Ben Amar	12909	1973-1989
Oued Tat	Kef Mahboula	13001	1953-1994
Oued Abd	Ain Hamara	13302	1967-2001
Oued Haddad	Sidi Aek Djillali	13401	1969-2001

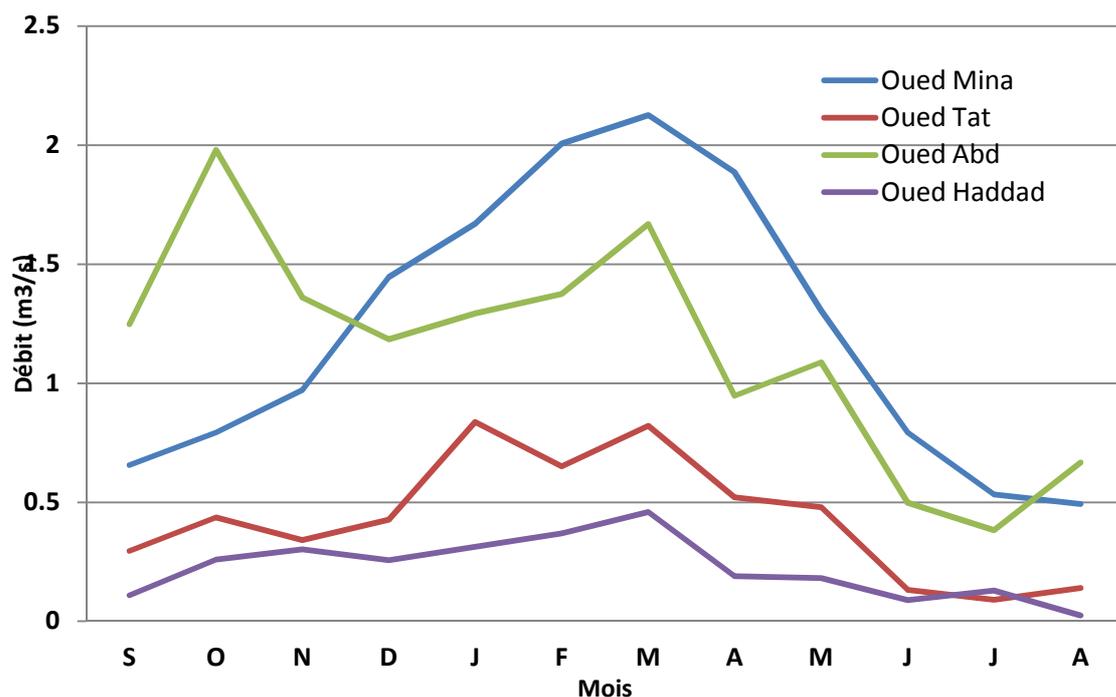


Fig. 14: Courbes annuelles des débits moyens mensuels des crues.

D'après la figure 14, on constate que la courbe annuelles des débits d'écoulement moyens mensuels indique une tendance plus grande aux crues de l'Oued Mina et l'Oued Abd, alors que l'Oued Haddad et l'Oued Tat l'emporte légèrement en hiver. C'est seulement pendant les mois d'été, de juin à aout que les crues des trois sous-bassins sont comparables.

4.3.2. Topographie et paramètres physiographique

Le développement de techniques modernes d'acquisition de mise en disposition d'information digitales a rendu possible la représentation de la topographie de milieu par le biais de modèle numérique d'élévation (DEM) et de terrain (MNT) par le biais de données satellitaires. Ces informations servent de plus en plus à la description des caractéristiques physiques des bassins versants et à la cartographie numérique.

Dans notre étude, le modèle numérique d'élévation en format SRTM Version 3 (Shuttle Radar Topography Mission ou images satellitaires optique et radar), a été utilisé comme source de donnée numérique pour la création d'un modèle numérique de terrain MNT. Les données en format SRTM sont importées dans un SIG (Global Mapper V 11) afin de les caller et les interpoler avec un maillage voulu. A partir de l'échantillon des points relevé de deux cartes topographiques (1/50000) couvrant la région d'étude, Le modèle numérique a été appelé afin d'avoir une précision maximale.

Modélisation hydrologique du bassin :

Les données numériques d'élévation obtenues sont introduites dans un modèle hydrologique intégré dans un SIG afin de délimiter le bassin et les sous bassins drainés par les différents cours d'eau existants. Deux modèles différents ont été utilisés dans le cadre de notre étude :

- Watershed Modeling System (WMS) qui est un SIG permet de délimiter les lignes de partage entre les bassins et de déterminer les différentes caractéristiques morphométriques.
- Soil and Water Assessment Tool. Cet outil permet de déviser un grand bassin versant en des sous bassins selon les caractéristiques physiques et l'état de surface.

Génération des bassins versant :

Le bassin de l'Oued Mina a été délimité à partir du modèle numérique de terrain en utilisant le modèle WMS. Ensuite, les différents sous bassins sont délimités en fixant l'exutoire des oueds (barrage ou station de jaugeage). La figure 16 représente les résultats de la modélisation. Le bassin de l'Oued Mina est divisé en trois sous bassins qui drainent les cours d'eau jusqu'aux barrages. La figure 15 montre les sous bassins contrôlés par les stations hydrométriques utilisées par la suite de l'étude.

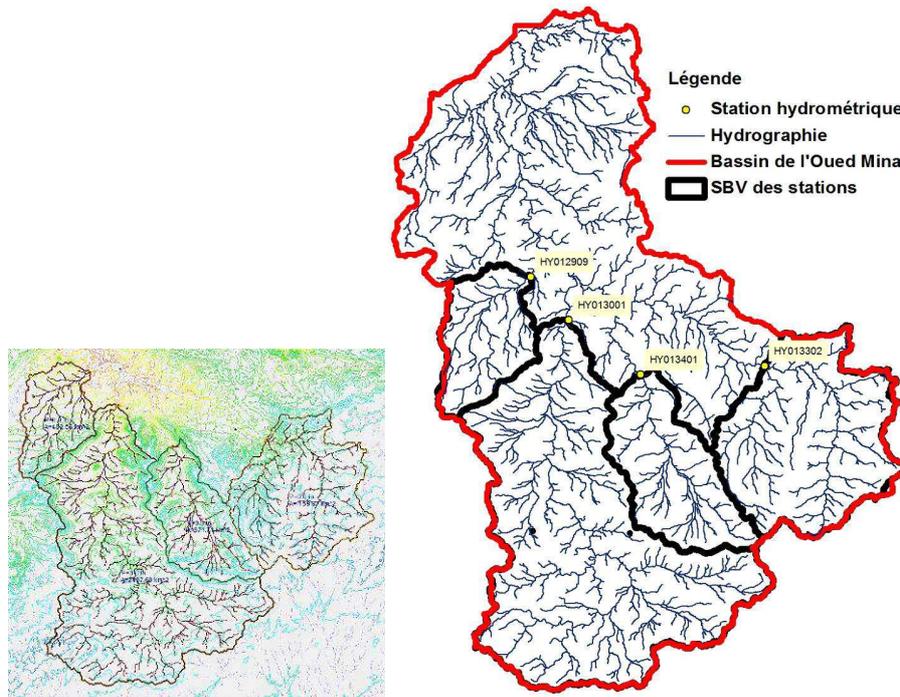


Fig. 15: limites du bassin et les sous bassins déterminée par WMS.

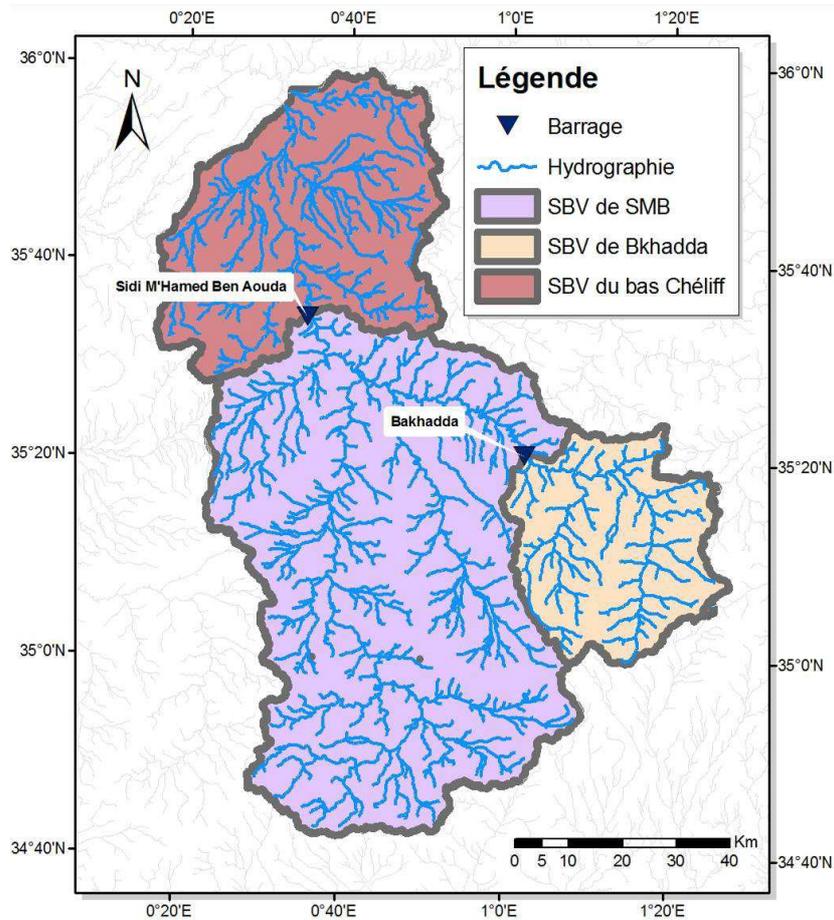


Fig. 16: Sous bassins des barrages existant dans la région d'étude et le réseau hydrographique (les barrages sont considérés exutoires).

Le module de SWAT intégré dans ArGIS 9.3 génère automatiquement quatre couches superposées selon les caractéristiques topographiques :

- La couche de la limite du bassin avec des attributs appropriés (surface, périmètre) ;
- La couche de l'Oued principale avec les principaux affluents (attributs : longueur, altitude max et altitude min, la pente).
- La couche des sous bassins versant générés automatiquement selon les paramètres physiographiques (attributs : superficie, périmètre, pente moyenne, altitude min, max et moyenne) ;
- La couche des cours d'eau le plus long des sous bassins (attribut : longueur).

Le résultat de ce procédé est représenté dans la figure 17.

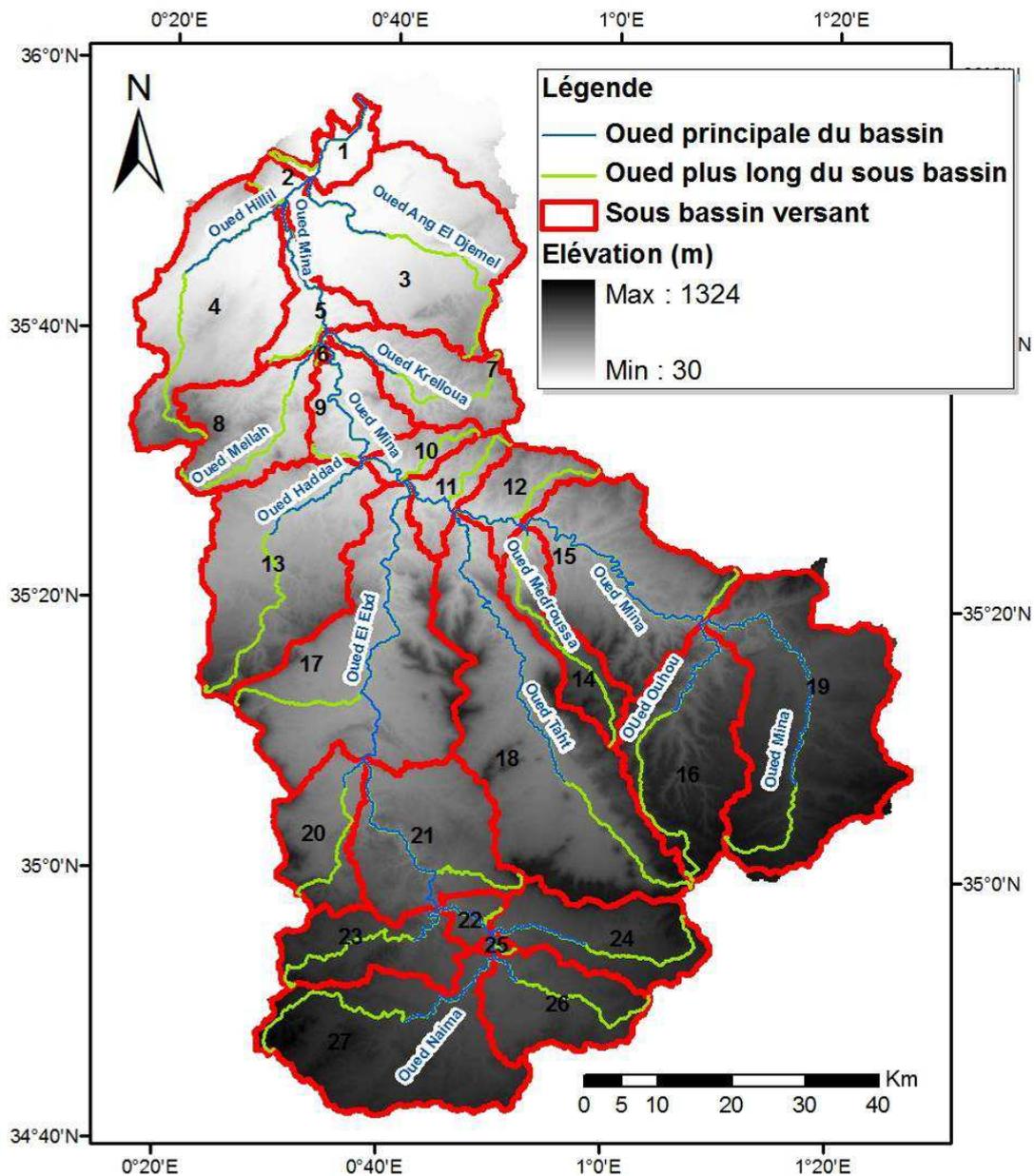


Fig. 17: Sous bassins versants délimités suivant les caractéristiques topographiques et morphologiques de la région d'étude.

L'utilisation du modèle numérique de terrain (MNT), a permis de réaliser un certain nombre de cartes thématiques à savoir, carte des pentes, carte des expositions, carte du réseau hydrographique.

Réseau hydrographique :

Le bassin de l'Oued Mina draine une superficie de 8200 km² comprise depuis les hautes terres (monts de Frenda) jusqu'à la mer Méditerranée par le biais du Oued Chélif (33 m). Les principaux affluents prenant naissance à partir des montagnes et se déversant dans l'Oued Mina sont :

- Oued Abd, prend naissance des monts à partir des monts de Sidi Youcef et Boudfir et draine le djebel d'Argoub, Toukiret, Moualek et Djebel Maida.
- Oued Tat draine les monts de Kaf Safsaf passant par les monts de Keskas et Coulamzan.
- Oued Haddad draine les monts de Loukda.
- Oued Kreloua, draine les monts de Sidi Yahia et de Bou Barha.

La figure 18 représente le profil au long de l'oued Mina. A 200 m d'altitude se situe le barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda sur l'oued Mina qui rejoint l'oued Chélif environ 80 Km à l'aval du site du barrage. A quelques kilomètres en amont du barrage de S.M. Ben Aouda, l'oued mina est contrôlé par le barrage de Bakhada (à 600 m) qui draine un bassin de 1300 Km².

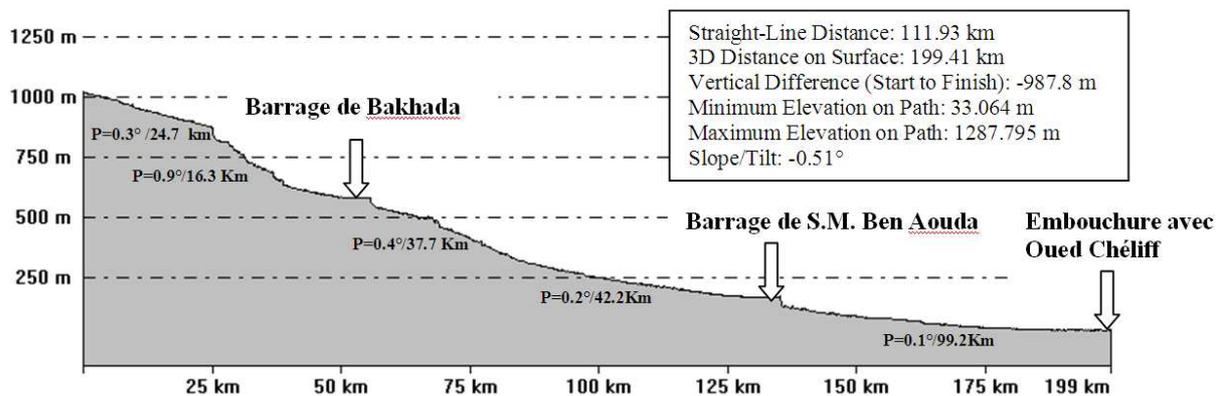


Fig. 18: Profil du cours d'eau principal du bassin versant.

La figure 19 représente la courbe hypsométrique de l'Oued Mina. Elle représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. La dénivelée maximale des terres, de même que celle des terres à 5% et 50% d'altitude, reflète la présence d'un massif montagneux car elles atteignent plus de 1200 m et 700 m respectivement. De ce fait, La majorité du sud de la région d'étude est caractérisée par un relief relativement doux, comme elle exprime la dénivelée des terres qui atteint 500 m en amont du barrage de Bakhada. En aval du barrage de S.M. Ben Aouda, les terres sont caractérisées par un relief plat qui représente la vallée de l'Oued Mina.

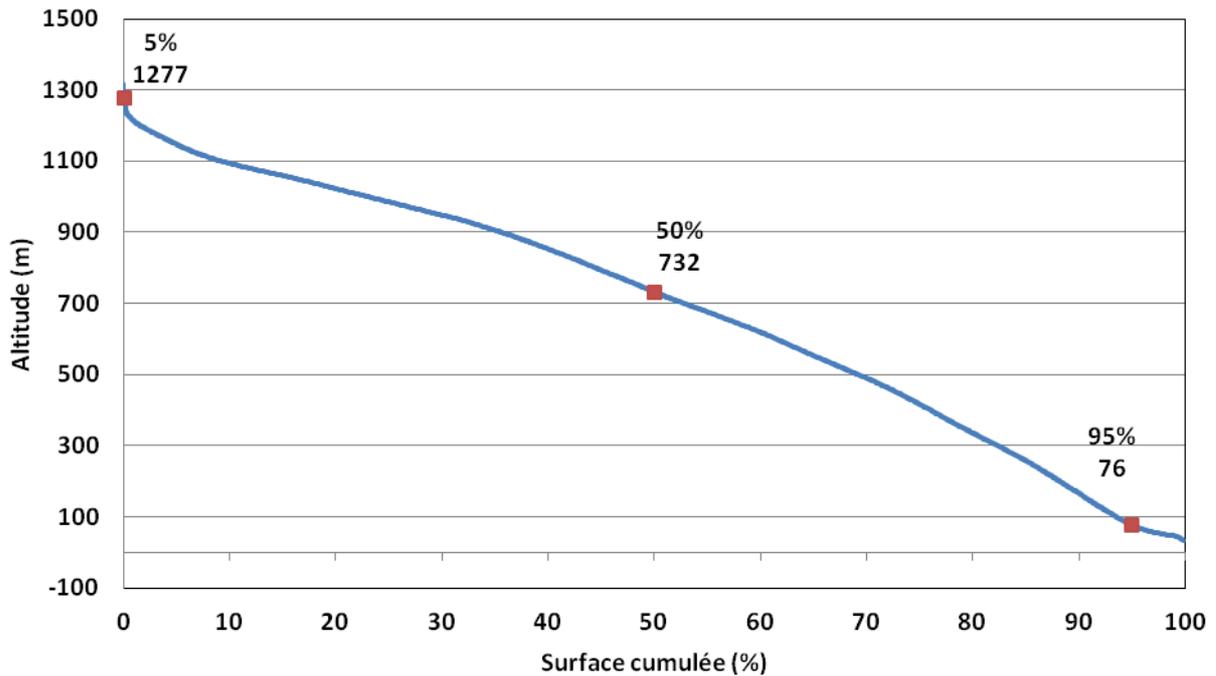


Fig. 19: Courbe hypsométrique de l'Oued Mina.

Tableau 6: Les principales caractéristiques physiographiques du bassin.

Superficie du bassin versant (Km ²)	8162.98
Périmètre du bassin versant (Km)	674.28
Le plus long talweg (Km)	199
Indice de compacité de Gravelius (KG)	2.09
Longueur du rectangle équivalent (L)	125
Largeur du rectangle équivalent (l)	65.3
Altitude max (m)	1324
Altitude min (m)	30
Élévation moyenne (m)	673.05
Altitude à 5% de la superficie du bassin (m)	1277
Altitude à 95% de la superficie du bassin (m)	76
Indice de pente global (Ig)	9.976
Dénivelée spécifique (Ds)	1201
Densité de drainage (Dd)	2.5

4.3.3. Ressources en eau souterraine

De nombreuses formations géologiques contiennent des eaux souterraines, les plus anciennes sont attribuées au jurassique et les récentes correspondent aux alluvions Quaternaire. Les systèmes aquifères existants dans la région d'étude sont représentés dans la figure 20. Le plus grand système se situe au Sud-Ouest du bassin sur les monts de Béni Chougrane, les monts de Frenda et le plateau de Saida. Ils sont répartis sur une formation calcaire de l'âge jurassique. C'est des nappes Karstiques d'une perméabilité moyenne. Les potentialités de ces aquifères est estimé à 8.4 millions de mètre cube par an avec 24 forages recensés entre la région sud et les calcaire de Kalaa. Le deuxième plus grand aquifère se caractérise par une formation

sédimentaire alluviale. Il est étalé sur la plaine de la Mina et la plaine de Griss. Ces potentialités annuelles sont estimées à 11 hm³, exploitées par 74 forages avec un volume exploité de 8.36 hm³/an (ABH, 2004)

Les alluvions des cours d'eau représentent aussi un aquifère important. En effet, les réseaux hydrographiques du Haddad, de l'Abd et du Tat se sont ajusté à niveau de la Mina, ont fortement incisé des plateaux et des plaines d'accumulation susceptibles d'être bon aquifères.

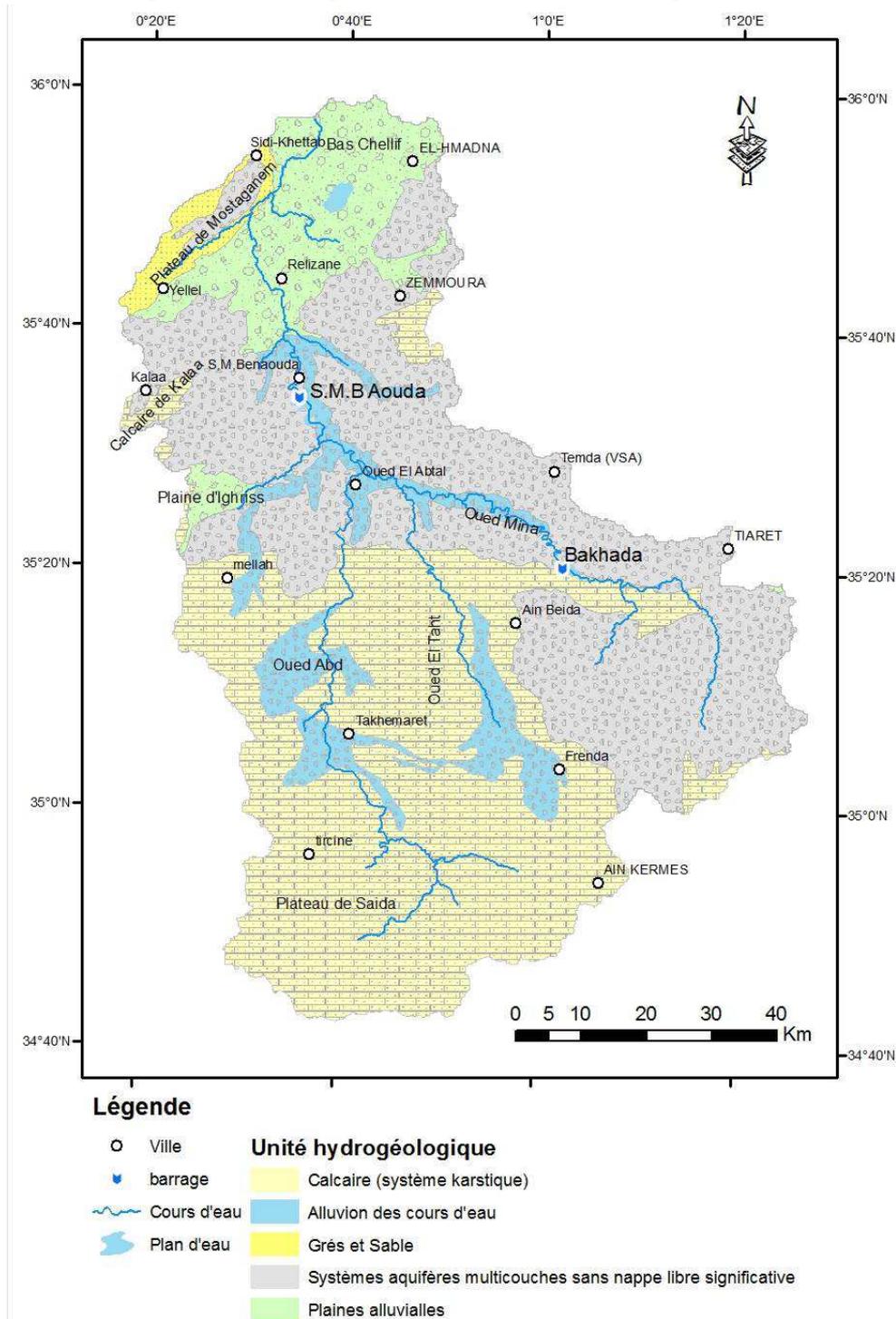


Fig. 20: Unités hydrogéologiques du bassin versant de l'oued Mina à la confluence du Cheliff.

4.3.4. Ressources en eau superficielles

Barrage de S.M. Ben Aouda (SMB)

Le Barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda est construit en 1978, il est considéré comme importante ressource hydrique de la région car il assure, en première position, l'alimentation en eau potable pour les villes qui se trouvent en aval et en deuxième lieu, il répond aux besoins agricoles par des lâchés d'irrigation modérées durant la saison étalant du printemps à l'automne et renforcées en été pour le périmètre de la mina.

La retenue du Barrage avait à l'origine un volume total de 241 hm³, mais cette valeur a été réduite avec le temps jusqu'à 153 hm³, la retenue reçoit un taux d'envasement considérable de l'ordre de 4 hm³/an. La figure 21 représente l'évolution de la cuvette du barrage S.M. Ben Aouda. Cette évolution indique bien la gravité de l'envasement qui est due principalement à l'érosion en amont. Le volume initial était 235 millions de m³ en 1978, après 8 années, le volume utile de la retenue a diminué de 11 millions de m³. La quantité importante de vase piégée dans la retenue a réduit considérablement sa capacité et ceci durant 18 années après 1986.

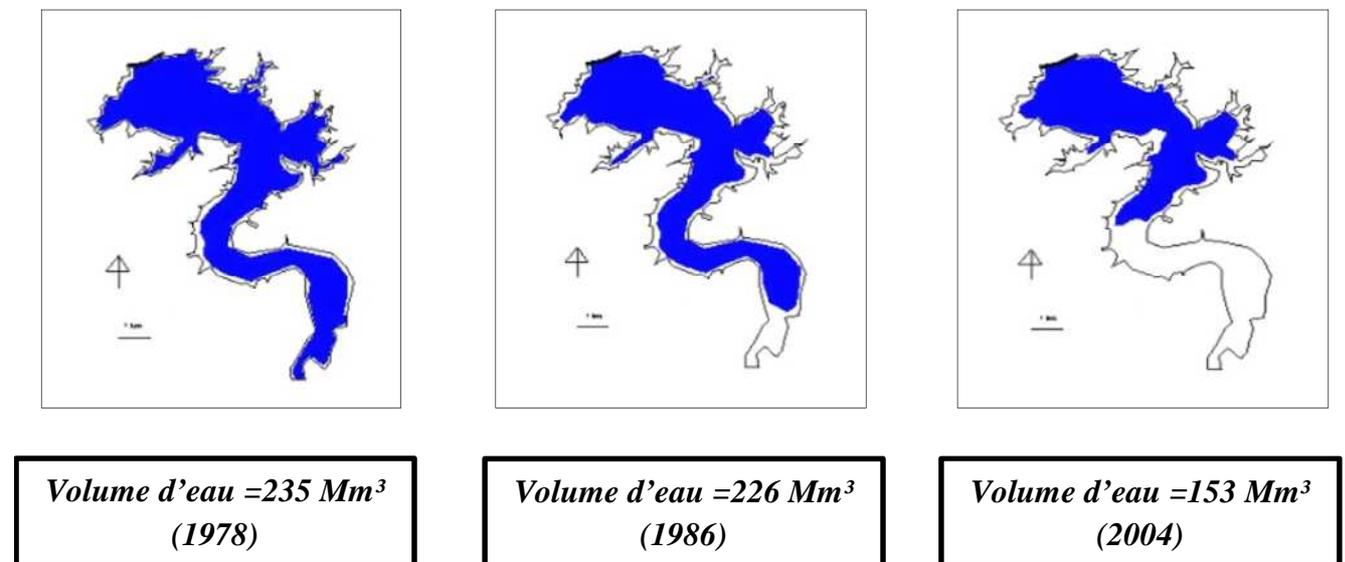


Fig. 21: Evolution de la morphologie de la cuvette et de la surface en eau libre du barrage Sidi M'Hamed Benaouda (Remini et Bensafia, 2011).



Fig. 22: Photo du barrage de S.M.B. Aouda (Toubel, 2012).

Barrage de Bakhada :

Le barrage de Bakhadda se situe à 32 kilomètres à l'Ouest de la ville de Tiaret, construit en 1936 est destiné à l'alimentation en eau potable et l'irrigation de la région de Tiaret. C'est un barrage en enrochement d'une capacité initiale de 56 hm^3 . Le taux d'envasement de la retenue de ce barrage est estimé à $0.27 \text{ hm}^3/\text{an}$. La capacité utile après le levé bathymétrique de 2004 est estimée à 39.94 hm^3 .

4.3.5. Végétation

Le couvert végétal de la région d'étude offre une grande diversité spatiale qui est influencée par le modelé des terres et les écarts climatiques induits par la proximité du Sahara. Les zones agricoles occupent des superficies presque aussi importantes, soit environ 22% du territoire. Elle concerne au premier lieu les plaines agricoles de la Mina de la wilaya de Relizane, de Griss de Mascara et plusieurs et quelques communes des plateaux de Saida et de Tiaret. Ce type de couvert est suivi par les steppes qui se concentrent au Sud du bassin et qui totalisent environ 17% du bassin. Le couvert forestier est concentré dans une région de pentes fortes au Nord-est du bassin, de même qu'au Sud-est. Les formations de maquis/garrigue complètent le cortège des strates dominantes car elles totalisent environ 12% du bassin. Ces formations sont particulièrement imbriquées au matorral, quoiqu'un îlot plus uniforme se distingue dans la zone de steppes au Sud-ouest du bassin. Finalement, les sols à nu représentent environ 5% du territoire. Ce pourcentage serait supérieur si l'on y comptabilisait les zones de matorral qui ne comportent qu'une très faible couverture végétale.

4.3.6. Périmètre d'irrigation de la Mina

Le périmètre de la d'irrigation de la Mina est considéré comme un des plus anciens périmètres en Algérie. Il a été créé par arrêté du 1er Avril 1943 son aménagement a été effectué entre la période 1936-1944 et d'une superficie classé de 13647 ha. Une phase d'aménagement et extension du périmètre a été entamée de 1985 à 1989 avec la réalisation des canaux d'adduction et l'extension d'une superficie de 1025 ha. Entre 2003 et 2007 le périmètre a été réaménagé jusqu'à atteindre ainsi une superficie équipée de 17235 ha

Localisation

Le périmètre est localisé dans sa totalité dans la wilaya de Relizane traversant ainsi les communes de S.M. Ben Aouda, Relizane, Oued Djemaa, Ben Daoud, Matmar, Yellel et Belhacel.

Ressources en eau

Le périmètre est alimenté à partir du barrage de S.M. Ben Aoud Aouda d'une capacité Théorique de 250 HM³ avec un volume utile de 153 Hm³ et de douze forages d'irrigation réalisés dans le cadre du programme d'urgence 2005 à 2006 d'un débit varie entre 7 à 18 L/S.

Superficies

- Superficie classée (18275 ha)
- Superficie équipée (17235 ha)
- Superficie Irrigable (17235 ha)

Le périmètre est composé de canaux principaux appelés adducteurs répartis comme suit :

- canal tronc commun : 5.500 Km avec canal, tunnel, aqueduc Mina.
- canal principal rive droite (CPRD) :35.00 Km composé de siphon Mina, Khelloug.
- canal principal rive gauche (CPRG) : 29.00 Km composé de siphon Malah.

Il est équipé aussi de divers ouvrages de régulations à savoir :

- partiteur principal
- bassin canal de 1.5 km de longueur
- 15 ouvrages dissipateurs d'énergie
- une station de pompage et 12 forages d'irrigation

Réseau d'irrigation

Le périmètre est partagé en 10 secteurs équipés de canaux et conduites d'irrigation de différents diamètres avec des équipements hydromécaniques (prises, vannes, modules) d'un linéaire total de :

- périmètre réaménagement : 182 KM
- Périmètre extension : 257 KM



Fig. 23: Photo : Extension du périmètre d'irrigation de la Mina.

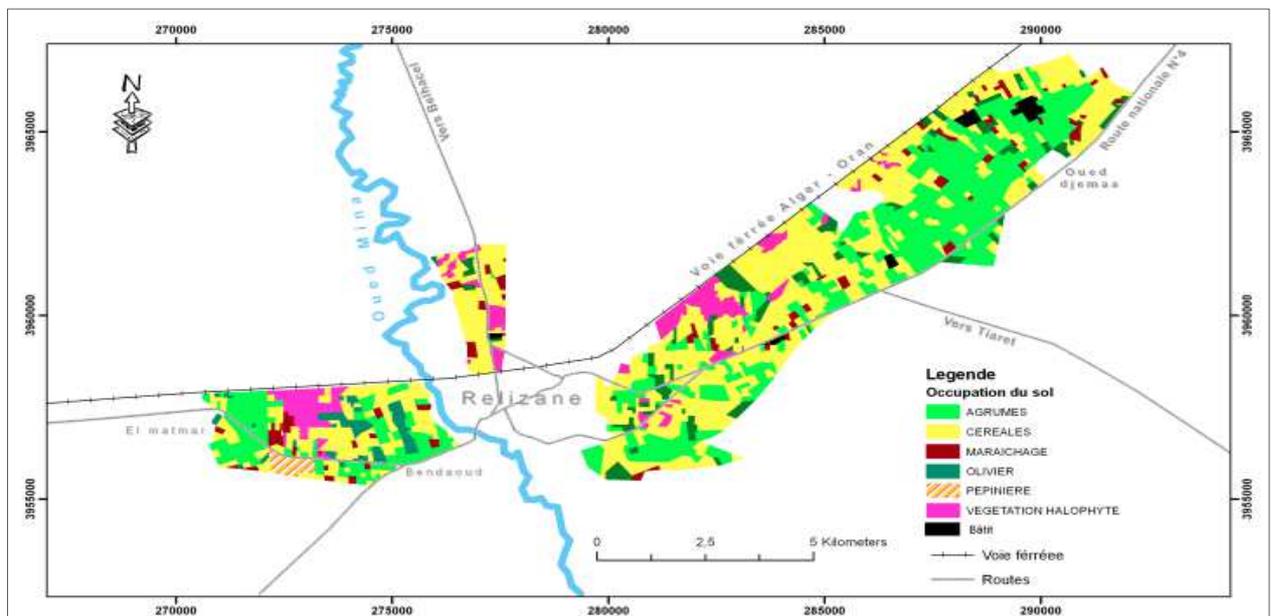


Fig. 24: Occupation du sol du périmètre d'irrigation de la Mina (Source INSID).

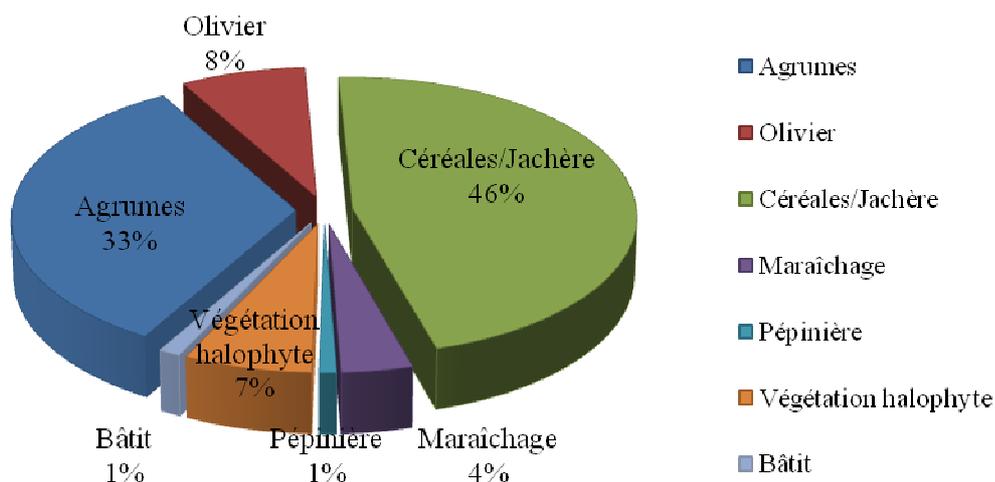


Fig. 25: Répartition d'occupation du sol du périmètre d'irrigation de la Mina selon la surface (Source INSID).

La grande partie des terres sont destinée à la céréaliculture qui couvre environ 46% de la superficie total du périmètre. Ces terres peuvent être des jachères hors compagnie. L'arboriculture occupe aussi une grande superficie occupée par les agrumes et oliviers.

Ressource en sol :

La région d'étude procède une ressource importante des sols qui peuvent être des terres agricoles et présentant une formation lithologique et pédologique idéales pour l'agriculture. Les surfaces agricoles utiles (SAU) ou les terres susceptibles d'être cultivées sont représentées dans la figure 26. Les SAU occupent environ 95% de la superficie de la wilaya de Relizane, suivi par la wilaya de Mascara avec un pourcentage de SAU de 86 %.

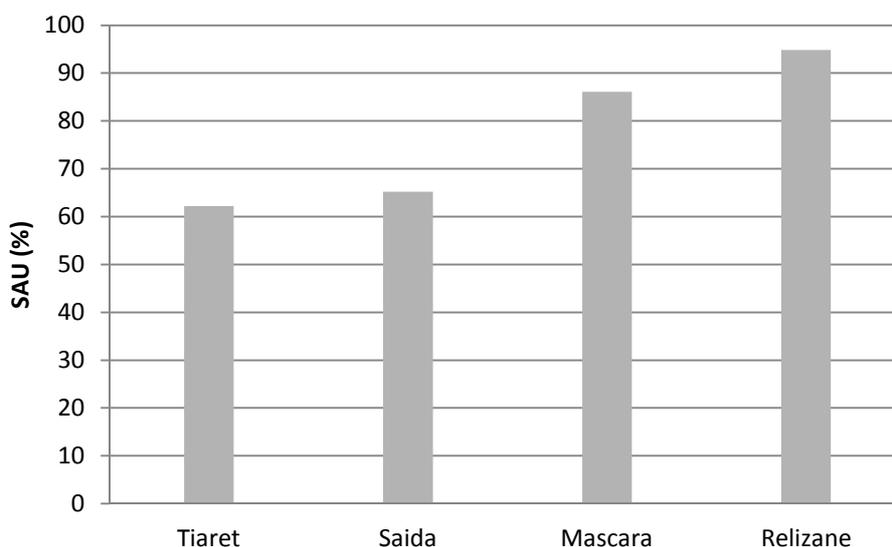


Fig. 26: Répartition des surfaces utilisées par wilaya. Les SAU occupent environ 95% de la superficie de la wilaya de Relizane, suivi par la wilaya de mascara avec un pourcentage de SAU de 86 %.

4.3.7. Zones géographiques

La zone d'étude s'étale sur deux domaines naturels bien distincts. L'atlas tellien au Nord et les hautes plaines steppiques au Sud. Dans ce contexte la région d'étude est délimitée sur le plan naturel au nord et nord-est par les monts de l'Ouarsenis et les monts de Dahra. À l'Ouest par les monts de Béni Chograne et de Saida. Au sud, la limite s'ouvrant sur les hautes plaines steppiques (Plateaux de Sersou et plateaux de Saida). Le nord du bassin est dominé par les plaines alluviales d'une altitude inférieure à 200 m quant au sud dominant les plateaux steppiques élevés. Entre les deux domaines s'étalent les paiements et chaînes élevées. Ce territoire n'a donc pas de caractère homogène : il se caractérise par une alternance de milieux très contrastés dont les grands ensembles sont au nombre de trois :

Le milieu montagnard: il est constitué par une série de djebels généralement orientés vers le nord-est, peu accentués et aux dénivellations peu importantes conférant à l'ensemble orographique une allure tabulaire ondulée. Ces domaines ondulés sont incisés par une série d'oueds courants dans des fonds de vallées: il s'agit d'ouest Abd, Haddad et Taht qui débouchent sur les plaines via l'Oued Mina. Au sud de ces plateaux ondulés se trouve une zone de contact avec les hautes plaines steppiques. Les plateaux de Saida et de Sersou qui se situent à des altitudes très peu variables d'une moyenne de 1200 m.

Les plaines: elles se localisent dans la partie nord de la région d'étude à moins de 200 m d'altitude et concernent principalement la wilaya de Relizane. Il s'agit de la plaine du bas Mina et du bas Chélif. Cette région est caractérisée par une agriculture intense (périmètres d'irrigation).

Le milieu steppique: il est caractérisé par des altitudes élevées (1100 m en moyenne), les plus hautes steppes atteignent 1300 m et les plus basses oscillent entre 1000 et 1100 m, ce qui signifie que les dénivellations sont peu importante, soit moins de 200 m. Cet espace est caractérisé par l'aridité du climat et la faiblesse des précipitations. Le substrat est à dominance calcaire.

4.3.8. Aspects orographiques

Le relief : le relief de la zone d'étude est assez diversifié puisqu'on y distingue des plaines, des plateaux et une zone montagneuse. Ces entités façonnent des milieux naturels découpant l'espace de la zone en unités physio-géographiques.

La pente : la potentialité et les limites d'utilisation du territoire dépendent dans leur majeure partie de la pente puisque celle-ci contribue à la détermination des possibilités d'érosion en relation avec d'autres facteurs de mécanisation des cultures, des modalités d'irrigation, des possibilités de pâturage, de l'installation et le développement de la végétation de reforestation (Lopez, 1976).

La carte des pentes représentée dans la figure 28 est établie sur la base du modèle numérique de terrain, la pente est subdivisée en 4 classes :

- Classe 1 : pentes 0-5% caractérise l'ensemble des terrains dont la topographie est généralement plane. Ce sont les fonds de vallées, les plaines et les plateaux. Cette classe témoigne la stabilité des terrains avec un risque d'érosion faible. Elle couvre 48 % de la superficie totale de la région d'étude. A l'exception des zones steppiques au sud, sur ces terrains c'est la céréaliculture qui domine.
- Classe 2 : pentes 5-12% caractérise généralement un relief montueux, qui peut être des plateaux ou bas de collines. Les risques d'érosion sur ces terrains restent faibles mais peut être fort avec la présence des activités agricoles principalement céréaliculture qui domine l'occupation du sol.
- Classe3 : pentes 12-30% caractérise le plus souvent les zones de piémonts qui sont le prolongement des massifs montagneux. Ce sont généralement des terrains de parcours et des terrains forestiers. Les risques d'érosion sont présents avec apparition des signes dus au ruissellement diffus. Ces terrains occupent 20 % de la superficie totale
- Classe4 : pentes supérieures à 30%, représente les hauts piémonts et les zones montagneuses, de forte déclivité généralement couverte par la végétation forestière.

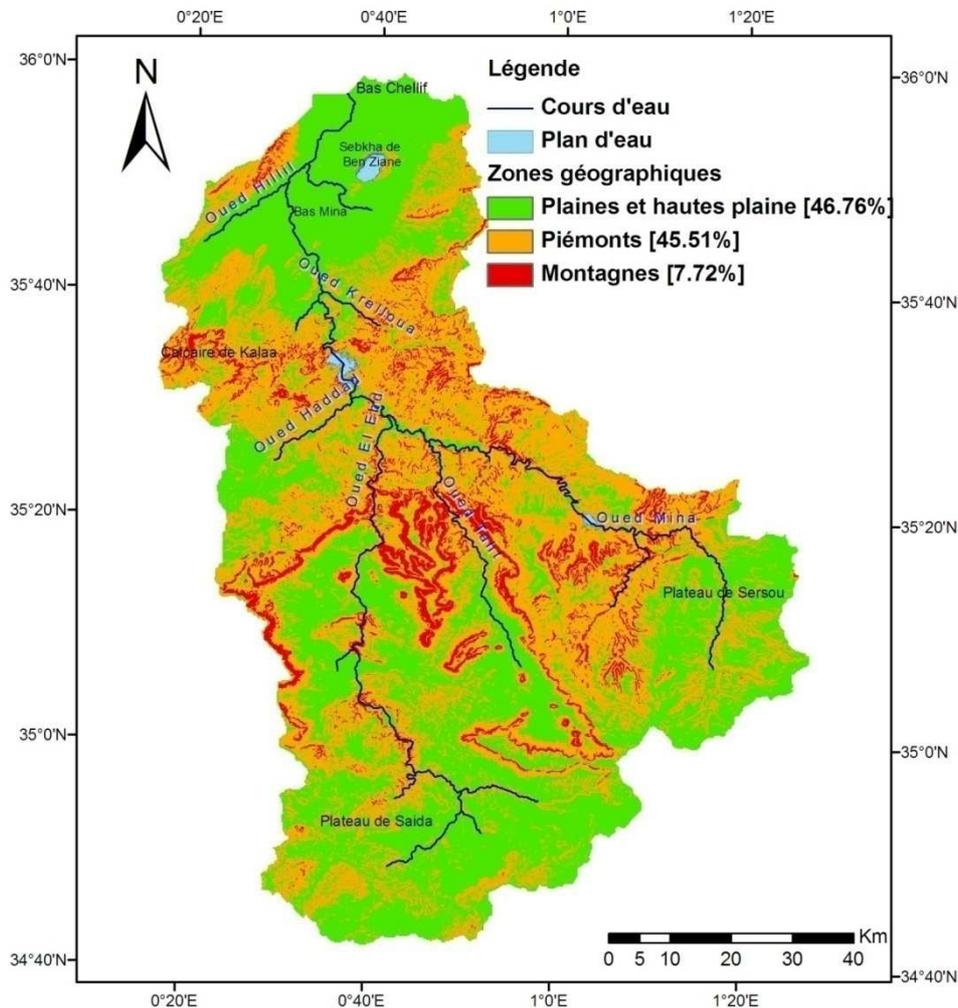


Fig. 27: Les principales zones géographiques de la région d'étude.

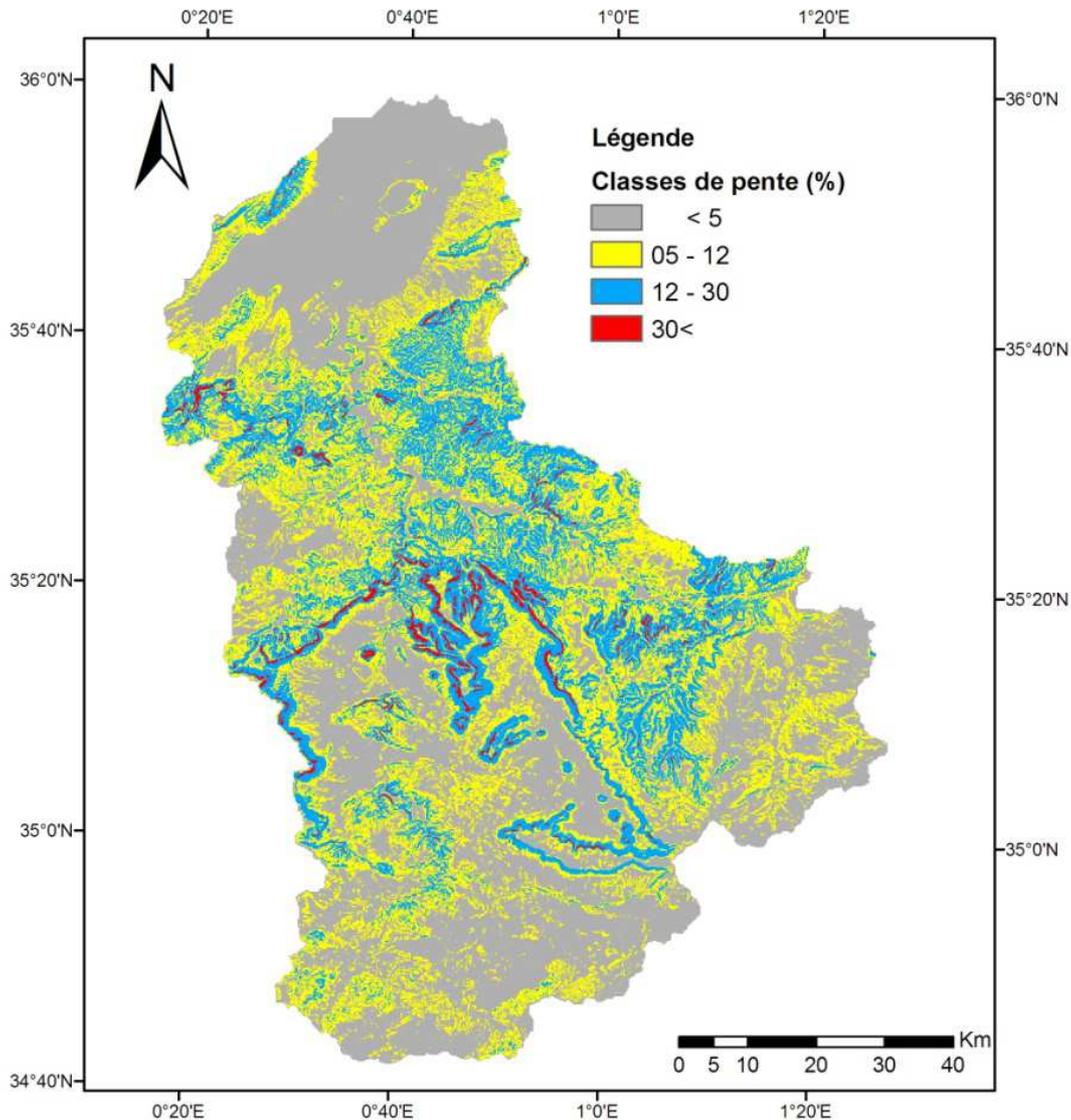


Fig. 28: Carte des classes des pentes élaborée à l'aide du MNT.

4.3.9. Lithologie

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

La lithologie du bassin versant de l'Oued Mina a été étudiée par la GTZ dans le cadre d'un projet de collaboration entre l'Allemagne et l'Algérie (GTZ, 1987). La caractérisation lithologique a été réalisée par l'interprétation des photos aérienne et satellitaires. D'après GTZ, le transport des sédiments s'explique par la lithologie de la région étudiée. Dans des zones principalement constituées de marnes (en amont du barrage de S.M. Ben Aouda), l'érosion hydrique se manifeste, avec l'absence des obstacles naturels, du fait que la végétation est absente et surtout pendant les averses de l'hiver.

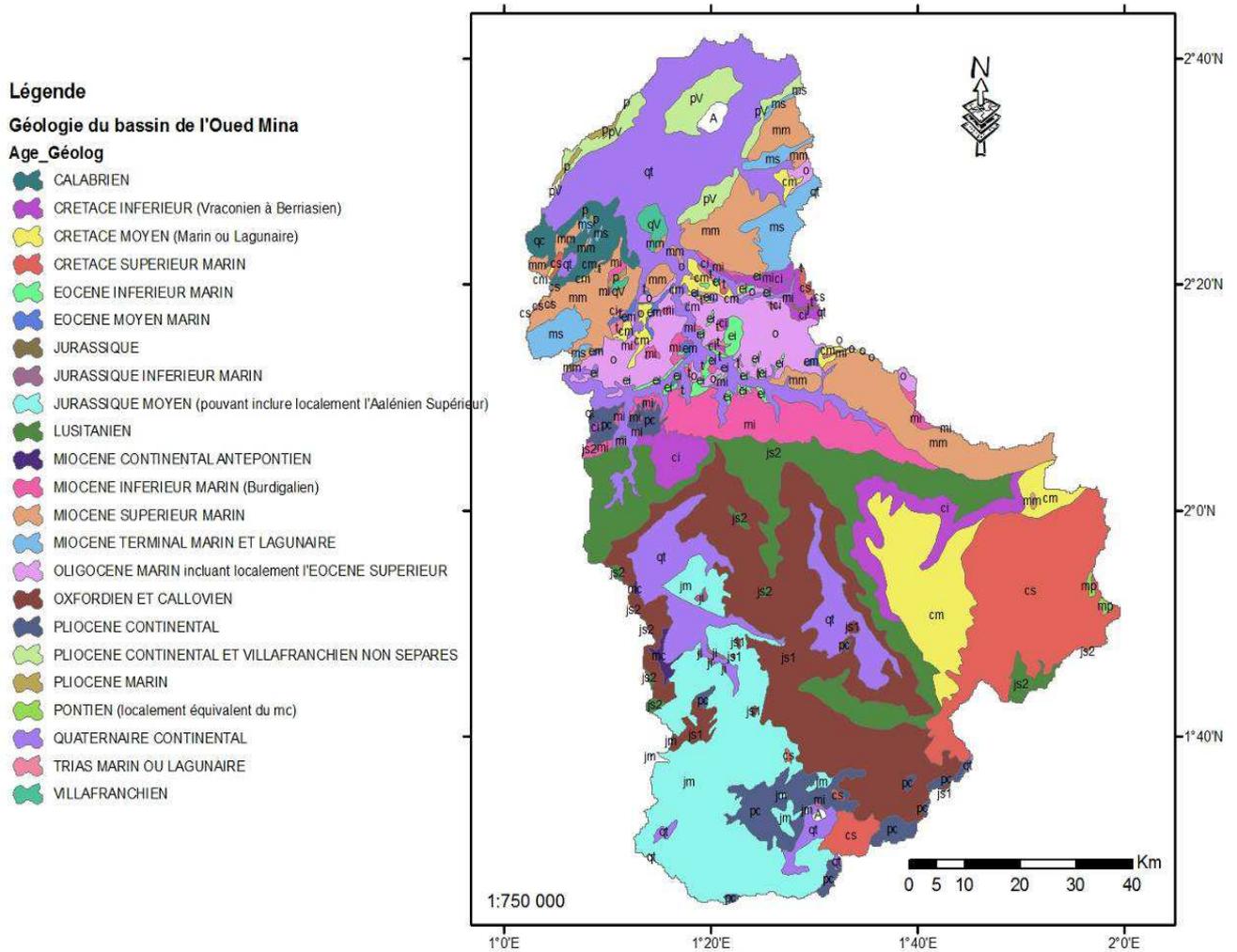


Fig. 29: Carte géologique de la région d'étude élaborée suite à une digitalisation de la carte géologique de 1 :50000.

4.4. Description socio-économique de la région d'étude

Le bassin versant de l'Oued Mina recouvre une superficie de 8200 Km² répartie sur cinq Wilayas, à savoir, la Wilaya de Tiaret, Mascara, Relizane, Saida et Mostaganem. Cette dernière occupe une petite superficie du bassin qui peut être négligé dans ce présent descriptif car elle est très faiblement représentée de point de vue de la taille de la population (Figure 30).

La wilaya de Tiaret occupe 48.22% de la superficie totale de la région d'étude, suivie de la wilaya de Relizane qui occupe 26.59% du secteur. Les wilayas de Mascara et de Saida n'occupent que 15.77 et 9% de la superficie totale du bassin respectivement. La population totale de la région d'étude est estimée en 2002 à 911523 habitants et environ 1050804 habitants en 2012 dont la partie la plus importante réside dans le territoire de la wilaya de Tiaret et Relizane (figure 31). Les données de la population des communes qui occupent la région d'étude proviennent du journal officiel de la république Algérienne pour les années 2002 et 2012.

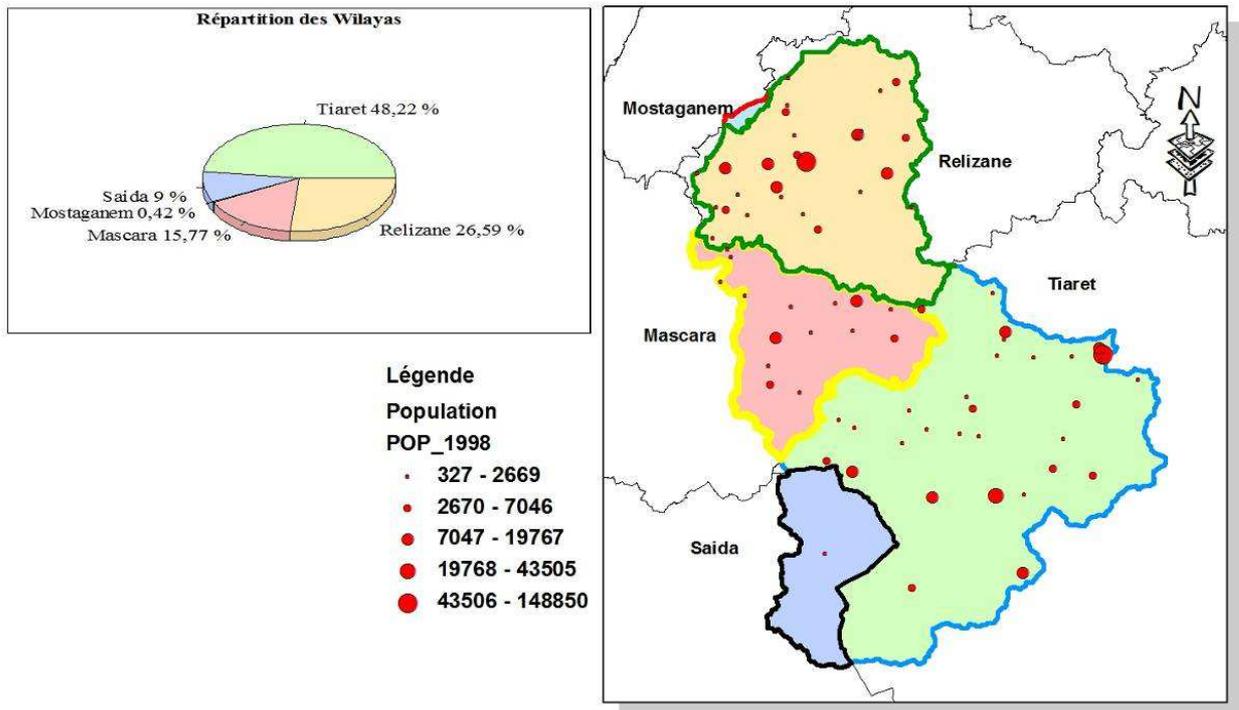


Fig. 30: Répartition des wilayas dans la région d'étude.

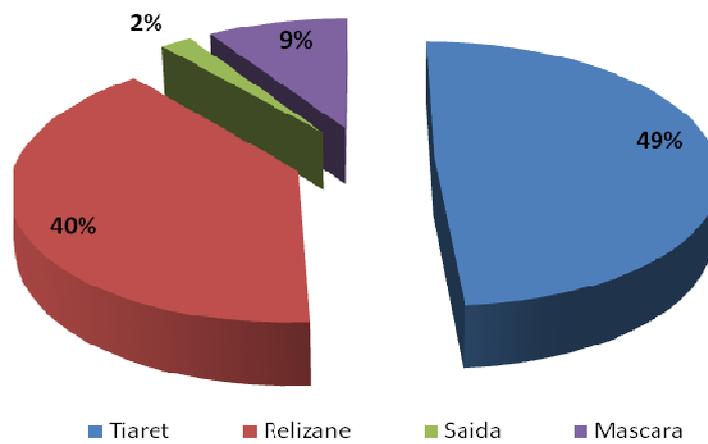


Fig. 31: Répartition des wilayas selon le nombre d'habitant.

Le bassin de l'Oued Mina couvre 60 communes réparties dans 4 Wilaya. Seules 44 d'entre elles ont été retenues car elles sont bien représentées par les limites géographiques du bassin. Les communes retenues sont représentées dans figure 32.

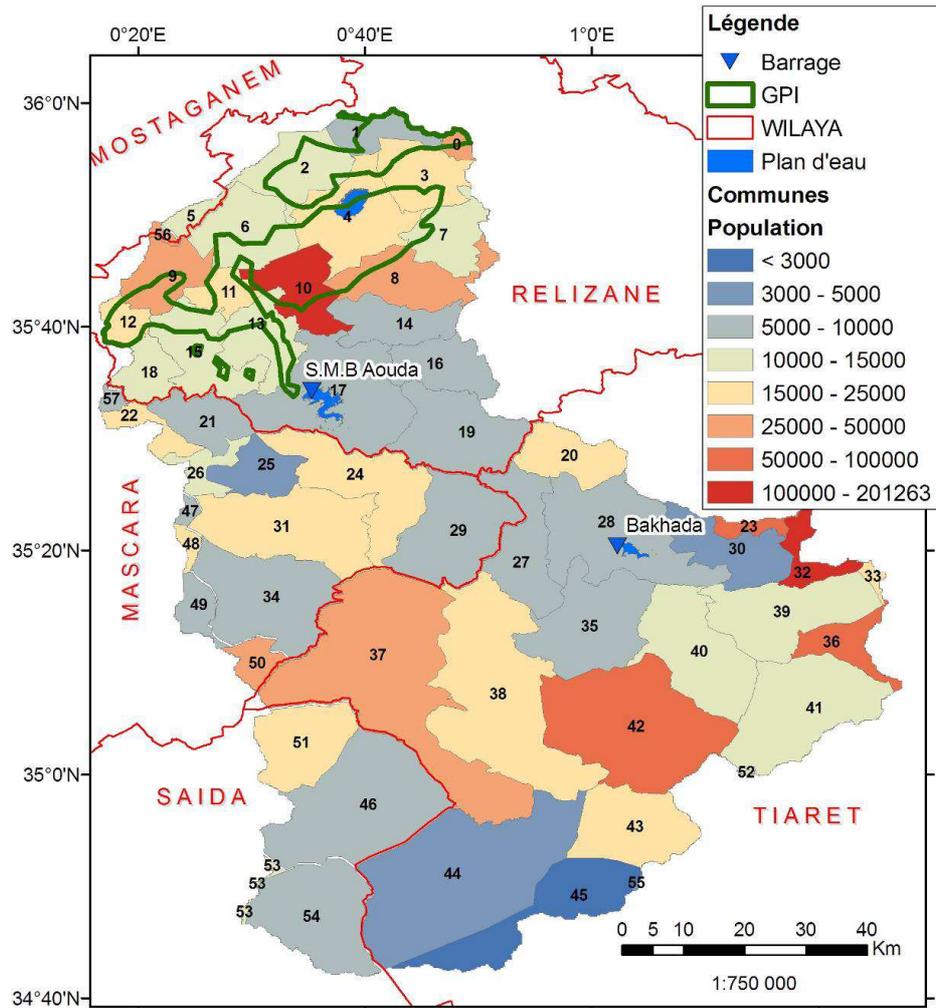


Fig. 32: Population du bassin versant de l'Oued Mina répartie par commune. Représentation du grand périmètre d'irrigation (GPI) et les ressources en eau superficielles (barrages).

Tableau 7: Liste des communes couvrant le bassin versant de l'Oued Mina avec les codes attribués à la figure 32.

N°	NOM				
0	DJIDIOUIA	15	AIN RAHMA	30	AIN FERAH
1	OULED SIDI MIHOUB	16	SIDI LAZREG	31	TAGDEMT
2	SIDI KHETTAB	17	SIDI MHAMED BENAOUDA	32	EL HACHEM
3	EL HMADNA	18	KALAA	33	TIARET
4	OUED EL DJEMAA	19	OUED ESSALEM	34	AIN BOUCHEKIF
5	SAFSAF	20	RAHOUIA	35	ZELMATA
6	BELAASSEL BOUZEGZA	21	OUED LILLI	36	SIDI BAKHTI
7	BENI DERGOUN	22	EL MENAOUER	37	SOUGUEUR
8	ZEMMOURA	23	EL BORDJ	38	TAKHMARET
9	YELLEL	24	GUERTOUFA	39	AIN EL HADID
10	RELIZANE	25	OUED EL ABTAL	40	MELLAKOU
11	EL MATMAR	26	SIDI ABDELJABAR	41	MEDROUSSA
12	SIDI SAADA	27	SEHAILIA	42	TOUSNINA
13	BEN DAOUUD	28	DJILLALI BEN AMAR	43	FRENDIA
14	OULED LARBI	29	MACHRAA SFA	44	AIN KERMES
				45	DJEBILET ROSFA
				46	MADNA
				47	TIRCINE
				48	NAIMA
				49	TEGHENNIF
				50	SIDI KADA
				51	NESMOTH
				52	GHARROUS
				53	OULED BRAHIM
				54	MEDRISSA
				55	EL HASSASNA
				56	MAAMORA
				57	SIDI ABDERRAHMANE
				58	BOUGUIRAT
				59	SEDJARARA

4.4.1. Evolution de l'emploi dans le secteur agricole par wilaya entre 2000 et 2004

Tableau 8: Mains d'œuvre destinée à l'agriculture (rapport sur la situation du secteur agricole (2004) (entre 2000 2004) source(DSA)

Wilaya	2000	2001	2002	2003	2004
Tiaret	3077	1636	3511	3442	4762
Saida	2383	2029	3465	6242	4326
Mascara	5108	3567	1294	2281	1255
Relizane	1967	2817	1305	2422	8458
Total	12535	10049	9575	14387	18801

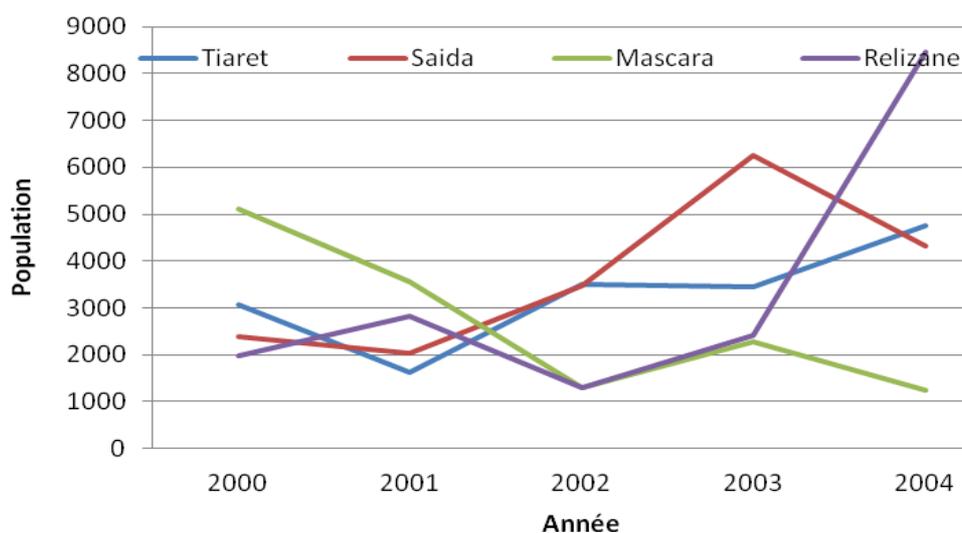


Fig. 33: Evolution de l'emploi dans le secteur agricole par wilaya entre 2000 et 2004.

D'après la figure 32, on constate que la population occupée par l'agriculture ne dépasse guère les 3000 citoyens entre l'année 2000 et 2002 pour les wilayas de Relizane, Saida et Tiaret sauf la wilaya de Mascara qui enregistre environ 5000 employés dans le secteur agricole en 2000 et ça a diminué jusqu' 1200 agriculteurs en 2002. Après l'année 2002, et avec l'effort considérable fourni par l'état Algérien pour le développement du secteur agricole par la création et l'accompagnement technique et financier des agriculteurs, on remarque l'accroissement en matière de création de l'emploi. Ce dernier a augmenté considérablement dans la wilaya de Relizane dans périmètres d'irrigation situés dans le bas Mina et le Bas Chélif. En effet, le secteur de l'agriculture a mis en place en 2000 une stratégie opérationnelle agricole élargie, à partir de 2002, au domaine rural à la faveur de nouvelles attributions. Cette stratégie appelée Plan National de Développement Agricole et Rural, a pour mission la réhabilitation des espaces ruraux et la stabilisation des populations rurales par l'amélioration de la sécurité alimentaire des ménages et le soutien au retour des populations ayant fui leurs localités pour des raisons économiques ou sécuritaires.

D'après le responsable de l'exploitation de l'office nationale d'irrigation et de drainage (ONID), les périmètres irrigués de la région a subi durant ces dernières années une utilisation

intense et que le nombre des agriculteurs enregistrés dans le programme d'irrigation atteint 2000 pour le périmètre de la Mina.

D'après la direction des services agricoles de la wilaya de Relizane, les terres agricoles sont réparties du point de vue juridique comme suit : les terres privées et la propriété de l'état. Le tableau 9 montre un exemple de la répartition de l'exploitation agricole par nature juridique de la wilaya de Relizane.

Tableau 9: Répartition des terres agricoles suivant le statut juridique (Source : DSA).

Statut juridique	Nombre Exploitations	SAT (ha)	Taux (%)
Privé	24.549	200.799	57,56
EAC	1.107	69.087	19,82
EAI	688	6.362	1,82
Fermes Pilotes	05	2.925	0,84
A.P.F.A	499	2.296	0,66
Concessions agricoles	56	266	0,08
INRA	01	77	0,02
Forêts et parcours	-	67.139	19,20
TOTAL	26.905	348.951	100

EAC : Ensemble Agricole Collectif. EAI : Ensemble Agricole individuel. INRA : Institut Nationale de Recherches Agronomique.

Les terres peuvent être de droit (de statut privé, non écrit mais reconnu par la collectivité) ou de droit privé (avec titre de propriété). La propriété relève du groupe (appropriation collective de la terre, confiée en jouissance individuelle à ses membres). Cette appropriation reconnue mais non répertoriée dans des documents cadastraux, ces limites de propriété mouvantes posent depuis longtemps des problèmes entre l'administration des forêts et les paysans (Taabni, 1994). Coincée entre la démographie et la dépossession de ses terrains par la reforestation et autres aménagements d'utilité publique, spoliée de ses droits, la population n'a eu comme solution pour survivre, que d'étendre la surface cultivée au détriment de la forêt ou des maquis, à produire du charbon de bois pour ses besoins en combustibles et à maintenir un élevage dépassant les disponibilités fourragères (Taabni, 1994).

Dans les monts de la Mina, pendant les 20 dernières années, la population a augmenté plus vite dans les agglomérations chefs-lieux et secondaires (4,9%) que dans la zone éparse (1,3%). Entre 1977 et 1987 la population a diminué de 1,5% par an dans la commune de Sidi Mohamed Ben Aouda et de 0,3% dans celle d'Oued Es Salem. La forte proportion (plus de 70%) des terroirs fortement dégradés par l'érosion dans ces communes explique en grande partie cette déprise rurale (Taabni, 1994). Les champs non travaillés sont imperméabilisés par

la croûte de battance et deviennent très favorables à la concentration du ruissellement, aux incisions régressives et au développement des ravines.

Une enquête de terrain a été effectuée au niveau des champs agricoles d'un certain propriétaire. Ce dernier a témoigné la gravité du phénomène de l'érosion et l'apparition des ravins au niveau de ces terres surtout après 1996 malgré que ces terres soient quasiment planes. En effet, cette région est exposée à une utilisation intense en plus du climat et les problèmes de drainage et de salinité.

4.5. Conclusion

La zone d'étude, d'une superficie de 8200 km², s'étale sur deux domaines naturels bien distincts. L'atlas tellien au Nord et les hautes plaines steppiques au Sud. Le Nord est dominé par les plaines alluviales d'une altitude inférieure à 200 m caractérisées par une activité agricole intense. Cette dernière, est dominée par les grandes cultures (céréales/jachère) quant au sud dominant les plateaux steppiques élevés. Entre les deux domaines s'étalent les paiements et chaines élevées. Ces activités agricoles de la région sont dépendantes des contraintes climatiques. En effet, la région d'étude est exposée à un climat semi-aride méditerranéen (pluie d'hiver, sécheresse estivale). Ses pluies sont torrentielles et irrégulières aussi bien dans l'espace que dans le temps. A cet effet, une politique d'irrigation est lancée pour combler les besoins en eau agricoles par la création de grands périmètres d'irrigation dans les plaines du Nord du bassin. La seule source d'eau d'irrigation est le barrage de SMBA. Ce dernier ne cesse de s'envaser à cause des apports importants des sédiments, estimé à 3.26 t/ha/an, dont le taux élevé arrivant de la zone des marnes (Touaibia *et al.*, 1999, Remini et Bensafia, 2011). Les valeurs de l'érosion spécifique fluctuent entre 0.5 et 36 t/ha/an dans le bassin versant de l'Oued Mina (Touaibia et Achite, 2003). Les activités agricoles s'étendent désormais à ces espaces défavorables à forte pente et à sol fragile (Taabni, 1994).

5

Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina par télédétection et SIG

5. Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina par télédétection et SIG

Dans ce chapitre, nous représenterons les procédures détaillées de la méthodologie développée pour l'estimation de différents facteurs interagissant l'érosion hydrique. Il abordera les différentes étapes de traitements numériques que nous avons suivi depuis les prétraitements, la création de la composition colorée adaptée, les post-traitements jusqu'à la classification.

5.1.Introduction

Compte tenu de la gravité de l'érosion du sol et de ses impacts, il est nécessaire que des mesures de gestion appropriées soient prises. Pour ce faire, une bonne connaissance des variations spatiales de l'érosion des sols est nécessaire lors de la planification des efforts de conservation (Tamene, *et al.*, 2006). En raison du coût élevé de conservation et les objectifs de production concurrentes telles que l'augmentation de la population, le développement des infrastructures et la dégradation des terres, il est nécessaire de cibler les solutions et les ressources dans les zones à haut risque, plutôt que de les répartir équitablement entre le paysage (Shiferaw, 2011). Différents scénarios de gestion et de planification de l'utilisation des terres peuvent alors être mises en œuvre pour faire face aux divers problèmes de dégradation des terres. Ces tentatives doivent prendre en considération les conditions biophysiques et socio-économiques des sites.

Dans des pays comme l'Algérie, où la dégradation des sols est sévère, il est impératif d'appliquer des modèles d'érosion des sols de base qui nécessitent moins de données et donc qui correspondent le mieux avec les ressources disponibles. Ces modèles intégrés dans un environnement SIG pourraient facilement être utilisés pour estimer la perte en sol et de simuler des options de conservation. En effet, Les modèles d'estimation de l'érosion des sols intégrés dans les SIG sont un moyen d'évaluer la répartition spatiale de la perte de sol, d'identifier les domaines de préoccupation et de simuler la gestion possible. L'équation universelle des pertes de sol(USLE) est la méthode la plus fréquemment utilisée. Elle peut être appliquée dans de nombreuses situations, même sur les unités de paysage topographiquement complexes tels que les pentes abruptes et le terrain accidenté (Desmet *et al.*, 1996) et peut être pris en charge par les SIG, car il est utile de cartographier les couches de facteurs de l'USLE.

Dans une image raster intégrée dans un SIG, le modèle USLE peut prédire le potentiel d'érosion sur une base d'un pixel. Cela présente des avantages distincts lorsque l'on tente d'identifier les schémas spatiaux de la perte des sols présents dans une grande région. Le SIG peut ensuite être utilisé pour isoler et interroger les bases de données constituées pour obtenir des informations vitales sur le rôle des variables individuelles. L'équation empirique qui a été développé pour prédire les taux d'érosion des sols dans les champs agricoles aux États-Unis d'Amérique (Wischmeier et Smith, 1978) a été largement utilisée dans le monde entier sous sa

forme originale ou modifiée (Shiet *et al.*, 2002, Nasir *et al.*, 2006, Terranova *et al.*, 2009, Fistikoglu et Harmancioglu, 2002), y compris au Maghreb et en Algérie et au Maroc (Touaibia *et al.*, 1990, Touaibia *et al.*, 1999, El Garouani *et al.*, 2003). Ce modèle est simple, il exige des données limitées et peut donc être pratique pour les grands bassins versants où les données peuvent être insuffisantes (Kinnell, 2001; Renschler et Harbor, 2002, Sadiki *et al.*, 2004). Ces données peuvent être recueillies par la télédétection. En effet, la télédétection fournit des données homogènes sur de vastes régions avec une capacité répétitive régulière, et peut donc contribuer grandement à l'évaluation régionale de l'érosion. Ainsi, quand on veut sélectionner un modèle d'érosion à l'échelle régionale ou nationale, c'est la disponibilité des données-sources qui est probablement la plus importante à prendre en considération. Utiliser un modèle sophistiqué n'aurait aucun sens sans des données-sources disponibles.

La télédétection a pour rôle de fournir des informations sur les paysages sous la forme de données images en utilisant le rayonnement électromagnétique comme véhicule de ces informations (Robin, 2001). L'analyse des images de télédétection a pour but d'interpréter la nature et la fonction des objets positionnés. Le processus d'interprétation qui se fait visuellement ou automatiquement en utilisant le système d'information géographique (SIG) consiste à transformer les données de l'image satellitaire en éléments d'information spatialement localisés (Bonn et Rochon, 1996). En plus, l'évolution extrêmement rapide des systèmes d'information géographique (SIG) au cours de la dernière décennie a encore accentué le recours à l'image pour l'acquisition ou la mise à jour de l'information concernant l'occupation du sol.

5.1.1. Modélisation spatiale

Conceptualiser le monde réel et ses changements spatio-temporels et leurs interactions dans l'espace, constitue le processus de modélisation spatiale. En utilisant le SIG pour représenter le modèle conceptuel et effectuer des calculs mathématiques simples sur les attributs stockés et afficher les résultats constituent l'espace de modélisation spatiale. Dans une opération de modélisation spatiale, les objets géographiques dans le monde réel sont délimités et extraits en utilisant les données de base telles que des photographies aériennes, des images satellites, des cartes et d'autres sources. Les objets sont stockés dans des bases de données SIG où ils sont affectés des valeurs d'attributs qui représentent la valeur de l'objet conçu. Les valeurs d'attributs peuvent être qualitatives ou quantitatives. Les valeurs d'attributs qualitatifs sont utilisées pour regrouper les fonctionnalités des thèmes spécifiques ou des classes d'entités. Alors que les valeurs quantitatives sont utilisées dans les opérations de calcul.

5.1.2. Méthodes d'évaluation de l'érosion des sols et les risques

La photographie aérienne

Plusieurs chercheurs dans le but de montrer la distribution de l'érosion des sols dans les milieux agricoles ou autres ont utilisé des photographies aériennes et la télédétection. Bien

que l'utilisation de photographies aériennes dans l'évaluation de l'érosion des sols ait aidé à distinguer les zones terrestres avec les occurrences de l'érosion visible, par contre, elles n'ont pas été en mesure de montrer l'étendue de l'érosion qui se passe en dessous de la canopée végétale. Ceci est principalement dû à l'obscurité des phénomènes au-dessous de la végétation (Okoth, 2002).

Les apports de sédiments de la rivière

Une autre méthode a été utilisée pour évaluer le taux d'érosion par la collecte de données sur les sédiments des cours d'eau. L'utilisation des données de rendement de sédiments fluviaux aussi, si important dans l'agrégation des données sur la production totale de sédiments d'un bassin versant ou bassin hydrographique, n'ont jusqu'à présent pas été en mesure de retracer l'érosion à partir de la source originale (Okoth, 2002). Les données obtenues sont seulement utiles pour la conception de la construction de barrages et l'estimation des charges de sédiments fluviaux. Les données ne peuvent pas facilement être utilisées pour des activités de conservation des sols et de l'eau, car on ne peut pas repérer les points où l'érosion des sols se déroule (Fistikoglu, *et al.* 2002).

Des modèles mathématiques prédictifs

Le développement de modèles mathématiques pour estimer la perte de sol a commencé avec Zingg (1940) qui a formulé la perte de sol à la longueur de la pente ainsi qu'à la pente. Smith (1941) déterminait des facteurs de l'influence des cultures et des pratiques de conservation sur la perte de sol. Le facteur pluviométrique a été ajouté à l'équation par Musgrave (1947). Enfin, la collecte des données et l'analyse de plusieurs parcelles expérimentales de 49 endroits sont conduits à l'équation universelle de perte en sol (USLE) de Wischmeier et Smith (1978), qui est encore aujourd'hui l'outil de base pour la conservation des sols aux États-Unis et dans d'autres pays.

L'USLE a été conçu pour prédire la perte de sol annuelle de l'érosion en nappe et en rigoles sur une petite échelle de terrain. Ce modèle est une équation localisée et ne tient pas compte de dépôt ni de prévoir le rendement des sédiments. L'USLE estime l'érosion des pentes modérées et les textures du sol moyen. Elle ne peut pas être utilisée avec des pentes fortes ou dans les régions où les forces érosives sont principalement de l'écoulement de surface (Robinson, 1979). L'USLE a été modifiée à plusieurs reprises. Williams (1975) a développé l'USLE modifiée (MUSLE). Ce modèle règle le facteur R de l'USLE, en introduisant dans le facteur R, un facteur de ruissellement hydrologique. Toutes les autres caractéristiques de l'USLE restent fondamentalement les mêmes. RUSLE ou l'USLE révisée présentée par Renard *et al.*, (1991) inclut des améliorations. Les améliorations comprennent une érosivité élargie par la création d'une carte iso-érode dans la région Ouest des États-Unis, basée sur l'analyse de données de plus de 1000 emplacements.

EPIC, le calculateur de l'incidence de la productivité de l'érosion a été développé par Williams *et al.*, (1990). Le modèle a été créé pour évaluer les mesures de gestion sur des dizaines, voire

des centaines d'années. Le modèle utilise la teneur en eau du sol dont elle est mesurée pour un pas de temps journalier et continuellement.

EUROSEM, le modèle d'estimation de l'érosion des sols européen développé par Morgan *et al.*, (1991). Ce modèle est basé sur les processus de prédiction de l'érosion des sols par l'eau dans les champs et les petits bassins versants. Il peut également être utilisé pour évaluer le risque d'érosion et évaluer les effets des mesures de protection des sols.

Les produits chimiques, le ruissellement et l'érosion des systèmes de gestion agricole ont été mis au point par Knisel *et al.*, (1980) dans le modèle CREAMS. Le modèle mathématique vise à l'évaluation de la pollution dans les champs agricoles. Un domaine est défini comme une unité de gestion ayant un usage unique de la terre, des sols relativement homogènes, les précipitations spatialement uniforme et une seule pratique de gestion. Il se compose de quatre composantes, à savoir: un sous-modèle hydrologique, un sous-modèle de l'érosion, un sous-modèle en éléments nutritifs et un sous-modèle de pesticides. CREAMS comprend l'évapotranspiration et la percolation dans son calcul afin de compléter le bilan hydrique.

De nombreux modèles mathématiques existent en tant que modèles empiriques, basés sur les processus ou déterministe. Chaque modèle a ces points forts et / ou faibles. Le choix d'un modèle pour une utilisation dépend de l'application, et les données disponibles.

5.2.Méthode d'évaluation de l'érosion utilisée

L'avènement du système d'information géographique (SIG) et la télédétection ont permis à l'équation universelle de perte en sol (USLE) d'être utilisée d'une manière répartie dans l'espace parce que chaque cellule dans une image raster s'agit de représenter une unité sur le terrain. L'approche utilisée a consisté dans un premier temps, à détecter les facteurs de déclenchant l'érosion et à les spatialiser en utilisant les images satellitaires Landsat-TM. Ces images sont choisies car leur définition de 30 m de résolution au sol est adaptée à l'échelle de travail (1:750 000). Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG sont utilisées pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement. La modélisation prédictive dans un environnement SIG offre une opportunité pour l'évaluation des risques d'érosion. Les données sur l'érosion par rapport à certains indicateurs sont collectées, calibrées et sont entrées dans une base de données SIG, après quoi elles seront spatialement modélisées pour représenter le risque d'érosion des sols dans n'importe quel élément du paysage choisi.

Des couches individuelles ont été créées pour chaque paramètre de l'USLE et sont ensuite combinées par une procédure de modélisation dans la grille ArcGIS 9.3. Chaque grille de facteur avait une taille de cellule de 30 m, bien que la résolution réelle (de la source de données la plus basse résolution) est d'environ 100 m. Ce ré-échantillonnage a été fait pour intégrer la plus grande précision de la précipitation et interpolations topographiques. Toutes les couches ont été projetées en UTM 37N zone en utilisant le WGS 1984. La méthodologie

suivante a été utilisée pour générer les grilles des facteurs. La figure 34 montre le cadre général suivi.

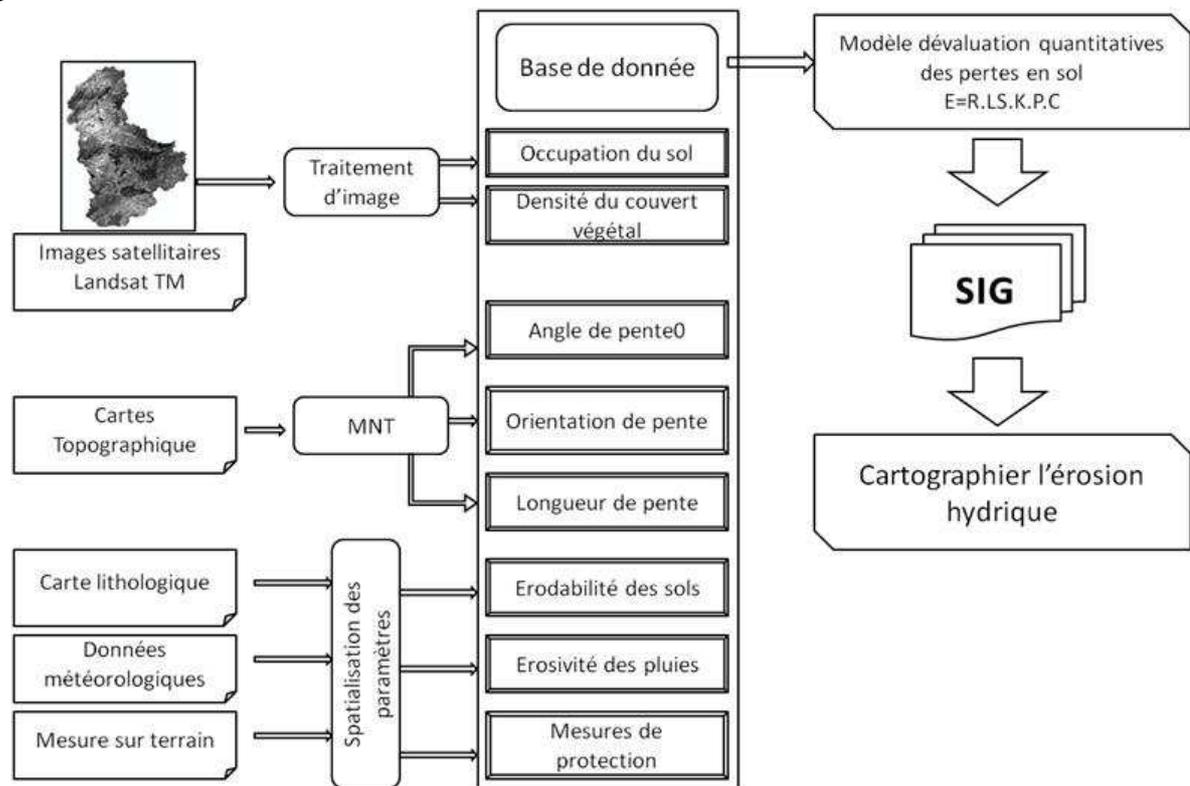


Fig. 34: Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Mina.

La première étape consiste à exécuter la fonction « watershed delineation » de WMS pour délimiter automatiquement la limite du bassin hydrographique (figure 35). Les étapes de cette partie sont détaillées dans le chapitre 3. Une fois la limite du bassin hydrographique est délimitée à partir du MNT, le fichier de données de sortie peut être utilisé comme modèle pour découper, ou extraire, la superficie exacte des autres cartes numériques. Le bassin délimité à partir du MNT sert de modèle de base pour les calculs de l'USLE. Toutes les couches de l'USLE se chevauchent lorsque la résolution de chaque grille est exactement la même (30 par 30 mètres). Les couches de l'USLE sont organisées en couches thématiques distincts dans le logiciel ArcGIS et multipliés ensemble pour donner le taux de perte de sol annuel estimé(A) en tonnes par hectare par an.

La méthode utilisée pour combiner et analyser l'USLE avec le logiciel ArcGIS est décrite comme suit : Chaque facteur de l'USLE est brièvement discutée et les méthodes de développement de chacun de ces facteurs sont présentées continué la phrase. Les ordres de présentation sont les facteurs R d'abord, puis par le facteur K, facteur C, facteur LS, et le facteur P. Une description de la création de chaque facteur USLE dans ArcGIS est donné.

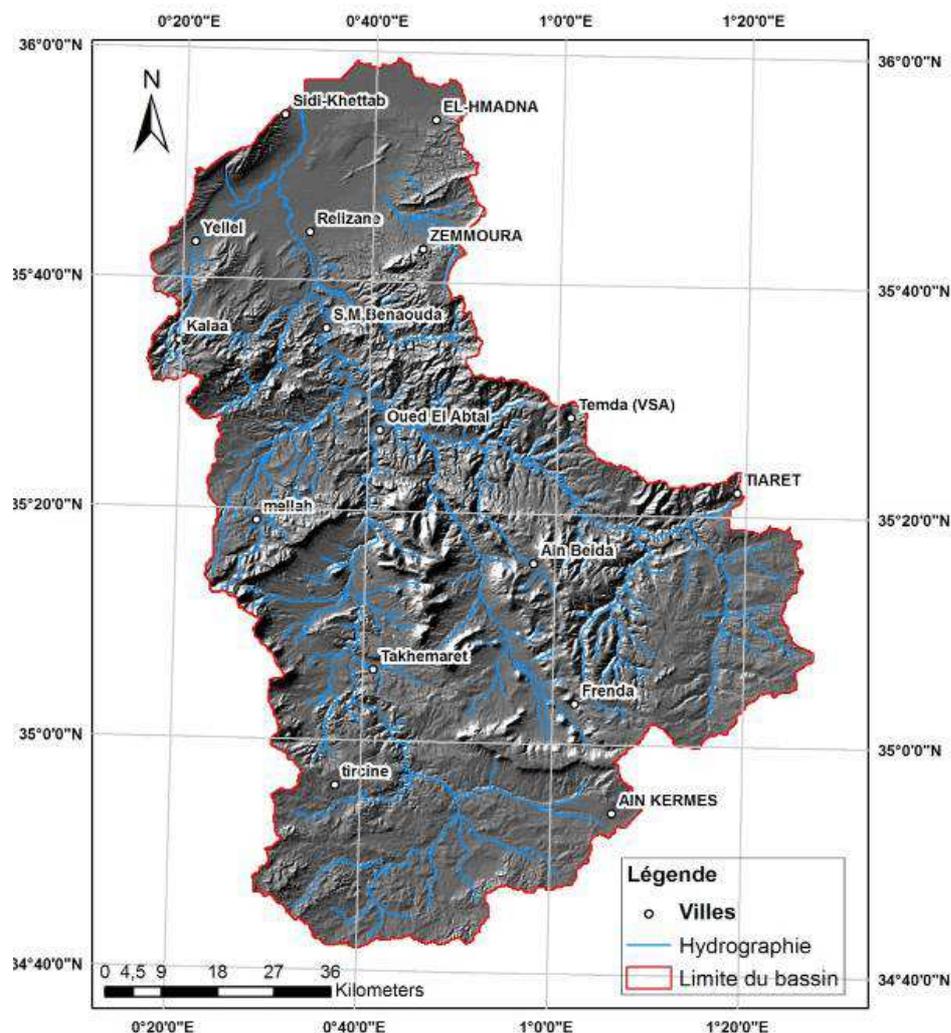


Fig. 35: Résultat de la modélisation hydrologique du bassin versant de l'Oued Mina. Représentation du MNT en Shaded Relief. Et le réseau hydrographique élaboré par « WMS ».

5.3.L'équation universelle de perte en sol USLE :

Plusieurs modèles d'érosion des sols existent avec différents degrés de complexité. Même si une grande variété de modèles est disponible pour l'estimation du risque d'érosion, la plupart demande tellement de données-sources que leur application à l'échelle régionale devient un problème. L'équation bien connue USLE (Wischmeier et Smith, 1978) a été utilisée car c'est le modèle qui demande le moins de données-sources et il a été appliqué largement à toutes les échelles (Fistikoglu *et al.*, 2002).

Fondamentalement, USLE a l'avantage de fournir des estimations à long terme de moyenne de perte annuelle de sol à partir de petites zones et est considéré comme un « bon modèle » si le but de la modélisation est d'arriver à des estimations globales de l'érosion des sols. Cependant, le modèle est limité dans le sens où il ne peut pas simuler l'érosion du lit de dépôt, ou en ravin (Foster, 1988).

L'Equation universelle de pertes en sol (Wischmeier et Smith, 1978) s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappe et en rigole. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique: agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques antiérosives:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

où A est le taux annuel de perte en sol ($t \text{ ha an}^{-1}$); R est le facteur de l'érosivité des pluies, il correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité en 30 min consécutives, et est exprimé en $\text{MJ mm} (\text{ha h an})^{-1}$; K est l'érodibilité des sols, et dépend de la granulométrie, de la quantité de matière organique, de la perméabilité et de la structure du sol, et est exprimé en $t \text{ ha h} (\text{ha MJ mm})^{-1}$; LS est un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m); C est un facteur sans dimension qui représente l'effet de la couverture végétale; et P est un facteur sans dimension, rapport qui tient compte des techniques culturales antiérosives telles que le labour en courbes de niveau.

Les unités de la perte de sol annuelle moyenne (A) sont portées par les facteurs R et K. Ces deux facteurs représentent la cause de l'érosion des sols. Le facteur R représente érosivité de la pluie, ou le pouvoir érosif de la pluie sur le sol quel que soit son type. Le facteur K représente l'érodibilité du sol, ou dans la mesure où le type de sol spécifique résiste aux forces érosives.

Les facteurs de l'USLE restants (L, S, C, P) peuvent être considérés comme des facteurs d'ajustement. L'USLE a été formulée par l'examen des données enregistrées à partir de l'érosion des parcelles de terrain de l'unité qui avait une longueur fixe de 72,6 pieds (soit 22,1 mètres) et une pente fixe d'environ 9% (ou 5,14 degrés). Le L, S, C, et les facteurs P ajustent les conditions réelles par rapport aux conditions de parcelles expérimentales sur le terrain. Ces facteurs représentent des rapports, et sont sans dimension.

5.3.1. Domaines d'application de l'USLE

L'USLE a été initialement développé pour estimer l'érosion du sol se produisant sur parcelles agricoles. En toute parcelle de terrain, le processus d'érosion du sol est difficile à observer sur une base régulière, car il se produit très lentement au fil du temps. L'USLE estime la perte de sol annuelle moyenne à long terme de cette parcelle de terrain basé sur la participation limitée. Plusieurs études ont utilisé l'USLE et un SIG afin de cartographier l'érosion des sols à l'échelle des bassins versants (Chen *et al.*, 1993, Tahri *et al.*, 1993, El Garouani *et al.*, 2003). Ces études ont démontré que les taux d'érosion varient principalement en fonction de l'occupation des terres et de la pente.

Une chose à noter est que les précipitations (facteur R) et du sol (facteur K) sont déterminés par la nature pour une région donnée et ne peuvent pas être modifiés. Les autres facteurs (L, S, C et P) peuvent être modifiés par des mesures d'atténuation. Les calculs USLE peuvent être ajustés avec ces quatre facteurs restants et sert comme outil de prévision pour déterminer la meilleure façon de réduire la perte de sol. Les effets du raccourcissement de la parcelle de terrain (facteur de Lest réduit) ou en déplaçant les parcelles de terrain à un autre endroit avec une surface plane (facteur S est réduit) peuvent être examinés par le calcul de l'USLE. Les effets de l'augmentation du couvert végétal ou mettre en œuvre des techniques de gestion fera baisser le C et les facteurs P respectivement. Tous les scénarios possibles peuvent être sondés par l'USLE sans vraiment faire de l'atténuation. L'USLE peut être utilisée comme un outil de prévision pour choisir la meilleure mesure possible pour réduire la perte de sol.

5.4. Traitement des images satellitaires

Le but du traitement d'images satellitaires est d'extraire de celles-ci des informations utiles pour la compréhension et la modélisation d'un phénomène se déroulant à la surface terrestre. Pour cela une bonne préparation (prétraitement) de ces données est nécessaire afin d'éviter toutes les erreurs provenant de l'instrument de captage et effets atmosphériques.

Les propriétés des imageries desquelles ont été utilisées au cours de cette partie sont représentées dans le tableau 10. Ces données ont été choisies en raison de leur excellente qualité. Ce sont des images multi-bandes issues du radiomètre Landsat-TM d'une résolution de 30 m pour les bandes du visible et de l'infrarouge et d'une résolution de 60 m pour la bande thermique.

Tableau 10: Caractéristiques des bandes spectrales.

N°	Nature	Longueur d'onde (µm)	Résolution (m)
1	Bleu	0,485	30
2	Vert	0,560	30
3	Rouge	0,660	30
4	Proche infrarouge (PIR)	0,830	30
5	Infrarouge moyen (MIR)	1,65	30
6	Infrarouge thermique (IRT)	11,450	60
7	Infrarouge moyen (MIR)	2,220	30

Les bandes spectrales de chaque image téléchargée sont en format TIFF (Tagged Image File Format) sous le mode BSQ. A ces bandes s'ajoute un fichier méta-information (en-tête) pour toute l'image.

5.4.1. Elaboration de données

Dans cette section, nous présentons les données disponibles et les différentes opérations de la préparation de ces données utilisées au cours de ce travail.

Au vu de la pénurie de données et du fait des objectifs de ce travail, les images de télédétection ont constitué la source d'information majeure pour réaliser la base cartographique nécessaire à l'opération. Le choix d'une unité spatiale appropriée dépend de plusieurs facteurs, notamment (a) le type de phénomène qui doit être étudié, (b) l'échelle d'investigation, (c) la qualité, la résolution, l'échelle et le type d'information requise, et (d) la disponibilité des outils d'analyse de l'information (Daoudi *et al.*, 2009). Pour réaliser cette étude, nous nous sommes proposé de combiner plusieurs informations géographiques intimement liées à l'espace dont elles doivent donner la représentation la plus appropriée. En plus des images satellitaires, nous disposons d'une carte géologique détaillée, de la lithologie et d'un modèle numérique de terrain MNT générée suite à interpolation du MNT - SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission) d'une résolution de 30 m.

Le modèle numérique d'élévation (MNT)

Un type spécifique de données raster appelé un modèle numérique de terrain(MNT) est utilisé pour modéliser le terrain complexe du bassin versant de Oued Mina. La résolution du MNT de la taille des cellules est de 30 mètres. Chaque cellule de la grille MNT contient une valeur correspondant à son altitude dans le monde réel. Le MNT sert d'entrée principale pour le calcul des degrés de la pente et la longueur de la pente(le facteur LS). Les données téléchargées en format SRTM sont importées dans un SIG (Global Mapper V 11) afin de les caller et les interpoler avec un maillage voulu. A partir de l'échantillon des points relevés de deux cartes topographiques (1/50000) couvrant la région d'étude, le modèle numérique a été callé afin d'avoir une précision maximale.

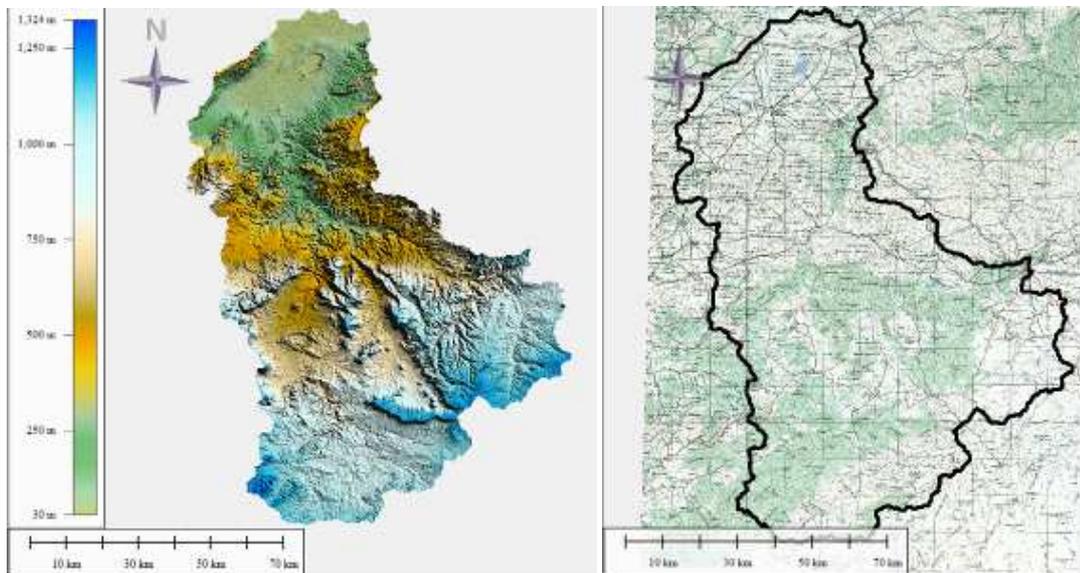


Fig. 36: Superposition de la carte topographique de 1/50000 sur le MNT téléchargé.

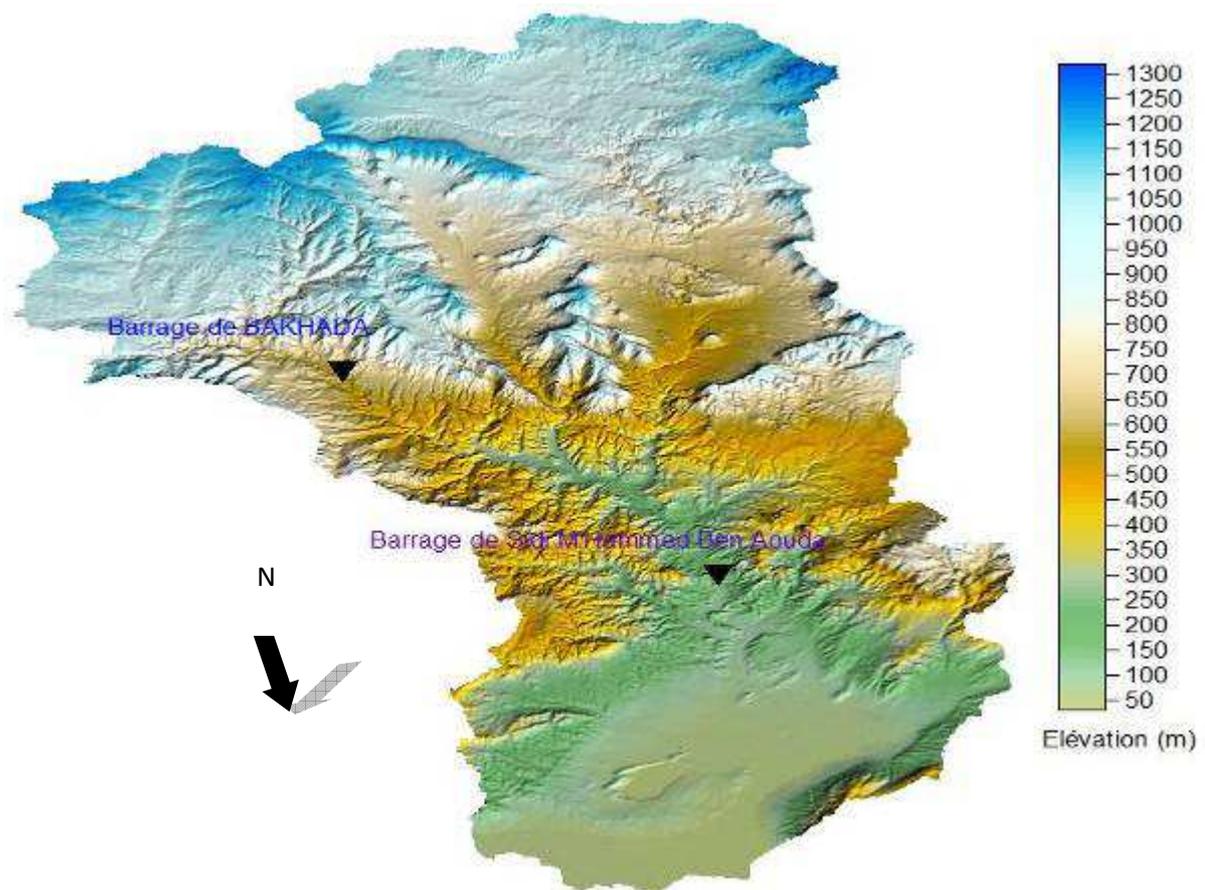


Fig. 37: Vue en 3D du modèle numérique de terrain bassin versant de l'Oued Mina.

Données de télédétection :

Le choix des produits et l'échelle appropriée :

La nature du phénomène à étudier peut conditionner le choix des produits, des capteurs, du nombre de dates de prise de vue. On ajoute aussi d'autres facteurs techniques et économiques, tels que, la taille de l'objet à percevoir, la durée de vue et le budget.

L'objectif de ce travail est de produire une cartographie du risque érosif et d'occupation du sol à l'échelle d'un bassin versant de 800 milles hectares, il est indispensable de choisir un satellite dont les capteurs disposent de plusieurs canaux dans le visible. Ainsi, la taille du pixel permet de détecter des petites parcelles (sol nu, de la végétation et de plan d'eau) d'une résolution spatiale de 50 m. Pour ce travail, 6 images à haute résolution (Landsat-TM 5) sont acquises à des périodes de prise de vue précises dans une même saison pour arriver à identifier de manière satisfaisante chaque variation.

Le choix de la résolution spatiale du capteur dépend également du niveau de caractérisation visé : détection, identification, interprétation :

- La détection d'un objet peut être effectuée même avec des pixels de taille nettement inférieure à la taille de l'objet à partir du moment où il existe un bon contraste entre cet objet et l'environnement.
- L'identification d'un objet suppose de disposer de pixels de taille similaire à celle de l'objet.
- L'analyse d'un objet (nécessite que l'objet soit couvert par plusieurs pixels).

Notre région d'étude se situe entre deux scènes (figure 38). Pour cela, on a procédé à un mosaïquée des scènes de chaque période. Six images satellitaires ont été acquises de 1985 jusqu'à 2010 avec, lorsque c'était disponible, deux périodes, une en été et l'autre en hiver. Les données disponibles proviennent des capteurs TM5 du Satellite Landsat prises durant les périodes mentionnées dans le tableau 11 :

Tableau 11: Les images satellitaire disponible et couvrant la région d'étude.

	Date de prise	Résolution	Path and Row
Période sèche	12 06 1987	30m	35 197 et 36 197
	05 06 2002		
	24 06 2009		
Période humide	14 02 1985		
15 11 2009			
18 01 2010			

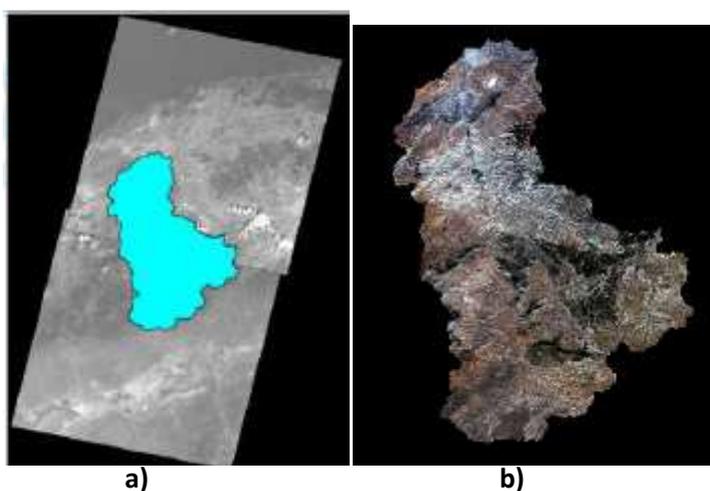


Fig. 38: Préparation des images satellitaires. a) Mosaïque des deux scènes couvrant la partie Nord et la partie Sud du bassin versant. b) Extrait d'images Langsa en composition colorée RVB 321 représentant la zone d'étude.

Les images satellitaires utilisées au cours de cette étude ont été téléchargées gratuitement à partir du site <http://glovis.usgs.gov/> de l'USGS. Le choix des images téléchargées a été fait rigoureusement suite aux critères suivants :

- Le temps entre la prise de deux scènes couvrant la région d'étude soit aussi bien court que possible pour éviter les anomalies du au système de captage lors du balayage ;
- Les scènes couvrant la région d'étude soient dégarnies de toute couverture nuageuse ou de brunes (taches);

Toute image téléchargée est accompagnée d'un fichier « métadonnées » offrant toutes les informations possibles sur l'image, telles que, la période de prise de vue, ces coordonnées géographiques, le système de projection, le taux du couvert nuageux, la qualité de l'image et autres informations de calibration.

Il a été remarqué que le bassin se divise en deux parties selon la composition colorée de l'image. La superposition des deux scènes coïncide avec la zone partagée, comme représenté dans la figure 39. Ce problème a été vérifié à l'aide de la carte géologique et le modèle numérique de terrain. En effet, la région d'étude se partage en deux parties géologiquement distinctes, l'une présente une formation jurassique au sud et l'autre présente une formation meuble au nord et chaque formation procède un comportement (réflectance) spectrale différent. Ces deux régions sont séparées par un point culminant représentant les monts de Béni Chograne.

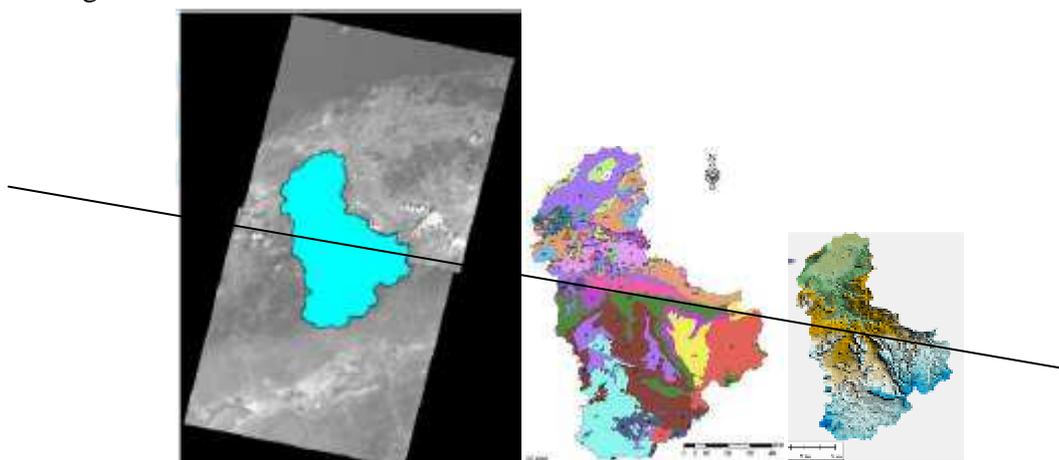


Fig. 39: Représentation de la superposition des scènes de Langsa TM5 et la carte géologique du bassin versant de l'Oued Mina.

Une autre vérification est effectuée sur les valeurs du compte numérique de chaque bande spectrale au niveau de la zone de partage des deux scènes. Le compte numérique des pixels situés dans la partie inférieure de la scène couvrant la partie nord du bassin et les pixels situés dans la partie supérieure de la scène couvrant la partie sud est le même (figure 40).



Fig. 40: Comparaison des valeurs du compte numérique (CN) des pixels situés dans la zone de la mosaïque des scènes

L'intérêt de l'utilisation d'une image multi-spectrale est de faciliter la séparation des objets de la surface terrestre ayant un comportement différent. En effet, l'utilisation de plusieurs longueurs d'onde offre une grande capacité pour séparer les objets plutôt qu'utiliser une seule bande spectrale. La figure 41 présente un exemple de la séparation de deux objets sur un plan de deux bandes spectrales.

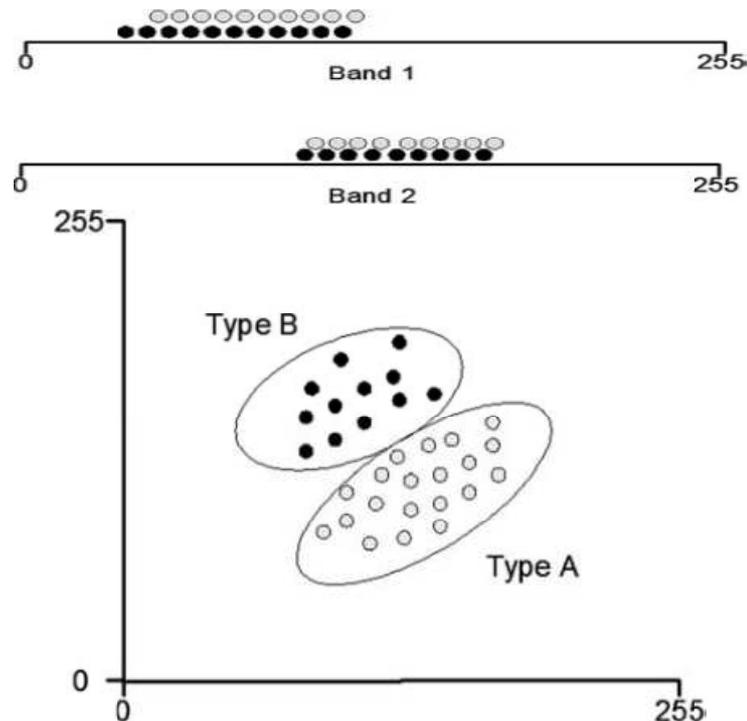


Fig. 41: Deux types de la couverture du sol A et B mesurés sous deux longueurs d'onde : (a) sur un graphe en une seule dimension qu'on ne peut pas distinguer entre les deux types du couvert, (b) sur un plan en deux dimension, les deux types d'occupation du sol peuvent être facilement séparés.

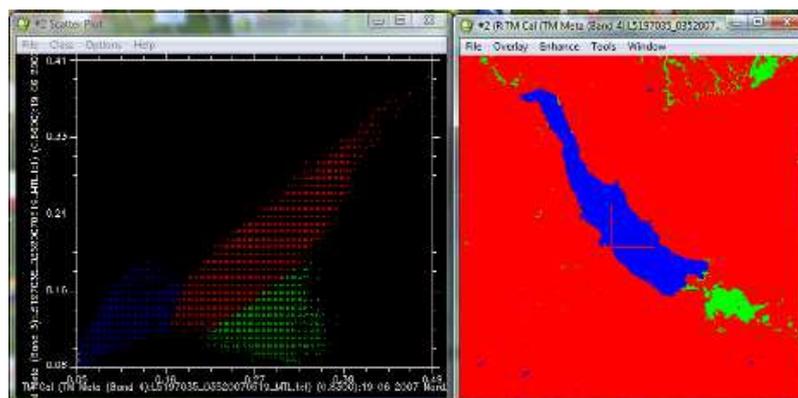


Fig. 42: Valeurs de la réflectance de la bande TM3 en fonction de la réflectance de la bande TM4 pour la séparation de la végétation (en vert), l'eau (en bleu) et le sol nu (en rouge).

5.4.2. Prétraitement des images satellitaires

On appelle les fonctions de prétraitement, les opérations qui sont requises avant l'analyse principale et l'extraction de l'information. Quatre grandes catégories de prétraitement émergent :

- Les restaurations et l'enregistrement : ces opérations de prétraitement se divisent en corrections radiométriques et en corrections géométriques. Les corrections radiométriques comprennent entre autres, la correction des données à cause des irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur ou à l'atmosphère, et de la conversion des données afin qu'elles puissent représenter précisément le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur. Les corrections géométriques comprennent la correction pour les distorsions géométriques dues aux variations de la géométrie Terre-capteur, et la transformation des données en vraies coordonnées (par exemple en latitude et longitude) sur la surface de la Terre.
- Les améliorations visuelles des images (rehaussement): Les fonctions de rehaussement ont pour but d'améliorer l'apparence de l'imagerie pour aider l'interprétation et l'analyse visuelles. Les fonctions de rehaussement permettent l'étirement des contrastes pour augmenter la distinction des tons entre les différents éléments d'une scène, et le filtrage spatial pour rehausser (ou éliminer) les patrons spatiaux spécifiques sur une image.
- Les transformations : Les transformations d'images sont des opérations similaires à ceux de rehaussement de l'image. Cependant, alors que le rehaussement de l'image qui est normalement appliqué à une seule bande de données à la fois, la transformation de l'image combine le traitement des données de plusieurs bandes spectrales. Des opérations arithmétiques (c'est-à-dire addition, soustraction, multiplication, division) sont faites pour combiner et transformer les bandes originales en de "nouvelles" images qui montrent plus clairement certains éléments de la scène. Nous allons examiner certaines de ces opérations incluant les diverses méthodes de rapport de bande aussi appelé rapport spectral et un procédé appelé analyse des composantes

principales qui est utilisée pour mieux représenter l'information en imagerie multi-spectrale.

- Les extractions d'informations : les informations dérivées de luminance et la classification.

5.4.2.1. Restaurations des données satellitaires

L'USGS offre des produits de données normalisées. Toutes les scènes de Landsat téléchargées sont traitées avec la correction standard de terrain (niveau 1T), fournit une précision radiométrique et géométrique systématique en intégrant les points de contrôle au sol tout en utilisant un modèle numérique d'élévation (DEM). C'est-à-dire que les images téléchargées sont déjà corrigées géométriquement. Mais, les images Landsat fournies par l'USGS (niveau L1) ne sont pas calibrées en réflectance, ni même en valeurs de luminance "absolue" (c'est-à-dire en grandeur physique avec son unité spécifique). Il est spécifié, dans les infos fournies par l'USGS, qu'elles ont subies une correction radiométrique car elles sont passées des données "brutes" fournies directement par le satellite (niveau 0) au niveau 1 (correction de certains artefacts radiométriques et application de gains spécifiques) et conversion en tant que comptes numériques codés sur 8 bits pour les capteurs TM et ETM+ de Landsat (valeurs allant de 0-255). Ces comptes numériques (CN) sont en fait une mesure de luminance "relative". A partir de ces CN, on peut retrouver les luminances physiques avec l'application des équations de calibration : $L = a * CN + b$ où a est le gain et b est le biais, et on peut également par la suite effectuer une correction atmosphérique pour obtenir des valeurs de réflectance au sol.

La calibration

Avant d'analyser les données, il est nécessaire de les normaliser pour permettre la comparaison quantitative entre les images. Le capteur Landsat TM acquiert des données électromagnétiques et stocke cette information comme une valeur numérique (CN), avec une fourchette comprise entre 0 et 255. Il est possible de convertir ces CN en réflectance au-dessus de l'atmosphère TOA en utilisant un processus de calcul du système ENVI. La première étape consiste à convertir les valeurs de luminance CN en utilisant les valeurs de gain et le biais spécifiques à la scène. La seconde étape consiste à convertir les données de radiance à la réflectance. Les données utilisées au cours de ce travail sont les scènes Landsat de l'USGS fournies avec un fichier métadonnée de format « MTL » compatible avec ENVI. Ce dernier peut facilement convertir ces données en une seule étape (calibration automatique).

Le résultat de la calibration obtenu n'est que la réflectance au-dessus de l'atmosphère et ne reflète pas le comportement spectral réel des objets. En effet, certaines lumières sont dispersées par la vapeur d'eau et d'aérosols, en particulier aux longueurs d'onde plus faibles, dans la partie bleue du spectre électromagnétique. Pour cela, les images calibrées sont ensuite traitées par module de la correction atmosphérique « FLAASH » du logiciel ENVI. Cette méthode effectue des corrections basées sur la modélisation du transfert radiatif.

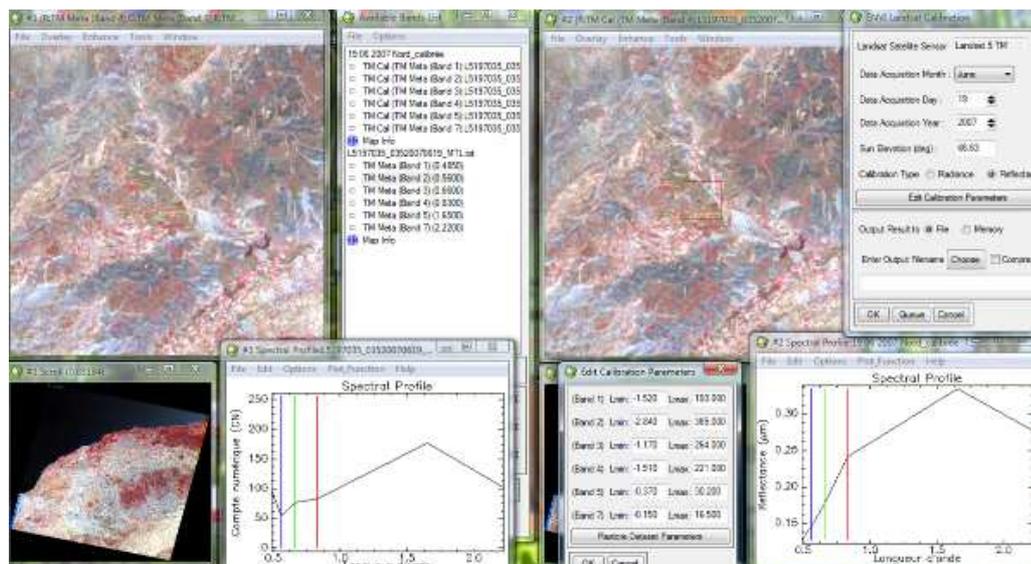


Fig. 43: Exemple d'une image Landsat TM5 calibrée (représentation en fosses couleurs (RBV : TM4, TM3, TM2). (a) les données brutes avec le profil du compte numérique. (b) les données calibrées à l'aide du module « Landsat Calibration » d'ENVI.

Exemple du contenu d'un fichier métadonnées :

```

GROUP = L1_METADATA_FILE
GROUP = METADATA_FILE_INFO
ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
REQUEST_ID = "8880909120001_86400"
PRODUCT_CREATION_TIME = 2009-09-12T21:52:24Z
STATION_ID = "EDC"
LANDSAT5_XBAND = "1"
GROUND_STATION = "MPS"
LPS_PROCESSOR_NUMBER = 0
DATEHOURL_CONTACT_PERIOD = "0917510"
SUBINTERVAL_NUMBER = "01"
END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
GROUP = PRODUCT_METADATA
PRODUCT_TYPE = "L1T" (Niveau de correction: correction géométrique et radiométrique avec des point de contrôle au sol)
ELEVATION_SOURCE = "GLS2000"
PROCESSING_SOFTWARE = "LPGS_10.1.0"
EPHEMERIS_TYPE = "DEFINITIVE"
SPACECRAFT_ID = "Landsat5"
SENSOR_ID = "TM"
SENSOR_MODE = "BUMPER"
ACQUISITION_DATE = 2009-06-24
SCENE_CENTER_SCAN_TIME = 10:20:56.3280500Z
WRS_PATH = 197
STARTING_ROW = 36
ENDING_ROW = 36
BAND_COMBINATION = "1234567"
PRODUCT_UL_CORNER_LAT = 35.5540736
PRODUCT_UL_CORNER_LON = -0.7020344
PRODUCT_UR_CORNER_LAT = 35.6073772
PRODUCT_UR_CORNER_LON = 2.0703686
PRODUCT_LL_CORNER_LAT = 33.5831509
PRODUCT_LL_CORNER_LON = -0.6155786
PRODUCT_LR_CORNER_LAT = 33.6326892
PRODUCT_LR_CORNER_LON = 2.0921336
PRODUCT_UL_CORNER_MAPX = 164400.000
    
```

```
PRODUCT_UL_CORNER_MAPY = 3940800.000
PRODUCT_UR_CORNER_MAPX = 415800.000
PRODUCT_UR_CORNER_MAPY = 3940800.000
PRODUCT_LL_CORNER_MAPX = 164400.000
PRODUCT_LL_CORNER_MAPY = 3721800.000
PRODUCT_LR_CORNER_MAPX = 415800.000
PRODUCT_LR_CORNER_MAPY = 3721800.000
PRODUCT_SAMPLES_REF = 8381
PRODUCT_LINES_REF = 7301
PRODUCT_SAMPLES_THM = 4191
PRODUCT_LINES_THM = 3651
BAND1_FILE_NAME = "L5197036_03620090624_B10.TIF"
BAND2_FILE_NAME = "L5197036_03620090624_B20.TIF"
BAND3_FILE_NAME = "L5197036_03620090624_B30.TIF"
BAND4_FILE_NAME = "L5197036_03620090624_B40.TIF"
BAND5_FILE_NAME = "L5197036_03620090624_B50.TIF"
BAND6_FILE_NAME = "L5197036_03620090624_B60.TIF"
BAND7_FILE_NAME = "L5197036_03620090624_B70.TIF"
GCP_FILE_NAME = "L5197036_03620090624_GCP.txt"
METADATA_L1_FILE_NAME = "L5197036_03620090624_MTL.txt"
CPF_FILE_NAME = "L5CPF20090401_20090630_07"
END_GROUP = PRODUCT_METADATA
```

5.4.2.2. Modifications visuelles des images

Notre capacité d'extraire des informations de l'image repose sur notre système visuel. Une image de bonne qualité est celle dont les apparences permettent à notre système visuel d'identifier le maximum d'informations. Le rehaussement d'images concerne principalement des finalités de représentation graphique. Les opérations effectuées modifient l'histogramme initial de l'image pour obtenir une image de bonne qualité (étalement, filtres).

Affichage :

L'affichage en tons de gris permet l'interprétation individuelle de chacune des bandes rehaussée. Son codage graphique correspond celui d'un document photographique noir et blanc figure 44.

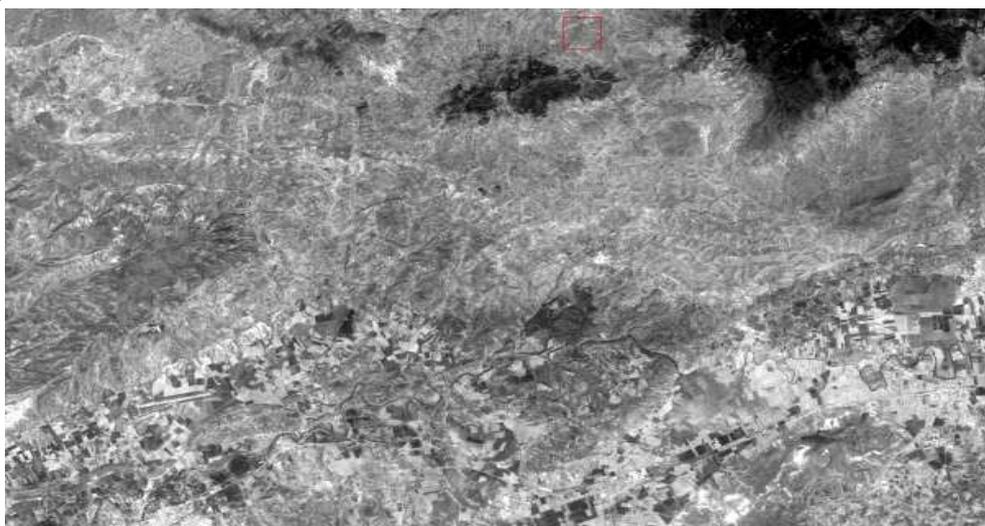


Fig. 44: La bande TM1 de l'imagerie Landsat TM du 24/06/2009 sur la région de Relizane.
En monochrome.

L'affichage multi bande se présente comme une composition colorée de trois images numériques figure 45.

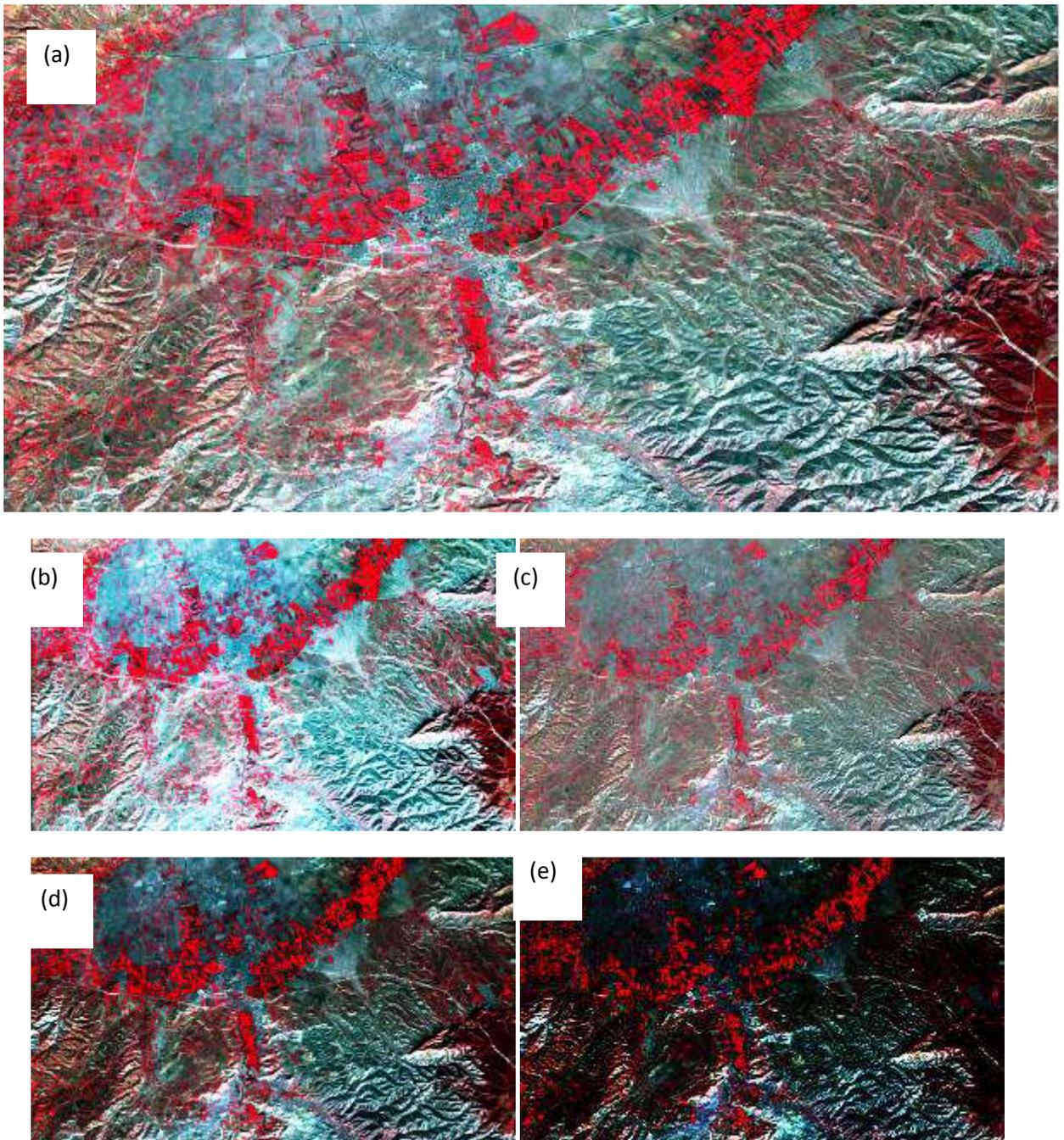


Fig. 45: Compositions colorées produites à partir des bandes rehaussées de l'imagerie Landsat TM du 24/06/2009 sur la région de Relizane. Bandes TM 2, 3, 4 assignées respectivement aux couleurs primaires bleue, vert et rouge. (a) changement linéaire du contraste. (b) étalement de l'histogramme de l'image sur la plage 0-255. (c) changement Gaussien du contraste. (d) changement Racine carrée du contraste. (e) changement Logarithmique du contraste.

5.4.2.3. Transformation des images et production d'images non spectrales

L'objectif d'utilisation des images non spectrales est d'examiner une propriété des objets de la surface terrestre, c'est-à-dire examiner directement une ou des caractéristiques biophysiques de la couverture végétale, des sols et de l'eau. Le principe de cette opération consiste à affecter à chaque pixel une valeur dérivée des luminances spectrales. La plupart des indices issus de la télédétection concernent la végétation. Ils sont calculés à partir des trois régions spectrales de l'infrarouge moyen (MIR), du proche infrarouge (PIR) et du visible (VIS).

Les différents indices de végétation

Les indices de végétation, qui sont des combinaisons arithmétiques des réflectances dans le visible (généralement le rouge) et le proche infrarouge, sont relativement bien corrélés à la croissance des plantes, la couverture végétale et la quantité de biomasse verte (Rondeaux *et al.*, 1996). En effet, les bandes rouge et proche infrarouge présentent un intérêt majeur. Outre une plus faible dépendance envers les conditions atmosphériques, la première coïncide avec une forte absorption du rayonnement, la deuxième, au contraire, offre une réflectance élevée. Il en résulte un écart important entre ces deux niveaux. Le rayonnement électromagnétique dans les longueurs d'ondes du rouge est absorbé en grande partie par la chlorophylle. Dans le proche infrarouge, la réflectance d'un couvert végétal varie essentiellement en fonction de la densité du couvert végétal vert (Jacquemoud, 1993). Un grand nombre d'indices de végétation ont été développés, du simple ratio aux indices plus élaborés, à partir de ces bandes rouge et proche infrarouge (tableau 12).

La création d'indice de végétation vise donc plusieurs objectifs:

- L'estimation de la masse végétale recouvrant le sol.
- La description de l'état phénologique de la couverture végétale.
- La prévision des récoltes.
- L'évolution de la couverture végétale.

Le modèle « Tasseled Cap »

La Transformation du Tasseled Cap est un outil utile pour comprimer des données spectrales en quelques bandes liées aux caractéristiques physiques de la scène (Crist *et al.*, 1984, Huang *et al.*, 2001). Cette transformation permet de ressortir trois informations majeures notamment l'indice de brillance, l'indice d'humidité et l'indice de verdure (ils représentent 97% de l'information). Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pris en compte que les deux premiers indices. L'indice de verdure étant très corrélé au NDVI, il n'a donc pas été pris en compte.

Tableau 12: Quelques formules des indices utilisés pour l'étude de la végétation (Girard et Girard, 1999, Girard, 1995)

Dénomination	Formules	Caractéristiques	Auteurs
Différence	R - PIR	Forte sensibilité aux variations atmosphériques	Monget (1980)
Rapport	$RVI = PIR / R$	Saturation aux forts indices, sensibilité à la contribution spectrale des sols et aux effets atmosphériques	(Jordan, 1969; Pearson <i>et al.</i> , 1972)
Indice de végétation par différence normalisée	$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$	Sensibilité aux effets atmosphériques, gamme de variation plus faible que le précédent, mais sensibilité aux variations angulaires de la visée, selon la position vis à vis du soleil	(Rouse <i>et al.</i> , 1974, Tucker, 1979)
Indice de végétation transformé	$TVI = (NDVI + 0,5)^{1/2}$	Essai d'élimination des valeurs négatives, stabilisation de la variance	(Deering <i>et al.</i> , 1975)
Indice perpendiculaire de végétation	$PVI = (PIR - aR - b) / (a^2 + 1)^{1/2}$ où a est la pente de la droite des sols et b son ordonnée à l'origine	Diminution de la contribution spectrale des sols, mais sensibilité à diverses caractéristiques des sols	(Richardson et Wiegand, 1977)
Indice de végétation ajusté au sol	$SAVI = [(1+L) (PIR-R)] / (PIR+R+L)$ avec L = 0,5 pour diminuer l'effet du sol	De nombreux indices sont issus de celui-ci pour minimiser l'effet du sol (TSAVI, MSAVI...)	(Huete, 1988)
indice de végétation résistant aux effets atmosphériques	$ARVI = (PIR-RB) / (PIR+RB)$ avec $RB = R - g(B-R)$ où g est fonction du type d'aérosols	Diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI mais sensible à la contribution spectrale des sols	(Kaufman et Tanre, 1992)
Indice de végétation amélioré	$EVI = 2.5[(PIR - R) / (PIR + 6R - 7.5B + 1)]$	Diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI et minimise l'effet du sol	(Huete, 1994)

Transformation en composantes principales (TCP)

La TCP se basant sur le principe de l'analyse en composantes principales (ACP) recherche un système d'axes tel que les nouvelles variables soient indépendantes entre elles. Une ACP se déroule selon les méthodes statistiques traditionnelles, la particularité pour la télédétection réside dans le très grand nombre de données à traiter (les pixels) (Caloz *et al.*, 2001). L'approche générale consiste à définir, dans l'espace multi spectral, de nouveaux canaux résumant l'information contenue dans l'image. Ce procédé vise donc à maximiser (statistiquement) la quantité d'information (ou variance) des données originales dans un nombre restreint de composantes (Caloz *et al.*, 2001). De plus, les données de bandes multi spectrales différentes ont souvent une corrélation très élevée et contiennent de l'information similaire. Les nouveaux canaux découplés apportent ainsi une information nouvelle. Ainsi, si l'on travaille sur les 7 canaux de Landsat, on obtient sept composantes principales dont les trois premières contiennent le maximum d'informations (ACP1, ACP2, ACP3). Dans la plupart des cas, on trouve alors les ordres de grandeurs suivants (Cherel, 2010) :

- L'axe 1 est assez proche de la somme des valeurs de comptes numériques pour un même pixel. Cela ressemble à un canal panchromatique. En simplifiant, ce néo canal contient plus des 2/3 de l'information multi spectrale d'origine,
- La deuxième composante met généralement en valeur l'opposition entre le visible et l'infrarouge. Cela ressemble à un indice de végétation dont la formule brute serait du type : $IR - R$. C'est donc sur ce canal que l'on détectera le mieux les divers types de végétation,
- L'ACP3 met plutôt en valeur les différences entre les deux canaux du visible.

L'analyse des composantes principales ou d'autres transformations complexes peuvent être utilisée comme techniques de rehaussement visuel pour faciliter l'interprétation ou pour réduire le nombre de bandes qui seront fournies comme données d'entrée (pseudo-bande) à une procédure de classification numérique (Scanvic, 1983).

5.4.2.4. Regroupement de l'information (classification)

Pour la détection et la séparation des objets à la surface du sol, on a employé l'interprétation des images satellitaires associée à l'utilisation des méthodes assistées par ordinateur et l'analyse visuelle. Cette dernière permet de caractériser les principaux objets présents : sols, végétations, eaux, etc., d'une manière fidèle, systématique et exhaustive par leur comportement spectral. Avec les différents algorithmes dont on dispose dans les logiciels, on a réalisé diverses images mettant en valeur tel ou tel type d'information (NDVI, ACP, Taselled Cap). En plus, les méthodes basées sur le seuillage ont pris appui sur les comportements spectraux des divers objets. La détermination des unités de paysage se fait visuellement à partir d'une ou plusieurs images préparées par les méthodes précédentes. On caractérise chaque unité délimitée par une série de variables ayant trait : à l'état de surface du sol (rugosité, couleur, calcaire, matière organique, humidité), au recouvrement végétal (état chlorophyllien, structure des tissus végétaux, humidité), à la turbidité de l'eau. On définit les

abondances de ces différents facteurs dans l'unité, ainsi que leurs positions relatives. On y adjoint aussi des informations extrinsèques aux images utilisées et provenant de divers documents cartographiques : botaniques, pédologiques, topographiques, (modèle numérique de terrain), géomorphologiques, géologiques.

On a effectué, ensuite, une classification (zonage) des objets déterminés par l'interprétation visuelle sur les échantillons pris des images de la zone d'étude. Il s'agit d'une généralisation des résultats en regroupant tous les pixels d'une image qui ont les mêmes caractéristiques spectrales et texturales.

La classification numérique des images utilise l'information spectrale contenue dans les valeurs de bandes pour classifier chaque pixel individuellement. Le but de la classification est donc, d'assigner une classe particulière ou thème à chacun des pixels d'une image. Les thèmes qui nous intéressent dans cette étude sont la végétation, l'eau et le sol nu. Ces grands thèmes sont choisis, car : i) ils influent directement sur l'érosion hydrique (le couvert végétal peut jouer le rôle, par exemple, d'un facteur protecteur), ii) ils occupent une grande étendue (par rapport à la superficie du bassin).

L'utilisation de la classification supervisée exige suffisamment de connaissances au préalable sur le terrain, elle n'est donc pas adaptée à notre démarche qui sera au contraire basée sur la classification non supervisée vu le manque d'informations sur la réalité du terrain (absence d'études antérieures sur les types du sol de la région d'étude). Cette méthode est connue sous le nom de « classification non dirigée ou non assistée » car elle ne fait pas intervenir des zones d'entraînements. Son principal avantage est que la subdivision est fondée sur les paramètres statistiques des classes, qui couvrent habituellement de grandes étendues géographiques, plutôt que sur un « échantillon d'entraînement » qui peut s'avérer assez peu représentatif de la variabilité de la catégorie à travers la scène à cartographier. En effet, il est souvent utile de distinguer les zones de l'image aux propriétés spectrales différentes, même lorsqu'on ne sait rien sur la nature des subdivisions ou des classes qui en résultent. On établit une carte de ces classes par la classification non supervisée de la trichromie ACP1, ACP2 et le NDVI (figure 46) et on les apporte sur le terrain pour déterminer la nature des subdivisions en question.

La classification a été validée en utilisant les photos de très haute résolution spatiale (THRS) de Google Earth et en se basant sur des études précédentes menées par Chader *et al.*, (1991).

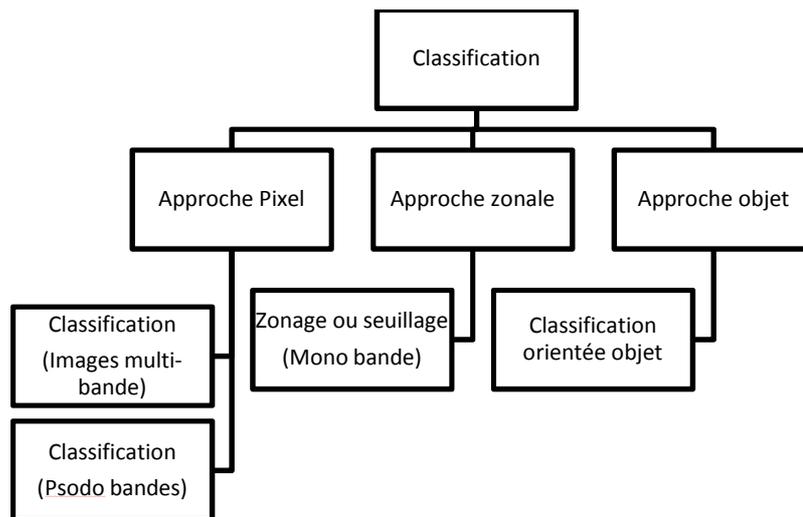


Fig. 46: Différentes méthodes de classification utilisées.

Classification multi spectrale

Comme illustré dans le chapitre précédent, le rayonnement incident interagira avec la cible (capteur) différemment, en fonction de la nature et des caractéristiques intrinsèques des objets et des surfaces. Chaque surface possède ainsi une signature spectrale - quantité d'énergie émise ou réfléchiée en fonction de la longueur d'onde - qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires.

Classification non supervisée

La méthode de classification utilisée est la méthode « Isodata » (Shimabukuro *et al.*, 1991). Cette classification calcule les moyennes de N classes, régulièrement distribuées dans l'espace des données. Puis, par itérations successives, la méthode va affecter les pixels restants aux centres de classes sur la base de leur distance minimum. A chaque itération les moyennes sont donc recalculées, les pixels sont reclassés en fonction des nouvelles moyennes. Ce calcul continue jusqu'à ce que le taux de pixels changeant dans chaque classe soit inférieur au seuil fixé par l'utilisateur ou que le nombre maximum d'itérations soit atteint.

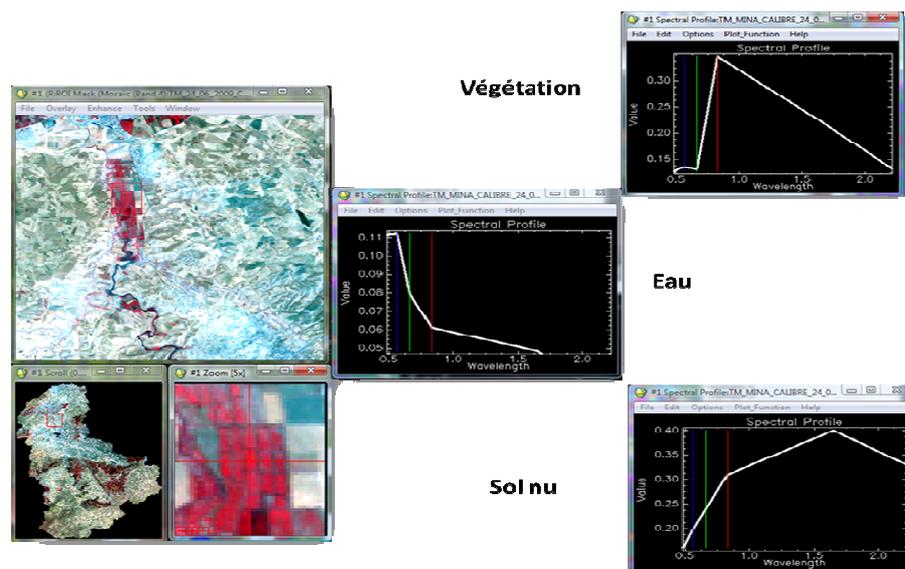


Fig. 47: Exemple la signature spectrale de l'eau, la végétation et le sol nu.

Les classes thématiques générées par la méthode « isodata » sont ensuite identifiées à l'aide des photos satellitaires de très hautes résolution de Google Earth. Le résultat de la classification est représenté dans la figure 48a. Les classes représentant la même thématique, comme par exemple la végétation 1,2,...,5, sont ensuite regroupées dans une seule classe (figure 48b).

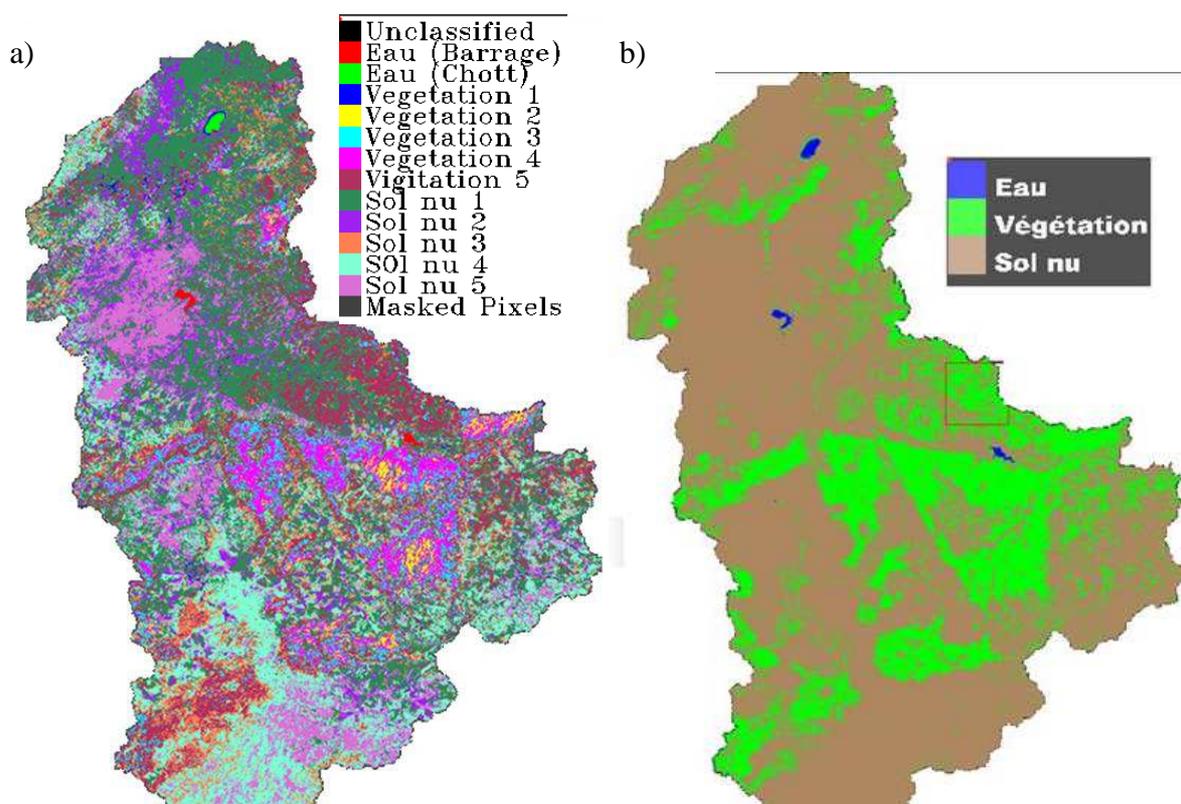


Fig. 48: Résultats de la classification, a) classification de l'image Landsat TM du 24 juin 2009 par la méthode non supervisée (Isodata), b) Combinaison des classes thématique.

Classification Dirigée (pseudo-bandes)

Pseudo-bandes (Changement de variables):

L'analyse en composantes principales (ACP) et l'indice de végétation (NDVI) sont mis en œuvre dans le cas présent afin de sélectionner les meilleures bandes spectrales d'une part, et d'augmenter le contraste sol-végétation d'autre part, et cela dans le but de faciliter l'étape de segmentation (Provencher *et al.*, 2007).

Classification par le Maximum de Vraisemblance

Chaque classe est définie par une courbe de densité de probabilité. La méthode calcule la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée. Le pixel sera affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte (Eerens *et al.*, 2000). Cette méthode classe tous les pixels sauf si on applique un seuil de probabilité (en dessous duquel les pixels de très faibles probabilités ne seront pas classés) (Guide d'utilisation d'ENVI 2004, « aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/biblio_sr/ENVI_userguid.pdf »).

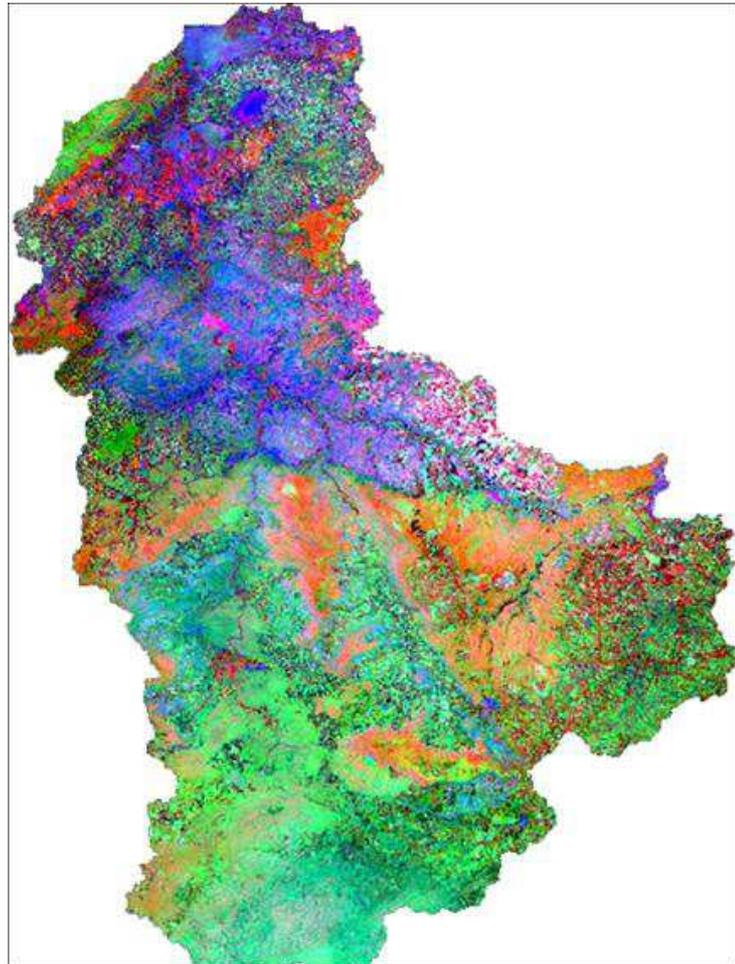


Fig. 49: Composition colorée produites à partir des composantes principales de l'imagerie Landsat TM du 24 juin 2009 sur le bassin versant de l'Oued Mina. Composantes principales 1, 2, 3 assignées respectivement aux couleurs rouge, verte et bleue.

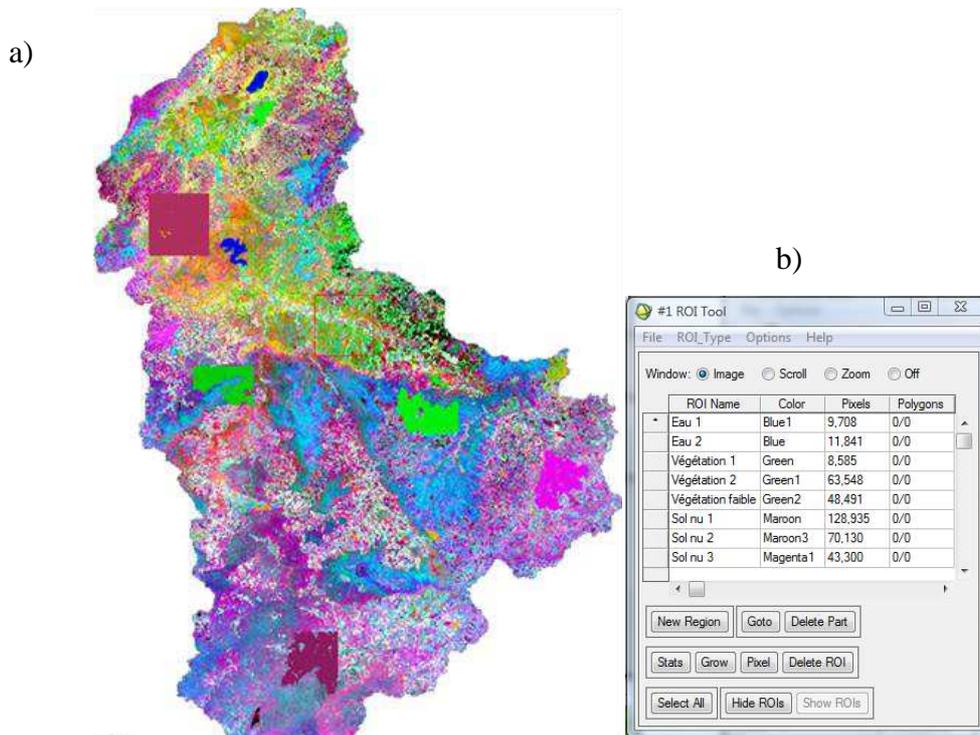


Fig. 50: Composition colorée produites à partir des deux premières composantes principales et l' NDVI de l'imagerie Landsat TM du 24 juin 2009 sur le bassin versant de l'Oued Mina. Composantes principales 1, 2 et NDVI assignées respectivement aux couleurs rouge, verte et bleue. a) choix des zones d'échantillonnage. b) définition des classe thématiques.

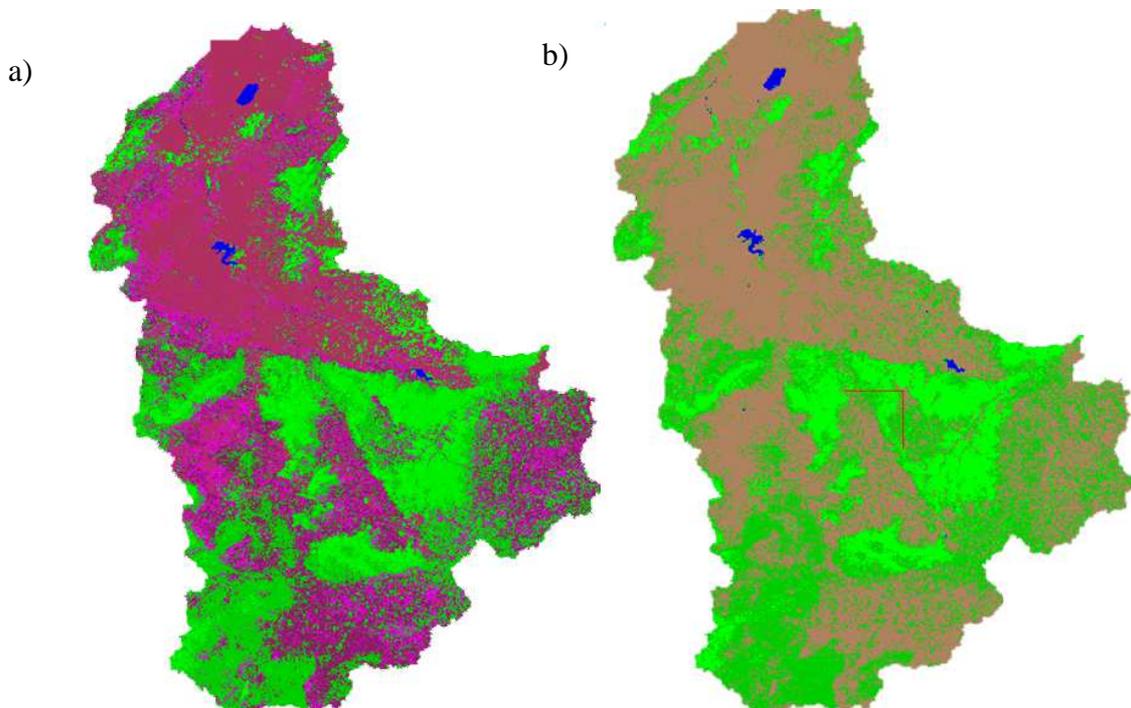


Fig. 51: Résultats de la classification, a) classification supervisée de l'image Landsat TM du 24 juin 2009 par la méthode « Maximum de Vraisemblance », b) Combinaison des classes thématiques.

Matrice de confusion

La matrice de confusion permet d'évaluer la qualité statistique des noyaux sites d'entraînement élaborés par la photo-interprétation (Guide d'utilisation d'ENVI 2004, « aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/biblio_sr/ENVI_userguid.pdf ». L'objectif est de quantifier le nombre de pixels d'une classe de référence que l'on retrouve dans la même classe d'affectation (= pixels bien classés). Les valeurs situées sur la diagonale de la matrice représentent les pixels bien classés (exprimés en valeur absolue ou en %). Différents indicateurs de précision sont proposés : précision globale, coefficient Kappa, matrice de confusion, erreurs d'excédents et de déficits, précision pour l'utilisateur et précision pour le réalisateur (Prasannakumar *et al.*, 2011).

```

Confusion Matrix: [Memory1] (3547x4774x1)
Overall Accuracy = (384538/384538) 100.0000%
Kappa Coefficient = 1.0000

Class      Ground Truth (Pixels)
Unclassified Eau 1 Eau 2 Végétation 1 Végétation 2 Végétation fa
Eau 1 [Blue1] 9708 0 0 0 0 0
Eau 2 [Blue] 0 11841 0 0 0 0
Végétation 1 0 0 8585 0 0 0
Végétation 2 0 0 0 63548 0 0
Végétation fa 0 0 0 0 48491 0
Sol nu 1 [Mar 0 0 0 0 0 0
Sol nu 2 [Mar 0 0 0 0 0 0
Sol nu 3 [Mag 0 0 0 0 0 0
Total 9708 11841 8585 63548 48491

Class      Ground Truth (Pixels)
Unclassified Sol nu 1 Sol nu 2 Sol nu 3 Total
Eau 1 [Blue1] 0 0 0 0 9708
Eau 2 [Blue] 0 0 0 0 11841
Végétation 1 0 0 0 0 8585
Végétation 2 0 0 0 0 63548
Végétation fa 0 0 0 0 48491
Sol nu 1 [Mar 128935 0 0 0 128935
Sol nu 2 [Mar 0 70130 0 0 70130
Sol nu 3 [Mag 0 0 43300 0 43300
Total 128935 70130 43300 384538
    
```

Fig. 52: Matrice de confusion de la classification supervisée de l'image Landsat TM du 24 juin 2009 par la méthode « Maximum de Vraisemblance ».

La figure 52 résume la précision de la classification par le choix des échantillons :

Précision globale (Overall Accuracy) : C'est le rapport du nombre de pixels bien classés sur le nombre total de pixels. Dans notre exemple la précision globale = 384538 / 384538 = 1

Coefficient Kappa (Kappa Coefficient) : Il correspond à une autre mesure de la précision de la classification.

$$Kappa = \frac{\sum_{i=1}^{\gamma} X_{ii} - \sum_{i=1}^{\gamma} (X_{i+} X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^{\gamma} (X_{i+} X_{+i})} \quad (2)$$

Avec N : nombre total d'observation et γ est le nombre de lignes.

Le coefficient Kappa dans notre cas est égal à 1, On constate donc qu'il existe une excellente correspondance entre la cartographie et les observations de terrain .Ce résultat est obtenu après plusieurs classifications en choisissant les meilleurs échantillons (pixels) qui représentent les classes thématiques.

Zonage par segmentation ou seuillage

Le zonage d'image est fourni par l'image mono bande non spectrale définie par l'indice de végétation NDVI. L'image dans ce cas n'est définie que par une seule variable (figure 53). La valeur de NDVI est fixée pour représenter une classe thématique (eau, sol nu, végétation).

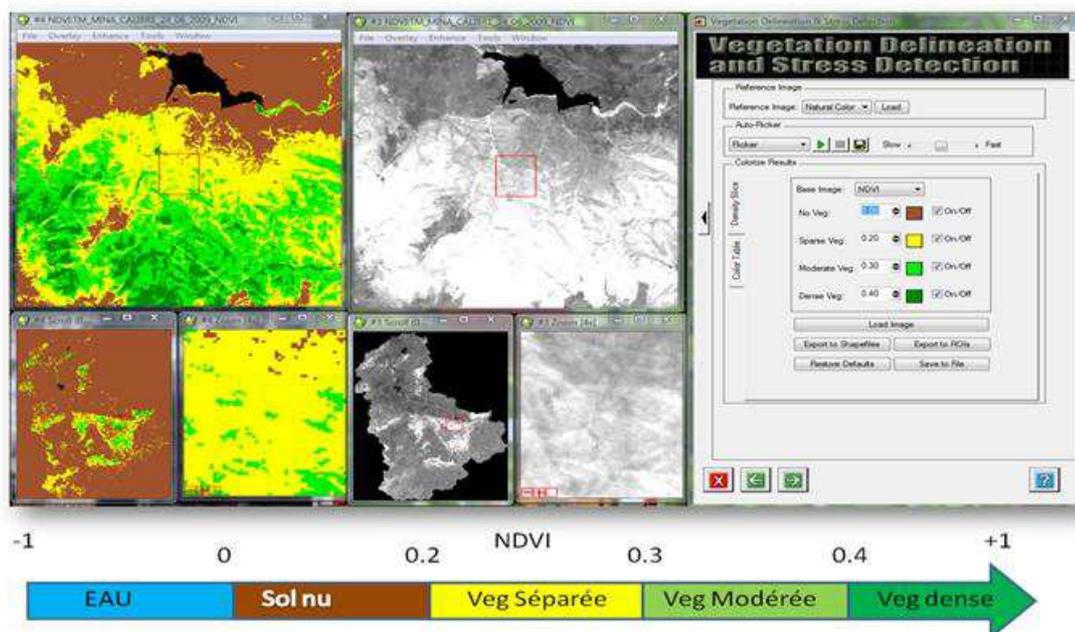


Fig. 53: Zonage de l'image prise le 24 juin 2009 par segmentation de l'indice NDVI.

Tableau 13: Tableau récapitulatif des traitements préliminaires effectués sur les données disponibles du capteur Langsa TM.

Prétraitements	Interprétation ou analyse	Analyse des erreurs	Sortie des résultats et stockage des données	Intégrations à d'autres processus
<ul style="list-style-type: none"> Correction radiométrique Correction géométrique Calibration Amélioration des images (contraste, convolution) Création d'images en couleurs composées Transformation (Indices, ACP, Tasseled Cap))	<ul style="list-style-type: none"> Photo-interprétation Classification Segmentation 	Analyse de la similitude Analyse de la divergence	<ul style="list-style-type: none"> Carte thématique Tableau statistique 	<ul style="list-style-type: none"> Système de gestion de B.D. Système d'information géographique

5.4.2.5. Génération de masques

Il peut être important, pour affiner cette étude, de masquer certaines zones de la scène car elles sont inutiles à l'analyse et risquent d'interférer avec les zones « utiles ». Un masque sert à éliminer une partie de l'image ou bien isolé des objets dont on ne souhaite pas traiter. Le premier masque élaboré isole seulement le bassin versant de la scène globale (figure 54°). Les traitements effectués par la suite concernent uniquement la partie extraite par le masque. Le deuxième masque élaboré concerne la surface occupée par l'eau.

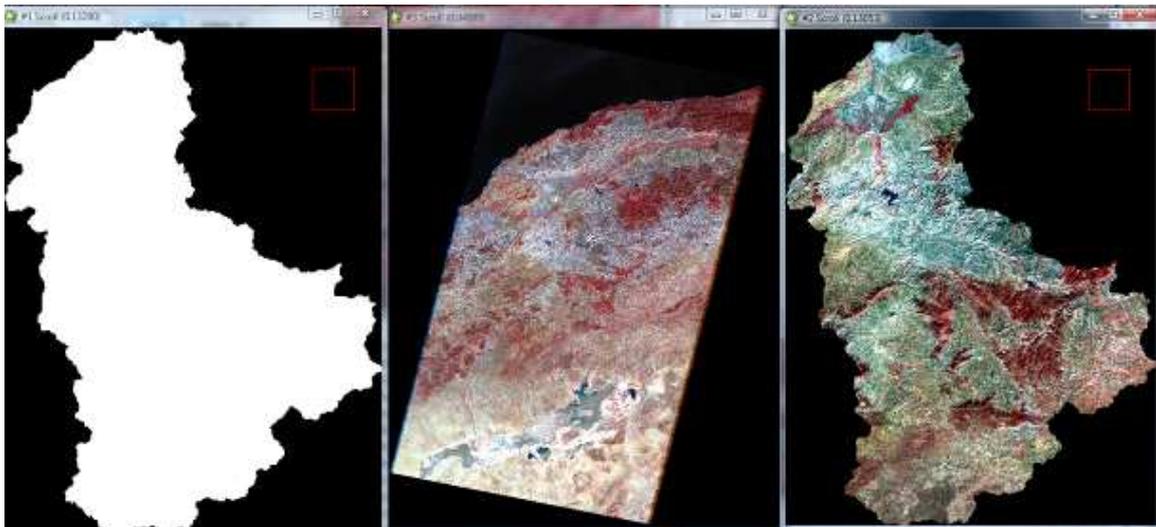


Fig. 54: Extraction des données à partir d'un masque.

5.5. Résultats et discussion

5.5.1. Facteur d'érosivité des précipitations

C'est l'énergie des gouttes des pluies qui déclenche le processus de destruction des agrégats et le ruissellement assure leur transport (Roose et Lelong, 1976). Le facteur R est estimé par la formule (Wischmeier et Smith, 1978):

$$R = ME_c 130 \quad (4)$$

Où M est un coefficient dépendant du système d'unités de mesure, et E_c est l'énergie cinétique de l'intensité moyenne sur 30 minutes (I_{30}) des gouttes de pluie de chaque averse.

Des informations sur les précipitations et sur l'intensité de ces précipitations sont nécessaires pour avoir une estimation directe du facteur R . Comme ces données ne sont pas disponibles dans les stations météorologiques couvrant la région d'étude, une méthode simplifiée a été utilisée pour estimer R . Il faut reconnaître que cela représente une limitation dans notre étude, et que la disponibilité des données journalières réduirait l'incertitude sur les résultats. Cependant, nous avons tenu à poursuivre notre étude malgré cela, en cherchant une méthode alternative de détermination de R . De plus, le but de l'estimation du risque d'érosion présenté dans ce travail est de donner un aperçu des schémas régionaux du risque d'érosion, plutôt que

de proposer des prédictions quantitatives et détaillées de perte en sol. C'est pourquoi, cette équation va donc être appropriée à cette étude.

Les seules données disponibles concernant les précipitations dans les stations qui se trouvent dans le bassin ou à sa proximité sont des moyennes mensuelles et annuelles. Certains auteurs (Sadiki *et al.*, 2004) ont utilisé des formules alternatives qui n'impliquent que les précipitations mensuelles et annuelles pour déterminer le facteur R :

$$\log R = 1,74 \log \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_i^2}{P} \right) + 1,29 \quad (5)$$

Où les P_i représentent les précipitations mensuelles et P les précipitations annuelles (mm). Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles (mm) de la période allant de 1968 à 2001 ont été utilisées pour le calcul du facteur R . Les résultats sont représentés sur la figure 55.

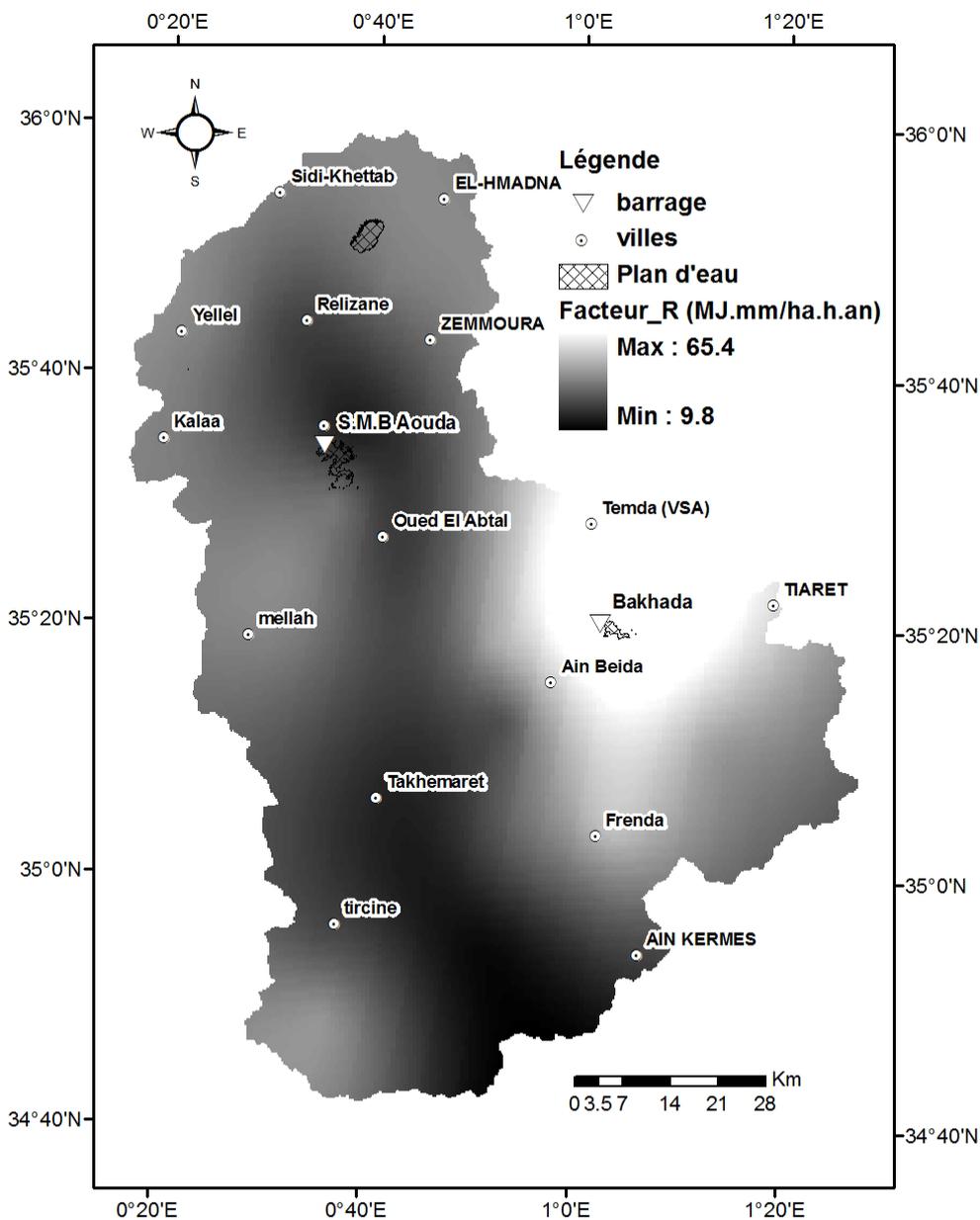


Fig. 55: Carte d'érosivité des pluies.

5.5.2. Erodibilité des sols (K)

Les sols diffèrent selon leur résistance à l'érosion, en fonction de la texture, de la structure, de la rugosité, de la teneur en matière organique et du degré d'humidité du sol. L'érodibilité du sol K est la susceptibilité du sol à l'érosion. Le facteur érodibilité des sols et le taux d'érosion sont déterminés expérimentalement sous des conditions standard. La répétition des expérimentations sur différents types de sols a permis à Wischmeier et Smith (1978) de développer une équation pour le calcul de l'érodibilité des sols :

$$100K = 2.1M^{1.14} * 10^{-4}(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \quad (6)$$

Où M est calculé par la formule $M = (\% \text{ sable fin} + \text{ limon}) \times (100 - \% \text{ argile})$; a est le pourcentage de matière organique ; b est le code de la perméabilité ; c : est le code de la structure.

Aucune donnée détaillée sur la taille des particules n'était disponible pour cette région, mais les textures de surface ont été déterminées au moyen de la lithologie. Les divers types de roches et leurs structures donnent une indication sur la capacité d'infiltration des zones occupées par les roches et par les sols et en conséquence sur la quantité de sol susceptible d'être érodée (Boukheir *et al.*, 2001). Une faible infiltration des roches indique qu'une grande quantité d'eau ruisselle, par conséquent, une forte quantité de terre peut être emportée.

En se basant sur les images satellitaires, on a pu extrapoler la lithologie sur la totalité du bassin en utilisant la carte lithologique réalisée par la GTZ dans le cadre d'un projet de collaboration entre l'Algérie et l'Allemagne (GTZ, 1996). Cette carte couvre uniquement le bassin versant de Sidi M'Hamed Ben Aouda. L'approche utilisée consiste, dans un premier temps, à supprimer l'effet de la végétation à l'aide de l'outil « vegetation suppression » du logiciel ENVI 4.7. L'image utilisée est acquise pour la période sèche (juin 2009) où la surface de la végétation atteint son minimum. Par la suite, on a effectué une classification dirigée en prenant des échantillons des cartes lithologiques et géologiques déjà élaborées.

Les linéaments, les failles, les réseaux hydrographiques (densité de drainage) et la karstification peuvent aussi nous donner une idée sur le degré d'érodibilité des sols (Scanvic, 1983). Les linéaments et les karsts associent toujours une infiltration importante et, par conséquent, une érodibilité faible.

Les dépôts meubles occupent une grande superficie dans la partie Nord du bassin. Ces dépôts sont essentiellement des marnes, des grès et des roches sédimentaires indifférenciées. En amont du barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda, les marnes tertiaires prédominent, elles sont recouvertes au Nord-est par des grès calcaire et des dolomies. La puissance de ces formations se réduit au centre et à l'Ouest de la partie septentrionale. Dans le centre et le Sud-Est, des marnes jurassiennes sont présentes. Au Sud-ouest affleure un complexe calcaire-dolomie du Jurassique moyen.

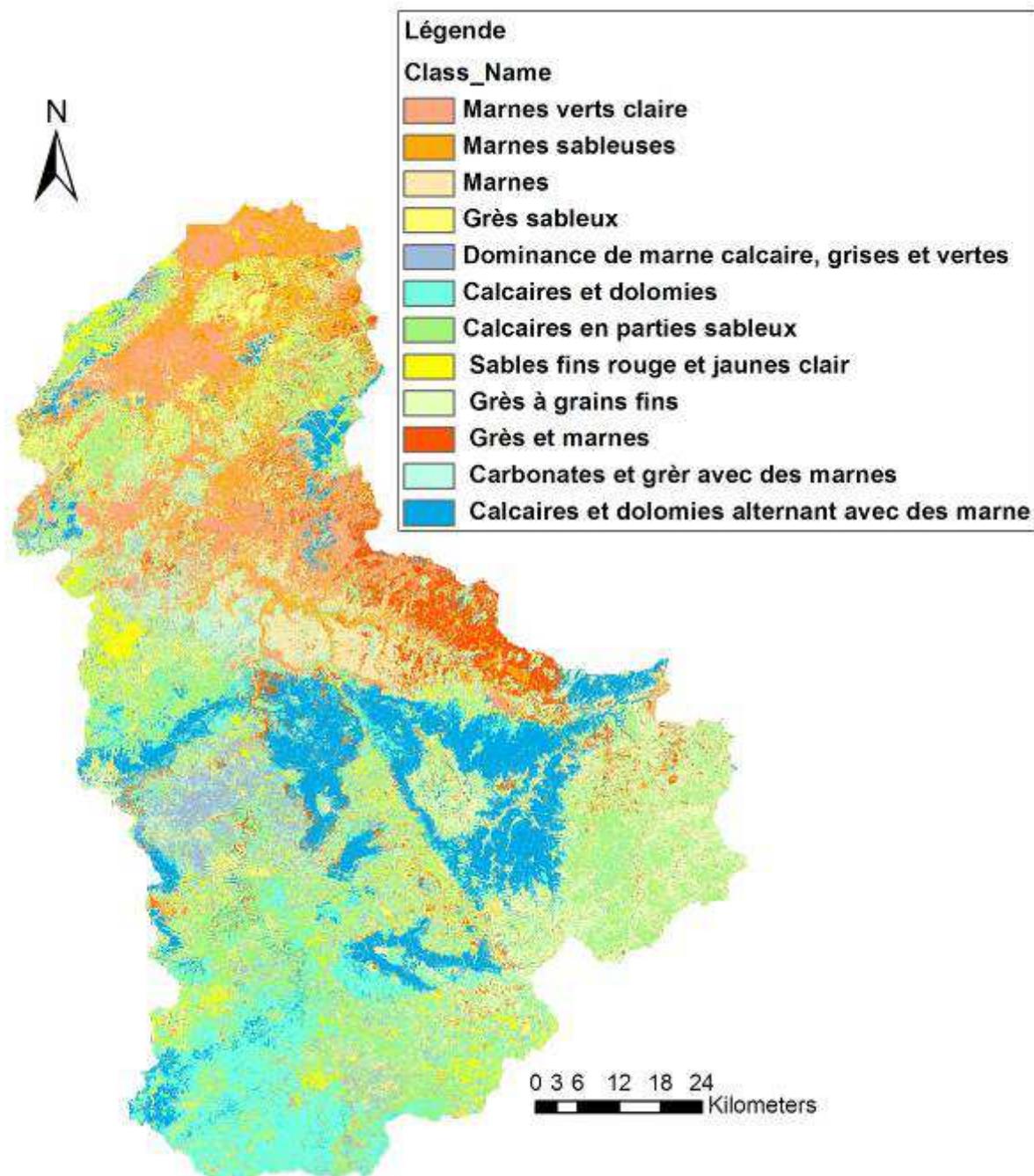


Fig. 56: Carte des classes lithologiques élaborée suite à une classification du sol à partir d'une image Landsat après suppression du caractère de la végétation.

Les valeurs de K correspondant à des types de sols ont été identifiées à partir de l'abaque d'érodibilité des sols (figure 57) en tenant compte de la classe de perméabilité. Les valeurs de K estimés pour les groupes de lithologie varient de $0,15 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (limoneux argileux), $0,06 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ pour le sable limoneux, $0,01 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ pour le sable.

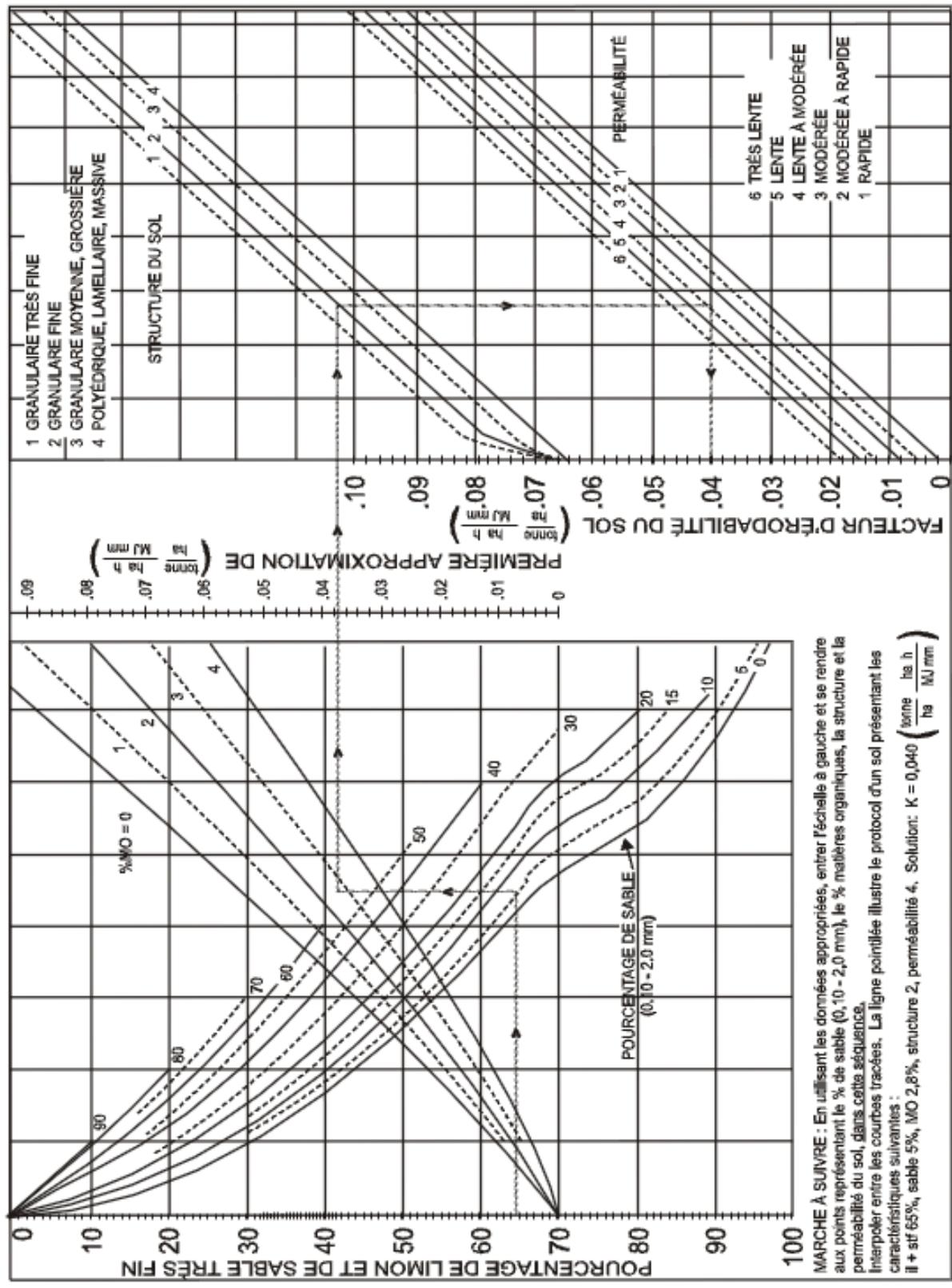


Fig. 57: Nomogramme de l'érodibilité des sols (Foster *et al.*, 1981, Foster *et al.*, 1982).

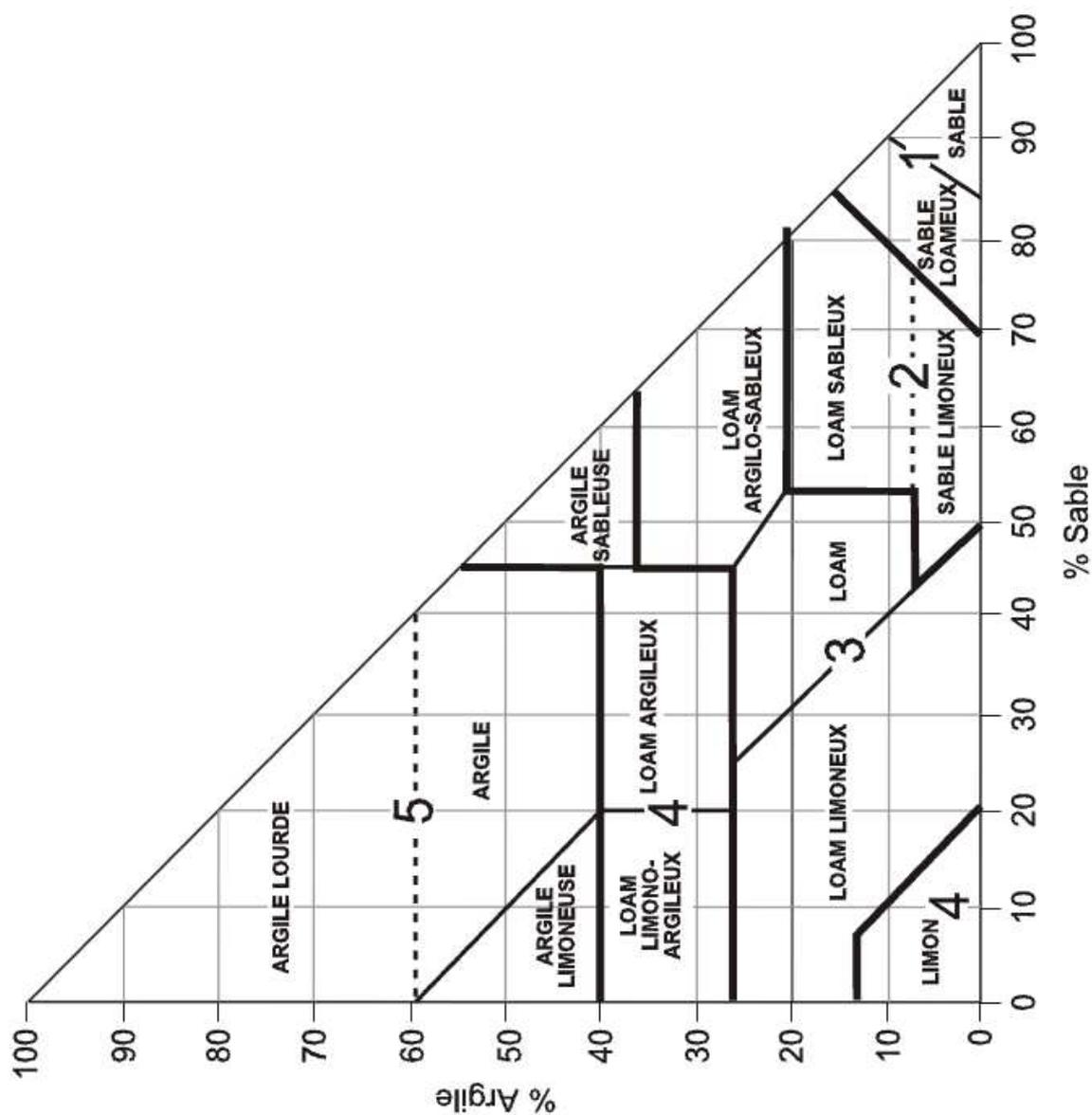


Fig. 58: Codes de perméabilité basé sur la classification des textures (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)

Tableau 14: Code des perméabilités différentes facies Source: Adapté par Stone et Hilborn (2000).

Facies	Code	Facteur k (moyennes)
Limono-argileux, argile	6	0,15
limono-argileux, sable	5	0,1
Limon argilo-sableux, argileux	4	0,1
Sable limoneux	3	0,06
Sable limoneux, sableux	2	0,05
sable	1	0,01

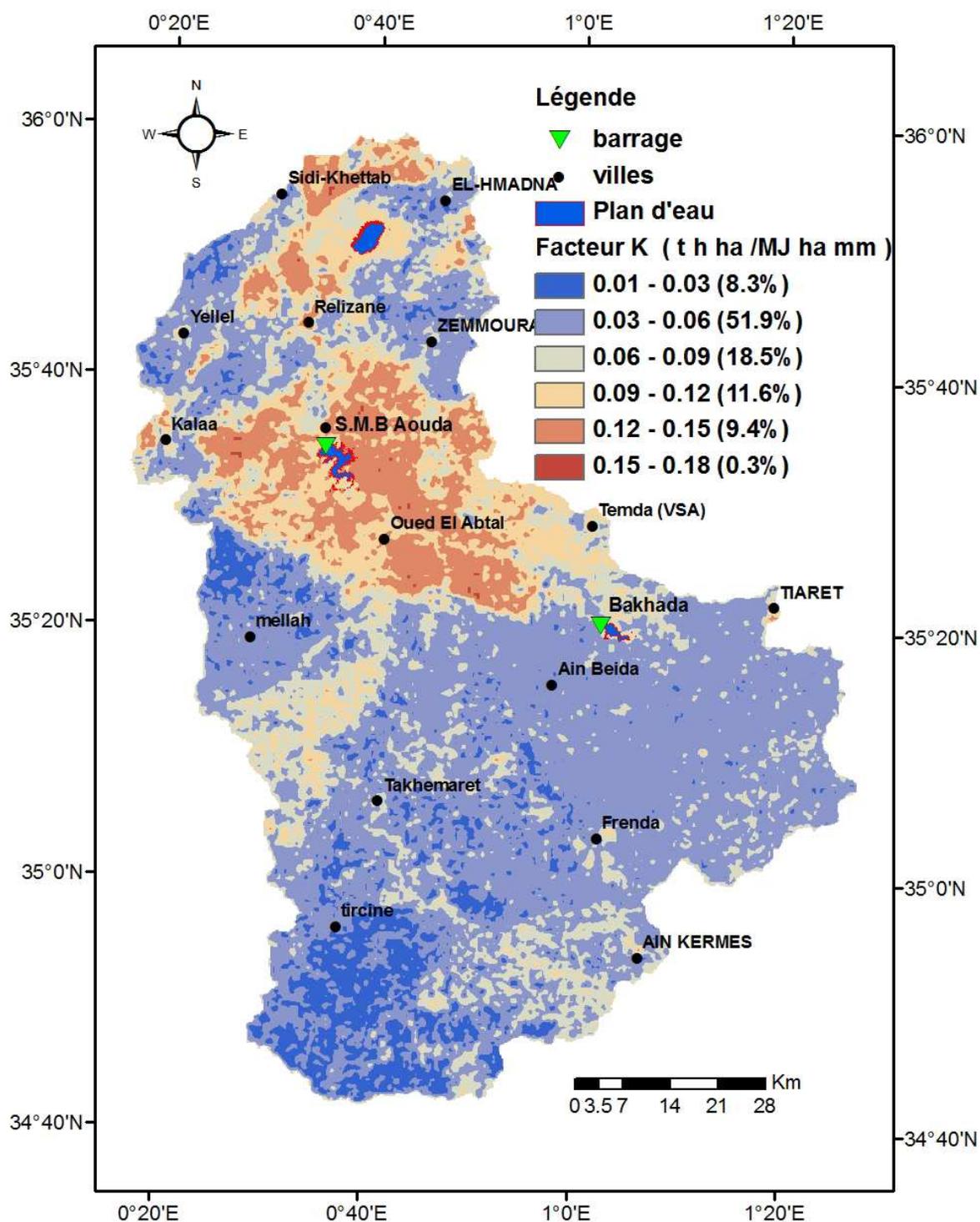


Fig. 59: Carte d'érodibilité du sol.

La figure 59 présente une cartographie du facteur d'érodibilité K pour le bassin versant de l'Oued Mina. La résolution spatiale de cette image matricielle est de 30 m. le regroupement de plusieurs pixels adjacents permet de représenter les unités pédologiques de plus de 1 ha. Cinq classes d'érodabilité (facteur K) ont été utilisées pour exprimer l'étendue de la variabilité d'érodabilité. L'étendue de chaque classe a été fixée arbitrairement à 0,03 t h ha

$\text{MJ}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$. Par conséquent, les valeurs d'érodabilité illustrées sur cette carte doivent être considérées comme des valeurs relatives à l'échelle du bassin versant.

La valeur moyenne du facteur d'érodabilité K atteint $0,07 \text{ t h ha MJ}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ sur l'ensemble du bassin versant. Les régions accusant une très faible érodabilité ($K < 0,01 \text{ t h ha MJ}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) sont localisées principalement au Sud du bassin versant, dans les hautes plaines et dans les piedmonts du Nord-ouest. Ces régions sont caractérisées par une lithologie imperméable regroupant les facies Karstiques et sableux. Cette classe d'érodabilité occupe 60% du bassin versant. La représentation spatiale des classes de la figure 59 fait ressortir une bande de sols, située en amont de la plaine agricole du périmètre d'irrigation de la Mina. Cette lanière, qui s'étend du sud-est au nord-ouest, présente une classe d'érodabilité élevée occupant environ 20% de la superficie totale du bassin versant.

5.5.3. Occupation des sols (C)

L'occupation des terres et la végétation sont en rapport avec d'autres facteurs tels que: la topographie, la géologie, les sols, le climat et les caractéristiques hydrologiques. L'occupation du sol, sauf dans les endroits éloignés, est en rapport direct avec les activités humaines. Les activités qui ont la plus grande influence sur l'érosion des sols sont l'agriculture, l'élevage, les exploitations minières, l'abattage du bois, la construction de routes et l'urbanisation (White, 1986).

L'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Mina a été analysée en se basant sur l'interprétation d'images satellites Landsat-TM de juin 2009. Le couvert végétal offre une grande diversité spatiale qui est influencée par des écarts climatiques induits par la proximité de la mer Méditerranée au Nord, d'une part, et le Sahara au Sud, d'autre part. L'activité agricole caractérise fortement la plus grande partie Nord du bassin. Cette activité agricole concerne essentiellement la plaine du bas Cheliff et la Mina. Il s'agit surtout de grandes plaines céréalières dotées de systèmes d'irrigations. Les zones de matorral occupent une superficie importante dans la partie centrale du territoire. Ce type de couvert est suivi par les steppes qui se concentrent au Sud du bassin. Le couvert forestier est concentré dans les régions de forte pente au Nord-est et au Sud-est du bassin.

C'est pourquoi, l'approche basée sur le NDVI a été plutôt utilisée pour obtenir des valeurs approximées du facteur C . En fait, la valeur du facteur C dépend de la nature de la végétation et du pourcentage du couvert végétal. Ce dernier peut être estimé par l'écart normalisé de l'indice de végétation (NDVI). La figure 60 présente les valeurs du NDVI dans le bassin versant et la figure 62 présente la relation entre le facteur C et le NDVI.

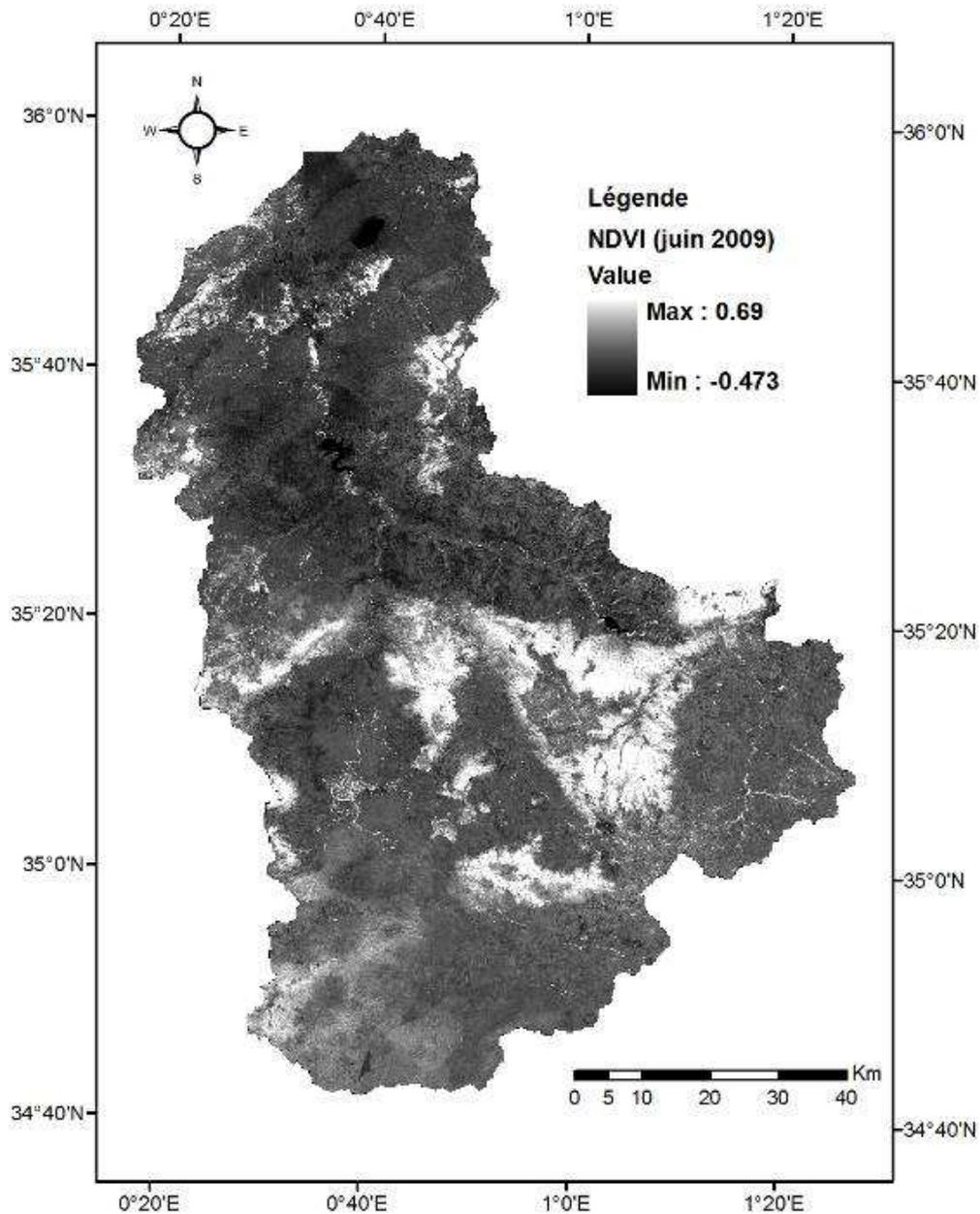


Fig. 60: Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'imagette Landsat du 24 juin 2009.

La classification de la végétation est réalisée suivant les conditions de seuillage suivantes:

- NDVI < -0.1: Eau
- 0.1 < NDVI < 0.15: Sol nu
- 0.15 < NDVI < 0.25: Végétation clairsemée
- 0.25 < NDVI < 0.4: Végétation moyennement dense
- NDVI > 0.4: Végétation dense

Les classes d'occupation du sol ont été choisies selon la réflectance spectrale des objets. La classification a été validée en utilisant les photos de très haute résolution spatiale (THRS) de Google Earth™ et en se basant sur des études précédentes menées par Chader *et al.*, (1991). La valeur maximale reflète le pourcentage le plus élevé de la couverture végétale et représente aussi le bon état de la végétation. Les régions sans végétation (sol nu et plans d'eau) ont une faible valeur du NDVI. Le NDVI intervient également pour assister la classification d'une image lors du choix de zones d'échantillonnage (Caloz et Collet, 2001).

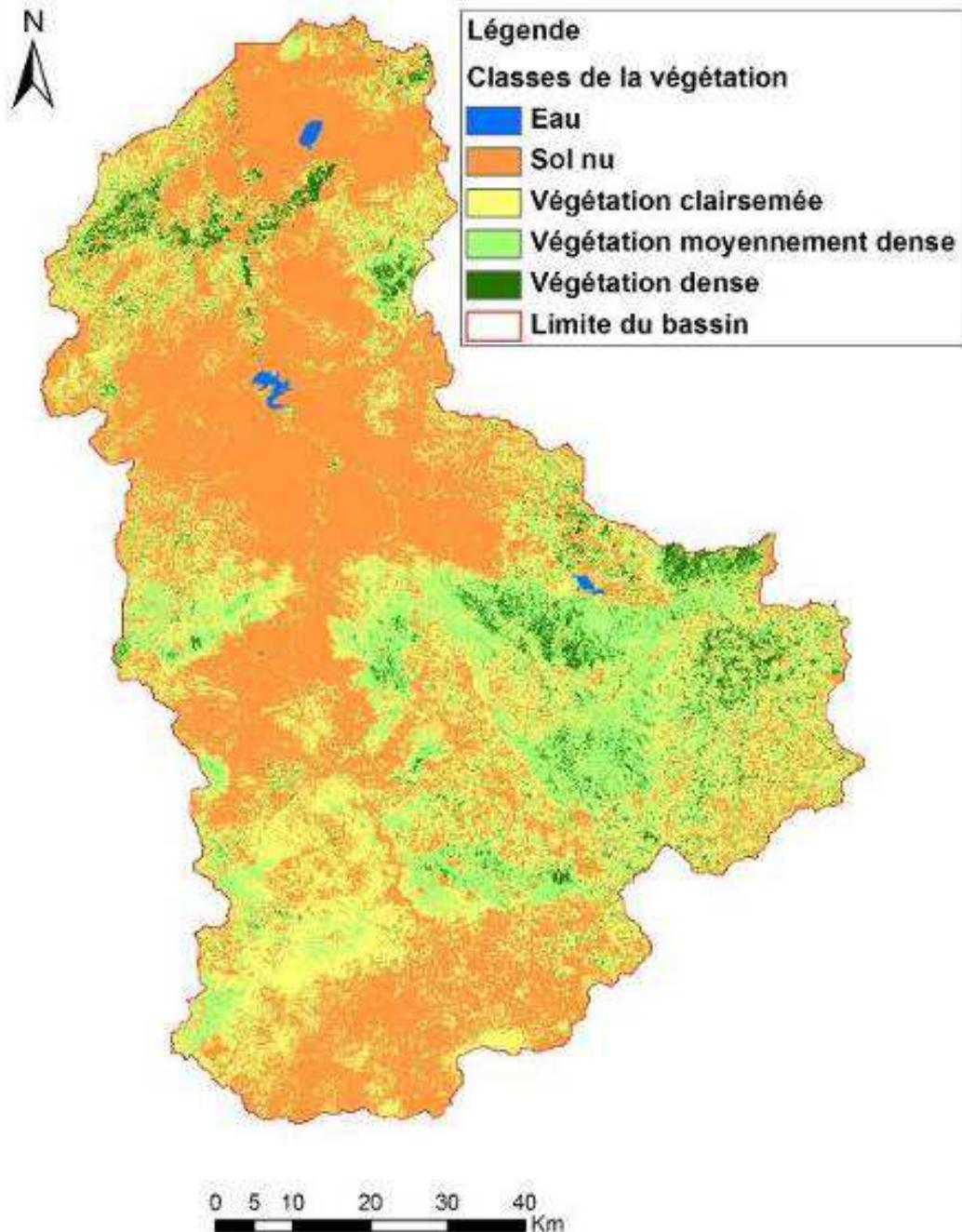


Fig. 61: Carte de la classification de l'occupation du sol dans la région d'étude.

Afin d'estimer les valeurs du facteur *C* dans la région d'étude, on a utilisé la régression entre deux valeurs extrêmes. Ces valeurs sont tirées du diagramme expérimental représenté dans la figure 62a (Gitas *et al.*, 2009). La droite de régression trouvée est: $C = 0.9167 - NDVI \cdot 1.1667$. La carte du facteur *C* (figure 63) est générée en utilisant la droite de régression trouvée à l'aide du module « Spatial Analysis » d'ArcGISTM 9.3.1.

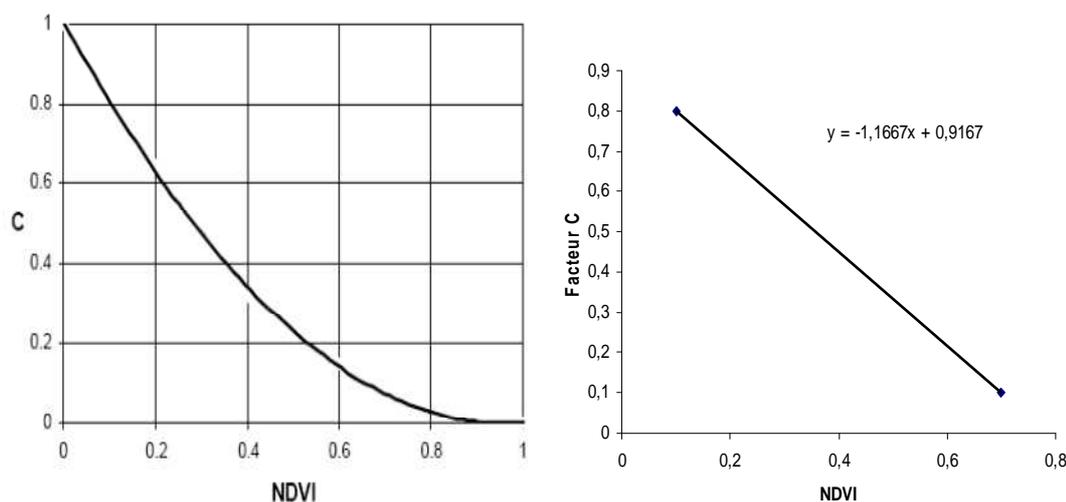


Fig. 62: (a) Diagramme expérimental d'estimation du facteur *C* de Gitas *et al.*, (2009), b) relation entre le facteur « *C* » et le NDVI.

La droite de régression trouvée est : facteur $C = 0.9167 - NDVI \cdot 1.1667$.

La carte du facteur « *C* » est générée en utilisant la droite de régression trouvée à l'aide du module « Spatial analysis » d'ArcgisTM 9.3.1.

La majeure partie du bassin est caractérisée par des valeurs du facteur *C* supérieures à 0,8. Ces zones sont des îlots de sols nus ou en jachère. La seconde classe en importance est constituée de valeurs variant de 0,6 à 0,7. Les régions dans lesquelles se situe cette seconde classe sont principalement au Sud et Sud-Ouest. En général, ces zones sont associées aux grandes cultures céréalières et fourragères. Les zones représentant les valeurs inférieures à 0,6, sont généralement couvertes de massifs forestiers et de formations de maquis/garrigue ou de matorral. Les valeurs du facteur protecteur des sols contre l'érosion sont plus faibles durant la période sèche (juin 2009). Durant cette période le sol se trouve exposé aux premières pluies d'automne.

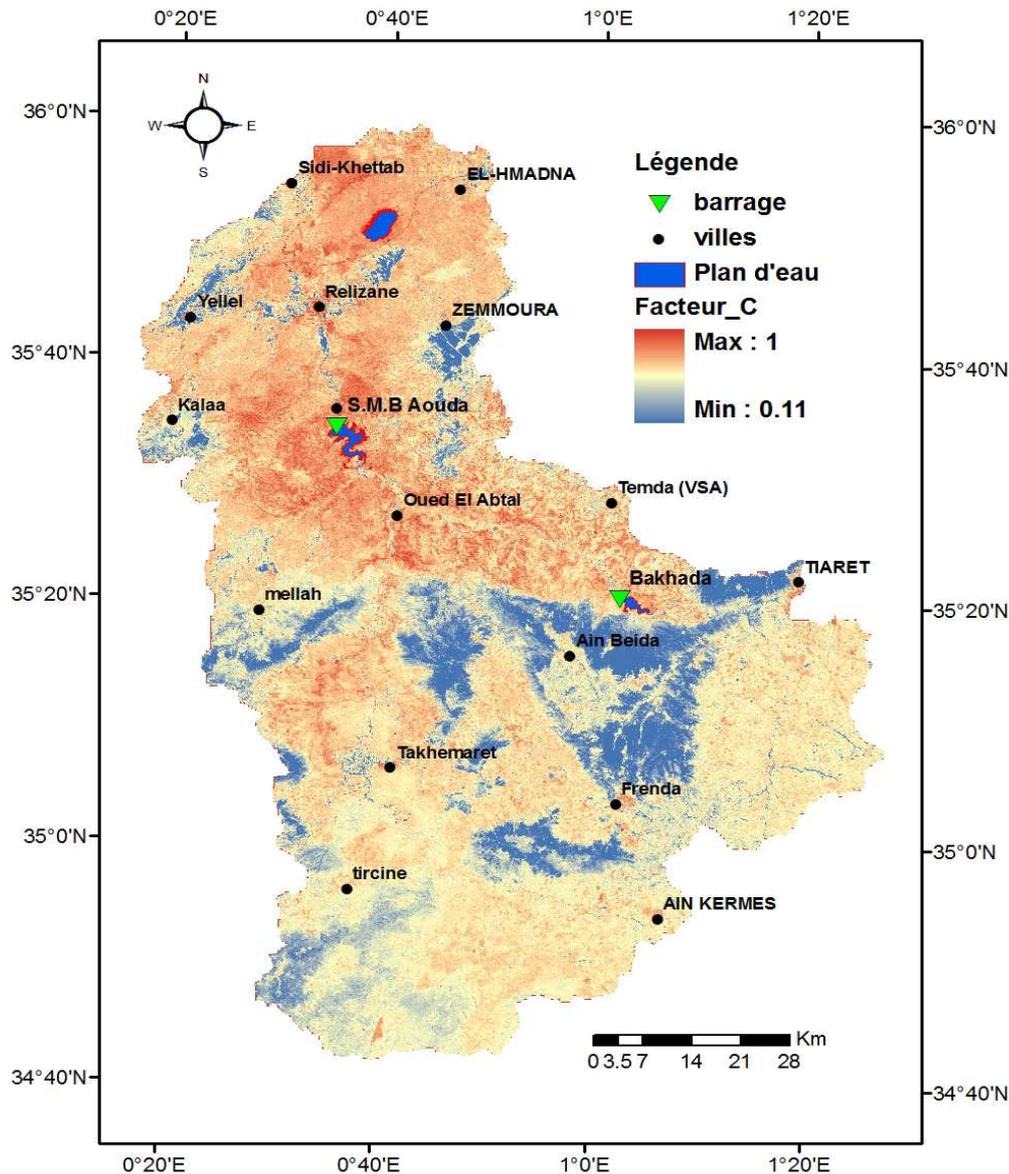


Fig. 63: Carte du facteur « C ».

5.5.4. Facteur LS :

Les fortes pentes avec un écoulement rapide sont en général à l'origine d'une érosion importante dont l'importance dépend de la géologie, de la nature des sols, et de la protection par la couverture végétale. Le facteur LS (équation (7)) est fonction de la longueur et de l'inclinaison des pentes. Dans le cadre de notre étude, on a utilisé la formule développée par Wischmeier et Smith (1978) et elle a été utilisée par plusieurs auteurs (Park, 2007, Vezena et Bonn, 2006, Rodríguez et Suárez, 2010):

$$LS = \left(\frac{L}{22,13} \right)^m (0,065 + 0,045S + 0,065S^2) \quad (7)$$

Où L est la longueur de pente (m); S est l'angle de la pente; m un paramètre tel que $m = 0,5$ si la pente est $>5\%$, $m = 0,4$ si la pente est de $3,5$ à $4,5\%$, $m = 0,3$ si la pente est de 1 à 3% et $m = 0,2$ si la pente est $<1\%$.

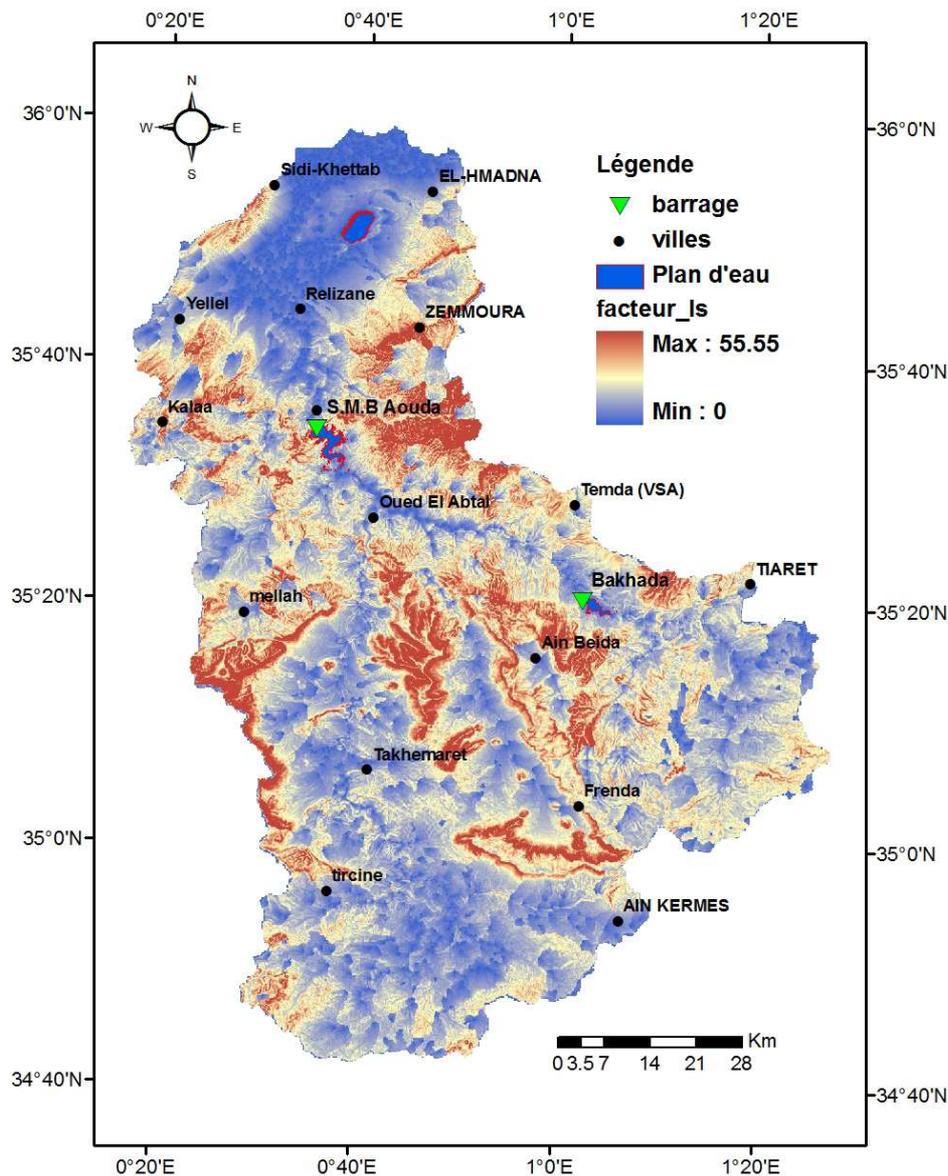


Fig. 64: Carte du facteur LS

Les facteurs L et S peuvent être estimés séparément à partir des MNT. Concernant la longueur de pente, la technique consiste à déterminer la délimitation des sous- bassins versants où l'écoulement ne rencontre aucun obstacle. Dans cette étude, la longueur et les degrés de la pente (longueur de l'écoulement de surface) ont été générés à l'aide du module intégré dans « l'analyse spatiale » de l'ArcGis 9.3. Les démarches de la génération du facteur LS sont :

1. Le MNT a été utilisé comme entrée pour déterminer le sens d'écoulement;
2. Le sens d'écoulement a été utilisé comme une grille d'entrée pour calculer les longueurs des pentes ;
3. La pente est alors dérivée du MNT;
4. La longueur de l'écoulement de surface et les cartes de pente ont été utilisés comme intrants dans la dérivation de LS.

Une grande partie du bassin de l'Oued Mina est caractérisée par un facteur $LS < 5$ (figure 64). En effet, la quasi-totalité des terres sont des plaines situées dans la partie Nord du bassin. A ces superficies s'ajoute la plaine alluviale de l'Oued Mina. Une dominance de valeurs variant de 5 à 10 est observée dans la région montagneuse située dans la partie septentrionale du bassin. À l'opposé, le fond des vallées est caractérisé par des valeurs faibles. Finalement, le facteur LS dépasse la valeur 20 sur quelques versants abrupts.

5.5.5. Pratiques agricoles et conservation du sol (P)

En raison de l'insuffisance des informations sur les pratiques anti-érosives et sur les caractéristiques des formations superficielles de la région d'étude, nous avons fixé la valeur du facteur P à 1 sur l'ensemble du bassin versant. Nous avons opté pour cette approche du fait que les pratiques de soutien couvrent des superficies modestes ainsi et que ces travaux n'ont pu être observés sur les images satellitaires Landsat-TM.

5.5.6. Risque érosif

La carte du risque érosif est déterminée en multipliant les couches de 30 m de résolution représentant les paramètres de l'USLE en format matriciel. La figure 65 n'indique pas seulement la perte du sol de chaque pixel, mais fournit aussi des informations sur les zones critiques vis à vis du risque de la perte en sol.

Les valeurs faibles du risque érosif occupent la partie Nord et la partie Sud-Ouest du bassin. Les terrains dans ces régions sont quasiment plat (pente inférieure à 10%). Alors que les valeurs fortes se localisent dans la région Est (en amont du barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda) et la région Ouest du territoire. Le risque érosif est important dans ces régions à cause de la forte inclinaison des terrains mais aussi aux fortes valeurs du facteur R malgré l'existence d'une végétation dans certaines régions (facteur protecteur).

Le facteur LS est le facteur essentiel du risque érosif. En région méditerranéenne, les pentes sont liées à la lithologie et au type de sol (Roose *et al.*, 1993) : les roches dures protègent souvent des pentes fortes et des sols résistants tandis que les roches tendres donnent des sols fragiles sur des pentes plus douces ; les pertes en terre peuvent donc être supérieures sur les pentes modérées. Les sols de montagne, souvent superficiels, sont mélangés à divers fragments de roche qui vont augmenter leur résistance à la battance des gouttes de pluie et au cisaillement du ruissellement (Roose *et al.*, 1993). En région forestière, le sol est couvert en permanence (C proche de zéro) et les taux d'érosion hydrique deviennent pratiquement nuls.

La carte d'érosion fournit des informations synthétiques et systématiques sur la nature, l'intensité et la répartition spatiale du phénomène, et permet donc d'identifier les zones les plus affectées et les types d'érosion dominants. Plus en détail, la mesure des phénomènes d'érosion dans certains milieux particulièrement intéressants apporte les données quantitatives et qualitatives précises, qui sont indispensables à la gestion intégrée et constituent une base

sûre pour la planification et la conception des activités requises de lutte anti-érosive (Okoth, 2002).

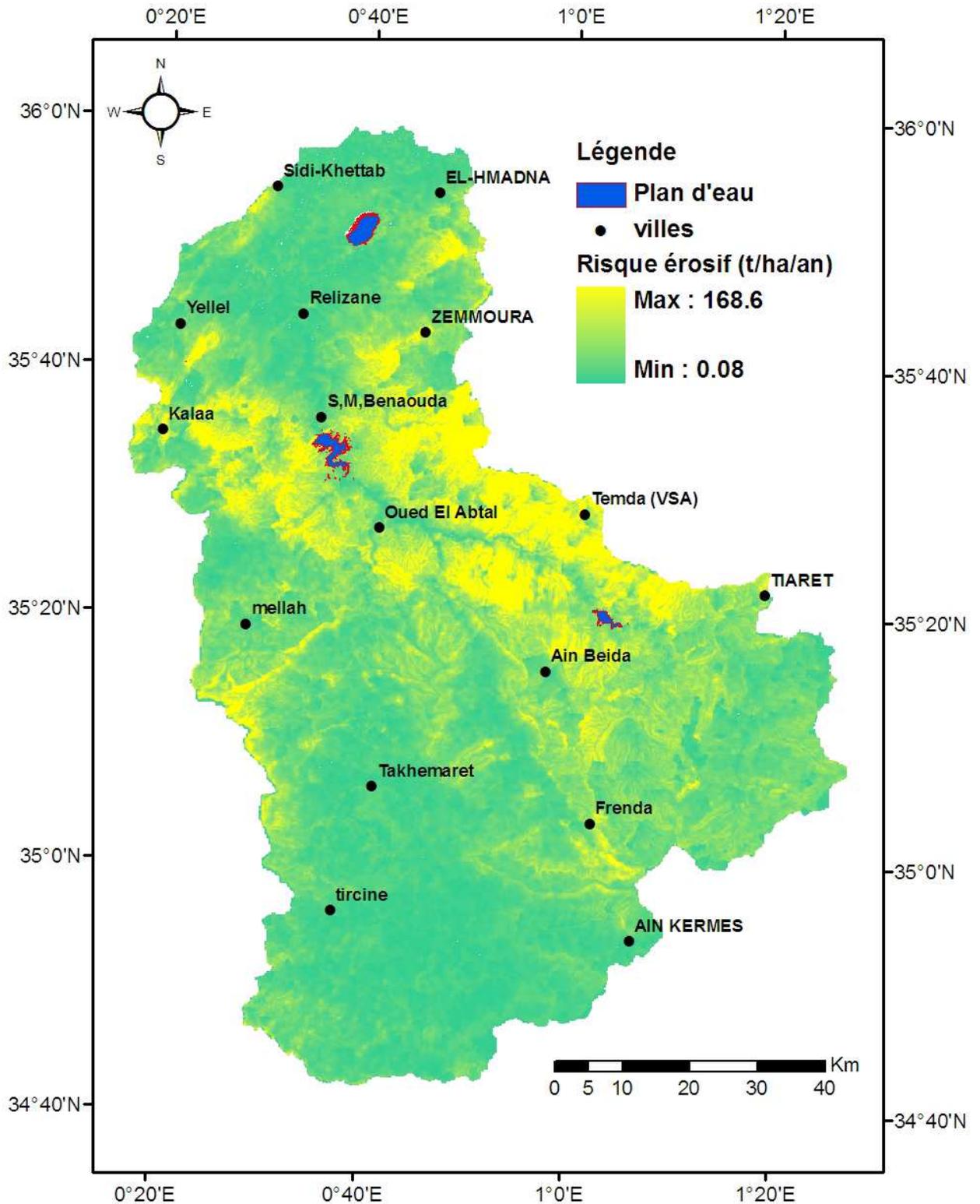


Fig. 65: Carte du risque érosif.

5.6. Analyse statistique de différents Facteurs

Les différentes couches thématiques élaborées sont superposées dans le SIG. Ce dernier, permet de faire une analyse spatiale de chaque couche. L'analyse statistique

Tableau 15: Valeur minimale et maximale de chaque facteur ainsi que la moyenne et l'écart-type.

Couche	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
Risque érosif	0,0822	168,730	12,2523	12,4392
Facteur R	9,7804	65,3685	27,5837	10,5154
Facteur K	0,0100	0,1500	0,0645	0,0322
Facteur C	0,1000	1,0000	0,7148	0,0717
Facteur LS	0,0000	55,1233	9,5046	6,5526
Pente	0,0000	67,2368	7,7711	7,1703
NDVI	-0,4733	0,6797	0,1730	0,0614

Tableau 16: Corrélation spatiale entre les facteurs.

Couche	Risque érosif	R	K	C	LS	Pente	NDVI
Risque érosif	1						
R	0,35726	1					
K	0,48939	-0,04458	1				
C	0,04593	-0,18710	0,40992	1			
LS	0,67267	0,11559	0,03649	-0,31800	1		
Pente	0,54174	0,14531	0,13581	-0,28282	0,69680	1	
NDVI	-0,04593	0,18710	-0,40972	-0,89740	0,31800	0,28282	1

D'après le tableau 16, on constate que la corrélation est très forte entre le risque érosif et les facteurs K et LS. Le risque érosif présente une corrélation très faible avec le facteur C ce qui est très logique car le facteur C joue le rôle de protecteur. Si c'est le contraire, le C, avec le K et LS et R, va jouer le rôle de générateur de l'érosion.

La délimitation des sous-bassins hydrographiques, effectuée dans le chapitre 4 par le module SWAT, est utilisée pour découper le bassin versant par des zones selon le niveau de gravité de la perte des sols. La valeur moyenne de chaque facteur est aussi estimée par sous bassin. La figure 70 montre le risque d'érosion actuel par sous bassin. La carte a été réalisée en calculant, pour chaque sous bassin, la moyenne de l'érosion prédite. De façon similaire, la moyenne des facteurs R, K, C et LS est déterminée.

Tableau 17 : Valeurs moyennes du risque érosif et des facteurs R, K, LS et C par sous bassin versant.

N°(superficie en km ²)	(Ec) les valeurs du risque érosif de chaque sous bassin tirées à partir de la figure70	Valeurs de R de chaque sous bassin tirée à partir de la figure66	Valeurs de K de chaque sous bassin tirée à partir de la figure67	Valeurs de LS de chaque sous bassin tirée à partir de la figure69	Valeurs de C de chaque sous bassin tirée à partir de la figure68	Risque érosif estimé par la multiplication des valeurs moyenne de R, K, LS et C. (Ee)	Différence entre (Ec et Ee) (%)
1 (48)	5,91	30,73	0,08	3,81	0,75	7,0	-19
2 (74)	4,82	28,43	0,10	2,65	0,77	5,9	-21
3 (44)	5,09	29,34	0,10	3,06	0,76	6,8	-34
4 (557)	8,51	26,95	0,08	6,65	0,73	10,8	-27
5 (470)	10,68	27,92	0,06	8,95	0,72	10,7	0
6 (115)	10,42	26,57	0,07	8,26	0,74	11,9	-14
7 (5)	4,63	20,05	0,08	4,02	0,75	4,6	0
8 (219)	22,07	25,50	0,10	11,04	0,76	22,0	0
9 (247)	3,81	17,66	0,08	3,70	0,75	3,8	+1
10 (155)	33,51	20,93	0,12	17,82	0,74	32,1	+4
11 (70)	17,02	18,78	0,12	9,47	0,79	16,8	+1
12 (107)	13,89	28,94	0,06	11,31	0,72	14,3	-3
13 (132)	21,48	19,65	0,12	12,02	0,74	21,7	-1
14 (522)	21,66	21,71	0,13	9,92	0,76	20,9	+3
15 (164)	33,40	33,84	0,11	11,85	0,75	33,4	0
16 (468)	27,78	53,86	0,07	11,92	0,70	30,9	-11
17 (405)	23,94	38,78	0,07	12,24	0,69	22,8	+5
18 (684)	11,56	26,61	0,05	12,40	0,69	11,9	-3
19 (822)	11,71	21,49	0,07	11,23	0,72	12,0	-2
20 (713)	9,92	34,93	0,05	8,11	0,71	10,1	-2
21 (197)	13,27	41,85	0,05	10,37	0,64	13,5	-1
22 (363)	11,56	26,61	0,05	12,40	0,69	11,9	-3
23 (46)	3,57	15,55	0,05	7,20	0,72	3,6	-2
24 (217)	7,83	19,34	0,05	10,83	0,71	7,9	-1
25 (263)	5,19	18,54	0,05	6,91	0,71	5,0	+4
26 (10)	1,72	13,25	0,05	4,13	0,72	1,8	-3
27 (244)	3,13	20,20	0,03	6,48	0,70	3,0	+5
28 (528)	4,11	23,35	0,04	7,29	0,70	4,2	-1
29 (193)	3,12	11,70	0,06	6,33	0,73	3,0	+3

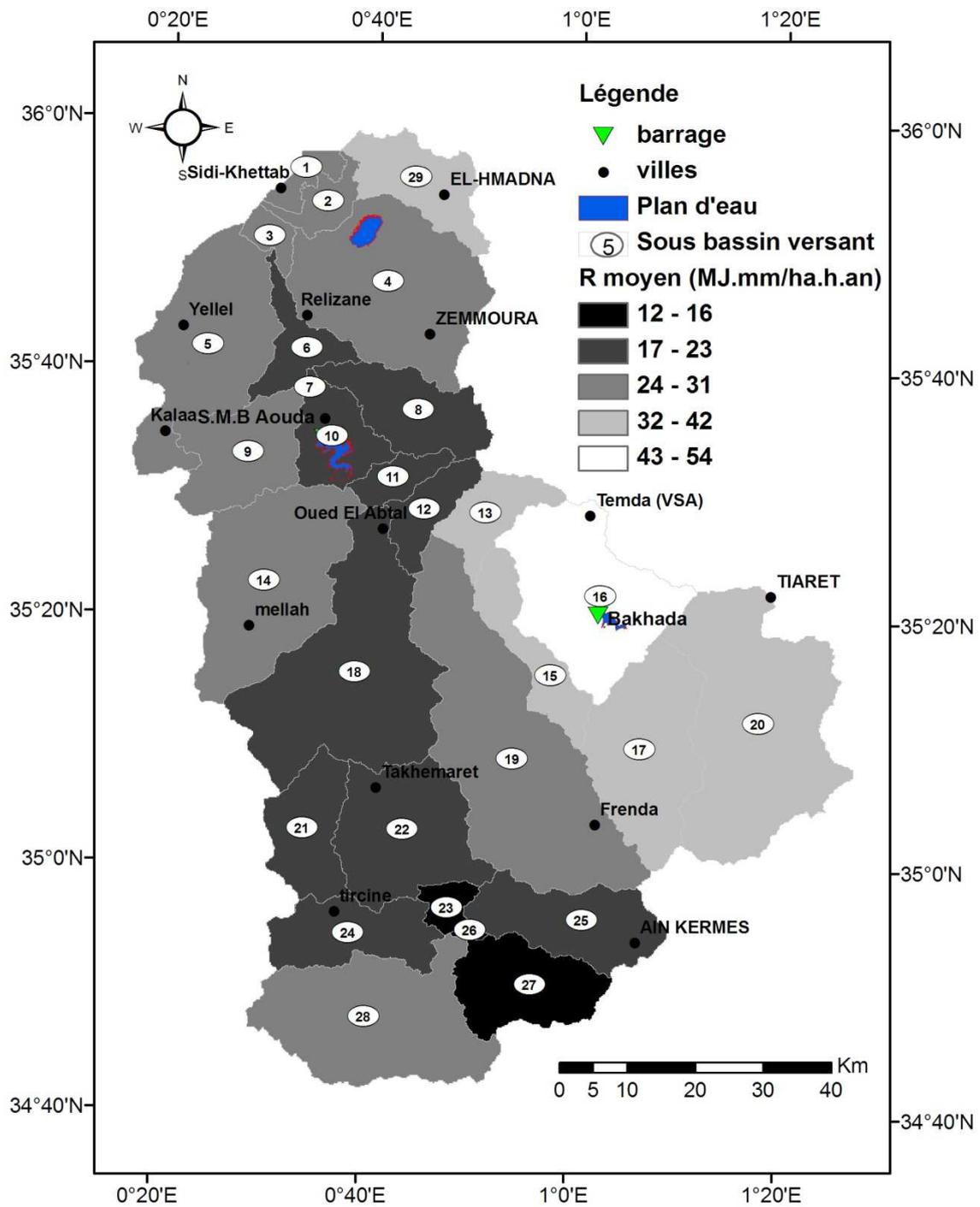


Fig. 66: Valeurs moyennes du facteur R en MJ.mm/ha.h.an par sous bassin versant.

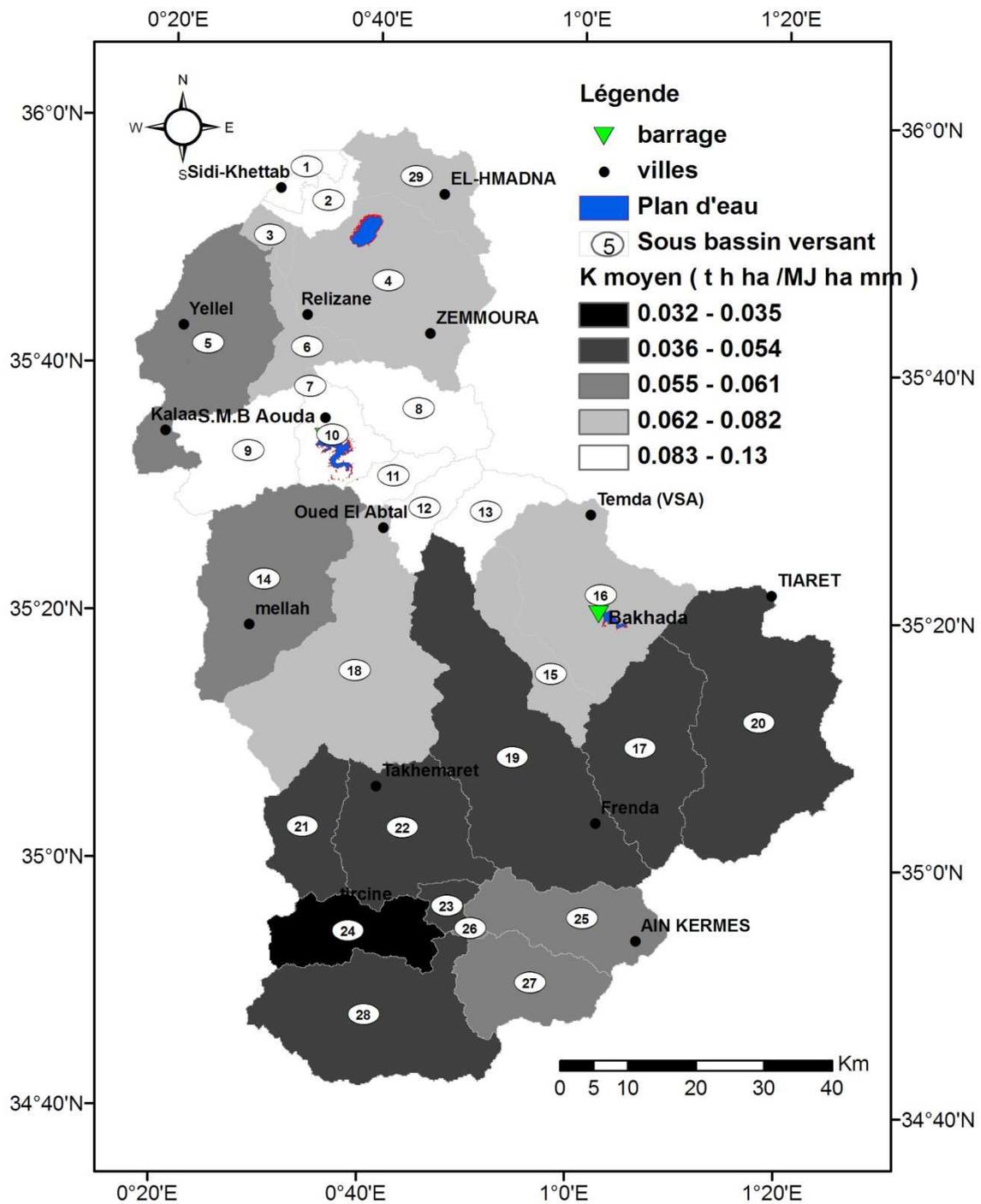


Fig. 67: Valeurs moyennes du facteur K en t.h.ha/MJ.ha.mm par sous bassin versant.

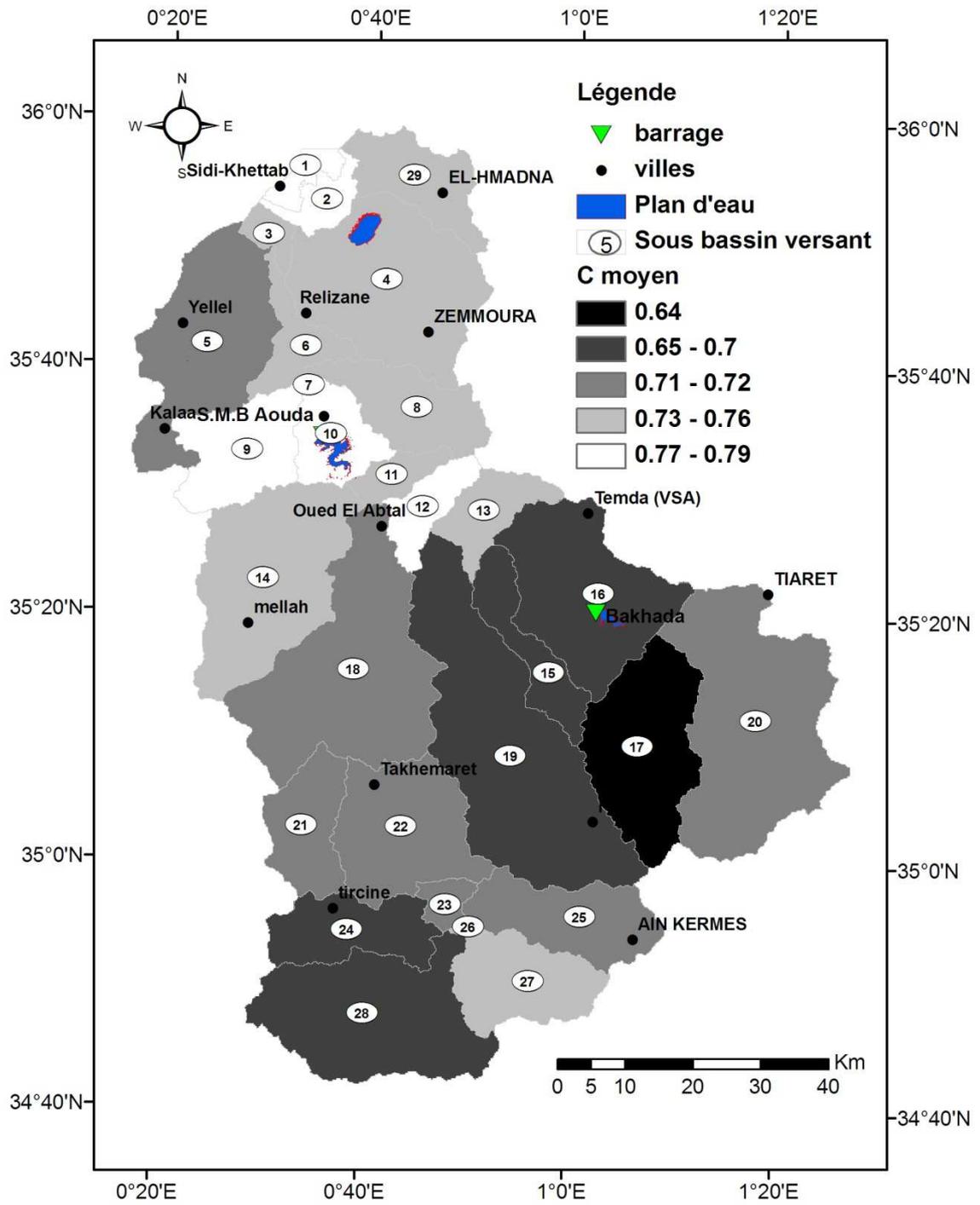


Fig. 68: Valeurs moyennes du facteur C par sous bassin versant.

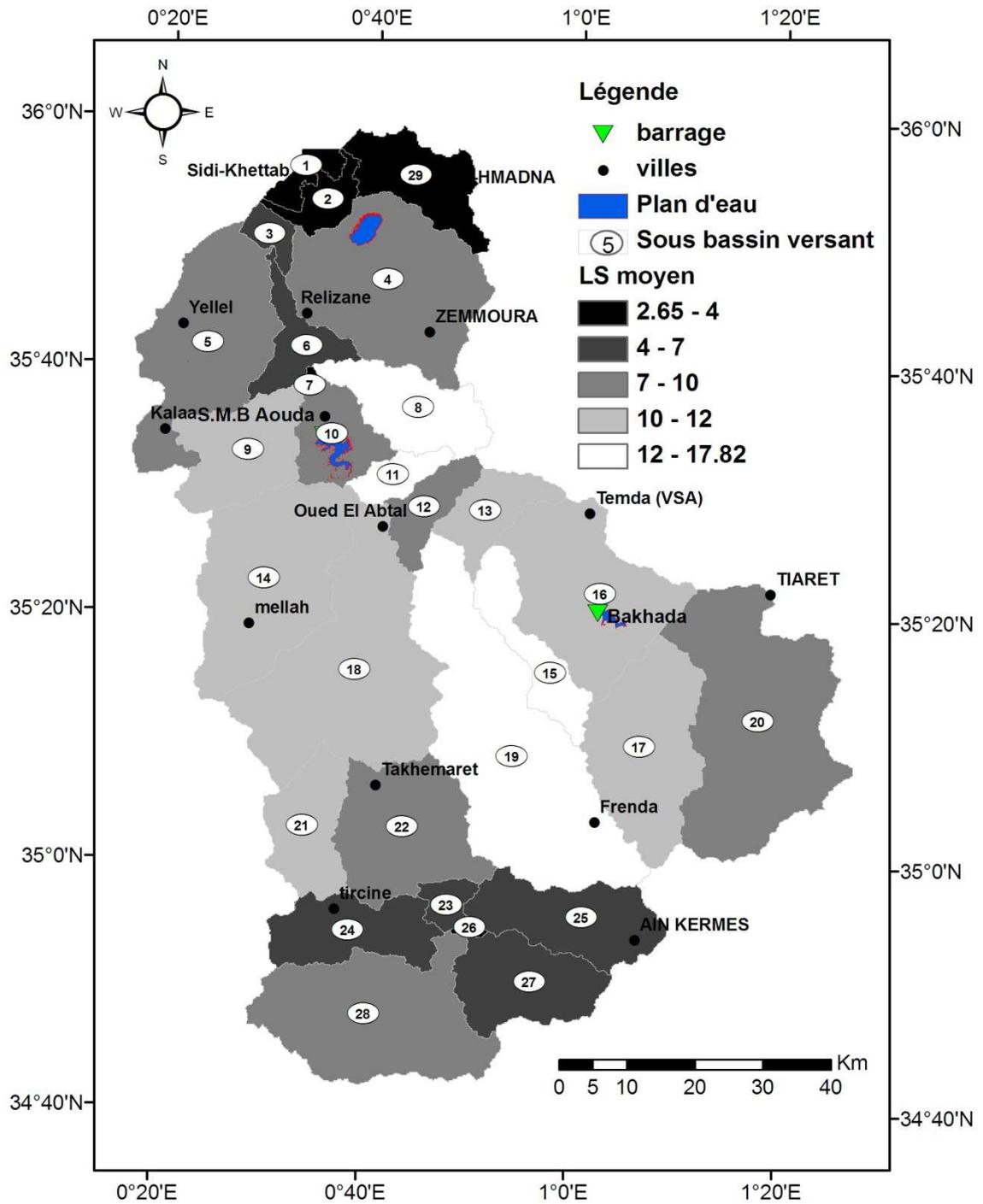


Fig. 69: Valeurs moyennes du facteur LS par sous bassin versant.

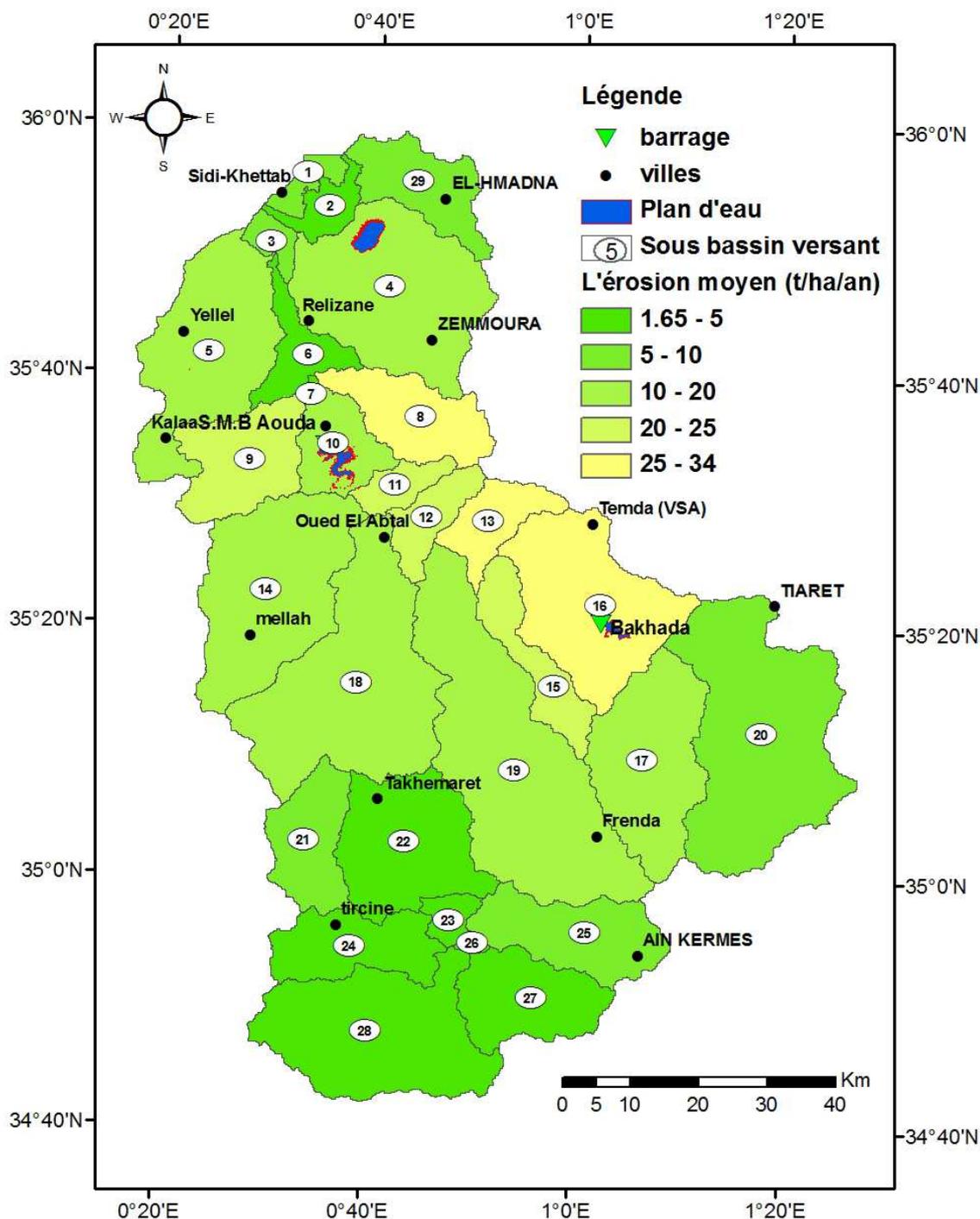


Fig. 70: Valeurs moyennes du risque érosif en t/ha/an par sous bassin versant.

Les sous bassins présentant de fortes valeurs du risque érosif sont situés dans la rive gauche de l'Oued Mina en amont du barrage de SMBA. Les faibles valeurs s'enregistrent dans les sous bassins de Sud et de la ceux Nord caractérisés par une très faible pente.

5.7. Conclusion et discussions

Selon la superposition des couches des différents facteurs interagissant sur l'érosion hydrique dans le bassin de l'Oued Mina, on a partagé ce dernier en trois régions suivant le degré du risque érosif. La région sud est caractérisée par une formation géologique consolidée, de faible pente et à couvert végétal plus ou moins faible. Cette zone est considérée comme zone à faible risque d'érosion. La zone à haut risque d'érosion est située en amont du barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda, sa formation géologique est essentiellement marneuse ($K > 0,1 \text{ t ha/Mj ha mm}$), le sol est globalement nu ($C < 0,5$), de forte pente ($LS > 10$) et plus exposé aux exercices agricoles. La partie nord du bassin, présente un terrain plat de moins de risque érosif. Nos résultats sont en phase avec ceux développés par le bureau d'étude Canadien TECSULT (2004). Ce dernier a utilisé l'équation de RUSLE pour l'estimation du potentiel érosif à long terme dans le bassin de SMBA et la région du Bas Chéloff.

5.7.1. Comparaison avec les études déjà faites sur le bassin versant de l'Oued Mina

Le bassin versant de l'Oued Mina a été sujet à plusieurs études sur l'érosion. Ces études ont été réalisées après la constatation par l'état que ce phénomène a pris de l'ampleur, surtout ces dernières années. L'érosion hydrique a touché la fertilité des sols, ce qui a poussé le ministère de l'agriculture de lancer un projet en collaboration avec la GTZ afin de développer un schéma directeur d'utilisation des sols pour favoriser la conservation des sols et de l'eau au niveau du bassin versant de l'Oued Mina (partie aval du barrage SMBA). Ils ont montré qu'une grande partie de la superficie de la région étudiée, située juste en aval du barrage, est classée comme très susceptible à l'érosion du fait de sa lithologie et son relief.

L'érosion a touché également l'approvisionnement en eau par l'envasement des retenues d'eau pour cela, l'Agence Nationale des Barrages (ANB) en collaboration avec un bureau d'études Canadien (TECSULT) a lancé une étude en 2004 pour identifier et préciser les mesures à mettre en œuvre pour lutter adéquatement contre l'envasement des retenues au niveau du bassin versant de l'Oued Mina et d'autres bassins. D'après Bouaichi et Touaibia (2006), les principales zones productrices de sédiments se situent dans le haut et moyen Cheliff, ainsi que dans la partie sud de l'Oued Mina. Par l'analyse multivariée des données relevées dans les tronçons du réseau hydrographique des petits bassins versants de l'Oued Mina, Kouri *et al.*, (1997) ont constaté que les différentes textures des marnes évoluent par glissement de terrain et par glissement pelliculaire et d'autres variables explicatives déterminant l'érosion linéaire, à savoir, la pente, le couvert végétal et la morphologie des parois. La gravité de l'érosion hydrique réside à la fois dans les taux importants estimés à $530 \text{ T/km}^2/\text{an}$ au niveau du bassin versant de l'Oued El Ham d'une superficie de 1150 km^2 (Hasbaia *et al.*, 2012) et par la variabilité spatio-temporelle.

Kouri *et al.*, (1993) ont permis d'élaborer, à partir des paramètres classifiés, la carte de sensibilité au ravinement des terrains marneux de la partie occidentale de l'Oued Mina. Il ressort une prédominance des terrains sensibles aux processus d'érosion linéaire (57% de la superficie). 25% des terrains sont très fortement et fortement sensibles à l'incision, et sont localisés pour l'essentiel sur la rive droite de l'Oued Mina et le secteur aval de la rive gauche

de l'Oued Haddad. 32% de la superficie sont fortement sensibles à la solifluxion. 32% sont moyennement sensibles à l'incision.

Selon Touaibia *et al.* (1999), l'érosion spécifique estimée par l'Agence Nationale des Barrages (ANB) à 3,26 t/ha/an dans le bassin de Sidi M'Hamed Ben Aouda et que l'érosion calculée dans les micro-bassins, la zone des marnes, d'une superficie de 1000 km², devrait contribuer à la quasi-totalité des apports de sédiments dans la retenue (16 t/ha/an).

D'après Touaibia et Achite (2003), les valeurs de l'érosion spécifique fluctuent entre 0,5 et 36 t/ha/an dans le bassin versant de l'Oued Mina. Les plus grandes valeurs de l'érosion sont observées dans la zone située dans la partie amont du barrage de SMBA est caractérisée par une érosion importante dépassant 20 t ha/an, purement marneuse et appauvrie en végétation; et une autre, située dans la partie sud du bassin, moins érodée.

Nous avons trouvé par l'approche utilisée que les zones présentant un risque érosif important se localisent principalement en amont du barrage de S.M.B Aouda. Dans ces zones domine une formation lithologique marneuse située souvent sur les piémonts d'une pente de 10 à 20 %. Le modèle utilisé permet d'estimer l'érosion en nappe et en rigole et permet pas de calculer d'autre type d'érosion comme le ravinement. Or, certains chercheurs ont constaté que l'érosion par ravinement est très intense par rapport à l'érosion en nappe (Kouri, 1993, Gomer, 1994, Touaibia *et al.*, 1999). Une lutte contre le ravinement est proposée par El Khalili *et al.*, (2013) à travers un suivi de la dynamique des ravines sur plus de cinquante ans. Ces résultats montrent la grande variabilité de l'efficacité des aménagements selon le contexte de pente et de géologie, et permettent de guider les gestionnaires vers des techniques adaptées au contexte physique de travail.

La carte du risque érosif a été élaborée en fonction de certains facteurs (pente, érosivité des pluies, érodibilité du sol et le couvert végétal). Bien que l'impact de l'utilisation des terres sur les la perte en sol sont généralement considérées comme entraînant une augmentation des apports de sédiments (Bu *et al* , 2008.). Cet impact peut être déterminé à partir de l'étude de l'évolution de l'occupation du sol et l'évolution de la végétation. C'est ce que nous allons tenter de réaliser dans chapitre suivant. Il est à noter que la mise en œuvre des pratiques agricoles et de conservation des sols et de l'eau peuvent avoir un effet inverse et entraînent des apports de sédiments réduits.

6

Evolution de l'occupation du sol

6. Evolution de l'occupation du sol

L'objectif de ce chapitre est d'exposer le traitement des séries temporelles des images satellites, pour extraire les informations relatives aux changements d'occupation et l'utilisation du sol sur le bassin versant de l'Oued Mina, plus précisément sur l'évolution de la couverture végétale. Il comprend d'une part l'estimation de taux de changement à partir de l'application du modèle « Land change modeler » du logiciel IDRISITM sur les images du capteur Landsat TM prises durant trois périodes différentes (1987, 2002 et 2009). La méthode utilisée permet la détection de changements sur ces variables, en l'occurrence les classifications qui permettent de déterminer et localiser les changements d'occupation et d'utilisation des sols. En effet, l'analyse multi-spectrale et multi-temporelle des données satellitaires peut déboucher sur une cartographie évolutive des paysages, utile à la connaissance des processus d'érosion.

D'autre part, il comprend d'étude de la variation spatio-temporelle de la végétation à partir des données décennales de NDVI du SPOT-VEGETATION ainsi que l'extraction de profils moyens des valeurs de NDVI, et à expliquer ces variations, notamment en fonction de paramètres climatiques. Elle permet aussi, le calcul de métriques temporelles de variables biophysiques qui servent respectivement à caractériser finement les variations de la végétation.

6.1. Introduction

Le couvert végétal est l'un des facteurs les plus importants pour réduire l'érosion des sols. En général, lorsque couvert végétal augmente, l'érosion des sols diminue (Alejandro *et al.*, 2007). La végétation réduit l'érosion du sol par: protection contre l'action des gouttes de pluie, et par augmentation de degré d'infiltration de l'eau dans le sol, ce qui réduit la vitesse de l'écoulement de surface (Baver, 1956).

Utilité des indices de végétation parmi tous les indices de végétation proposés depuis les origines de la télédétection spatiale, l'indice de végétation normalisé (Rouse *et al.*, 1974) est devenue l'outil standard de description du comportement spectral de la couverture végétale (Bartholomé, 1993). Cet indice, le plus souvent appelé NDVI selon son abréviation anglaise, est calculé à partir de deux bandes spectrales, le rouge R et l'infrarouge IR selon la formule suivante : $NDVI = (IR - R)/(IR + R)$. Son utilité pour décrire le couvert végétal se base sur le fait que d'une part ce dernier absorbe préférentiellement (mais pas uniquement) l'énergie lumineuse dans les longueurs d'onde du rouge pour la photosynthèse, et réfléchit par contre fortement cette énergie dans le proche infrarouge.

Notre étude de la végétation ne peut être considérée sous son aspect botanique ou naturel, mais sous son aspect de couverture du sol (densité). Donc l'influence sur l'écoulement et l'érosion ne peut être négligée (Meddi, 2009). Dans cette optique, la végétation peut intervenir aussi bien comme un élément de différenciation au niveau de la dégradation du sol.

6.2. Détection des changements

Dans cette partie, on a tracé les cartes de la couverture du sol pour 3 périodes (1987, 2002 et 2009) et déterminé les gains et les pertes dans chaque classe (eau, végétation et sol nu) en utilisant le module (Land Change Modeller) de « IDRISITM » (figure 71). Les paramètres suivants ont été tirés :

- contribution du changement dans chaque classe en pourcentage de la surface du sol (de chaque catégorie de la couverture du sol) ;
- variation nette de chaque catégorie ;
- persistance de chaque classe: la couverture du sol qui n'a pas changé entre les deux dates respectives.

La méthode utilisée a nécessité la mise en place d'une chaîne de prétraitement et de traitement des images utilisées. Ces traitements, sont les mêmes décrits dans le chapitre précédent. La méthode de comparaison des classifications (Lu *et al.*, 2004) a été choisie pour détecter des changements de l'occupation du sol. Le principe de cette méthode est basé sur la classification de deux scènes acquises à des dates différentes. Elle assigne d'abord des classes et détecte ensuite le changement. Cette méthode permet de fournir l'information détaillée du changement et préparer des cartes de changement (Mas, 2000).

Afin de mieux séparer des objets ainsi que diminuer des confusions, l'approche de classification « isodata » de pseudo-bandes (ACP, NDVI) a été appliquée sur trois images, de la période sèche, Landsat (TM 1987, TM 2002 et TM 2009) à l'aide du logiciel IDRISI.

L'analyse en composantes principales (ACP) et l'indice de végétation (NDVI) sont mis en œuvre dans le cas présent afin de sélectionner les meilleures bandes spectrales d'une part, et d'augmenter le contraste sol-végétation d'autre part, et cela dans le but de faciliter l'étape de classification.

6.3. Evolution temporelle et spatiale des changements de l'occupation du sol

6.3.1. Variation annuelle

Trois classifications ont permis d'estimer l'évolution (temporelle et spatiale) de l'occupation du sol de la zone d'étude pour une période de dix ans (1987-2009). Pour faciliter et synthétiser l'analyse de l'évolution globale de l'occupation du sol, les classes thématiques ont été regroupées en trois classes: végétation, sol nu et eau.

Les gains sont les changements positifs, où les classes eau, végétation et sol nu ont été converties en d'autres classes. Les pertes sont les changements négatifs lorsque la classe est convertie en d'autres types du couvert du sol. Deux algorithmes pour la détermination des changements entre deux images prises durant deux périodes différentes ont été utilisés : le premier consiste à faire une simple différence entre les deux scènes pour faire ressortir l'excès ou le surplus d'un élément sur la surface du bassin ; le second utilise les classifications effectuées pour la délimitation des zones de changement et de persistance des objets.

Le sol nu, qui représente les badlands et les habitats, possède une grande proportion qui dépasse 92 % de la surface totale du bassin versant (environ 780000 hectares).

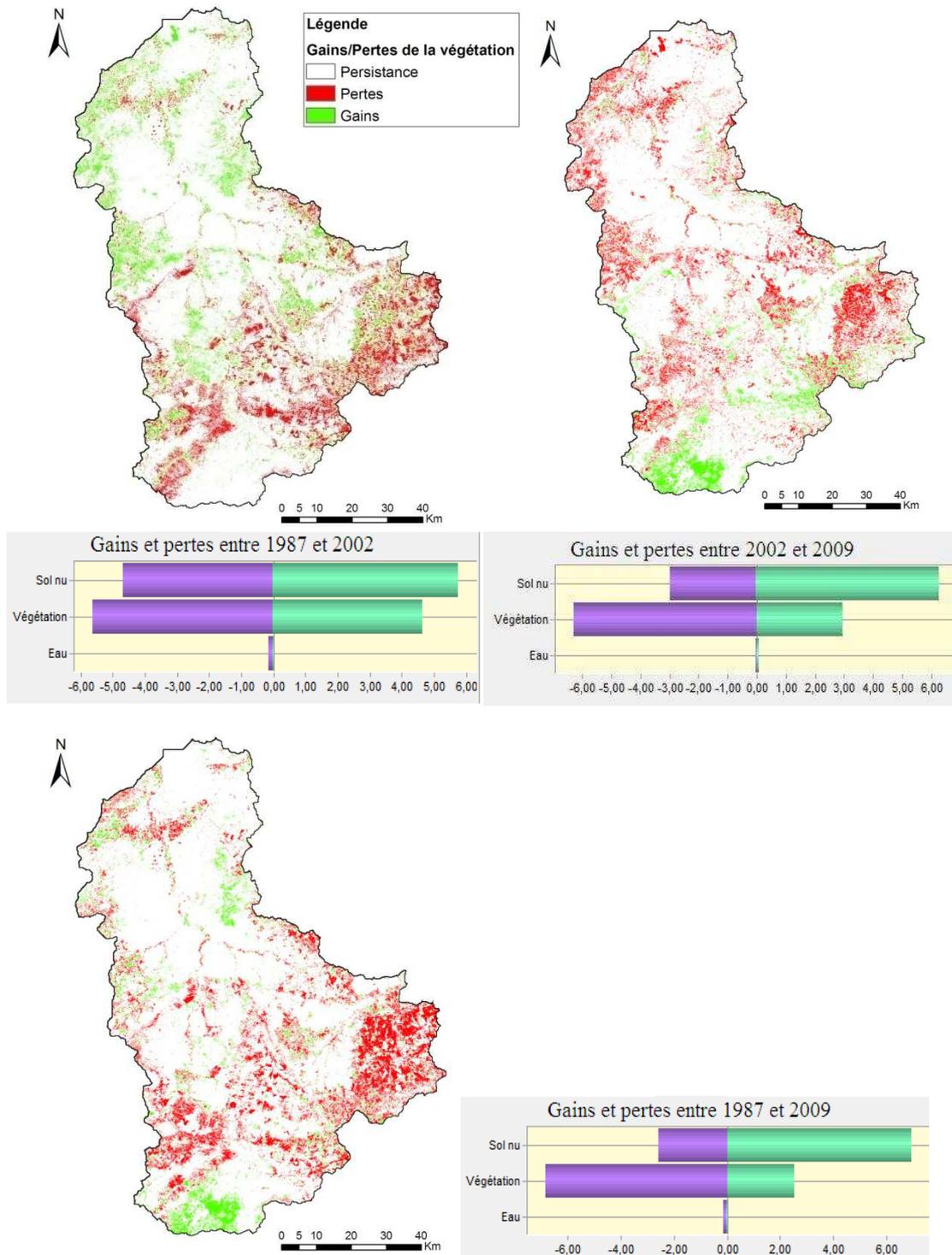


Fig. 71: Cartes des gains, pertes, et persistance de la végétation, de l'eau et du sol nu entre 1987 et 2009.

Tableau 18: Résultat de la classification de l'occupation du sol pour les années 1987, 2002 et 2009

Classes	juin-87		juin-02		juin-09	
	Surface (km ²)	Proportion	Surface (km ²)	Proportion	Surface (km ²)	Proportion
Sol nu	7643,8332	93,64	7538,5305	92,35	7791,5835	95,45
Végétation	484,8822	5,94	528,1461	6,47	348,5601	4,27
Eau	34,2846	0,42	96,3234	1,18	22,8564	0,28
Total	8163	100	8163	100	8163	100

D'après les résultats obtenus, on constate que les deux classes « végétation » et « sol nu » ont subi un grand changement durant la période 1987-2009. La majorité de la zone Sud du bassin a été dépourvue de végétation entre 1987 et 2002 (soit 856 km² de perte). Contrairement au Nord-Ouest, on remarque une amélioration de la superficie végétale dans des zones éparpillées (711 km²). Cette amélioration est probablement due à l'augmentation des activités agricoles dans cette région. Entre 2002 et 2009, les zones où on a enregistré des gains de la végétation durant la période 1987-2002, ont devenues des sols nus sauf l'extrême Sud, où on a enregistré une légère amélioration de la végétation (449 km²).

Tableau 19: Récapitulatif des résultats du calcul des changements d'occupation du sol entre les trois années : 1987, 2002 et 2009.

	Changement (km ²) entre 1987 et 2002	Changement (km ²) entre 2002 et 2009	Changement (km ²) entre 1987 et 2009
Végétation vers Eau	0,74	1,93	1,16
Sol nu vers Eau	4,54	7,57	6,33
Eau vers Végétation	0,31	0,04	0,217
Sol nu vers Végétation	711	449	386
Eau vers Sol nu	2	2,87	19
Végétation vers Sol nu	856	955	1038

Le sol nu occupe environ 40 % de la superficie de la région d'étude durant la période sèche. Ce pourcentage diminue (-50%) en automne et atteint environ 8% en hiver. En effet, en début de saison de culture et avec les premières pluies d'automne, la végétation pousse et occupe les zones nues. En hiver, la santé de la végétation atteint son maximum. Durant cette période, la végétation couvre environ 44% de la superficie du bassin.

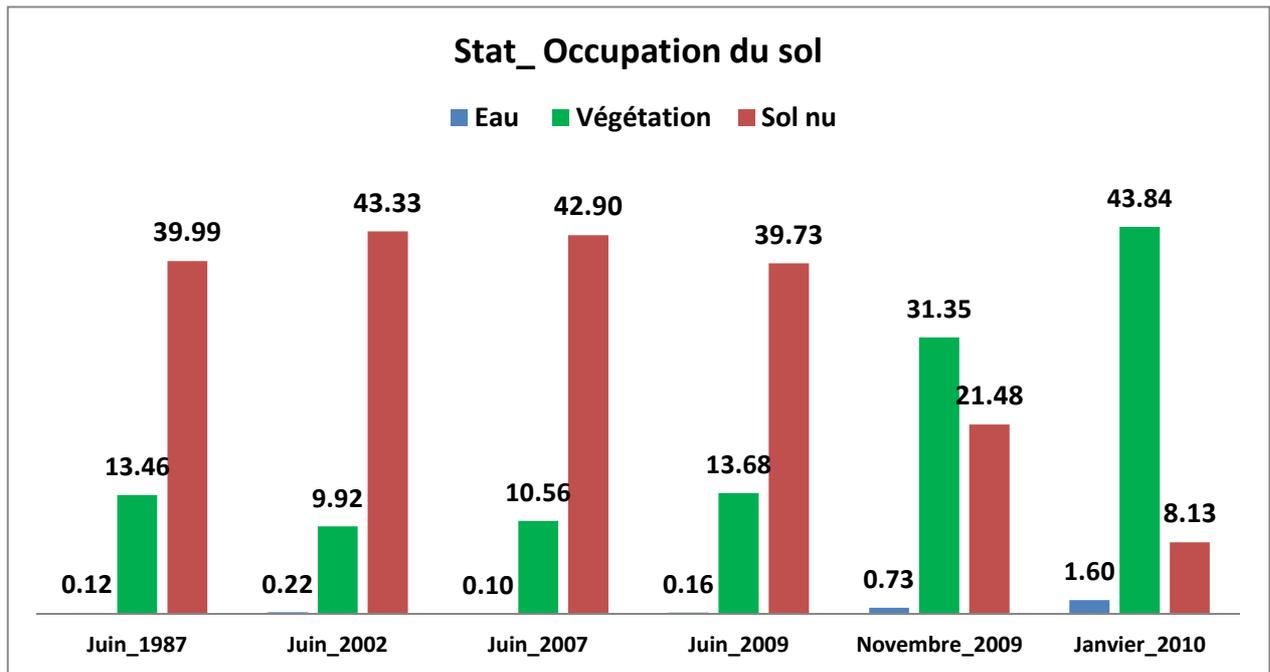


Fig. 72: Statistiques de la classification d'occupation du sol des imagerie Landsat TM prises durant les mois de juin 1987, 2002, 2007, 2009, le mois de novembre 2009 et le mois de janvier 2010.

6.3.2. Variations saisonnières

Une classification de l'occupation et de l'utilisation du sol a été effectuée pour la période humide de l'année 2010 et pour période sèche de l'année 2009. Ces deux images sont acquises à des dates permettant de distinguer clairement les types d'occupation et d'utilisation hivernaux des sols. Chacune des images a été classée par une méthode de classification basée sur le pixel utilisant la méthode du maximum de vraisemblance afin de distinguer la végétation annuelle, les intercultures et les badlands. Par la suite, ces deux classifications ont été croisées afin d'identifier les zones du sol nu et de la végétation en permanence figure73:

Tableau 20: Croisement des classes de sols couverts et de sols nus permettant de déterminer l'occupation et l'utilisation hivernale des sols :

lasse de la période humide	Classe de la période sèche	Type d'occupation du sol
Sol couvert	Sol couvert	Végétation annuelle (prairies, forêts)
Sol couvert	Sol nu	interculture
Sol nu	Sol couvert	Culture hivernale
Sol nu	Sol nu	Sol nu et badlands

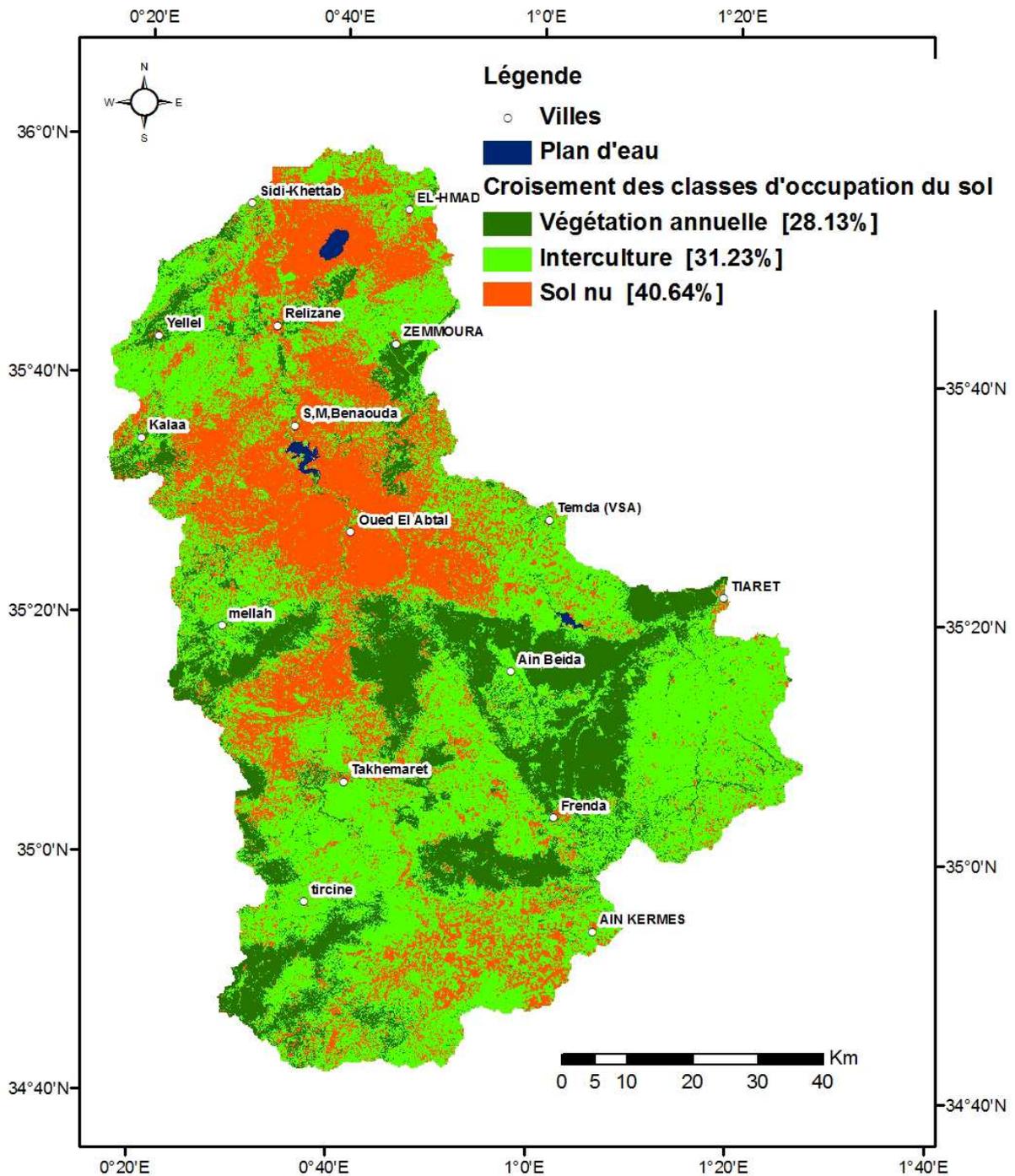


Fig. 73: Carte de croisement des classes de sols couverts et de sols nus entre la saison hivernale et la saison estivale.

D'après la figure ci-dessus, on constate que le sol nu hivernal, représenté par les badlands, occupe une superficie importante du bassin versant de l'Oued Mina (40,64%). Ces régions sont dépourvues de toute forme de végétation et par conséquent elles sont exposées directement aux forces d'inertie de la pluie ainsi que les forces d'écoulement. Ces badlands occupent la partie nord du bassin.

Afin de classer les types de végétation par ordre de densité ou d'efficacité décroissante, la classification proposée par Tricart (1963-1968) a été retenue. Celle-ci, nous a permis de classer la végétation du bassin versant de l'Oued Mina, dans les catégories suivantes :

- Surfaces protégées en permanence : ce type de surface est défavorable au ruissellement et à l'érosion, il englobe les forêts, prairies naturelles et artificielles permanentes. Cette classe occupe 28% de la superficie totale du bassin. Elle couvre les montagnes de Saida de Tiaret et de Frenda ;
- Surfaces protégées incomplètement : ce type de surface permet aux averses tombant sur les parties nues du sol de provoquer le ruissellement et exercer une érosion hydrique ;
- La couverture végétale n'occupant le sol que saisonnièrement (inter-cultures, résidus, culture maraichères ;
- Surfaces mal protégées ou nues : ces surfaces sont favorables au ruissellement et à l'érosion hydrique : terrain dénudé (badlands et steppe).

6.4. Etude de la dynamique de la végétation à l'aide de NDVI de SPOT-VEG

Dans cette étude, nous nous proposons d'utiliser l'indice de la végétation normalisé NDVI, qui est un indicateur couramment utilisé pour la cartographie et le suivi de l'évolution de la végétation. En effet, l'utilité des indices de végétation parmi tous les indices de végétation proposés depuis les origines de la télédétection spatiale, l'indice de végétation normalisé (Rouse *et al.*, 1974) est devenue l'outil standard de description du comportement spectral de la couverture végétale (Bartholomé, 1993). Cet indice, le plus souvent appelé NDVI selon son abréviation anglaise, est calculé à partir de deux bandes spectrales, le rouge R et l'infrarouge IR selon la formule suivante : $NDVI = (IR - R)/(IR + R)$. Son utilité pour décrire le couvert végétal se base sur le fait que d'une part ce dernier absorbe préférentiellement (mais pas uniquement) l'énergie lumineuse dans les longueurs d'onde du rouge pour la photosynthèse, et réfléchit par contre fortement cette énergie dans le proche infrarouge.

Les données du NDVI utilisées sont issues du capteur « VEGETATION 1 » à bord du satellite SPOT4 (lancé en Avril 1998) et « VEGETATION 2 » à bord de SPOT5 (depuis Février 2003). Ces capteurs offrent une couverture quotidienne avec une résolution spatiale d'environ 1 km². Les images du NDVI disponibles sont des synthèses décennales depuis 1999 jusqu'à 2010, elles sont générées en sélectionnant des pixels qui ont des valeurs maximales du NDVI dans un délai de 10 jours. Une série temporelle de 432 images décennales couvrant le bassin de l'Oued Mina entre janvier 1999 et Décembre 2010 ont été acquises. Les données du NDVI en combinaison avec les données de précipitations ont permis d'identifier les changements subtils associés à la dégradation des terres.

6.4.1. Prétraitement des séries temporelles du NDVI

Le NDVI décrit la différence de réponse spectrale de la chlorophylle des végétaux entre le canal rouge et infra-rouge suivant l'équation (1). Les données brutes sont des images en niveau de gris (les valeurs des pixels varient entre 0 et 255). Les valeurs numériques (CN) des pixels sont converties en indice de végétation selon l'équation (8). Lorsque NDVI est supérieur à 0,1, le type de couverture terrestre est identifié comme couvert végétal, qui est également utilisé pour déterminer la saison de croissance de la végétation (Cuomo *et al.*, 2001; Lanfredi *et.al*, 2003).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}} \quad (8)$$

Tel que « PIR » est le canal proche infrarouge et « R » est le canal rouge.

$$\text{NDVI} = \text{DN} \times 0,004 - 0,1 \quad (9)$$

Les changements dans le couvert végétal peuvent être déduits du NDVI. Plus la valeur NDVI est élevée plus la végétation est, dense. Selon les lois de croissance des plantes et les caractéristiques de variation du NDVI, le maximum annuel du NDVI reflète le meilleur état de la végétation en un an (Huang *et al.*, 2001).

L'utilisation des valeurs maximales du NDVI (NDVI_{max}) permet de conserver la valeur la plus élevée du NDVI pour chaque pixel au cours d'une période donnée et de produire des images qui sont spatialement continues et relativement sans nuages, avec une résolution temporelle suffisante pour évaluer la dynamique de la végétation (Holben 1986).

Le NDVI_{max} est défini comme le NDVI maximal pour un intervalle de temps. Le NDVI_{max} décadaire, mensuel et annuel peut être un indicateur fiable des variations qui peuvent affecter l'état du couvert végétal. Il permet aussi de montrer la nature des variations inter-annuelles de la végétation et de déterminer le lien entre ces variations et celles des conditions climatiques et/ou encore celles induites par l'homme.

6.4.2. Variation annuelle

Le couvert végétal dans bassin versant de l'Oued Mina a changé avec une tendance ondulante dans la période 1998-2006 (Figure 74). Les pics des valeurs maximales du NDVI se sont produits durant les années 2001, 2007 et 2009, tandis que les creux d'onde pourraient être trouvés dans 2000 et 2008. Le NDVI maximal en 2009 est le plus haut (0,8) au cours des derniers 12 ans. La moyenne annuelle des NDVI_{max} a légèrement augmenté de 0,48 en 1999 à 0,56 en 2010, indiquant une tendance à la hausse de la végétation.

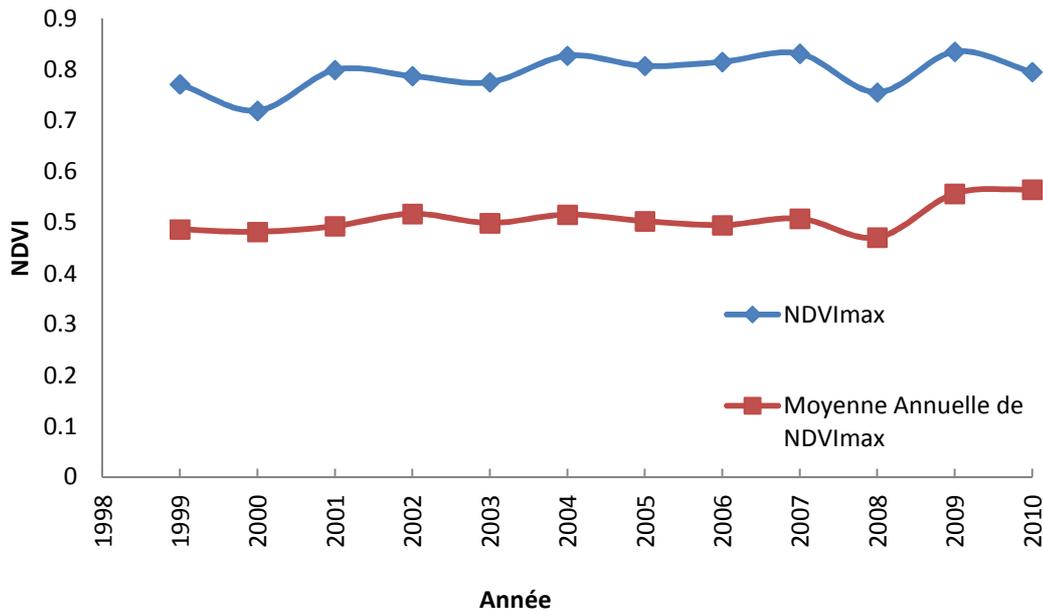


Fig. 74: Variation annuelle du NDVI_{max} et de la moyenne annuelle du NDVI_{max} au cours de la période 1999-2010.

La figure 76 illustre la différence entre deux NDVI_{max} de deux années voisines. Les différences entre 1999 et 2000, entre 2001 et 2002, entre 2004 et 2005, entre 2007 et 2008 et entre 2009 à 2010 se sont révélées négatives, ce qui montre une dégradation du couvert végétal au cours de ces périodes. Par ailleurs, ceux des périodes 1998 à 1999, 2000 à 2001, 2002 à 2003 et 2004 à 2005 étaient supérieures à zéro indiquant une augmentation des activités agricoles dans la région. La figure 76 montre la variation des valeurs du NDVI_{max} de l'ensemble du bassin et de la région délimitée comme un grand périmètre d'irrigation (GPI). Les valeurs du NDVI_{max} de la région agricole coïncident avec celles de la totalité du bassin durant la période hivernale (octobre à mars). Les valeurs maximales du NDVI sont essentiellement celles de la végétation des régions agricoles à biomasse élevée où les plantes sont bien arrosées et en bon état indiquant la forte activité agricole dans la région.

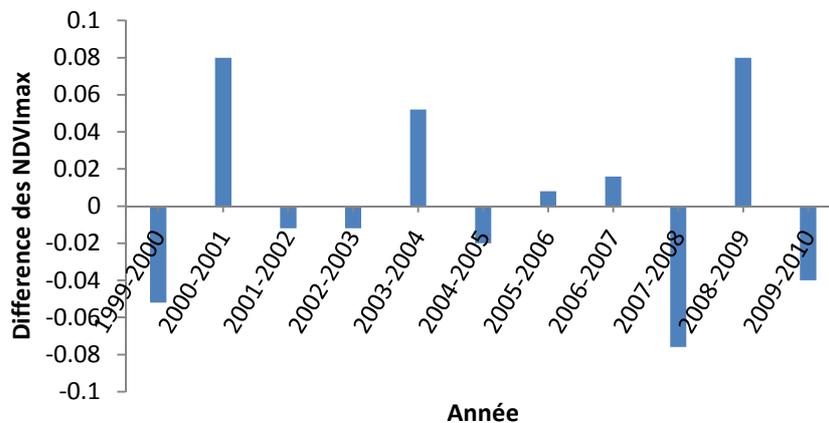


Fig. 75: Différence de la moyenne du NDVI_{max} entre deux années voisines.

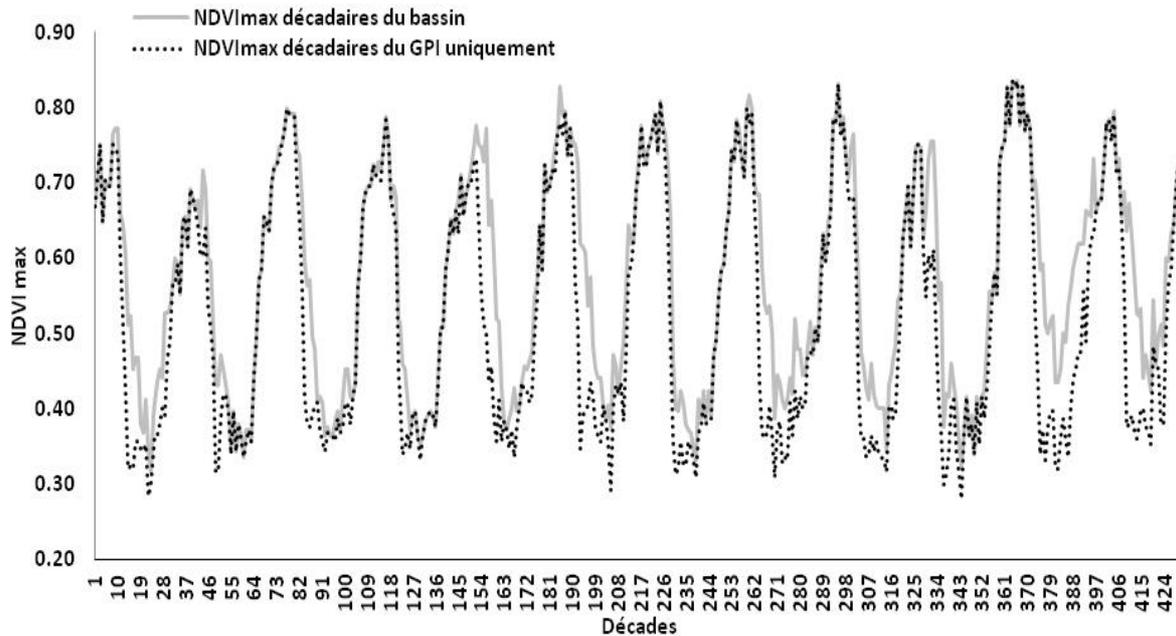


Fig. 76: Variation décadaire du $NDVI_{max}$ du grand périmètre d'irrigation (GPI) et du $NDVI_{max}$ du bassin.

6.4.3. Variation mensuelle

La figure 77 illustre la dynamique du NDVI mensuel maximal au cours de l'année 1999 et 2010. Le maximum du $NDVI_{max}$ correspond au pic de la verdure durant l'hiver, tandis que les valeurs minimales correspondent à la saison estivale (l'été). Les pics du $NDVI_{max}$ durant l'été correspondent probablement aux périodes d'irrigation. Les valeurs maximales du NDVI du printemps, de l'été et de l'automne en 2010 sont supérieures à celles de 1999. Par rapport à 1999, l'activité agricole aurait augmenté dans la région.

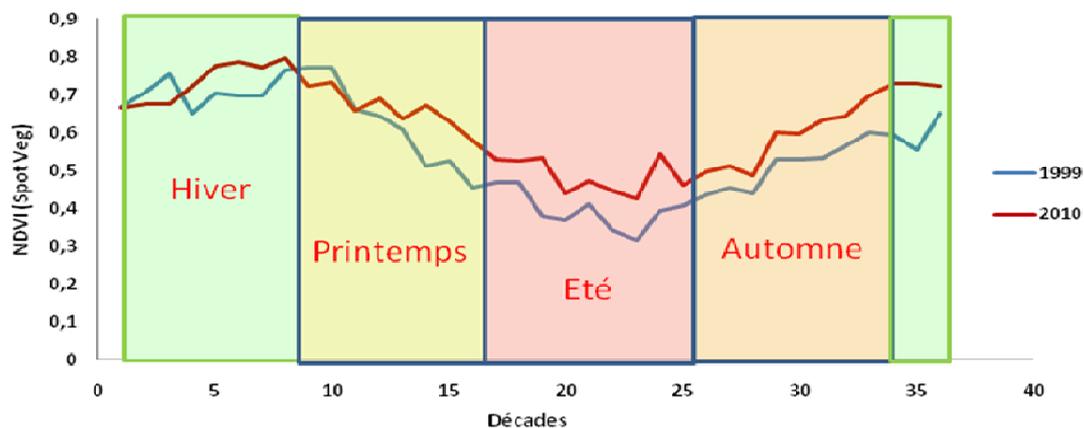


Fig. 77: Variation mensuelle du $NDVI_{max}$ durant deux années 1999 et 2010

La figure 78 montre la variation du $NDVI_{max}$ mensuel et des précipitations au cours de la période étudiée. Le temps de réponse du développement de la végétation est approximativement de 10 à 20 jours (Justice *et al.*, 1991).

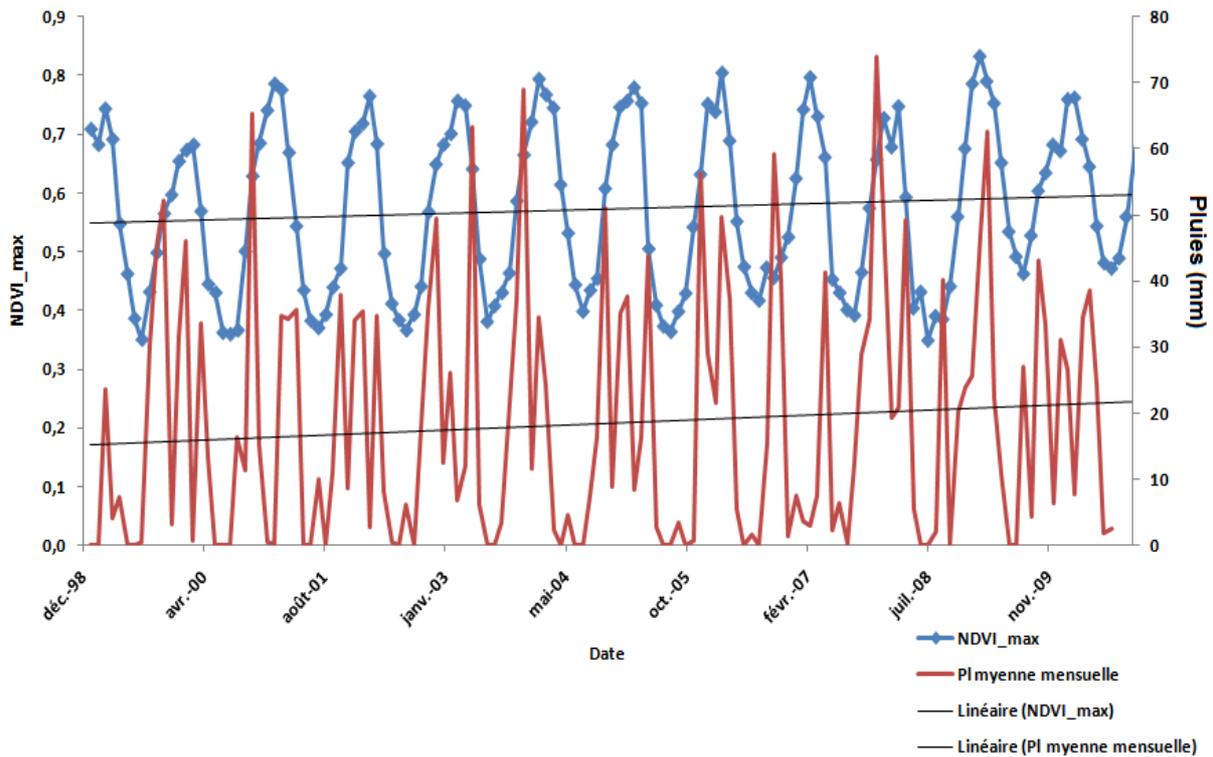


Fig. 78: Dynamique du $NDVI_{max}$ mensuel et les précipitations mensuelle au cours de la période d'étude (1999-2010).

La précipitation dans la région d'étude a oscillé tout au long des dernières décennies. Les moyennes mensuelles maximales des précipitations sont enregistrées durant la période hivernale tandis que les valeurs minimales sont mesurées durant la période estivale. Les pics des précipitations d'automne coïncident avec les valeurs minimales du NDVI où le sol se trouve nu et plus vulnérable à l'érosion hydrique. On voit nettement que les précipitations et le NDVI ont une tendance légère à la hausse suivant deux lignes de même pente.

6.5. Tendance annuelle de la végétation

Les tendances au niveau du $NDVI_{max}$ résultent de l'interaction de plusieurs facteurs, à savoir certains artefacts sur les données satellitaires, des variations biophysiques et les influences anthropiques (Omuto *et al*, 2010). On a utilisé la régression linéaire entre les valeurs maximales annuelles du NDVI et les années pour déterminer la tendance au cours de la période étudiée. Les pentes de la régression linéaire sont illustrées par la figure 79.

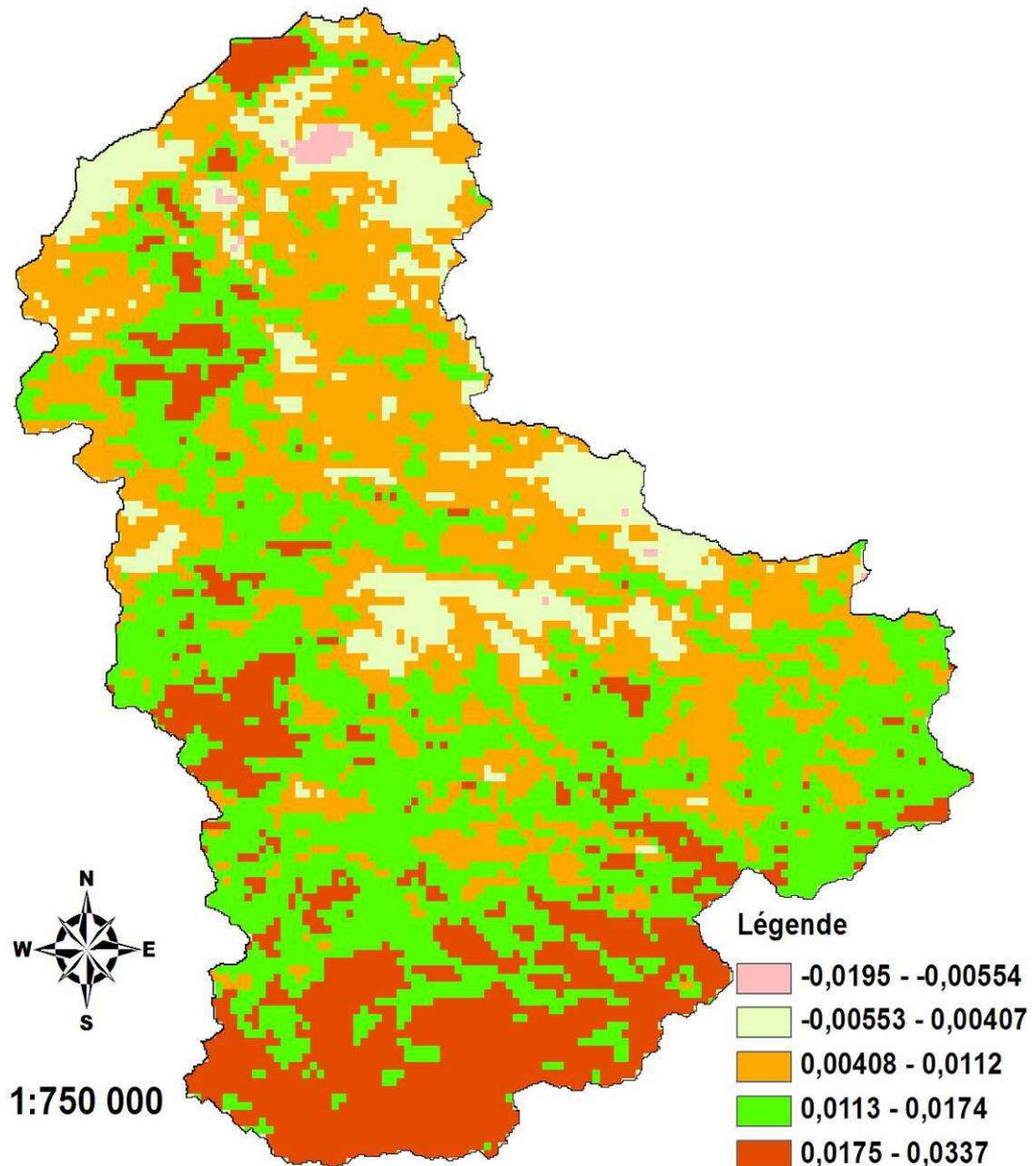


Fig. 79: Tendence du NDVI_{max} dans la région d'étude au cours de la période 1999-2010.

Les pixels qui ont une pente négative (pente < 0) ont subi une tendance à la baisse (dégradation de la végétation). Les pixels possédant une pente positive (pente > 0) subissent une amélioration. La démarche adoptée devrait permettre d'identifier les zones connaissant une augmentation ou une dégradation de la végétation.

Les régions subissant une dégradation sont des forêts touchées par la désertification (pente entre -0,1950 et -0,0055). Or les régions qui ont bonne tendance annuelle à la hausse du NDVI_{max} étaient durant la période 1999 à 2003 dégradées (sol nu) et semblent avoir été bien couvertes durant les dernières années (pente entre 0,075 et 0,033). Les zones agricoles représentent une faible tendance à la hausse. L'activité agricole s'est améliorée durant ces dernières années, avec une augmentation des précipitations. Dès lors, les variations de l'indice

de végétation ne peuvent s'expliquer que par des variations pluviométriques ou des interventions humaines pouvant soit réduire la couverture végétale (dégradation) soit l'étendre, via la bonification des terres ou l'intensification agricole.

6.6. Conclusion

La comparaison entre deux périodes différentes, permet d'apprécier la dynamique de l'occupation des sols et de la végétation, mais elle ne permet pas de dégager un scénario d'évolution simple des formations végétales. Elle traduit la variation des situations et la diversité d'occupation des terres. Selon les résultats de calcul des changements entre l'année 1987 et l'année 2009, environ 1038 km² des terrains couverts par la végétation sont devenus des terrains nus.

L'analyse de données satellitaires Landsat durant les trois périodes (1987, 2002 et 2009) a permis d'identifier trois principaux types d'occupation du sol (Terrains fortement dégradés « badlands », Végétation et l'eau dans le bassin versant de l'Oued Mina. L'étude diachronique de l'occupation du sol révèle une modification de l'espace naturel avec un accroissement des zones nue (+ 6 %), une extension des sols fortement érodés (badlands et terrains incultes) et une réduction de la végétation (-2 %).

Nous avons utilisé des séries chronologiques de données NDVI de SPOT-VEGETATION afin de suivre la dynamique temporelle de la végétation à l'échelle du bassin versant de l'Oued Mina. Au cours de la période 1999-2010, la couverture végétale dans cette région a légèrement augmenté avec une tendance ondulante. La moyenne annuelle maximale du NDVI a augmenté de 0,08 ce que signifie que la productivité végétale et essentiellement agricole dans la région, a progressivement augmenté. L'augmentation du NDVI_{max} mensuelle en hiver et en automne des grands périmètres d'irrigation a contribué à l'augmentation du NDVI annuelle du bassin. Durant la même période, les précipitations des stations analysées présentent une tendance à l'augmentation.

Les régions forestières ont enregistré une baisse de la productivité végétale reflétée, dans le cadre de cette étude, par le NDVI_{Max}. Or les régions qui ont bonne tendance annuelle à la hausse du NDVI_{max} étaient durant la période 1999 à 2003 dégradées (sol nu) et qui semblent avoir été bien couvertes durant les dernières années (pente entre 0,075 et 0,033). Les zones agricoles représentent une faible tendance à la hausse, soit les zones connaissant la plus forte concentration de population. L'activité agricole s'est améliorée durant ces dernières années avec une augmentation des précipitations. Cependant, il est intéressant de constater que le pourcentage des points subissant cette augmentation du NDVI_{Max} augmente du nord vers le sud. Les variations de l'indice de végétation ne peuvent s'expliquer que par des variations pluviométriques et/ou des interventions humaines pouvant soit réduire la couverture végétale (dégradation) soit l'étendre, via la bonification des terres ou l'intensification agricole. L'évolution intra-annuelle de la végétation est essentiellement influencée par des facteurs climatiques. Les événements climatiques les plus remarquables sur la période d'étude sont les sécheresses des années 2000 et 2008, caractérisées par un déficit hydrique.

Validation des résultats : les résultats de ce travail montrent l'intérêt de l'utilisation de la télédétection et des SIG pour le suivi de la dynamique de l'occupation et l'utilisation du sol.

Par ailleurs, le couplage des images satellites avec les statistiques agricoles (figure 81) permet de valider mais aussi de comprendre les résultats cartographiques, comme en 2008 où une faible pluviométrie entraîne le développement d'une végétation trop faible et une réponse radiométrique correspondant à un très faible NDVI. Cette situation est corroborée par des rendements agricoles très faibles et surtout la grande culture constituée essentiellement par la céréaliculture (figure 81).

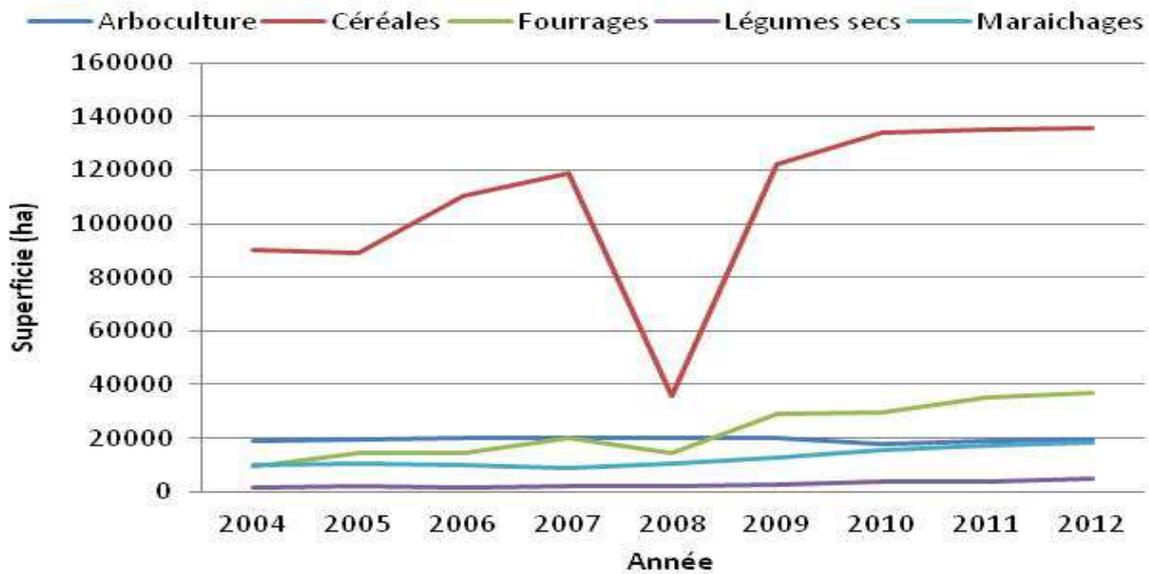


Fig. 80 : Bilan annuel de la moisson et le battage entre au niveau du périmètre d'irrigation de l'Oued Mina (Source : DSA de Relizane).

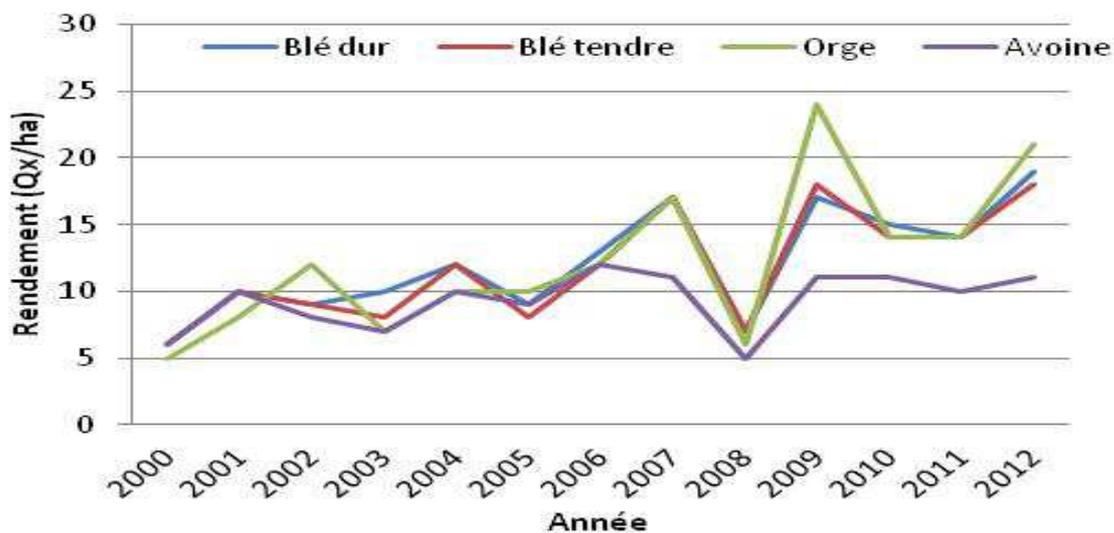


Fig. 81 : Rendement des différents types de la céréaliculture en quintu/ha au niveau du périmètre d'irrigation de la Mina (Source DSA de Relizane).

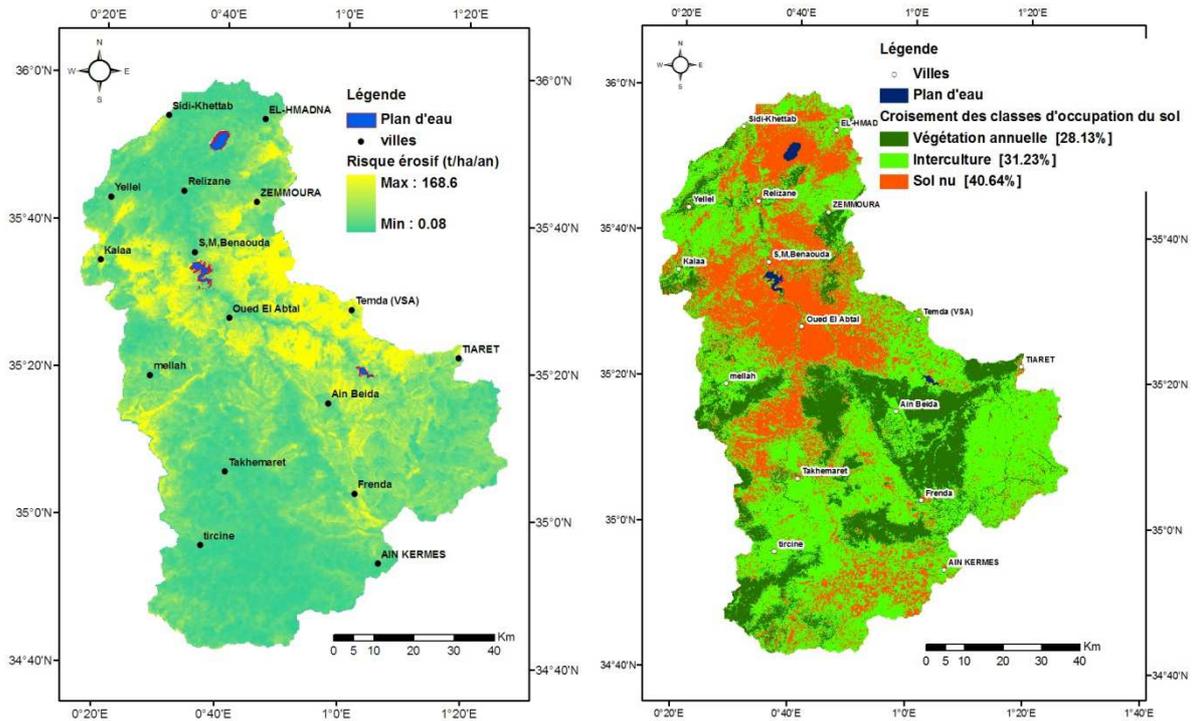


Fig. 82 : Carte du risque érosif contre la carte de l'évolution saisonnière de la végétation dans le bassin de l'Oued Mina.

Le risque érosif estimé en utilisant l'ESLE représente la potentialité, à long terme, des terrains pour déclencher l'érosion hydrique sans tenir compte de l'évolution ou la variation de l'état de surface. En comparant la carte de l'occupation du sol de juin 1987 avec celle de juin 2009, nous constatons une diminution du couvert végétal de l'ordre de 1080 km². Ce gain de sol nu va augmenter la possibilité (risque) de la perte en sol. Et dans le cas contraire, les régions qui ont subis un accroissement du couvert végétal, le risque de l'érosion diminuera. Ces changements de l'occupation du sol, et en particulier du couvert végétal, sont influencés, d'une façon combinée, par le climat et l'activité agricole. Ainsi, il semble raisonnable de penser que les champs cultivés peuvent contribuer de manière significative à la production des sédiments (Baver 1956, Alejandro *et al.*, 2007).

En comparant la carte du risque érosif avec celle de l'évolution saisonnière de la végétation (figure 82), on remarque que les valeurs les plus élevées du risque érosif correspondent aux régions dépourvues de la végétation (sol nu hivernal) et certaines régions présentant une intensification de l'agriculture (la région de Temda, sud de Yellel et de Frenda et à l'ouest de Zemmoura). Ces régions ont subis une variation importante du couvert végétal entre 1999 et 2010.

7

Evaluation de l'érosion par le Césium-137

7. Evaluation de l'érosion par le Césium-137

Dans ce chapitre, nous allons essayer d'estimer et spatialiser l'érosion hydrique par l'utilisation d'un radio isotope à savoir le « Césium 137 ». Elle consiste à étudier la redistribution de l'isotope radioactif « Césium-137 » dans l'environnement. Cette approche permet, en effet, d'évaluer les déplacements du sol liés à l'action de l'érosion hydrique et de quantifier et spatialiser les processus érosifs des sols à l'échelle du bassin versant de l'Oued Mina. Le résultat de cette méthode permet de valider celles de la technique utilisée dans la première partie en l'occurrence les SIG.

7.1.Introduction

Le CS-137 est un sous-produit des essais atomiques réalisés en haute atmosphère dans les années 1950 et 1960. La majeure partie des retombées s'est produite en 1963, avec un pic secondaire en 1959. Les retombées de ces explosions, via les précipitations, ont constitué la principale source d'entrée du CS-137 dans l'environnement terrestre. Comme la majeure partie des essais nucléaires a eu lieu dans l'hémisphère nord, les retombées y ont été beaucoup plus importantes que dans l'hémisphère sud (Cambray *et al.*, 1985).

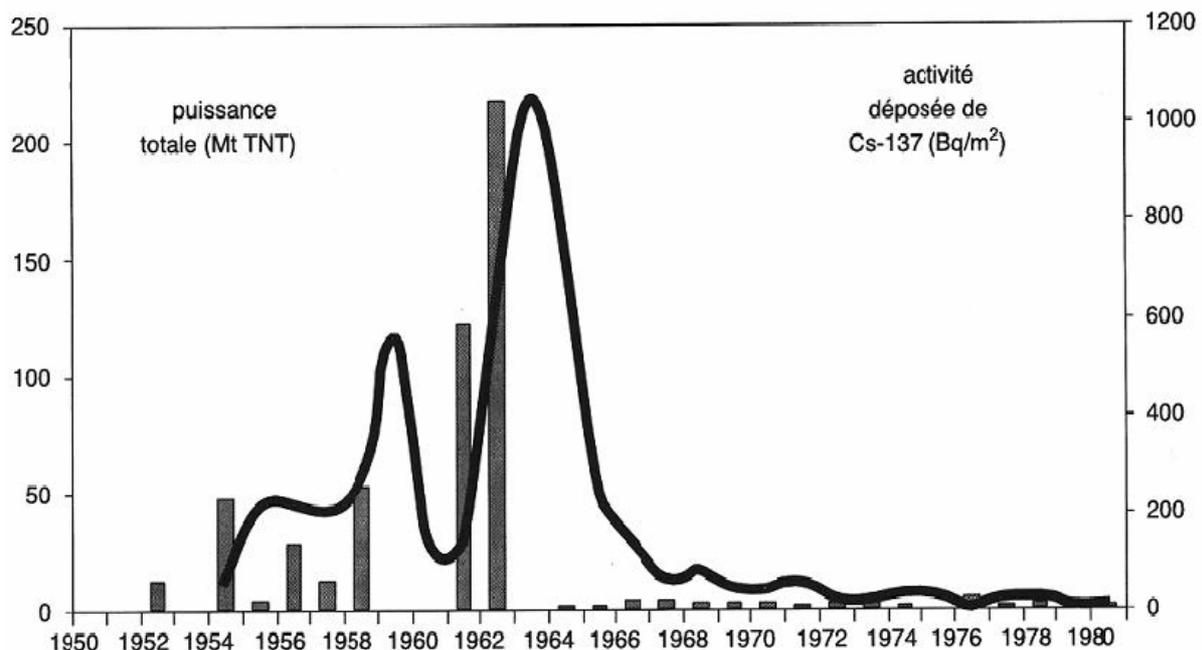


Fig. 83 : Calendrier des essais nucléaires en atmosphère et le bilan des retombées de Cs-137 aux moyennes latitudes de l'hémisphère Nord (en Bq/m², Cambray *et al.*, 1985).

Les retombées du Cs-137 dans le paysage sont fortement absorbées par les particules du sol limitant son mouvement par des procédés chimiques et biologiques. La plupart des mouvements du Cs-137 dans l'environnement sont dus principalement par des procédés physiques; par conséquent, le Cs-137 est un traceur fiable pour étudier l'érosion et la sédimentation. Il a été démontré que la perte de césium-137 dans un bassin versant est fortement corrélée à la perte de sol calculée par l'USLE (Ritchie *et al.*, 1974). La technique du Cs-137 peut être utilisée pour déterminer les taux d'accumulation de sédiments, dans les

réservoirs, les lacs, les zones côtières, et dans les plaines inondables. La bibliographie montre que Cs-137 a été largement utilisé pour l'étude de l'érosion et la sédimentation dans différents environnements du monde.

En 1974, une méthode a été décrite pour l'utilisation de la mesure de la perte de pourcentage de retombées du Cs-137 afin d'estimer la perte de sol (Ritchie et al., 1974). Il a été montré que la perte de Cs-137, dans différentes utilisations des terres dans un bassin versant, présente une forte relation logarithmique avec la perte de sol estimée en utilisant l'USLE. Ensuite, ils ont combiné leurs résultats avec ceux de Menzel (1960), Graham (1963). Cette combinaison a donné lieu à une forte relation logarithmique ($R = 0,94$) entre la perte de sol en tonnes par hectare et par an et la perte de radionucléides. Ils ont conclu que les taux d'érosion des sols peuvent être mesurés de façon fiable par la détermination du pourcentage de la perte en sol dans les retombées du Cs-137 dans le sol.

Une série d'études ont été effectuées au début des années 1970 (Ritchie et Roger, 1990) afin de déterminer : (i) la structure de l'érosion du sol et le dépôt de matériel érodé dans le bassin versant, (ii) le déplacement des matériaux érodés provenant des bassins versants, et (iii) le dépôt des matériaux dans les plans d'eau à l'aide de la distribution spatiale du Cs-137 dans les bassins versants. Ces études ont montré que la teneur du Cs-137 mesurée dans des sites non érodés était semblable aux retombées dans la région et elle était concentrée dans la partie supérieure du profil du sol ce qui peut être utilisée comme une ligne de base. Sur les sites où l'érosion était intense, le totale du Cs-137, dans le profil du sol, était inférieure à ligne de base. Dans les sites de dépôt, le totale du Cs-137 était supérieure à ligne de base où la distribution du Cs-137 en profondeur était supérieure à celle mesurée dans un site non érodé. Ils ont conclu que par mesure de la répartition spatiale du Cs-137, les taux de perte ou de dépôt du sol pourraient être mesurés pour les différentes parties d'un bassin versant.

Pourquoi le Cs-137 ?

Le césium-137 est fortement adsorbé par les argiles et les particules organiques (Tamura et Jacobs, 1960, Brisbin *et al.*, 1974). L'adsorption du Cs-137 par le sol et les sédiments est très rapide (Eyman *et al.*, 1975) pour une distribution verticale dans un sol non perturbé, montrant une décroissance exponentielle avec la profondeur (Ritchie *et al.*, 1970). Alors que, dans les sols labourés, le Cs-137 montre une distribution uniforme à travers la couche de labour. Donc, une simple comparaison entre le profil de l'activité du Cs-137 pour un sol quiconque avec le profil du site de référence, permet d'estimer le taux de sédimentation ou de perte en sol.

Ainsi, le Cs-137 émet un rayonnement gamma (662 keV) rend sa mesure dans des échantillons du sol relativement facile et précis sans préparation chimique spécial ou de séparation (Mc Callan *et al.*, 1980). Le césium 137 peut être mesuré en utilisant un détecteur à semi-conducteur germanium hyper pure et analyseur multicanaux pour séparer et quantifier la crête de 662 keV de rayons gamma à partir du spectre de rayons gamma.

Le Cs-137 constitue un marqueur intéressant pour des études sur l'érosion des sols pour les raisons suivantes (Ritchie *et al.*, 1990, Walling *et al.*, 1988) :

- cet isotope a été introduit artificiellement dans notre environnement depuis l'avènement de l'ère nucléaire ;
- cette introduction, à la fin des années 1950, coïncide avec le début de l'industrialisation de notre agriculture ;
- le Cs-137 a une demi-vie de 30 ans. Les quantités encore présentes dans les sols sont donc aisément détectables ;
- une fois retombé au sol, le césium est fermement retenu par les particules de sol, n'étant à toute fin pratique ni lessivé, ni prélevé par les cultures. Sa redistribution spatiale dans l'environnement reflète donc les mouvements de sol ;
- Le mode de déplacement de cet isotope dans l'environnement est lié principalement au sol. La comparaison de l'activité du sol en Cs-137 d'un site donné avec celle d'un site reconnu non-érodé peut donc être interprétée en termes d'érosion (réduction de l'activité) ou de déposition (augmentation de l'activité). ;
- les mesures de Cs-137 renseignent non seulement sur l'érosion nette, mais sur l'ensemble des mouvements de sol, leur importance relative et leur distribution spatiale dans le paysage ;
- un seul échantillonnage des sols de la zone étudiée est suffisant pour pouvoir y estimer l'ensemble des mouvements de sol en cours des 30 dernières années.

En se basant sur ces avantages, de nombreux chercheurs ont utilisé la technique du Cs-137 pour suivre l'évolution du phénomène d'érosion dans de nombreux bassins versant à travers le monde (Estrany *et al.*, (2010) dans le milieu méditerranéen, Gomez *et al.*, (1997) en Espagne). Cette technique a été utilisée dans les différents contextes climatologique, topographique et géologique. Les études menés par Quine *et al.*, (1994); Porto *et al.*, (2003); Soto *et al.*, (2004), ont montré la validité de l'approche appliquée dans le cas de plusieurs types de pente et de sol dans le milieu méditerranéen (Navas *et al.*, 2007, Chappell, 1999, Douglas, 1993).

7.2.Principe de la technique

Le principe de la technique consiste à comparer la teneur en Césium-137 de sols par rapport à la teneur en Césium-137 de sites témoins non érodés. Comme la surface étudiée est plus grande, il est jugé préférable de prendre en compte plusieurs sites représentant les retombées initiales pour intégrer la variabilité spatiale de ces dernières.

La première étape de l'approche consiste à sélectionner des sites de référence non perturbés (où ni érosion ni sédimentation ont eu lieu). Les sites de référence doivent être plats, ne devrait pas avoir été cultivées au cours des 50 dernières années et de préférence devrait être couverte par des prairies. A partir de ces sites de référence, les échantillons du sol sont pris à des intervalles de profondeur de 2cm afin d'établir un profil de profondeur de la répartition du Cs-137 dans le sol.

Pour cibler les zones qui peuvent être des sites de référence, on a superposé la carte de la densité de la végétation tracée à l'aide de l'indice de végétation normalisé (NDVI), et la carte

des classes des pentes. Les sites dont la valeur du NDVI supérieur à 0.25 avec une pente inférieure à 10%, sont considérés comme stables.

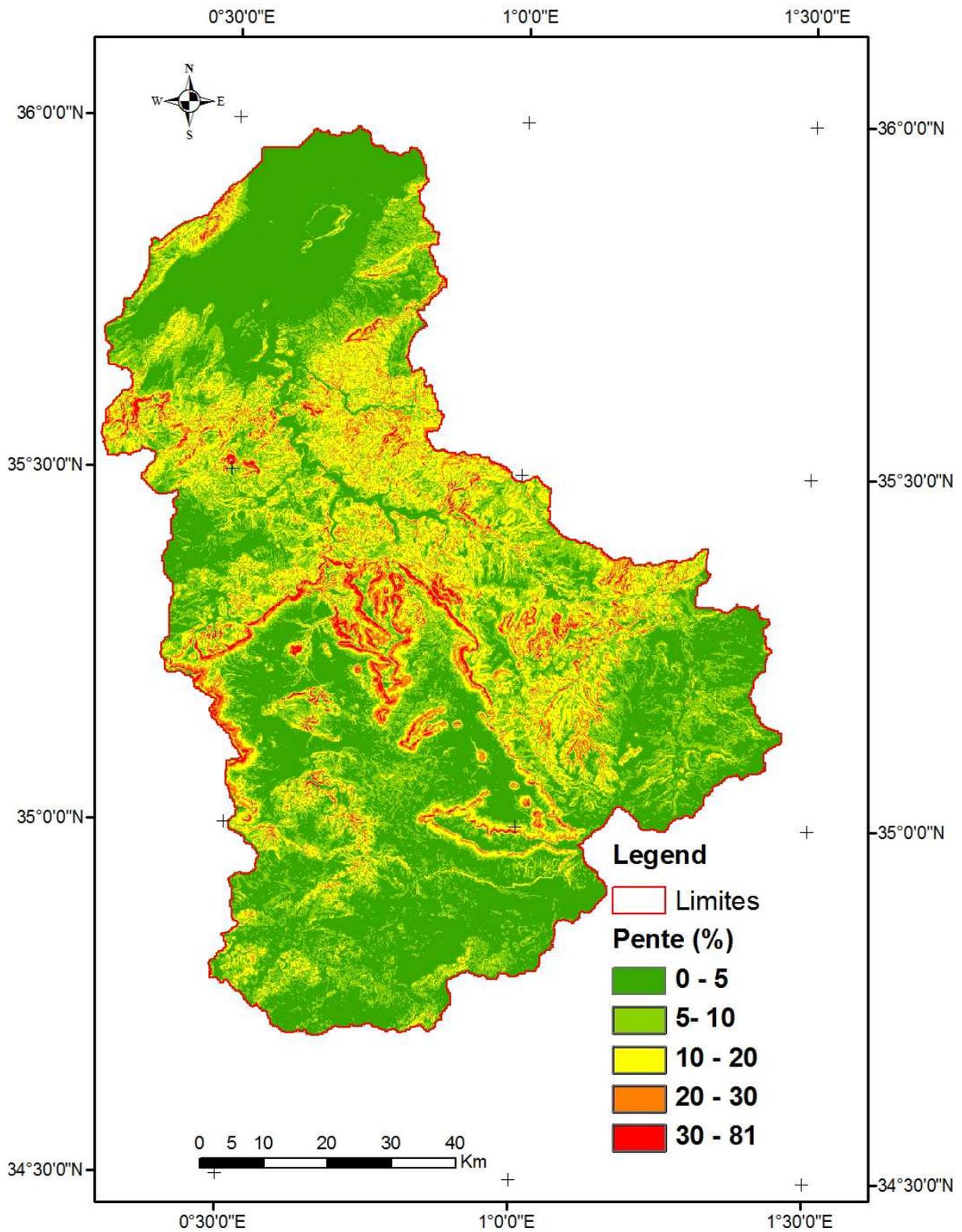


Fig. 84 : Carte des pentes (%) établie à partir du MNT.

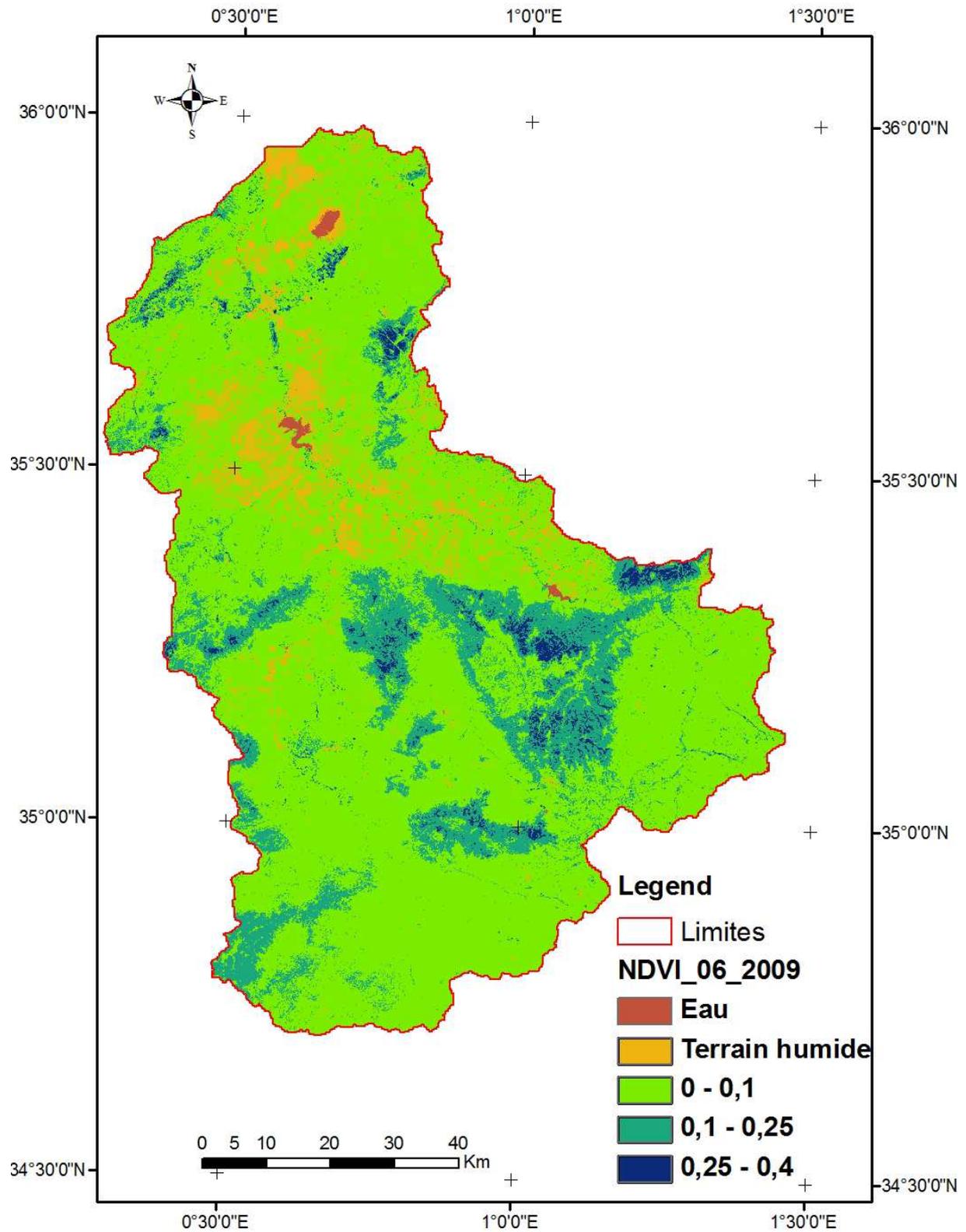


Fig. 85 : Valeurs du NDVI de juin 2009.

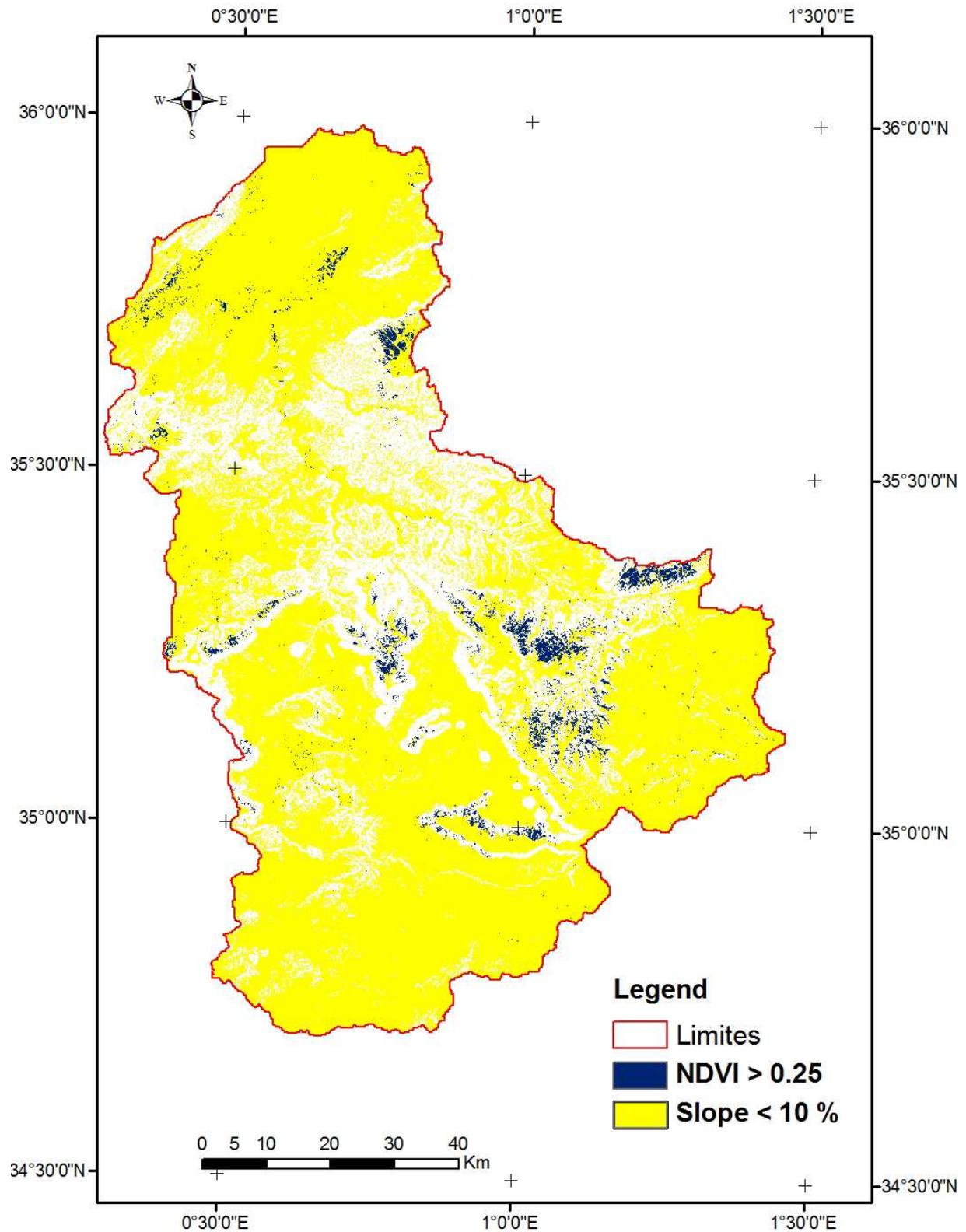


Fig. 86 : Superposition de la carte des pentes inférieures à 10% avec celle des valeurs du NDVI supérieures à 0.25.

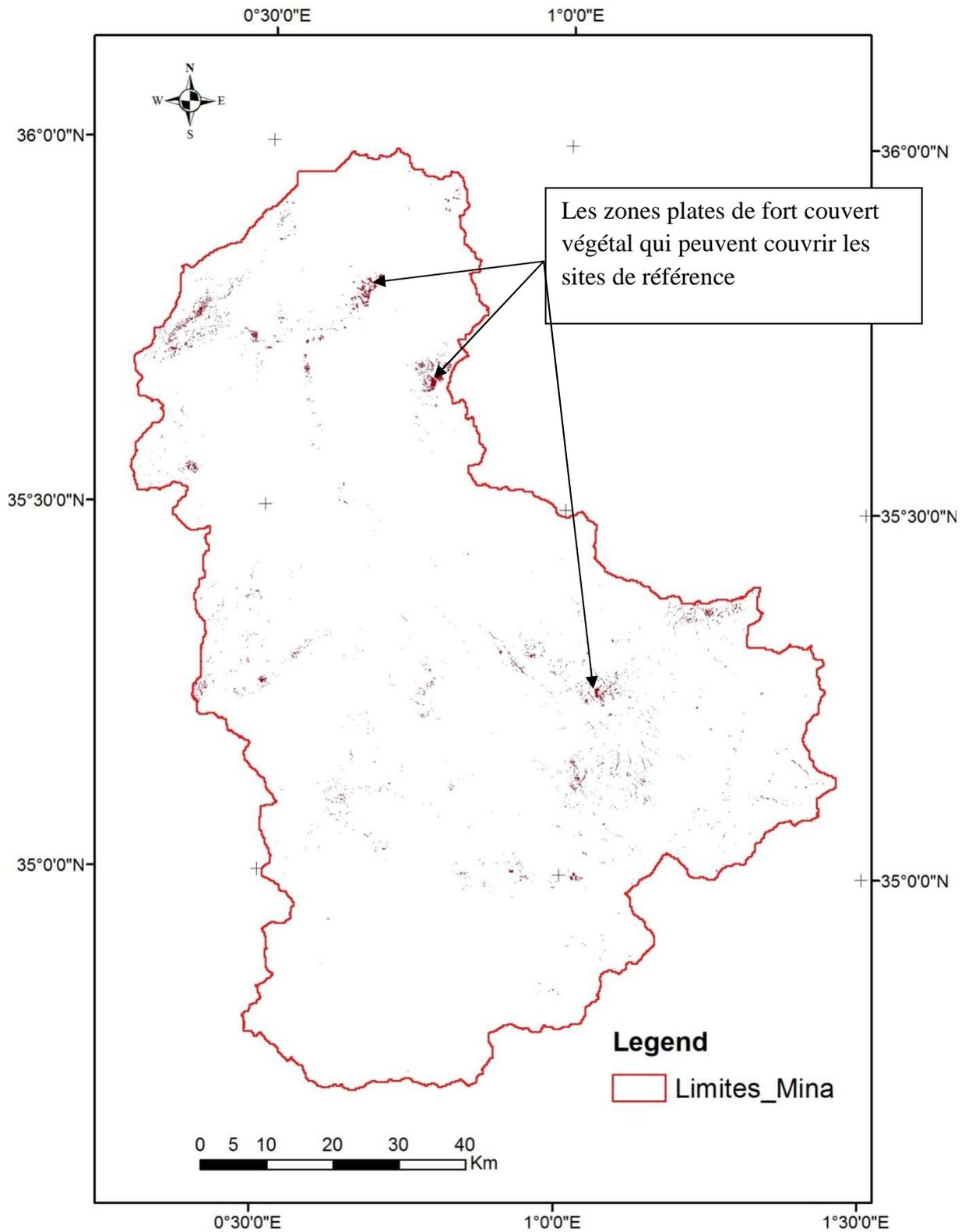


Fig. 87 : Carte de Croisement de la carte des pentes inférieures à 10% avec celle des valeurs du NDVI supérieures à 0.25.

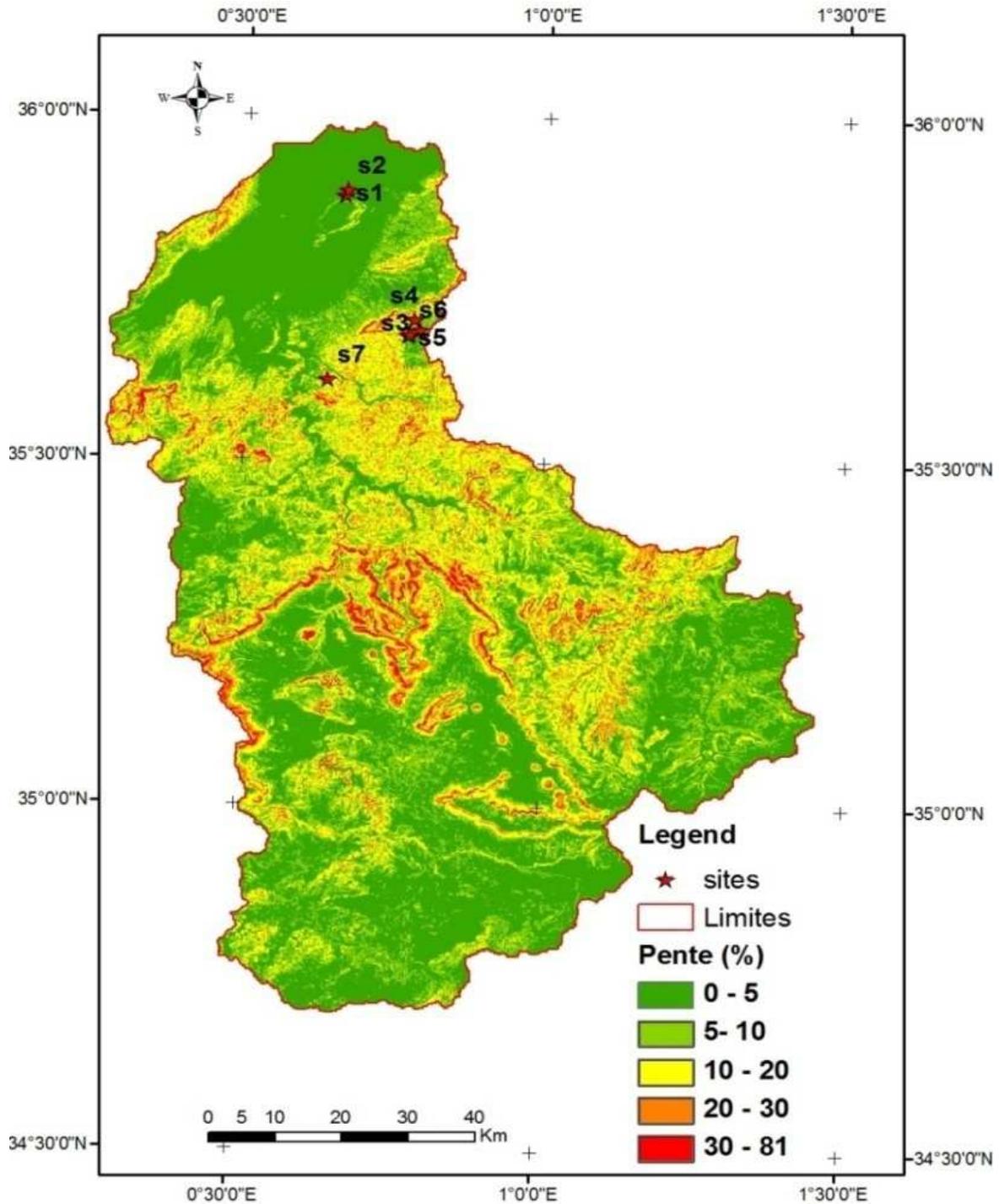


Fig. 88: Localisation géographique des points d'échantillonnage.

7.3.Stratégie d'échantillonnage

L'étude de petites zones (quelques hectares) par le Cs-137 implique généralement l'échantillonnage du sol sur une base de grille plus ou moins régulière. Pour la présente étude, en raison de la taille importante du bassin versant de l'Oued Mina, une autre méthode d'échantillonnage a été adoptée. Nous avons ciblé, tout d'abord, les zones agricoles

d'accumulation (S1 et S2) situées dans les plaines du Nord de la région d'étude (GPI) (figure 87). Les autres zones sont sélectionnées en fonction de l'état et l'utilisation du sol (S5 en haut de pente et S6 en bas de pente). Sur sept échantillons prélevés, trois ont pu être analysés par spectrométrie gamma. Dans le tableau 20, on a exposé la première tranche du travail réalisé sur le terrain (échantillonnage) et au laboratoire afin déterminer la redistribution du radioélément Cs-137.

Tableau 21: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du sol.

Site	Classes de pente	NDVI_Juin 2009	Végétation	Moyenne du pourcentage de la matière organique
S1	0-5	0	GPI	1,51
S2	0-5	0,016	GPI	1,72
S3 (site de ref.)	0-5	0,18	forte	0,98
S4	5-10	0,123	moyenne	1,86
S5	5-10	0,064	faible	1,55
S6	0-5	0,065	faible	0,77
S7	0-5	0,07	faible	-

GPI : Grands Périmètre d'Irrigation.

7.4.Echantillonnage du sol et mesure de Cs-137

Pour pouvoir estimer les mouvements de sol à partir des mesures de Cs137, il faut mesurer le stock de césium présent dans les sols, tant pour le site d'étude (zones d'érosion ou de dépôt) que pour les sites de références non érodés. En milieu non perturbé, le Cs-137 est habituellement concentré dans les premiers centimètres du sol et décroît de façon exponentielle avec la profondeur (Grzegorz, 2006, Walling et He, 1999). Un carottier en métal d'environ 30 cm de long et de 5 cm de diamètre a été utilisé. Chaque carotte a été sectionnée à des intervalles de 1 à 2 cm sur toute sa longueur afin de tracer le profil de la teneur en Césium-137 en fonction de la profondeur.

Les échantillons secs sont broyés à l'aide d'un mortier en porcelaine jusqu'à obtention d'une poudre fine et homogène. Les grosses particules sont écartées au moyen d'un tamis de 2 mm d'ouverture de maille. Chaque échantillon, représentant chaque tranche de sol considérée, est séchée une semaine à l'air libre, puis placé durant 24 heures environ dans une étuve à 100 °C, jusqu'à l'obtention d'une masse constante (figure 89 à 91).



Fig. 89 : Broyage et pesages des échantillons du sol prélevés.



Fig. 90 : Préparation des échantillons : après homogénéisation, les échantillons sont passés au travers d'un tamis de largeur de pores 2 mm.



Fig. 91 : Séchage des échantillons à 100°C durant 24 h.

7.5. Système d'analyses

Une chaîne de spectrométrie gamma a été utilisée pour l'analyse le radioélément Cs-137 dans le compartiment du sol. La chaîne d'acquisition est composée d'un détecteur (dont la partie sensible est un cristal de germanium hyper pur), placé au centre d'une enceinte blindée. Le détecteur est relié à un réservoir d'azote liquide qui assure le refroidissement du détecteur d'une part, et par le biais d'un préamplificateur d'amplitude à une électronique de détection, d'autre part (figure 92).

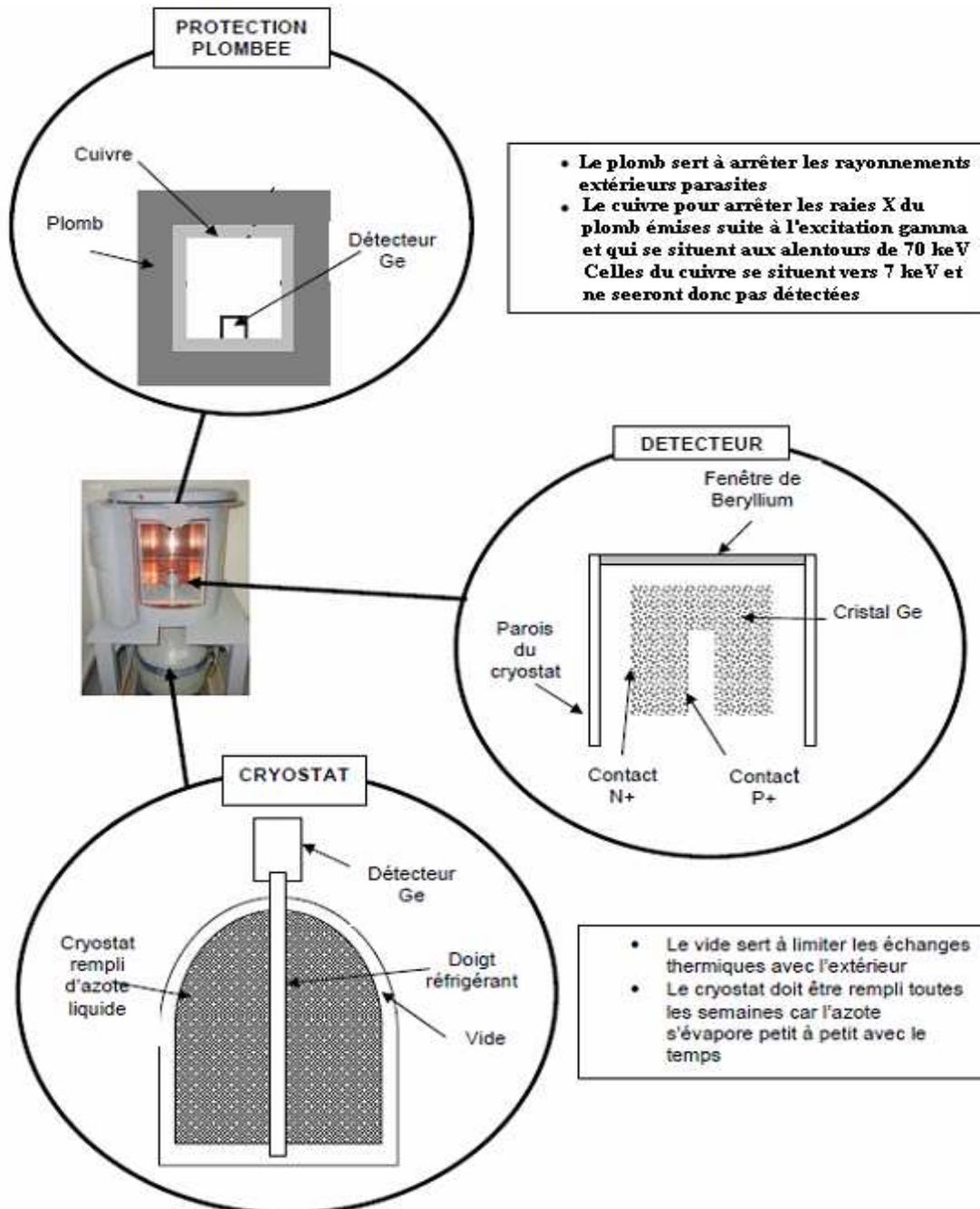


Fig. 92: Système d'analyse du Césium-137 et le détecteur Gamma hyper pur.

7.6.Résultats et discussions

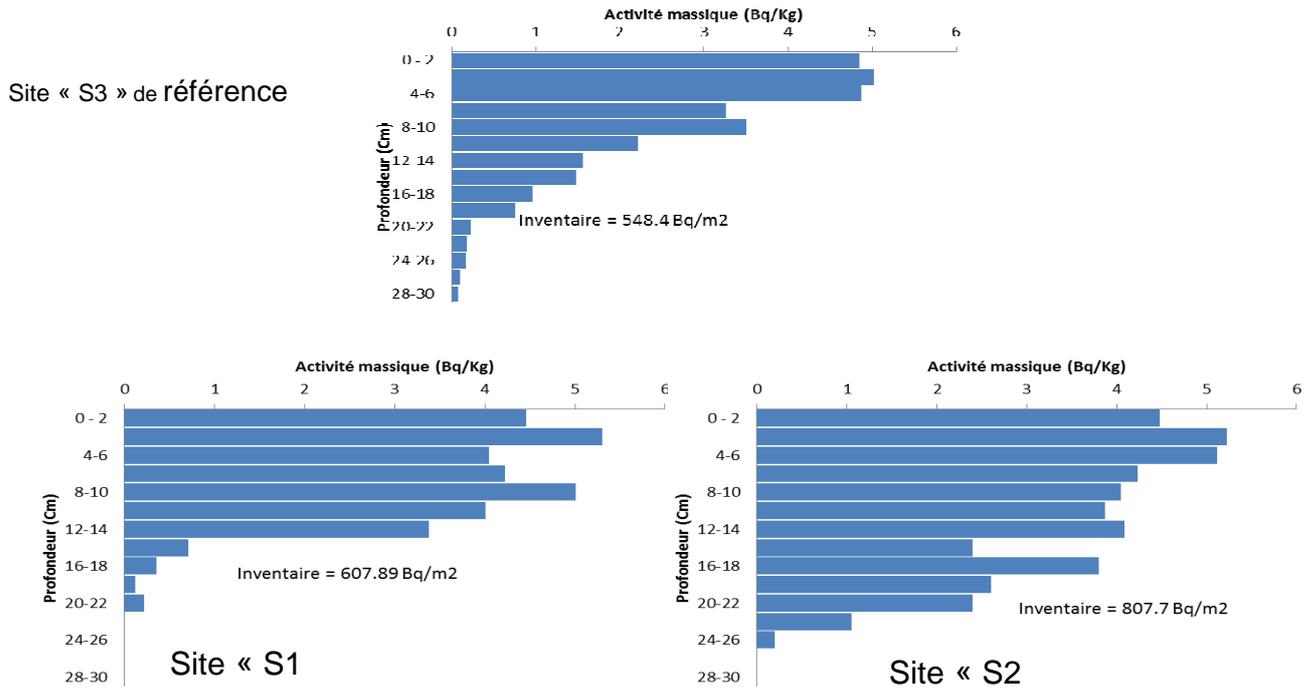


Fig. 93: Répartition verticale du Cs-137 dans trois profils de sol (site 1, 2 et le site de référence S3).

D’après les profils de l’activité en Cs-137 dans le site 1 et le site 2 (figure93), considérés comme terrain agricole, on constate que les inventaires du Cs-137 établies à partir des points d’échantillonnages recueillis sont nettement supérieurs à l’inventaire de référence (548.4Bq/m²), ce qui pourrait suggérer qu’une accumulation du sol a eu lieu à cet endroit. Les valeurs d’inventaire du Cs-137 varient entre 607 et 807 Bq/m². Comme les deux points d’échantillonnage présentent une activité du Cs-137 supérieure à l’activité de référence, donc nous n’avons pas observé de points d’érosion pour ces du terrain.

Les activités spécifiques du Cs-137 doivent être converties en un mouvement du sol en utilisant des modèles de conversion. De nombreux modèles ont été développés au fil du temps. Ils impliquent tous différentes hypothèses qui se traduisent par des paramètres, dont certains sont spécifiques au site (Fulajtar, 2003). Nous avons utilisé le modèle du bilan de masse simplifié proposé par Kachanoski (1963), pour estimer les mouvements du sol dans les champs de l’échantillon (Eq. (10)). Ce modèle a été utilisé avec succès dans des études antérieures où l’érosion était estimée sur le terrain dans un bassin versant (Bernard *et al.*, 1998). Ce modèle tient compte de la retombée initiale du Césium-137 et permet de convertir les teneurs en cet élément en termes de perte ou de gain (dépôt) de sols par rapport au site de référence.

$$E = MR^{-1} \left(1 - \left(T_n / T_0 \right)^{1/n} \right) \tag{10}$$

où E : perte de sol en Kg/m²/an,

M : poids de couche de laboure en Kg/m²,

R : enrichissement relatif en isotope du sol érodé,

Tn : activité spécifique en Césium-137 de l'échantillon de sol prélevé en Bq/m²

T0 : activité spécifique en Césium-137 du sol d'un site non-érodé en Bq/m²,

n : nombre d'années écoulées depuis le maximum de retombées (année 1963).

Les zones à activité en césium-137 inférieure à celle des témoins sont considérées comme érodées, et les zones à activité supérieure sont considérées comme des zones d'accumulation.

En utilisant le modèle de Kachanoski, on a pu estimer le taux d'accumulation qui est de 0,039 kg/m²/an pour le site S1 et de 0,148 kg/m²/an pour le site S2

7.7. Conclusion

L'analyse de la teneur du Césium-137 dans les échantillons du sol a permis de conclure que la partie Nord du bassin versant de l'Oued Mina peut être considérée comme une zone de déposition des sédiments (0,935 t/ha/an). Ces résultats complètent ceux déterminés par l'utilisation de l'USLE et les SIG. Donc, l'application de ces deux dernières techniques n'est pas suffisante pour étudier le phénomène d'érosion dans le bassin.

L'approche d'échantillonnage retenue, dans le bassin de l'Oued Mina, fait intervenir des parcelles choisies aléatoirement à l'intérieur de chacune des catégories identifiées de façon à représenter les différentes combinaisons type de sol/système cultural.

Les taux d'érosion, estimés dans cette étude à l'aide de la télédétection et les SIG, sont grandement supérieurs (11,8 t/ha/an en moyenne pour tout le bassin versant) à ceux estimés par le Cs-137 (0,935 t/ha/an). Cependant, il est évident que la proportion de ces sédiments n'a pas atteint les champs agricoles, représentant les sites d'échantillonnage pour l'analyse en Cs-137. En outre, le dépôt peut se produire en amont, dans des champs de piégeage par exemple, entre les champs et le système de la rivière, sur le lit de la rivière, dans les plaines inondables, etc. ce qui conduit à une sous-estimation de la dégradation des sols dans certains endroits.

Nos résultats corroborent avec ceux trouvés par (Ritchie et McHenry, 1973, Playford *et al.*, 1993, Collins *et al.*, 2001, Kachanoski, 1993, Bernard *et al.*, 1990) dans un milieu similaire. Leurs résultats démontrent que l'érosion est plus importante dans les bassins cultivés que dans les autres. Par contre, ils diffèrent des résultats auxquels sont arrivés Hang *et al.*, (2008) et Y dans un milieu humide où le couvert végétal joue un rôle primordiale dans la protection des sols à l'inverse des milieux semi-arides et arides comme celui du bassin de l'Oued Mina.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude, on a fait appel à la télédétection et aux SIG pour évaluer et cartographier l'érosion hydrique en utilisant l'équation universelle des pertes en sol USLE dans le bassin versant de l'Oued Mina. Ce bassin est caractérisé par une grande irrégularité dans les précipitations, une forte pente, une lithologie essentiellement marneuse et une couverture végétale très faible ce qui le rend très vulnérable à l'érosion. Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG ont été utilisés pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement. L'intégration des cartes thématiques des facteurs du modèle USLE dans le SIG a permis de cartographier l'érosion hydrique dans le bassin de l'Oued Mina.

Les techniques de SIG et les données provenant de la télédétection ont été utilisées avec succès pour déterminer les facteurs d'érosion des sols, y compris l'érosivité des pluies (R), l'aptitude du sol à l'érosion (K), l'occupation de sol (c) et longueur / inclinaison de la pente (LS). Par conséquent, les cartes thématiques de ces paramètres et l'érosion du sol estimée ont été déterminés. Avec ces informations, les interventions de gestion peuvent être précisément ciblées. Les facteurs ont été calculés en utilisant les données de télédétection. Cette dernière a constitué la base de données majeure de cette étude. La valeur du facteur R est comprise entre 9 et 857 MJ.mm/ha.h.an avec les valeurs les plus élevées dans la partie Sud-est du bassin versant. Le facteur (K) est estimé à 0,06 t h ha /MJ ha mm en moyenne, les valeurs élevées s'enregistrent dans la partie aval du barrage de Sidi M' Hamed Ben Aouda. Le facteur (C) est compris entre 0,01 et 1,46 avec une moyenne de 0,71. La valeur moyenne de (LS) est estimée à 9,5 avec une valeur minimale est 0 et de valeur maximale de 55,12. La valeur moyenne de l'érosion est estimée à 12,43 t/ha/an avec un minimum de 0.08 t/h/an et un maximum de 168,6 t/ha/an. Les valeurs minimales se localisent dans les régions des faibles inclinaisons de la pente, de faibles valeurs du facteur (K) et de fortes valeurs du facteur (C). Alors que les valeurs importantes du risque érosif, se concentre dans une bande diagonale couvrant le Sud-est, le centre et le Nord-Ouest du bassin versant. Cette région se caractérise par des fortes valeurs des facteurs (LS) et (K) et de faibles valeurs du facteur (C).

Même si l'équation a été initialement conçue pour prédire l'érosion des sols à l'échelle du champ, son utilisation pour les grandes surfaces dans la plate-forme SIG a produit des résultats satisfaisants. Par la délimitation des sous-bassins hydrographiques comme zones sensibles à l'érosion en fonction du niveau de gravité de la perte des sols, la priorité est donnée pour une planification de la conservation ciblée et rentable.

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

précipitations annuelles. L'extrapolation du facteur (R) sur la totalité du bassin sur l'ensemble du bassin peut être inappropriée à cause de la grande variété de climats que l'on trouve dans le bassin. Le facteur (K) est estimé à partir de la perméabilité. Cependant, le K est en fonction avec la perméabilité et la texture. Pour le facteur (LS), l'angle de pente a été déterminé par un MNT avec une résolution de 30 mètres, qui est peut être adapté à l'échelle du bassin versant de 8000 km². Le facteur C a été estimé à partir des images NDVI, ce dernier peut être influencé par les effets atmosphériques ce qui peut fausser l'estimation du facteur (C).

Malgré ces déficiences et ces défauts, les méthodes utilisées dans cette thèse ont produit une information valable sur le risque d'érosion. Le principal intérêt de l'analyse spatiale est d'identifier des zones qui, sur le long terme, vont subir de l'érosion en nappe et en rigoles.

En ce qui concerne l'évolution des facteurs interagissant avec l'érosion au cours du temps, on a déterminé les changements d'états des facteurs variables dans le temps entre deux périodes différentes ainsi que changement qui peut intervenir entre deux années différentes et entre deux saisons différentes. Pour ce faire, on a utilisé les scènes prises durant le mois de juin des années 1987, 2002, et 2009 de Landsat TM. Pour la période humide, on a utilisé les scènes prises en février 1985, novembre 2009 et janvier 2010. Le sol nu occupe environ 40 % de la superficie de la région d'étude durant la période sèche. Ce pourcentage diminue (-50%) en automne et atteint environ 8% en hiver. Ça s'explique du fait qu'en début de saison de culture et avec les premières pluies d'automne, la végétation pousse et occupe les zones nues. En hiver, la santé de la végétation atteint son maximum. Durant cette période, la végétation couvre environ 44% de la superficie du bassin. La portion du sol nu hivernal ou permanent est constituée essentiellement par les badlands d'une formation marneuse. Elle est la plus sensible à l'érosion du fait qu'elle est soumise à la force des conditions climatiques (température, évapotranspirations et les précipitations) durant toute l'année.

Les deux classes de l'occupation du sol : « végétation » et « sol nu » ont subi un grand changement durant la période 1987-2009. La majorité de la zone Sud du bassin a été dégarnie de végétation entre 1987 et 2002 (soit 856 km² de perte). Contrairement au Nord-Ouest, on remarque une amélioration de la superficie végétale dans des zones dispersées (711 km²). Cette amélioration est probablement due à l'augmentation des activités agricoles dans cette région. Entre 2002 et 2009, les zones où on a enregistré des gains de la végétation durant la période 1987-2002, ont devenues des sols nus sauf l'extrême Sud, où on a enregistré une légère amélioration de la végétation (449 km²).

D'autres données satellitaires de basse résolution spatiales, mais procédant une importante résolution temporelle (NDVI de SPOT-VEGETATION) ont été utilisées afin de suivre la dynamique temporelle de la végétation à l'échelle du bassin versant de l'Oued Mina. Au cours de la période 1999-2010, la couverture végétale dans cette région a légèrement augmenté avec une tendance ondulante. La moyenne annuelle maximale du NDVI a augmenté de 0,08 ce que signifie que la productivité végétale et essentiellement agricole dans la région, a progressivement augmenté. L'augmentation du NDVI_{max} mensuelle en hiver et en automne

des grands périmètres d'irrigation a contribué à l'augmentation du NDVI annuelle du bassin. Durant la même période, les précipitations des stations analysées présentent une tendance à l'augmentation.

Les régions forestières ont enregistré une baisse de la productivité végétale reflétée, dans le cadre de cette étude, par le $NDVI_{Max}$. Or les régions qui ont bonne tendance annuelle à la hausse du $NDVI_{max}$ étaient durant la période 1999 à 2003 dégradées (sol nu) et qui semblent avoir été bien couvertes durant les dernières années (pente entre 0,075 et 0,033). Les zones agricoles représentent une faible tendance à la hausse, soit les zones connaissant la plus forte concentration de population. L'activité agricole s'est améliorée durant ces dernières années avec une augmentation des précipitations. Cependant, il est intéressant de constater que le pourcentage des points subissant cette augmentation du $NDVI_{Max}$ augmente du nord vers le sud. Les variations de l'indice de végétation ne peuvent s'expliquer que par des variations pluviométriques et/ou des interventions humaines pouvant soit réduire la couverture végétale (dégradation) soit l'étendre, via la bonification des terres ou l'intensification agricole. L'évolution intra-annuelle de la végétation est essentiellement influencée par des facteurs climatiques. Les événements climatiques les plus remarquables sur la période d'étude sont les sécheresses des années 2000 et 2008, caractérisées par un déficit hydrique.

La même technique a été utilisée au niveau du bassin versant de Bouregreg (Maroc) pour l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur l'état de surface par les images Modis. Il est en résulte que sur un intervalle de temps annuel, l'année 2007 présente les plus faibles indices de végétation (Mahé *et al.*, 2012). Cette situation est particulièrement remarquée au centre du bassin et s'expliquerait à la fois par l'évolution des paramètres climatiques et des activités humaines. La dynamique spatio-temporelle de la masse végétale de 1982 à 2009 au niveau du bassin du Bouregreg présente un bassin en pleine mutation. Le gain de végétation est lié à une concentration de l'activité agricole pendant cette période. Au contraire de ces mois, la période de mai à juillet connaît des tendances notables à la baisse de la masse végétale (Tra Bi *et al.*, 2013).

La technique isotopique par le césium 137, semble être intéressante pour l'évaluation de la perte en sol et la fraction de sédimentation. Dans cette étude, nous avons tenté d'estimer l'érosion hydrique par le césium-137 sur la totalité du bassin versant pour valider les résultats de l'évaluation de l'érosion par la télédétection et les SIG. Vue la taille du bassin, nous avons échantillonné seulement sept points dans la partie nord du bassin. Seuls trois échantillons ont pu être analysés par la spectrométrie Gamma. D'après les profils de l'activité en Cs-137 dans le site S1 et le site S2, considérés comme terrain agricole, on constate que ces régions représentent une accumulation du sol car l'activité de ces derniers en Cs-137 est supérieure au site de référence (S3). En utilisant le modèle de Kachanoski, on a pu estimer le taux d'accumulation qui est de l'ordre de 0,935 t/ha/an en moyenne.

L'avantage de la technique du Cs-137 est son évaluation prospective indépendante des taux d'érosion à moyen terme. Le procédé utilisé permet la collecte d'échantillons de sol au cours d'une visite de terrain sans la nécessité de surveiller les processus d'érosion et de sédimentation sur une longue période de temps. Une limitation importante est le temps requis

pour l'analyse au laboratoire. Toutefois, pour les deux sites testés dans le bassin versant de l'Oued Mina, la technique du Cs-137 a fourni une quantification adéquate de l'accumulation du sol dans la zone de dépôt de sol au Nord de la région d'étude.

En conclusion, l'actuelle carte du risque d'érosion des sols à l'échelle du bassin versant de l'Oued Mina, avec les limites abordées plus haut, est sûrement proche du mieux que l'on peut obtenir avec les données disponibles. Les résultats peuvent être améliorés en utilisant un modèle numérique de terrain plus détaillé, des données satellites qui ont de meilleures caractéristiques spectrales et géométriques et une information plus détaillée sur le sol. L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol a fourni des informations additionnelles concernant l'impact du changement climatique et surtout du changement de l'état de surface sur l'érosion. L'analyse des changements, qui peuvent être dus aux activités agricoles, ne permet pas que de localiser les sites d'intervention, elle permet aussi de déterminer les scénarios de gestion de l'occupation et l'utilisation du sol à long terme pour le but de minimiser l'érosion hydrique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abaoui, J., A., El Harti, E., Bachaoui, A., El Ghmari et A., El Bouadili, 2005. Deux approches de cartographie de l'érosion hydrique par télédétection et SIG : cas de la région de Bin el Ouidane (haut Atlas, Maroc). *Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable"*. 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc.
- ABH (Agence du Bassin Hydrographique Chélif Zahrez), 2004. *Cadastre Hydraulique du bassin hydrographique Chélif-Aval du barrage de Boughzoul*, Deuxième partie : Bas Chélif et Mina, 52 pages.
- Achite M, Touaibia B, 2000. Analyse multivariée de la variable d'érosion spécifique : cas du bassin versant de l'oued Mina (Wilaya de Relizane, Algérie). *Actes du Séminaire International d'Hydrologie des régions méditerranéennes du 11 au 13/10/2000*, Montpellier, France, UNESCO-IRD (51) : 119-28.
- Achite, M., B., Touaibia, et S., Ouillon, 2006. Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences & Perspectives. *14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments*. Marrakech, Morocco, p 14-19.
- Alejandro M. et K. Omasa, 2007. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 62 (2007) 309–324
- Arabi, M., 1991. Identification de l'agriculture en Algérie, Contraintes et espoirs. *Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages*. P 96-104.
- Arabi, M., 1991. Influence de quatre systèmes de production sur le ruissèlement et l'érosion en milieu méditerranéen à Médéa (Algérie). *Thèse doctorat Université de Grenoble III*. 273 p.
- Arabi, M., et E., Roose, 1989. Influence du système de production et du sol sur l'érosion et le ruissèlement en nappe en milieu montagnard méditerranéen (station de Ouzera). *Bulletin Réseau Erosion*, IRD, Montpellier (France).
- Bachaoui, B., E.M., Bachaoui, A., El Harti, A., Ait fora, J., Abaoui et A., El Ghmari, 2005. Cartographie des zones vulnérables a l'érosion hydrique de la Ville de béni Mellal : apport de la télédétection et des systèmes D'information géographique (SIG). *Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable"*. 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc.
- Bannari, A., D., Morin, F., Bonn, A.R., Huete, 1995, A review of vegetation indices, *Remote Sensing Reviews*, Vol. 13, 95-120.
- Bartholomé, E., 1993. Télédétection et cartographie. Éd. AUPELF-UREF. *Les Presses de l'Université du Québec*. 1993. p. 187-201
- Baver, L.D., 1956. Soil Physics, third ed. *John Wiley & Sons Inc.*, New York.
- Benkhalel, A., et B., Remini, 2003. « Analyse de la relation de puissance : débit solide – débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Revue des Sciences de l'eau* 16(3) : 333-356.

- Benmansour, M., Ibn majah, M., Marah, H., Marfak, T., Walling, D.E., 2000. Use of the Cs-137 technique in soil erosion investigation in Morocco-case study of the Zitouna basin in the north. In: October 16th–20th, *Proceeding of an International Symposium on Nuclear Techniques in Integrated Plant Nutrient, Water and Soil Management*. AIEA/FAO, Vienna, pp. 308–315.
- Bennett, H., 1939. Elements of soil conservation. *Édit. MAC GRAW-HILL, New-York, 530 p.*
- Bernard, C., Lavadiere, M.R., 1990. Variabilité spatiale de l'activité en Cs-137 et ses répercussions sur l'estimation de l'érosion hydrique. *Pédologie 40*, 299–310.
- Bernard, C., Mabit, L., Wicherek, S., Laverdière, M.R., 1998. Long-term soil redistribution in a small French watershed as estimated from Cs-137 data. *J. Environ. Qual. 27*, 1178–1183.
- Boardman, J., 2006. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena 68 (2006) 73 – 86*. www.elsevier.com/locate/catena.
- Bonn, F., et al., 1996. Précis de télédétection – Volume 2. Applications thématiques, Sainte-Foy, *Presses de l'Université du Québec/AUPELF*, 633 p.
- Bouaichi, I., et B., Touaibia, 2006. Approche quantitative de l'érosion spécifique Pour l'élaboration d'un abaque. Cas du bassin versant de l'oued Cheliff. *LJEE-ENSH-N°08*.
- Boukheir, R., C., Abdallah, et M., Khawlie, 2008. Assessing soil erosion in Mediterranean Karst landscapes for Lebanon using remote sensing and GIS; *Engineering Geology Journal*, 16 pages.
- Boukheir, R., M.C., Girard, M., Khawlie, et C., Abdallah, 2001. Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens: une revue bibliographique. *Etude et Gestion des sols*, Volume 8, 4. P 231 à 245.
- Boukheir, R., O., Cerdo, et C., Abdallah, 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon; *Geomorphology journal*.
- Bourouba, M., 1994. Bilan comparatif de l'érosion actuelle dans deux bassins-versants de l'Algérie orientale: le Seybouse et le Djendjen. *Cahier ORSTOM, série Pédologie 22(2)*: 153-162.
- Bourouba, M., 1998. Contribution à l'étude des transports solides de l'Oued Medjerda supérieur (Algérie orientale). *Bulletin de l'ORSTOM 18* : 76-97.
- Brisbin, I.L., Jr., R.J. Beyers, R.W. Dapson, R.A. Geiger, J.B. Gentry, J.W. Gibbons, M.H. Smith, et S.K. Woods. 1974. Patterns of radiocesium in the sediments of a stream channel contaminated by production reactor effluents. *Health Phys. 27*: 19-27.
- Bu C. F., Cai Q. G., Ng S. L., Chau K. C., and Ding S. W. 2008, Effects of hedgerows on soil erosion in the Three Gorges Dam area. *International Journal of Sediment Research, Vol. 23, No. 2*, pp. 119–129.
- Burrough, P.A., 1986. Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford: *Clarendon Press*.
- Calkins, H.W., and R.F., Tomlinson, 1977. Geographic Information Systems: Methods and Equipment for Land Use Planning. *Ottawa, Canada: International Geographical Union, Commission of Geographical Data Sensing and Processing and U.S. Geological Survey*.

- Caloz, R., et C., Collet, 2001. Précis de Télédétection, Traitement Numérique d'images de Télédétection. *Presses de l'université du Québec*, Volume 3, 381 pages.
- Cambray, R. S., Playford, K., Lewis, G. N. J., et Carpenter R. C., 1989. Radioactive fallout in air and rain: results to the end of 1988. *AERE-R-13575*. Harwell: UK Atomic Energy Authority.
- Cambray, R.S, K. Playford, et N.J. Lewis, 1985. Radioactive fallout in air and rain : Results to the end of 1984. U.K. Atomic Energy Authority Rep. AERA-R-11915. U.K. AERE, Harwell, UK.
- Chader, A., R., Meziane, V., Schweikle, T., Vogt, 1991. Utilisation de la télédétection pour une carte des sols dans la zone des marnes, Bassin de l'Oued Mina. *Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages*. Pages 44-49.
- Chappell A. 1999. The limitations of using ¹³⁷Cs for estimating soil redistribution in semi-arid environments. *Geomorphology*, Vol. 29, No. 1-2, pp. 135-152.
- Chen, F., E.T., Kanemasu, L.T., West, et F., Rachidi, 1993. Analysis of land use and simulation of soil erosion with GIS for the semi-arid region of Morocco. *Géo Observateur 10*: 55-75.
- Cherel, J.P., 2010. Traitement d'images : transformation d'images de télédétection. *Support de cours M1 SIIG3T*.
- Collins, A.L., Walling, D.E., Sickingabula, H. M. et Leeks, G. J. L. (2001). Using Cs-137 measurements to quantify soil erosion and redistribution rates for areas under different land use in the upper Kaleya river basin, southern Zambia. *Geoderma 104 (3)*:299-323.
- Colwell, R.N., 1997. History and place of photographic interpretation. In: Manual of Photographic Interpretation, 2nd ed., edited by W. R. Philipson. Bethesda, MD: *American Association of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Cuomo V., Lanfredi M. et Lasaponara R .et.al., 2001. Detection of inter-annual variation of NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development.10 pages.
- Dagorne, D., 1990. Outils du changement d'échelles en télédétection aspect radiométriques et spatiaux. *Seminfor IV*. P 51-61.
- Daoudi, M., M., Salmon, O., Dewitte, P., Gérard, A., Abdellaoui, et A., Ozer, 2009. Prédiction de l'érosion ravinante en Algérie : vers une nouvelle approche probabiliste à l'aide de données multisources. *Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF*, Alger Novembre 2009. 7 pages.
- Demmak, A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. *Thèse de Dr. Ing.*, Université de Pierre et Marie Curie, Paris XI.
- Desmet, P.J.J., and G., Govers. 1996. Comparisons of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies. *International Journal of Geographical Information Systems*. 10.3:311-331.
- Desmet, P.J.J., G., Govers, 1995. GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information. *Catena 25 (1- 4)*, 389- 401.

- Deursen, W.P.A. van, 1995. Geographical Information Systems and Dynamic Models: Development and Application of a Prototype Spatial Modelling Language. *Ph.D Thesis*, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.
- Douglas I. 1993, Sediment transfer and siltation. In B. L. Turner, W. C. Clark, R. W. Kates, J. F. Richards, J. T. Mathews and W. B. Meyer (eds.), *The Earth as Transformed by Human Action*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 215–234.
- Dregne, H.E., 1982. Impact of Land Degradation on Future World Food production, USDA-ERS677, Washington, U.S.A.
- Droesen, W., 1999. Spatial Modelling and Monitoring of Landscapes: With Cases in the Amsterdam Waterworks Dunes. Ph.D Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Eerens, H., G., Derone, et J, Van Rensbergen, 2000. "A new vegetation map of Central Africa Update of the JRC-TREES map of 1992 with SPOT-VEGETATION imagery of 1998". *VEGETATION 2000 conference proceedings*, 3-6 avril 2000, Belgirate, JRC et CNES.
- El Bouqdaoui, k., h., Ezzine, A., Emran et M., Zahraoui, 2005. Approche méthodologique par télédétection et SIG pour l'évaluation du risque potentiel d'érosion du bassin versant de l'Oued Srou (Moyen Atlas, Maroc). *Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable"*. 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc.
- El Garouani A., A., Merzouk et A., Ozer, 2003. Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain. *Hydrology of die Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003)*. IAHS Publ. no. 278.
- El Garouani, A., H., Chen, L., Lewis, A., Tribak, M., Abahrour, 2007. Apport de la Télédétection et du SIG pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol et de l'érosion nette dans le bassin de l'Oued Tlata (Maroc). *Actes des JSIRAUF, Hanoi*, 6-9.
- Elliott, G. L., Campbell B. L., & Loughran R. J., 1990. Correlation of erosion measurement and soil caesium-137 content. *Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 41, 713–717.
- Engel, B., 2003. Estimating Soil Erosion Using RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) *Using ArcView.7* page.
- Envi user's guide. ENVI Version 4.1 September 2004 Edition. avisis.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/biblio_sr/ENVI_userguid.pdf
- Estrany J., C. Garcia et D.E. Walling, 2010. An investigation of soil erosion and redistribution in a Mediterranean lowland agricultural catchment using caesium-137. *International Journal of Sediment Research* 25 1-16.
- Eyman, L.D., et N.R. Keven, 1975. Cesium-137 and stable cesium in a hypereutrophic lake. *Health Phys.* 28 : 549-555.
- Fistikoglu, O., et N.B., Harmancioglu, 2002. Integration of GIS with USLE in Assessment of Soil Erosion. *Water Resources Management* 16: 447–467.

- Foster, G.R., 1982., Hydrologic Modeling of Small Watersheds, 'Modeling the Erosion Process, *ASAE Monograph No. 5*, pp. 297–380.
- Foster, G.R., 1988. Modelling Soil Erosion and Sediment Yield. In: R., Lal (Editor), Soil Erosion Research Methods. *Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA*.
- Foster, G.R., et V.A., Gerreira, 1981. Deposition in uniform grade terrace channels. *Pages 185-197 in Crop production with conservation in the 80's. Am. Soc. Agric. Eng. St. Joseph, Michigan*.
- Fulajtar, E., 2003. Assessment of soil erosion on arable land using Cs-137 measurements: a case study from Jaslovske Bohunice, Slovakia. *Soil Tillage Res. 69 (1–2)*, 139–152.
- Gachene, C.K.K., 1995a. Evaluation and Mapping of Soil Erosion Susceptibility: An Example from Kenya. *Soil Use and Management. 11*, 1-4.
- Gavrilovic, S., 1992. Étude générale de la petite et moyenne hydraulique agricole de l'Algérie du Nord. Détermination des potentialités globales par zone homogène. *Érosion. Mission 1, Dossier 2, vol 3. A. Enhyd-Energoprojekt, Ministère de l'Équipement et du Logement, Alger*.
- Ghader, A., R., Meziani, V., Schweikle, et T., Vogt, 1991. *Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages*. P 44-49.
- Girard, M.C., 1995. Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols. *Étude et Gestion des Sols, 2, 1*, pages 7- 24.
- Girard, M.C., et C.M., Girard 1999. Traitement des données de télédétection. *Paris*.
- Gitas, I.Z., K., Douros, C., Minakou, G.N., Silleos, et C.G., Karydas, 2009. Multi-temporal soil erosion risk assessment in Chalkidiki using a modified USLE raster model. *EARSeL eProceedings 8, 1/2009*. pp 40-53.
- Gomer, D., 1994. Écoulement et érosion dans des petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen. Thèse de Doctorat, Wasserbau, Université de Karlsruhe, Allemagne.
- Gomer, D., et B., Touaibia, 1991. Détermination de l'érosion spécifique moyenne sur parcelles expérimentales et bassins, bassin versant de l'Oued Mina. *Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages*. P 106-115.
- Gomer, D., et T., Vogt, 2000. Physically based modeling of surface runoff and soil erosion under semi-arid Mediterranean conditions – The exemple of Oued Mina, Algeria. Soil erosion, Application of physically based models. *J. Schmidt, Berlin, Springer, 59-78*.
- Gomez E., Garcias F., Casas M., and Cerda V. 1997, Determination of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in calcareous soils: Geographical distribution on the island of Majorca. *Applied Radiation and Isotopes, Vol. 48, No. 5*, 699–704.
- Graciela S., F., Salmuni, M., Maldonado, L.M., Inés, C., Puigdengolas, 1996. Delimitation of the hydric erosion using Digital image processing of Landsat TM, in the alluvional plain of Valle Fértil Dept. - San Juan. Argentina. *Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, INPE*, p. 375-380.
- Graham, E.R. 1963. Factors affecting Sr-85 and I-131 removal by runoff water. *Water Sewage Works 110* : :407-410.

- Grzegorz, J. P., 2006. Caesium-137 as a Soil Erosion Tracer: A Review. *Eochronometria Vol. 25, pp 37-46, 2006* – Journal on Methods and Applications of Absolute Chronology
- GTZ, 1996. L'aménagement des zones Marneuses dans les bassins-Versants des Montagnes de l'Atlas Tellien Semi-Aride, *Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ)*.
- Guettoche, M. S., 1991. Essai d'une cartographie de l'érosion des sols par télédétection satellitaire SPOT. *Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages*, Alger.
- Harket ,S., 2010. Les risques érosifs et vulnérabilité environnementale des eaux de surface du bassin versant de Cheliff. *Mémoire de magister*. 200 pages.
- Hasbaia, M., A., Hedjazi, et L., Benayada, 2012. Variabilité de l'érosion hydrique dans le bassin du Hodna: cas du sous-bassin versant de l'Oued El Ham.
- Heusch, B., 1986. Cinquante ans de banquettes de D.R.S. - C.E.S. en Afrique du Nord.
- Hickey, R., 2000. Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS. *Cartography*, v. 29, no. 1, pp. 1 - 8.
- Holben B., 1986. Characteristics of maximum value composite images for temporal AVHRR, *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1417-1437
- Huang, C., B., Wylie, L., Yang, C., Homer, et G., Zylstra, 2001. Derivation Of A Tasseled Cap Transformation Based On Landsat 7 At-Satellite Reflectance. *Raytheon ITSS, USGS EROS Data Center Sioux Falls, SD 57198, USA*. 10 pages.
- Huete, A. R., 1988. "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)", *Remote Sensing of Environment*, 25(3): 295-309.
- Huete, A., Justice, C. et Liu, H., 1994. "Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS", *Remote Sensing of Environment*, 49(3): 224-234.
- Jacquemoud, S., 1993. "Inversion of the PROSPECT+ SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: theoretical study", *Remote Sensing of Environment*, 44(2): 281-292.
- Janssen, L., 1994. Methodology for Updating Terrain Object Data from Remote Sensing Data. *Ph.D Thesis*, Wageningen University.
- Jensen, J.R., 2005. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, *3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall*.
- Jordan, C.F., 1969. "Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor", *Ecology*(50): 663-666.
- Justice, C., Hall, D., Salomonson, V., Privette, J., Riggs, G., Strahler, A., et al. 1998. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228–1249.
- Justice, C.O., G., Digdale, J.R.G., Townshend, A.S., Narracott and M., Kumar, 1991 Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development. 10 pages.
- Kachanoski, R. G., 1993. Estimating soil loss from changes in soil Cesium-137. *Canadian Journal of Soil Science*, 73, 515–526.

- Kaste J.M., A. M. Heimsath, M. Hohmann, 2006. Quantifying sediment transport across an undisturbed prairie landscape using cesium-137 and high resolution topography. *Geomorphology* 76. 430–440
- Kaufman, Y.J., et D., Tanre, 1992. "Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOSMODIS", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 261-270.
- Kilewe, A.M., 1984. Physical Properties of Soils in Relation to Erosion. East African Agricultural and Forestry Journal, Special Issue, 44: 242-246.
- King, C., N., Baghdadi, V., Lecomte, O., Cerdan, 2005. The application of remote-sensing data to monitoring and modelling of soil erosion. *Catena* 62; 79–93.
- Kinnell, P.I.A., 2001. Slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells. *Soil and Tillage Research*. 58:11-17.
- Knisel, W.,G., Jr., (Editor), 1980. CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. *U.S. Department of Agriculture, Conservation Report No. 26*.
- Koirala S., P., Cabral, 2007. Land Use Land Cover Change And Its Impact On Soil Erosion Process In Begnas Tal Rupa Tal Watershed Using Geospatial Tools, Kaski District, Nepal. *European Commission, Erasmus Mundus Programme*, M.Sc. in Geospatial Technologies, project n°2. 2007 – 0064. 13 Pages.
- Kouri, L., 1993. L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie), étude des processus et types fonctionnels des ravins dans la zone des marnes tertiaires.
- Kouri, L., H., Vogt, et D., Gomer, 1997. Analyse des processus d'érosion hydrique linéaire en terrain marneux, bassin de l'Oued Mina, Tell oranais, Algérie. *ORSTOM Bulletin Réseau Erosion* 17 : 64-73.
- Kouri, L., Vogt, H., 1993 : Estimation de la sensibilité des terrains marneux au ravinement au moyen de système d'information géographique. Bassin versant de l'oued Mina. *Workshop "Soil Erosion in Semi-Arid Mediterranean Areas"*.
- Lafren, J.M., et E.J., Roose, 1997. Methodologies for assessment of soil degradation due water erosion. *CRC Press LLC, USA*.
- Lahlou, Y., 1997. Erosion dans le bassin versant du barrage Sidi Driss: méthodologie d'approche et quantification (cas du sous bassin versant Mhasser). *Thèse de 3ème cycle Université Mohamed V Faculté des Sciences de Rabat, Maroc*.
- Lal, R. 1988. Monitoring Soil Erosion Impact on Crop Productivity. In: R. Lal (Editor), *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society, U.S.A.
- Lanfredi M., Simoniello T. and Lasaponara R. et.al., 2003. Multiresolution spatial characterization of land degradation phenomena in Southern Italy from 1985 to 1999 using NOAA-AVHRR NDVI data, *Geophysical Research Letter*, 30, pp. 1069.
- Lecerf, R., 2008. Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (Application à la Bretagne). *Thèse de doctorat, Université de Rennes 2 de Bretagne*.
- Liu, J.G., et J. M., Philippa, 2009. Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing. *John Wiley & Sons Ltd Publication*. www.wiley.com/wiley-blackwell.

- Longley, P.A., M.F. Goodchild, D.J., Maguire, D.W., Rhind, 2009. Geographical Information Systems and Science 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd Publication. www.wiley.com/wiley-blackwell.
- Lopez, C., 1976. Guia para l'elaboracion d'estudios del medio fisico. *Cap XII riesgos derivados de los procesos naturales*. Ministerio de medio ambiente. Secretaria general tecnica. pp549-590.
- Lu, D., P., Mausel, E., Brondizio et E., Moran, 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (12) : 2365-2407.
- Mahé, G., A., Emran, B.Y., Télesphore, A.Z., Tra Bi, 2012. Impact de la Variabilité Climatique sur l'état de surface du bassin versant du Bouregreg (Maroc). *European Journal of Scientific Research*, 84, 3 417-425. <http://www.europeanjournalofscientificresearch.com>
- Mahé, G., AlKarkouri, J., Benabdelfadel, H., Bensafia, D., Brou, T., Chaker, M., Chikhaoui, M., Coupleux, S., Couzevialle, R., Dieulin, C., Emran, A., Ezzaouini, M., Goussot, E., Hallouz, F., Khomsi, K., Laouina, A., Machouri, N., Maleval, V., Meddi, M., Nging, M., Planchon, O., Remini, B., Saadi, H., Sfa, M., Sinan, M., Snoussi, M., Taibi, S., Toumi, S., Tra Bi, A., 2013. Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. In: Considering hydrological change in reservoir planning and management (Schumann, A. et al., Eds.) *IAHS Publ.* 362, 115-123.
- Mas, J.F., 2000. Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Journal Canadien de Télédétection*, 26 (4) : 349-362.
- Maurel, P., 2002. Initiation à la télédétection - *UMR 3S Cemagref/ENGREF* - p 4 / 53.
- Mazour M., 1992. - Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'oued Isser : Tlemcen, Algérie. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 300- 3 13.
- McCallan, M.E., B.M. O Leary, et C.W. Rose. 1980. Redistribution of caesium-137 by erosion and deposition on an Australian soil. *Aust. J. Soil Res.* 18:119-128.
- Meddi, M., 2009. Pluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina Algérie *Thèse de doctorat, université Louis Pasteur, Strasbourg France*, 1992, 390 p.
- Meddi, M., A., Khaldi, et H., Meddi, 1998. Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes (Proceedings of a symposium held at Vienna, July 1998). *IAHS Publ.* no. 249.
- Meddi, M., B., Morsli, 2001. Etude d'érosion et du ruissellement sur bassins versants expérimentaux dans les monts de Beni-Chougrane (Ouest d'Algérie). *Z. Geomorph. N.F.*, 45,4 : 443-452.
- Menzel, R.G. 1960. Transport of strontium-90 in runoff. *Science* (Washington, DC) 131:499-500.
- Meusburger, K.L., D., Bänninger, C., Alewell, 2010. Estimating vegetation parameter for soil erosion assessment in an alpine catchment by means of Quick Bird imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and GeoInformation* 12 (2010) 201–207

- Mian, Li, ZhanbinLi., Wenyi Y., Puling L., 2009. Estimating the erosion and deposition rates in a small watershed by the Cs-137 tracing method. *Applied Radiation and Isotopes* 67. 362–366.
- Mlaouhi A., Climat et érosion par ravinement dans les bassins versants des oueds Maïz et Redjel (Haffouz) Tunisie centrale. *Thèse de doctorat*, Univ. Aix-Marseille I, 2003, 221 p.
- Morgan, R.P.C., J.N., Quinton, J.R., Rickson, 1991. *EUROSEM A User Guide*. Silsoe College, Silsoe, Bedford, U.K.
- Morsli B., M. Meddi, A. Boukhari, 2002. Etude de ruissellement et du transport solide sur parcelle expérimentale. Utilisation de la simulation des pluies. *Actes du Séminaire sur la gestion de l'eau*. Univ. Mascara Algérie, 2002 : 80-88.
- Morsli, B., A., Halitim, E., Roose, 2000. Effet des systèmes de gestion Sur le ruissellement, l'érosion et le stock du Carbone dans les monts de Beni-Chougrane, Algérie. *Bulletin de l'ORSTOM* 18.
- Nasir, A., K., Uchida et M., Ashraf, 2006. Estimation of Soil Erosion by Using RUSLE and GIS for Small Mountainous Watersheds in Pakistan. *Pakistan Journal of Water Resources*, Vol.10(1).
- Navas A., Walling D. E., Quine T., Machin J., Soto J., Domenech S., and Lopez-Vicente M. 2007, Variability in Cs-137 inventories and potential climatic and lithological controls in the central Ebro valley, Spain. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 274, No. 2, pp. 331–339.
- Nill, D., U. Schwertmann, U. Sabel-Koschella, M. Bernhard, J. Breuer, 1996. Soil Erosion by Water in Africa: Principles, Prediction and Protection. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Nouira A., E.H. Sayouty , M. Benmansour, 2003. Use of Cs-137 technique for soil erosion study in the agricultural region of Casablanca in Morocco. *J. Environ. Radioactivity* 68 (2003) 11–26.
- Okoth, P.F., 2003. A hierarchical method for soil erosion assessment and spatial risk modelling, *Thesis Wageningen University* 232 pages.
- Omuto, C.T., R.R., Vargas, M.S., Alim et P., Paron, 2010. Mixed-effects modelling of time series NDVI-rainfall relationship for detecting human-induced loss of vegetation cover in drylands; *Journal of Arid Environments*; pp. 1552-1563.
- Ontario Centre for Soil Resource Evaluation. 1993. Field Manual for Describing Soils in Ontario. 4th ed. *Ontario Centre for Soil Resource Evaluation. Publication No.93-1.62*.
- Park, M., 2007. Developing a GIS-Based soil erosion potential model of the UGUM watershed. *Technical Report No. 117* ; 103 pages.
- Pearson, R.L., et L.D., Miller, 1972. "Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie, pawnee national grasslands, colorado". *8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, Ann Arbor, Michigan (USA), ERIM, pp 1357- 1381.

- Pennock, D.J., Lemmon, D.S., et de Jong, E., 1995. Cesium-137 measured erosion rates for five parent material groups in southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 75, 205–210.
- Playford, K., Toole, J., & Adsley, I., 1993. Radioactive fallout in air and rain: results to the end of 1991. *AEA-EE-0498*. Harwell: UK Atomic Energy Authority.
- Podmanicky, L., K., Bala, M., Bele, Nyesi, C.S., Centeri, D., Kristo, f, N. Kohlheb, 2009. Modelling soil quality changes in Europe. An impact assessment of land use change on soil quality in Europe. *Ecological Indicators* 11 (2011) 4–15.
- Porto P., Walling D. E., Ferro V., and Di Stefano C., 2003. Validating erosion rate estimates provided by caesium-137 measurements for two small forested catchments in Calabria, southern Italy. *Land Degradation & Development*, Vol. 14, No. 4, pp. 389–408.
- Prasannakumar, V., H., Vijith, S., Abinod, N., Geetha, 2011. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers* 3(2) (2012) 209-215.
- Provencher, L., J.M., Dubois, 2007. Traitement des images satellitaires. Précis de télédétection Volume 3. *Presses de l'Université du Québec*. 468 pages.
- Quattrochi, D.A., and M.F., Goodchild, 1997. Scale in Remote Sensing and GIS. *New York: Lewis Publishers*.
- Quine T. A., Navas A., Walling D. E., et Machin J. 1994, Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near Las Bardenas in the central Ebro River basin, Spain. *Land Degradation & Rehabilitation*, Vol. 5, No. 1, pp. 41–55.
- Rakotondraompiana, S., T., Randrianarison, C., Collet et S., Rakotoniaina, 2011. Analyse spatiale des propriétés physiques des zones d'érosion à l'aide de données géoréférencées, images de télédétection et données topographiques. *9^{ème} Journées du réseau de télédétection, Maroc*.
- Ramdane, M., 1989. "La notion de représentativité dans les études de l'érosion. Application au bassin versant de l'Isser." *Revue Eaux et Sols d'Algérie* 2: 40-45.
- Rejaour R., Z.H., Shi et Cai Chongfa 2009. Soil erosion hazard evaluation—An integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. *Ecological Modelling* 220 (2009) 1724–1734.
- Remini, B., 2011. Une nouvelle approche de lutte contre l'envasement des barrages : la technique des obstacles émergés. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 09, Décembre 2011, pp. 43-53
- Remini, B., W., Hallouche, 2007. Studying Sediment. *Revue Internationale Water Power et Dam construction*. Octobre, 42-45.
- Renard, K.G., G.R., Foster, G.A., Weesies and J.,P., Porter, 1991. RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 41, 1: 30-33.
- Renschler, C.S., and J., Harbor, 2002. Soil erosion assessment tools from point to regional scales. The role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology*. 47: 189-209.
- Ritchie Jerry C. et J. Roger McHenry, 1990. Application of Radioactive Fallout Cesium-137 for Measuring Soil Erosion and Sediment Accumulation Rates and Patterns: A Review. *J. ENVIRON. QUAL.*, VOL. 19.215-233.

- Ritchie, J. C., et McHenry, J. R., 1973. Determination of fallout Cs-137 and natural gamma-ray emitting radionuclides in sediments. *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 24, 575-578.
- Ritchie, J. C., et McHenry, J. R., 1990. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review. *Journal of Environmental Quality*, 19, 215-233.
- Ritchie, J.C. and J.R, Mchenry, 1990. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review. *J Environ Qual* 1990; 19: 215-33.
- Ritchie, J.C., J.R. McHenry, and A.C..Gill. 1974. Fallout Cs-137 in the soils and sediments of three small watersheds. *Ecology* 55:887-890.
- Robin, M. 2001. La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographiques, *Nathan Université*, Paris, 320 p.
- Robinson, A.R., 1979. Sediment Yield as a Function of Upstream Erosion. In: A.E., Peterson, J.B., Swan (Editors), *Universal Soil Loss Equation: Past, Present and Future. Soil Science Society of America. Special Publication No. 8, Soil Science Society of America, Madison Wisconsin.*
- Röder, A., et J., Hill, 2009. Recent Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessment. 422 pages.
- Rodríguez, G., et M.C., Giménez Suárez, 2010. Historical Review Of Topographical Factor, Ls, Of Water Erosion Models revision Historica, *Aqua-LAC - Vol. 2 Sep. 2010.* pp. 56-61.
- Rondeaux, G., M., Steven, et F., Baret, 1996. "Optimization of soil-adjusted vegetation indices", *Remote Sensing of Environment*, 55(2): 95-107.
- Roose E., G., De Noni, J.M., Lamachère, 1994. L'érosion a l'ORSTOM : 40 ans de recherches multidisciplinaires. *Réseau Erosion du Centre ORSTOM*, 13 pages.
- Roose, E., 1993. Erosion : a current environmental problem. The GCES, a new strategy for fighting erosion to resolve this dilemma of a growing society. In: S. Wicherek (Editor), *Farm and land erosion: in temperate plains environment and hills. Elsevier Science Publisher, Amsterdam*, 571-585.
- Roose, E., M., Arabi, K., Brahamia, R., Chebbani, M., Mazour et B., Morsli, 1993. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : *synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. Cah.Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVIII, no 2,: 289-308.
- Roose, E.J., et F., Lelong, 1976. Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale - étude sur petites parcelles expérimentales de sol, *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 10 pages.
- Roose, J.W., R.H., Haas, D.W., Deering, J.A., Schell, et J.C., Harlan, 1974. "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation». *Greenbelt, Maryland, NASA/GSFC*, 371 p.
- Sadik A., S., Bouhlassa, J., Auajjar, A., Faleh et J.,J., Macaire, 2004. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des

- pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : *cas du bassin versant de l'oued Boussouab. Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 2004, n°26, p. 69-79.
- Sanderson, R., 2011. *Introduction to Remote Sensing*. Live, 38 pages.
- Sanjay, K., Jain et M.K., Goel, 2002. Assessing the vulnerability to soil erosion of the Ukai Dam catchments using remote sensing and GIS. *Hydrological Sciences—Journal-des Sciences Hydrologiques*, 47(1) p 31-40.
- Scanvic, J., 1983. Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. BRGM. *Manuel et Méthodes*. N 7, 158 p.
- Shbeli, O.E., 2005. GIS Applications For Erosion Risk Assessment And Land Classifications North-West Libya. *Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable"*. 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc.
- Shi, Z.H., C.F., Cai, S.W., Ding, Z.X., Li, T.W., Wang, and Z.C., Sun, 2002. Assessment of Erosion Risk with the Rusle and Gis in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River. *12th ISCO Conference Beijing 2002*.
- Shiferaw A., 2011. Estimating soil loss rates for soil conservation planning in the borena woreda of south wollo highlands, Ethiopia. *Journal of Sustainable Development in Africa* (Volume 13, No.3, 2011) ISSN: 1520-5509.
- Shimabukuro, Y., J. A., E. et Smith, 1991. "The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(1): 16-20.
- Siakeu, J., Oguchi, T., 2000. Soil erosion analysis and modelling: a review. *Transactions of the Japanese Geomorphological Union* 21 (4), 413–429.
- Smati, A., 1996. Étude méthodologique sur l'hydrologie des retenues collinaires. Résumé et synthèse des principaux résultats et conclusions de l'étude SOGREAH, *Agence Nationale des Ressources Hydrauliques*.
- Smith, D.D., 1941. Interpretation of Soil Conservation Data for Field Use. *Agricultural Engineering* 22, 173-175.
- Soil Erosion Modelling By Using Gis & Remote Sensing : A Case Study, Ganos Mountain. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008. P 1681-1684.
- Soto J. et Navas A., 2004. A model of ¹³⁷Cs activity profile for soil erosion studies in uncultivated soils of Mediterranean environments. *Journal of Arid Environments*, Vol. 59, No. 4, 719–730.
- Stone, R.P., & D., Hilborn, 2000. Equation universelle des pertes en terre (USLE). *Soil Erosion. Water Resources Management* 16: 447–467.
- Suryana, N., 1997. A geo-Information Theoretical Approach to Inductive Modelling Based on Terrain mapping Units. Ph.D Thesis, Wageningen Agricultural University.
- Taabni, M., 1994. Les échelles de l'administration territoriale et du développement local dans les massifs montagneux telliens du nord ouest oranais : *dirigisme et initiatives locales. Montagnes méditerranéennes No 1*, 1996, Grenoble .

- Tahri, M., A., Merzouk, H.F., Lamb, et R.W., Maxted, 1993. Etude de l'érosion hydrique dans le plateau d'Imilchil dans le Haut-Atlas central. Utilisation d'un SIG. *Géo-Observateur*.51-60.
- Tamene, L., S., Park, R., Dikau, and P.L.G., Vlek, 2006. Analysis of factors determining sediment yield variability in the highlands of Ethiopia. *Geomorphology*, 76, 76-91.
- Tamura, T., and D.G. Jacobs. 1960. Structural implications in cesium sorption. *Health Phys.* 2:391-398.
- TECSULT, 2004. Étude de la protection des bassins versants de l'ensemble des barrages en études d'Avant Projet Détaillé (lots nos 1 à 4) page 7 et des bassins versants des barrages en exploitation en Algérie (lots nos 5 et 6).
- Terranova, O., L., Antronico, R., Coscarelli and P., Iaquina, 2009. Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy). *Geomorphology journal 112 (2009) 228–245*.
- Touaibia B., D., Gomer et A., Kidaoui, 1990. Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les micro-bassins expérimentaux de l'Oued Mina en Algérie du nord.
- Touaibia, B., 2000. Erosion - Transport Solide - Envasement de barrage. Cas du bassin versant de l'Oued Mina dans la Wilaya de Relizane. *Thèse de Doctorat d'Etat. Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques (Ex : INA)*. El-Harrach. Alger. 200p.
- Touaibia, B., et M., Achite, 2003. Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 48(2), page 235.
- Touaibia, B., S., Dautrebande, D., Gomer et A., Kidaoui, 1999. Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales : bassin versant de l'Oued Mina. *J. Sciences Hydrologiques.*, 44, 6. : IAHS Press. Wallingford.UK : 973- 986.
- Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., et Brou, Y.T., 2013. Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological Sciences Journal* 58 (7), 1–17.
- Townshend J.R.G. et C.O. Justice 1988. Selecting the spatial resolution of satellite sensor required for global monitoring of land transformations. *International Journal of Remote Sensing* 9(2): 187-236.
- Townshend, J.R.G., 1981. The spatial resolving problems of earth resources satellites. *Progress in Physical Geography*, 5 : 32-55.
- Tra Bi, Z.A., Zueli Koli Bi, Y. T., Brou, G. Mahé et A. Emran, 2013. Télédétection et analyse statistique de la dynamique de la végétation dans un contexte de variabilité climatique sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). *Climate and Land Surface Changes in Hydrology Proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013 (IAHS Publ. 359, 2013)*.
- Tribak, A., EL Garouani , A., et Abahrour, M. 2006. Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique dans un espace montagnard marocain : cas du sous bassin versant de l'Oued Tleta, Préfif oriental. *In : ISCO - Marrakech*:1-10.

- Tricart J., 1963. Oscillations et modifications de caractère de la zone aride en Afrique et en Amérique Latine lors des périodes glaciaires des hautes latitudes. *Les changements de climat, Colloque de Rome-UNESCO*. Pp. 415-419.
- Van der Knijff J.M., R.J.A., Jones et L., Montanarella, 2000. Estimation du risque d'érosion en Italie.
- Vezena K. et F. Bonn, 2006. Modélisation et analyse de la dynamique spatio-temporelle des relations société – érosion et pollution diffuse en milieu agricole – étude de cas en Vietnam et au Québec ; Interaction Nature-Société, analyse et modèles. UMR6554 LETG, *LaBaule*, 6 pages.
- Vogt, H., 1991. Quelques problèmes concernant les méthodes de recherche en érosion ; *Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages*, 246 pages.
- Vogt, T., et D., Gomer, 1992. Estimation du ruissellement et des matières en suspension par l'utilisation d'un SIG intégrant MNT, données Landsat TM et données hydrologiques de terrain. *Bulletin de la société française de photogrammétrie et télédétection* 128(5) : 7-17.
- Vrieling, A., 2005. Satellite remote sensing for water erosion assessment ; *Catena*, 17 pages.
- Wachal, D.J., 2007. Integrating GIS and erosion modeling – A tool for watershed management, *ESRI international user conference, Paper N° UC1038*, 11 pages.
- Wallbrink, P. J., et Murray A. S., 1993. The use of fallout radionuclide as indicators of erosion processes. *Hydrological Processes*, 7, 297–304.
- Walling, D. E., et Quine, T. A., 1991. The use of measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations. *Journal of Soil Science*, 42, 147–162.
- Walling, D.E. 1988. Measuring sediment yield from river basins in Soil erosion research methods. *Soil and Water Conserv. Sac., Ankeny, IA.* . 39-73.
- Walling, D.E. and Q., He, 1999. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal of Environmental Quality* 28: 611-622.
- Walling, D.E., Quine, T.A., 1993. Use of ¹³⁷Cs as tracer of erosion and sedimentation. In: *Handbook for the Application of the Cs-137 Technique. UK Overseas Development Administration Research Scheme, R4579*, Department of Geography, University of Exeter, UK.
- Walling, D.E. and T.A., Quine, 1991. Use of ¹³⁷Cs measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations. *J Sil Sci* 1991 ; 42 ; 147-65.
- Wang, Y., G., Wang, H., Hu, et H., Cheng, 2008. Erosion rates evaluated by the Cs137 technique in the high altitude area of the Qinghai–Tibet plateau of China. *Environ Geol* 53:1743–1749.
- White, W.R., 1986. Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants, *Projet 5.3 du programme hydrologique international*, 155 pages.
- Wilkinson, G.G., 1996. A review of current issues in the integration of GIS and remote sensing data. *International Journal of Geographical Information Systems* 10, 85–101.

- Williams, J.R., 1975. Sediment Routing for Small Scale Agricultural Watersheds. *Water Research Bulletin 11* (5).
- Williams, J.R., C.A., Jones, and P.T., Dyke, 1990. The EPIC Model. In: A.N., Sharpley and J.R., Williams (Editors), EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: *1 Model Documentation, USDA Technical Bulletin Number 1768, Chapter2, 3-02.*
- Wischmeier, W.H. and D.D., Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses. *A Guide to Conservation Planning, Washington, USDA 537, 58 pp.*
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1958. Evaluation of factors in the soil-loss equation. *Agricultural Engineer 39, 458–462.*
- www.gov.on.ca/omafra/frech/engineer/facts/00-002.htm
- Zhiyanski M., J. Bech, M. Sokolovska, E., Lucot, P.M., Badot, 2008. Cs-137 distribution in forest floor and surface soil layers from two mountainous regions in Bulgaria. *Journal of Geochemical Exploration 96 256–266.*
- Zingg, A.W., 1940. Degree and Length of Land Slope as it Affects Soil Loss in Runoff. *Agricultural Engineering, 21, 2:59-64.*

Sito-références :

Centre Canadien de Télédétection (CCT) : <http://www.rncan.gc.ca>.

Les images MODIS de Terra et Aqua : <http://www.usgs.gov/>

Annexes



Photo représentant l'état avancé du ravinement dans la région de Sidi M'Hamed Ben Aouda.



Photo de la digue du barrage de SMBA.



Extention du périmètre d'irrigation de la Mina.



Photo d'une retenue collinaire.



Canal principal du système d'irrigation (grand périmètre d'irrigation de la Mina).