

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir
le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Youssef El HADRAOUI

Étude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc) à partir des données de l'Observation de la Terre.

Soutenu le 09 juillet 2013

JURY

PRESIDENT : M. Christophe PROUDHOM

MEMBRES : M. Mathieu Bonnefond, professeur référent
M. José Cali
M. Vincent Wawrzniak
M. Xavier André

Maître de stage : M. Anas EMRAN

Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps, l'ESGT (l'école supérieure des géomètres et topographes) et le corps professoral et technique pour tous les efforts soutenus qu'ils ont consentis en vue de réussir notre formation.

Mes sincères et vifs remerciements s'adressent à mon professeur référent M. Mathieu Bonnefond et mon encadrant M. Anas Emran pour leurs encadrement continu, leur disponibilité et leurs précieux conseils.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à M. Mustapha Hakdaoui, professeur de l'enseignement supérieur à l'université Hassan II (CasaBlanca) pour le temps qui m'a consacré tout au long de ce travail et pour le partage de son expérience et compétence dans la géomatique.

Je remercie M. Joël Daroussin (UR Science du Sol)-INRA- Site d'Orléans et M. Rachid Zoubir chef de service du SIG (DIRECTION DE LA STATISTIQUE - Haut-Commissariat au Plan-) pour les données fournies.

Finalement, mes remerciements vont à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce document .Qu'ils veuillent bien agréer l'expression de mes vifs remerciements et respectueuses gratitudees.

Liste des abréviations

ABHBC : l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia

ANCFC : L'Agence Nationale de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie

ASTER: Advanced Spacebone Thermal Emission and Reflection Radiometer

DGH : Direction Générale de l'Hydraulique

DH : Dirhams (1 euro \approx 10 DH)

DPAE : Direction de la Planification Agricole et de l'Environnement

ENSG : L'Ecole Nationale des Sciences Géographiques

ESGT : L'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes

ESRI: Environmental Systems Research Institute

ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

GDEM: Global Digital Elevation Model

HA: Hectare

HCEFLCD : Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la lutte contre la désertification

HCP : Haut-commissariat au Plan

IDCS : l'Indice Dynamique de Couverture du sols

INRA : l'Institut National de la Recherche Agronomique

KM: Kilomètre

MITI: Ministry of International Trade and Industry

MJ: Mégajoule

MM: Millimètre

MM3 : Millimètre cube

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MSS: Multi spectral Scanner

PELCOM: Pan-European Land Cover Monitoring

PNABV : Plan National d'Aménagement des Bassins Versant

Qx : Quintaux

RGA : Recensement agricole général

SIBE : Sites d'Intérêt Biologique et Ecologique

SIG : Système d'Information Géographique

SWAT : Soil and Water Management Tool

T : Tonnes

TC : Taux de croissance/croissement

TM: Thematic Mapper

USLE: The Universal Soil Loss Equation

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations.....	3
Table des matières	5
Introduction	8
I CONTEXTE DE L'ETUDE : LE BASSIN VERSANT DU BOUREGREG ET L'INTERET DE LA GEOMATIQUE DANS L'ETUDE DES PHENOMENES D'EROSION	10
I.1 LE PHENOMENE DE L'EROSION.....	10
I.1.1 Définition	10
I.1.2 Facteurs d'érosion.....	10
I.1.2.1 Facteurs naturels	11
I.1.2.2 Facteurs anthropiques.....	12
I.1.3 Effets et conséquences de l'érosion sur le bassin versant	12
I.1.4 Politique de lutte contre l'érosion au Maroc	13
I.1.5 Conclusion.....	14
I.2 LES APPORTS DE LA GEOMATIQUE DANS LA GESTION DES SOLS ET LA LUTTE CONTRE L'EROSION .	14
I.2.1 Apport de la géomatique aux études spatiotemporelles de l'occupation du sol	15
I.2.2 Apport de la géomatique à la modélisation des processus érosifs	16
I.2.3 Conclusion.....	19
I.3 LE BASSIN VERSANT DU BOUREGREG.....	19
I.3.1 Milieu physique	19
I.3.1.1 Situation géographique.....	19
I.3.1.2 Situation géomorphologique.....	20
I.3.1.3 Climat.....	22
I.3.1.4 Géologie	22
I.3.1.5 Pédologie.....	23
I.3.1.6 Végétation	24
I.3.1.7 Ressource en eau.....	24
I.3.2 Activité humaine.....	26
I.3.2.1 Démographie	26
I.3.2.2 Activité économique	26
I.3.3 Conclusion.....	28
II METHODOLOGIE	29
II.1 DONNEES UTILISEES	29
II.1.1 Les images Satellitaires Landsat	29
II.1.2 Carte topographique (papier et scanné)	30
II.1.3 Image Aster	31
II.1.4 Données statistiques	31
II.2 OUTILS DE TRAVAIL	31
II.2.1 Logiciel ERDAS Imagine 2011 version 11.0.2.....	31
II.2.2 Logiciel Arcgis Version 10.....	32
II.2.3 Logiciel Idrisi Taiga version 16.0	32
II.2.4 Google Earth.....	32
II.3 ÉTUDE DIACHRONIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL	32
II.3.1 Prétraitement des données	33
II.3.1.1 Assemblage des bandes	33
II.3.1.2 Corrections radiométriques.....	34

II.3.1.3	Corrections géométriques.....	34
II.3.1.4	Mosaiquage	35
II.3.1.5	Extraction de notre zone d'intérêt.....	35
II.3.2	La classification des images	35
II.3.2.1	L'interprétation visuelle des images satellite.....	36
II.3.2.2	L'évaluation statistique de la classification	37
II.3.3	Conclusion.....	37
II.4	LA MODELISATION DES PROCESSUS EROSIFS	37
II.4.1	Réalisation.....	38
II.4.1.1	La couverture végétale	38
II.4.1.2	L'inclinaison de pente.....	39
II.4.1.3	La longueur de pente.....	39
II.4.1.4	L'érodibilité.....	40
II.4.1.5	Bilan.....	40
II.4.1.6	La justification des choix de l'arborescence logique.....	41
II.4.1.7	Attribution d'indices finaux.....	42
II.4.2	Conclusion.....	43
III	RESULTATS ET ANALYSES	44
III.1	LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN VERSANT DU BOUREGREG	44
III.1.1	Cartes d'occupation du sol.....	44
III.1.1.1	Géoréférencement des données.....	44
III.1.1.2	La classification supervisée	44
III.1.2	Évaluation	46
III.1.3	Effets des précipitations sur l'occupation du sol	46
III.1.4	Résultats et analyses des cartes d'occupation du sol.....	48
III.1.5	L'évolution du bâti entre 1985 et 2011	54
III.1.6	Conclusion	57
III.2	LA MODELISATION DES PROCESSUS EROSIFS	57
III.2.1	La carte d'inclinaison des pentes.....	57
III.2.2	La carte d'érodibilité	57
III.2.3	La carte de sensibilité à l'érosion	57
III.2.4	Conclusion	59
	Conclusion et recommandations.....	60
	Bibliographie	62
	Résumé.....	66
	Table des annexes	70
	Annexe 1 Le découpage administratif du bassin versant	71
	Annexe 2 Moyennes des précipitations mensuelles et annuelles de 1980 jusqu'à 2009(Source : Sigmed).....	72
	Annexe 3 Carte pédologique du bassin versant du Bouregreg (Source : Sigmed).....	73
	Annexe 4 La carte de végétation du bassin versant du Bouregreg (Source : Sigmed)	74
	Annexe 6 Les cartes satellitaires Landsat	76
	Annexe 7 Le MNT du bassin versant du Bouregreg	77
	Annexe 8 Projection utilisée au Maroc (Lambert conforme-zone 1)	78
	Annexe 9 Les classes et les indices de chaque facteur	79

Annexe 10 La carte des pentes	80
Annexe 11 La carte des longueurs de pentes	81
Annexe 12 La carte de vulnérabilité des sols à l'érosion.....	82
Annexe 13 Arborescences logiques	83
Annexe 14 Images du bassin versant du Bouregreg	85
Liste des figures	86
Liste des tableaux	87

Introduction

L'érosion est considérée comme un des grands problèmes de l'environnement au monde (Conférence de l'organisation internationale de la conservation du sol). Elle menace à la fois les pays développés et les pays en développement. Au Maroc, l'érosion touche durement ses terres. Effectivement, des études réalisées par la FAO montrent que plus de 40% des terres sont menacées par ce phénomène. Ces pertes de terres ont un impact socio-économique localement mais aussi au niveau régional et national.

L'érosion est aujourd'hui ressentie de façon plus tangible en raison des forts développements démographique, économique, urbain, agricole et industriel (Direction générale de l'hydraulique, 2005).

Le phénomène est influencé principalement par la nature et par l'homme. Les interventions négatives de l'homme (incendies, urbanisation, déforestation, mauvaise connaissance des techniques de culture) engendrent une forte dégradation des couvertures végétales, La nature aussi joue un rôle dans ces dégradations. En effet, la sécheresse des années 1980 et 2000 qui a touché le Maroc a favorisé de plus en plus la dégradation des terres notamment dans les grands bassins du pays.

Le bassin versant du Bouregreg lieu de cette recherche est l'un des principaux bassins versant du pays par sa situation en bordure avec l'océan atlantique et par la qualité de ses terres. Le bassin a été classé parmi les bassins prioritaires les plus menacés par l'érosion par le plan national d'aménagement des bassins versant (PNABV) dont l'objectif principal, est de lutter contre l'érosion. Ses terres sèches et arides souffrent d'une importante dégradation causée essentiellement par le phénomène d'érosion hydrique. Les conséquences de cette dégradation ont été catastrophiques surtout dans le développement socio-économique dans le bassin. Par conséquent, des méthodes de contrôle des processus de dégradation des terres s'avèrent nécessaires afin de les protéger contre ce phénomène.

L'évaluation et le contrôle des risques d'érosion des sols nécessitent alors l'analyse et l'intégration des différents facteurs qui favorisent les processus érosifs : l'inclinaison et la longueur de pente, l'érodibilité des sols et la couverture des sols. Le système d'information géographique (SIG) permet de croiser les différents facteurs d'érosion et d'appliquer des équations mathématiques ou modèles sur les valeurs afin d'avoir une carte de sensibilité à l'érosion.

Dans cette étude, la méthodologie choisie s'appuie sur la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) qui sont de plus en plus utilisés pour l'étude des phénomènes de surface et forment des outils essentiels dans les systèmes interactifs d'aide à la décision et opérationnels pour des opérations de gestion du risque (Wachal and Hudak, 2000 ; Shrimalil et al. 2001 ; Lee, 2004 ; Bou Kheir et al. 2006). L'intégration des cartes thématiques des différents facteurs dans un SIG a permis de graduer les différentes régions du bassin versant.

Ce présent travail rentre 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 », il s'inscrit dans le cadre du plan bleu (2005)¹.

L'objectif de cette recherche est dans un premier temps, d'étudier le changement de l'occupation du sol dans le bassin versant du Bouregreg à partir d'images Landsat datant de 1985,2000,2007 et 2011 et d'adopter dans une second temps une méthodologie qui permettra de superposer et d'analyser un ensemble de facteurs pour faire ressortir à la fin du travail une carte des risques, document que les planificateurs et décideurs peuvent s'en servir après dans l'aménagement.

Cette recherche s'articule autour de 3 grandes parties. Dans la première partie, nous présenterons la zone d'étude et nous décrirons le phénomène d'érosion. La deuxième partie sera consacrée à la méthodologie adoptée dans l'étude diachronique de l'occupation du sol et pour la modélisation des processus érosifs dans le bassin versant du Bouregreg. Une analyse et une discussion des résultats obtenus est présentée dans la troisième partie.

¹ Plan dont les objectifs est de protéger l'environnement et d'assurer le développement durable en méditerranée

I Contexte de l'étude : Le bassin versant du Bouregreg et l'intérêt de la géomatique dans l'étude des phénomènes d'érosion

L'une des plus grandes problématiques environnementales du bassin versant du Bouregreg lieu de notre recherche est la dégradation des sols par érosion. Ce premier chapitre sera consacré à l'étude du phénomène de l'érosion. On présentera une revue de littérature portant sur le phénomène dans un cadre global puis local à travers une description détaillée du bassin versant du Bouregreg. Nous montrerons aussi l'intérêt de l'imagerie satellitaire et les SIG pour décrire et suivre le changement du milieu et pour modéliser le phénomène d'érosion.

I.1 Le phénomène de l'érosion

L'érosion est très active dans le bassin versant du Bouregreg, elle est influencée par plusieurs facteurs naturels et anthropiques. Ce phénomène constitue une menace sérieuse pour les biens, la population et l'environnement. Il est donc préalablement nécessaire d'étudier ce phénomène, de présenter ses facteurs, ses conséquences ainsi que la politique de lutte contre l'érosion dans les bassins versants au Maroc.

I.1.1 Définition

L'érosion, selon la (FAO, 1994), regroupe l'ensemble des phénomènes qui contribuent, sous l'action d'un agent d'érosion (notamment l'eau) à modifier les formes de relief. L'érosion est aussi définie comme étant un processus physique, chimique, naturel par lequel le sol et les roches de la croûte terrestre sont continuellement soumis à une abrasion et à une corrosion (Georges, 2008).

I.1.2 Facteurs d'érosion

Les facteurs d'érosion influencent l'intensité des processus de détachement, de transport et de dépôt. Nous pouvons en citer cinq : le sol, l'occupation du sol, la topographie, le climat et les techniques culturales (Dennis, 2008).

Bref, l'érosion est sous l'influence des facteurs naturels et anthropiques :

I.1.2.1 Facteurs naturels

• Facteur topographique ou l'influence de la pente

Nombreux sont ceux qui ont montré que la topographie agit sur le ruissellement et les pertes en sol par deux composantes: le degré de la pente et la longueur de la plus grande pente (Borst et Woodbrun, 1940 ; Wischmeier et Smith, 1978).

- ✓ Le degré de la pente car plus le degré de l'inclinaison des versants est grand, plus l'énergie cinétique de l'écoulement et la détachabilité des particules du sol sont importantes (Hadir, 2010).
- ✓ La longueur de la pente puisque les pentes les plus longues permettent une plus forte accumulation du ruissellement, ce qui accroît l'énergie globale de celui-ci et ses possibilités de détachement et de transport (Batti et Depraetere ,2007).

•Le climat

Le climat est un autre facteur majeur de l'érosion. La pluie détache des particules terrestres, notamment dans la formation du ruissellement. Cette érosivité dépend principalement de la durée et de l'intensité des précipitations.

Les eaux de ruissellement sur les terrains et les forts vents jouent aussi un rôle important dans le détachement des particules du sol. Il y'a ruissellement quand la vitesse avec laquelle la pluie arrive au sol dépasse la vitesse avec laquelle l'eau entre dans le sol (Fox, 2008).

•Le sol

Les sols se caractérisent par leur vulnérabilité à l'érosion (érodibilité). L'érodibilité d'un sol représente la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent sous l'action des gouttes de pluies et/ou de l'écoulement (Le Bissonnais et al. 2005) .L'érodibilité est définie par deux caractéristiques principales : la résistance au splash (déplacement local de fragments du sol sous l'impact des gouttes de pluie, et la résistance au cisaillement (lié au ruissellement). La sensibilité d'un sol à l'érosion est en fonction de plusieurs paramètres qui sont la capacité d'infiltration, la stabilité structurale, la texture et la teneur en matière organique.

•La végétation

Les sols nus sont les plus vulnérables à l'érosion. En effet, le risque d'érosion diminue si le sol est bien protégé par le couvert végétal ou une couche de résidus de culture. La végétation et les résidus limitent l'impact des gouttes de pluie et des éclaboussures d'eau. Ils peuvent également réduire la vitesse d'écoulement de l'eau et améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol.

I.1.2.2 Facteurs anthropiques

Le phénomène d'érosion est devenu principalement un résultat direct de l'activité humaine qui représente maintenant un facteur de dégradation des sols. En effet, l'homme constitue la source du déclenchement et de l'accélération de l'érosion par ses pratiques inadaptées sur les versants, ses actions de déboisement puis de défrichement, ses incendies et surpâturages et techniques culturales.

De même, les aménagements urbains augmentent les surfaces imperméables ce qui favorise l'intensité du ruissellement, et contribuent par la suite à l'entraînement du sol.

I.1.3 Effets et conséquences de l'érosion sur le bassin versant

On peut citer parmi les effets bien visibles causés par l'érosion les éléments ci-dessous :

•Pertes en sol et en éléments nutritifs

L'érosion des bassins versants engendre essentiellement la destruction de la structure du sol et la réduction de la fertilité des sols. Selon le HCEFLCD (Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification), la dégradation spécifique au Maroc atteint 500 t/km²/an au Moyen Atlas, et à plus de 5000 t/km²/an au Rif.

•Détérioration des ressources en eau

Les retenues des barrages connaissent un envasement de 75 millions de m³/an ce qui engendre une réduction de 0,5 % de la capacité de stockage (HCEFLCD).

De plus, l'érosion cause la diminution de la qualité de l'eau potable mobilisée. En effet, une eau chargée de sédiments devient impropre à la consommation ce qui augmente les frais de traitement des eaux.

•Dommage aux infrastructures de transport de l'eau

Les produits de l'érosion ou les sédiments se déposent en chemin dans un cours d'eau et par conséquent menacent le bon fonctionnement des infrastructures de transport de l'eau. La réparation et l'entretien des infrastructures endommagées peuvent être très coûteux pour la municipalité ou le propriétaire qui en est responsable.

•Autres problèmes environnementaux :

Les sédiments transportés par le processus de l'érosion sont souvent chargés de contaminants. Les pesticides et les engrais, souvent emportés avec les particules du sol, polluent les sources d'eau, les terres humides et les lacs en aval.

•Au niveau social :

Les effets néfastes engendrés par le phénomène accentuent la pauvreté des paysans et par conséquent encouragent l'exode rural.

I.1.4 Politique de lutte contre l'érosion au Maroc

Le Maroc, pays essentiellement aride, est durement confronté depuis plusieurs années aux graves menaces de l'érosion et de la dégradation sévère de ses ressources naturelles (sol, couvert forestier et végétal...). Face à cette situation, le Maroc a adopté entre 1990 et 1996, avec la collaboration d'organismes internationaux et la participation de divers partenaires concernés, un Plan National d'Aménagement des Bassins Versants (PNABV) visant à la gestion durable des ressources naturelles associées, la préservation des eaux à leur source et l'amélioration du niveau de vie des populations démunies qui en dépendent (HCEFLCD).

Les principaux objectifs en termes de lutte contre l'érosion du PNABV sont :

- ✓ La réduction de l'envasement des barrages et l'amélioration de la qualité de l'eau ;
- ✓ Le développement socio-économique des populations ;
- ✓ La sécurisation de tout le domaine forestier (9 millions d'hectares);
- ✓ La prévention contre les incendies et la surveillance sanitaire ;
- ✓ Le renforcement des infrastructures socio-économiques au niveau des bassins versants.

Pour cela, 22 bassins versants occupant une superficie de près de 15 millions d'ha ont bénéficié d'un programme d'action entre 2008 et 2012 ce qui a permis de :

- ✓ Protéger le reboisement et consolider les plantations anciennes ;
- ✓ Régénérer et reconstituer des milieux forestiers ;
- ✓ Élaborer des plans d'aménagement antiérosifs au niveau de 6 bassins versant, parmi eux, il y'a le bassin versant du Bouregreg.

I.1.5 Conclusion

L'érosion présente un risque notable pour le bassin versant, il est nécessaire alors d'évaluer ce danger par une étude de l'évolution de l'occupation du sol ainsi que de modéliser ce phénomène pour produire à la fin une carte de sensibilité à l'érosion aidant à gérer la dégradation des sols. La géomatique constitue un outil fiable et robuste qui permettra de réaliser cette étude. Cela constitue l'objet du chapitre suivant qui expose l'apport de la géomatique dans le suivi et la gestion de notre problématique.

I.2 Les apports de la géomatique dans la gestion des sols et la lutte contre l'érosion

La géomatique est un champ d'activité qui intègre, selon une approche systématique, l'ensemble des moyens d'acquisitions et de gestion des données à référence spatiale requis pour effectuer les opérations scientifiques, administratives, légales et technique dans le cadre du processus de production et de gestion de l'information sur le territoire (Geomatica, 1999).

À partir de diverses sources, les outils de la géomatique, SIG et informatique, peuvent être appliquées à plusieurs domaines notamment à la gestion de l'espace, à l'aménagement des territoires et au contrôle des phénomènes menaçant l'environnement comme l'érosion. La caractérisation et le suivi de cette dernière imposent en principe de déterminer avec suffisamment de certitude quel sera le futur de la surface et de détecter les différents changements observés dans la dynamique de l'occupation du sol à plus ou moins long terme. Il faut aussi identifier les facteurs déclenchant l'érosion. Pour ce faire, il est nécessaire d'appliquer des traitements aux images satellitaires issues de la télédétection et les intégrer au travers des différentes couches d'information afin de produire des informations aidant à la décision et la lutte contre l'érosion des sols. Dans ce chapitre, nous proposerons un état de l'art des études et techniques utilisées dans l'étude de

l'évolution de l'occupation du sol et dans la modélisation des processus érosifs tout en soulignant la grande contribution des technologies de la géomatique.

I.2.1 Apport de la géomatique aux études spatiotemporelles de l'occupation du sol

Selon la (FAO, 1998), la carte d'occupation peut être succinctement définie comme "la couverture (bio-) physique de la surface des terres émergées". Cette carte comprend la végétation (naturelle ou cultivée) et l'aménagement du territoire (habitat, bâtiment, routes) qui occupent la surface de la terre ainsi que l'hydrographie. Elle s'élabore essentiellement à partir des données de la télédétection, aérienne ou spatiale.

La télédétection est ainsi considérée comme la source principale pour la réalisation des cartes d'occupation du sol. Les images satellitaires à haute résolution offrent une vision particulière de la surface terrestre ce qui permet d'obtenir un état des lieux d'une zone donnée, et donc de présenter simultanément de grandes superficies en détail. De plus, les images satellitaires peuvent être acquises pour la même zone à une fréquence élevée, cette répétitivité permet de comparer la couverture d'une région à des données équivalentes antérieures, ainsi que d'élaborer des analyses diachroniques des changements de couvertures du sol en utilisant des traitements d'images numériques.

La production de cartes d'occupation du sol constitue un enjeu très important pour beaucoup de travaux de recherche et pour de nombreux projets et applications opérationnelles au niveau mondial. Dans la littérature, les cartes d'occupation du sol sont largement utilisées dans l'étude de l'évolution de couverture du sol. Le programme européen (Pan-European Land Cover Monitoring, (1996,1999)) propose par exemple une description de l'occupation du sol européen selon une nomenclature hiérarchisée en 3 niveaux (5 classes, 15 classes et 44 classes) pour une cartographie à l'échelle du 1/100.000ème élaborée à partir de données satellitaires et selon un seuil surfacique minimal de 15 ou 25 hectares selon les thèmes. La méthodologie adoptée pour ce projet était la combinaison des méthodes de la classification non supervisée et supervisée et la validation des classifications a été réalisée par la vérification des résultats avec 40 images de hautes résolutions à travers toute l'Europe.

Au cours de l'année 2000, le Centre Commun de Recherche (CCR) de la Commission Européenne a produit la carte Global Land Cover 2000 (GLC2000) en utilisant des données majoritairement acquises par l'instrument VEGETATION à bord du satellite SPOT 4. L'objectif général de cette carte est de fournir une base de données

harmonisée de l'occupation du sol sur l'ensemble du globe de l'année 2000. Le projet GLC2000 utilise le FAO Land Cover Classification System (LCCS). Il s'agit d'une classification hiérarchique qui a permis à chaque partenaire régional de décrire les classes de couverture du sol au détail thématique le mieux adapté à l'occupation du sol dans leur région, tout en suivant une approche de classification standardisé (Labiadh, 2012).

Le projet AFRICOVER de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2004), a permis l'établissement, par et pour les pays africains, d'une base de données digitale géoréférencée de l'occupation du sol et d'un référentiel géographique à une résolution spatiale de 30 m (FAO, 2004). La cartographie a été réalisée à partir d'un système de classification hiérarchique dont les types d'occupation des sols ont été identifiés par interprétation visuelle des données LANDSAT par des experts.

Le thème de l'occupation du sol a fait également l'objet de plusieurs études et projets au Maghreb : (Bensaid, 1997) a utilisé des images multidates (MSS, TM et ETM+) dans son étude diachronique de l'évolution des changements des zones steppiques algériennes tout en exploitant trois techniques : la technique basée sur l'utilisation des SIG et des images satellitaires, l'utilisation des compositions colorées multidates et de l'indice dynamique de couverture des sols (IDCS).

(Benkrid,2008) a essayé en utilisant des données de télédétection dans la plaine du bas Chélif, de déterminer l'évolution des contours des périmètres irrigués, d'étudier la dynamique spatiale et temporelle des cultures et de détecter les parcelles d'anomalies et la végétation non vigoureuse.

L'étude de (Samaali, 2011) avait pour ambition d'élaborer une cartographie détaillée de la dynamique d'occupation et d'utilisation du sol (milieux naturels, activités agricoles, zones d'habitation et d'activité humaine) dans le delta de Mejerda pour la période 2009-2013. La recherche a permis aussi de mettre en place une base de données géographique, sous système d'informations géographiques (SIG) multi-sources en utilisant le logiciel Arc view(ESRI).

I.2.2 Apport de la géomatique à la modélisation des processus érosifs

Les données spatiales générées à partir des images satellites ou d'autres sources constituent des volumes d'information très importants. Pour les exploiter efficacement, il faut recourir aux méthodes et outils informatiques performants. La technologie SIG permet d'intégrer plusieurs paramètres et couches de données en utilisant des modèles bien

définis ce qui permet de simuler la réalité et d'optimiser la gestion et le suivi des phénomènes naturels tels que l'érosion et la dégradation des sols.

De nombreuses recherches et articles ont été réalisés sur les risques de dégradations des terres. Cette partie tente de présenter les principaux modèles d'érosion pour lesquels les données de l'observation de terre peuvent apporter les paramètres d'entrée nécessaire dans l'application de ces modèles.

L'un des modèles les plus utilisés dans l'évaluation et la cartographie de l'érosion est le modèle empirique de perte en terre (Wischmeier et Smith, 1965).

Selon ce modèle (Roose et Georges, 2004), l'érosion est une fonction multiplicative dont la forme est : $A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$ où :

- ✓ A = Taux de pertes en terres en tonnes par hectare par année (t/ha/an);
- ✓ R = Érosivité des pluies en Mégajoule millimètre par hectare heure (MJ mm /ha h);
- ✓ K = Érodibilité des sols en tonne heure par Mégajoule millimètre (t h/ MJ mm) ;
- ✓ Ls = Longueur de pente et d'inclinaison (sans unité) ;
- ✓ C = Facteur du couvert végétal (sans unité) ;
- ✓ P = Facteur tenant compte des pratiques antiérosives (sans unité).

L'équation universelle des pertes du sol est un modèle simple et pratique. Ainsi, elle a été mise en pratique dans de nombreux pays du Nord et adaptée à différents pays du Sud et en milieu tropical (Renard et Freimund, 1994 ; Mati et al. 2000 ; Boggs et al. 2001 ; Dumas et Printemps, 2010 ; Fengyin et al. 2010). Ce modèle a été appliqué au Maroc en 2004 sur le bassin versant de l'oued Boussouab (Rif oriental) dans le cadre de l'action intégrée entre le laboratoire GÉEAC de la Faculté des Sciences et Techniques de Tours (France) et la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz de Fès. Ce travail a utilisé des cartes thématiques des différents facteurs de l'équation universelle de pertes en sol dans un système d'information géographique ce qui a permis d'une manière efficace d'analyser les risques d'érosion et de mieux déterminer le taux d'érosion par le ruissellement en nappe (Asadiki ; Bouhlassa ; Auajjar, Feleh ; Macaire, 2004).

Cependant, la principale critique à faire à ce modèle c'est qu'il néglige les interactions entre les paramètres. L'équation d'USLE est présentée effectivement sous la forme d'un produit sans tenir compte de leur liaison causale et les relations complexes existantes (Auzet, 1987). Selon (Asadiki, 2004), le modèle présente aussi des limites à son applicabilité dans des zones différentes de celles où il a été établi.

Un modèle de type système expert a été élaboré en 1998 par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) (Le Bissonnais et al. ,1998). La méthode adoptée par l'INRA prend la forme d'un arbre de décision afin de définir des classes qualitatives d'aléa érosif.

Cette approche méthodologique est basée sur la combinaison de cinq facteurs jugés importants et ont été intégrés à l'arbre de décision : L'occupation du sol, la battance des sols, l'intensité de la pente, l'érodibilité des sols, l'érosivité des pluies (intensités et hauteurs des précipitations). En utilisant ce modèle expert, l'institut national des sols, de l'irrigation et du drainage en Algérie a commencé en 2006 une étude pour établir une carte de sensibilité à l'érosion du nord du pays. L'étude a permis de délimiter des classes de sensibilité à l'érosion pour faciliter ensuite la prise des décisions et pour l'élaboration des plans d'aménagement et de mise en valeur.

Le modèle SWAT (Soil and Water Management Tool) est un modèle conceptuel, déterministe et semi-spatialisé développé par le Département d'Agriculture des Etats-Unis (USDA). Ce modèle est appliqué pour modéliser des bassins versants de quelques centaines à plusieurs milliers de km². Le modèle considère que le faciès de la surface du sol, la rugosité, la couverture du sol (cultures et résidus) et l'humidité du sol (Cerdan et al. 2002) sont les principaux facteurs déterminants du ruissellement et de l'infiltration à l'échelle de la parcelle. Il permet aussi de modéliser d'autres paramètres comme la qualité de l'eau et le transfert de nutriments (Laurent et al. 2007).

En Europe, le modèle SWAT a été largement utilisé dans la production de flux diffus de sédiments, de nutriments et de pesticides (Beaudin, 2006). Il est appliqué aussi en Afrique de l'Ouest dans la modélisation de la dégradation du sol, surtout en faisant des scénarios sur l'influence du changement de climat et de l'occupation du sol (2000-2025). Il a été également essayé au Québec pour modéliser l'hydrologie, les sédiments et les processus chimiques à l'échelle des petits bassins versants agricoles.

I.2.3 Conclusion

Nous avons présenté au cours de ce chapitre les différentes méthodes et applications utilisées dans les études de l'occupation du sol et dans la modélisation de l'érosion. Le choix du modèle d'érosion adéquat à notre recherche dépend principalement de la zone d'étude et de ses différentes spécificités physiques et environnementales surtout celles contribuant au phénomène d'érosion. Le prochain chapitre présentera d'une façon assez détaillée le bassin versant du Bouregreg, ses caractéristiques physiques et humaines et l'impact de ces dernières sur le déclenchement des phénomènes de dégradations des sols.

I.3 Le bassin versant du Bouregreg

I.3.1 Milieu physique

I.3.1.1 Situation géographique

Le bassin versant du Bouregreg se situe dans la partie Nord-Ouest du Maroc (figure 1). Il occupe une superficie totale d'environ 2,19 % de la superficie du pays avec 10 000 km², il est limité au Nord par le bassin versant de Sebou et par le bassin versant de Oued Oum Rbia au Sud, par les bassins des Oued cherrat et Oued Nfifikh et Mellah au Sud-Ouest, et s'ouvre à l'Ouest sur l'océan atlantique.

Le bassin versant du Bouregreg est drainé par trois principaux réseaux hydrographiques à savoir : L'oued du Bouregreg, le Grou et Korifla.

En ce qui concerne le côté administratif², on trouve à l'intérieur du périmètre du bassin 66 communes et 6 provinces et 3 régions avec une population d'environ 2 366 142³ personnes soit 7,97% de la population du pays (selon de dernier recensement de 2004). 61,34% de la totalité de la population du Bouregreg est concentré dans les villes de Salé et Rabat. Le tableau 1 présente les principales villes du Bouregreg.

² Annexe 1

³ DIRECTION DE LA STATISTIQUE - Haut-Commissariat au Plan-

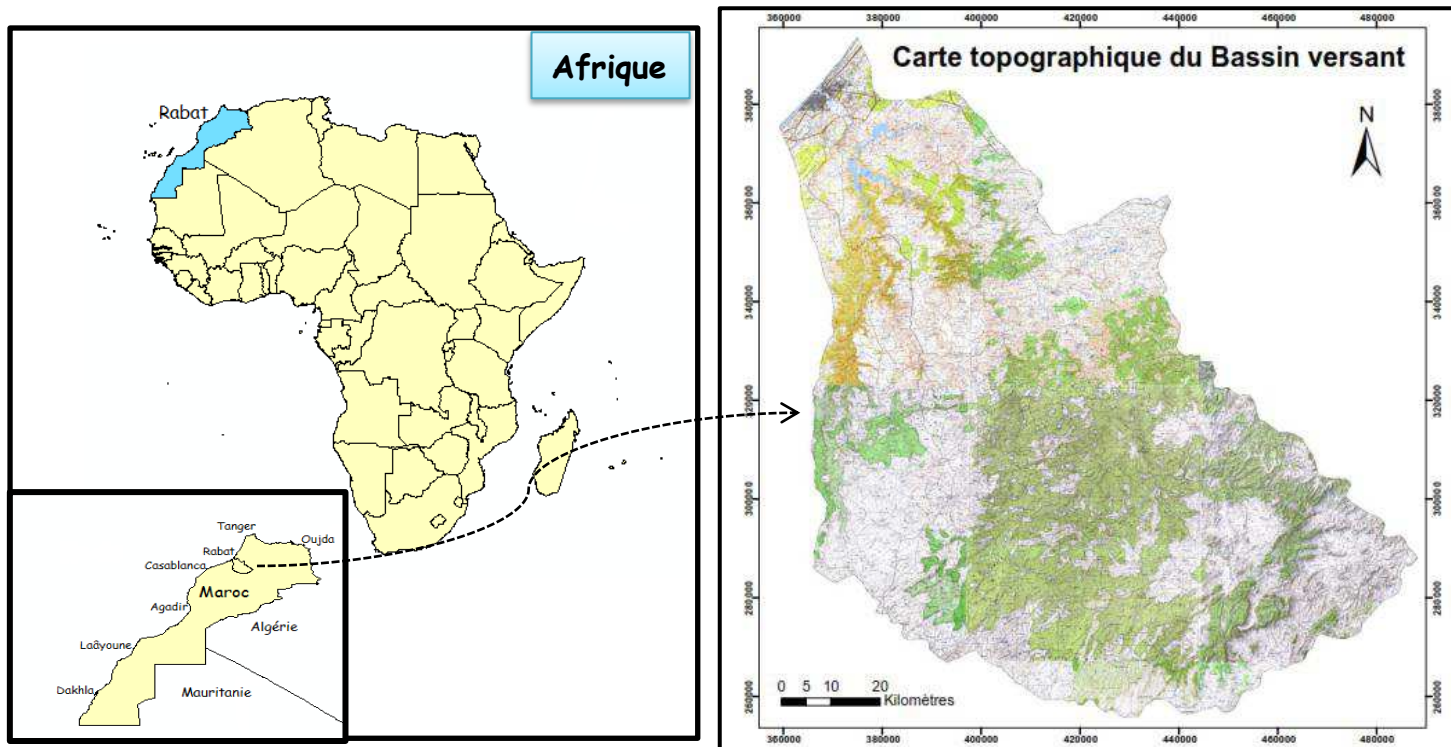


Figure 1 : La zone d'étude

Tableau 1 : Principales villes de Bouregreg

Villes	Population(2004)	Pourcentage
Salé	823 485	34,80%
Rabat	627 932	26,54%
Khémisset	336 131	14,21%
Skhirat-Témara	319 637	13,51%
Khénifra	177 901	7,52%
Khéribga	69 491	2,94%
Ben-Sliman	11 565	0,49%

I.3.1.2 Situation géomorphologique

Selon (Beudet ,1969), Le bassin versant du Bouregreg peut être subdivisé en quatre unités géomorphologiques (figure2): Le haut pays, la dépression orientale, le palier intermédiaire et le palier inférieur.

- ✓ **Le haut pays** : Représente un complexe géomorphologique, il est constitué à la fois par des crêtes culminantes d'une altitude entre 1050 et 1400 m et des plateaux (Plateau d'Oulmès, Ment, Zguit, Fourhal et de Telt) situés entre 1000 et 1400 m d'altitude.
- ✓ **La zone de dépression orientale** : Elle s'étend entre le haut pays à l'ouest et le Moyen Atlas Occidental à l'est. L'ensemble de la dépression s'incline du

nord-est au sud-ouest, les pentes sont moyennes ou faibles. La quasi-absence de couvert végétal oppose le couloir oriental à ses bordures surélevées : les affleurements sont le siège d'une érosion qui stérilise des étendues notables (Beudet, 1969).

- ✓ **Le palier intermédiaire** : situé entre les reliefs du haut pays et la basse Meseta caractérisé par des altitudes entre 550 et 900 m.
- ✓ **Le palier inférieur** : Regroupant à la fois tous les bas plateaux atlantiques de faible altitude ainsi que la plaine de Meseta⁴. Le palier inférieur est caractérisé par une pente faible aux approches du littoral ou les plateaux sont moins élevés.

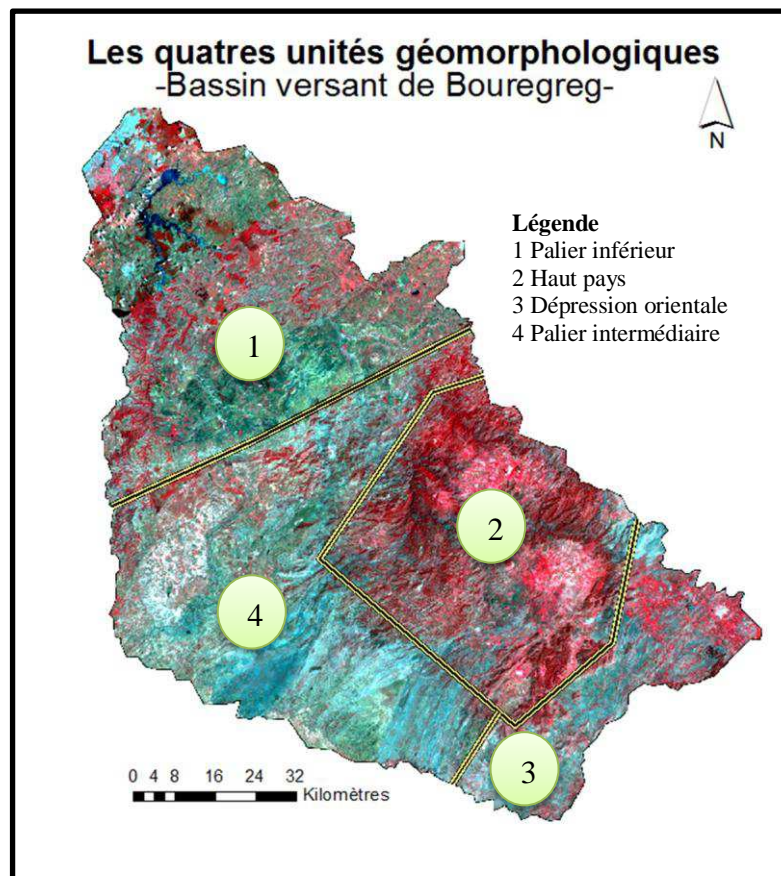


Figure 2: Carte géomorphologique du bassin versant du Bouregreg

⁴ Meseta : Massif ancien situé dans le nord-ouest du Maroc.

I.3.1.3 Climat

Le climat du bassin versant du Bouregreg est de type semi-aride, caractérisé dans sa majeure partie par une saison sèche la plus grande partie du temps et par une saison humide marquée par des faibles précipitations.

Le climat dans le bassin est influencé à la fois par l'altitude surtout au nord avec des altitudes pouvant atteindre 1 630m et par l'ouverture sur l'océan atlantique, ce dernier assure aussi bien l'humidification que la modération des températures.

- **Températures**

Les températures moyennes annuelles oscillent au niveau du bassin entre 15° et 18°C au long du littoral et 15° et 17°C en zone de montagne. Des fois les températures peuvent atteindre des degrés supérieurs à 45 ° à cause des vents de Chergui⁵.

- **Pluviométrie**

Le bassin est distingué par une saison pluvieuse qui s'étale d'octobre jusqu'à mai et par une saison sèche qui s'étend du mois de juin à septembre et se caractérise par des précipitations plus au moins faibles⁶. Le maximum de précipitation est observé durant le mois de décembre, le minimum est observé au mois de juillet.

- **Vents**

Dans le bassin versant, on trouve deux types de vents qui dominant :

- ✓ Les vents qui génèrent de la pluie en hiver ce sont des vents qui sont à l'origine des masses d'air polaire couvrant les zones méditerranéennes ;
- ✓ Les vents qui sont connus sous le nom de Chergui, ce sont des vents chauds venant du Sahara et qui dessèchent les plaines côtières.

I.3.1.4 Géologie

Les formations géologiques sont marquées par la dominance de formations paléozoïques⁷ généralement d'origine sédimentaire dominées par les schistes, grès⁸ et

⁵ Un vent chaud qui vient du Sahara

⁶ Annexe 2

⁷ Ou bien ère primaire, est l'ère géologique la plus ancienne des temps phanérozoïques (temps fossilifères).

quartzites⁹. Ces roches ont été traversées par d'importantes masses de roches magmatiques plutoniques ou volcaniques de composition chimique différente. Elles sont localisées dans la partie basse du bassin (Bounouira, 2007). Les granites, calcaires et basaltes s'étendent quant à eux sur de plus faibles surfaces (Beaudet, 1969).

Cette vaste surface paléozoïque a été plissée et métamorphosée lors de l'orogénèse hercynienne, puis arasée du fait de phénomènes d'érosion au Permien et, durant le Trias, puis partiellement recouverte par des dépôts du Secondaire avec notamment des argiles rouges salifères (Beaudet, 1969).

Le bassin prend naissance dans le Massif central et chemine vers le littoral à travers la Masetta côtière selon une direction SE-NW conformément à la disposition topographique générale du plateau (Beaudet, 1969 ; El Agbani, 1984). Le bassin occupe environ 90 % du massif central marocain.

I.3.1.5 Pédologie

Le bassin versant du Bouregreg est distingué par l'existence d'une structure pédologique assez variée¹⁰ à cause des variations climatiques, des formations géologiques, du relief et aussi de la diversité végétale, ces facteurs ont un impact dans l'évolution des sols dans cette zone.

On constate une dominance des sols rouges et bruns méditerranéen. Ces sols sont caractérisés par une évolution rapide de la matière organique et par leur hydromorphie. Celle-ci est liée à la fois à l'imperméabilité du substratum schisteux dominant, au climat et à l'évolution pédologique elle-même (Benabdellouahad, 2006).

Les processus érosifs dans le bassin versant du Bouregreg vont être influencés par les caractéristiques intrinsèques du sol.

⁸ Roche sédimentaire constituée par une agrégation de grains de sable

⁹ Roche siliceuse massive, constituée de cristaux de quartz soudés

¹⁰ Annexe 3

I.3.1.6 Végétation

Le couvert végétal joue un rôle de protection des sols contre l'érosion. L'étude de la carte de végétation ¹¹ permet de recenser les différentes couvertures végétales. On peut donc décomposer la zone en deux formations végétales.

- **La forêt**

Les espèces végétales qui dominent sont le chêne vert et liège couvrant le haut pays et le palier intermédiaire. À l'intérieur de ces zones denses, les plateaux d'Oulmès, du Ment restent dénudés. Au nord, dans la Meseta littorale, on trouve la forêt de Maâmora connue par sa diversité floristique, ainsi que par sa situation à proximité de Rabat et Kénitra. Elle est considérée comme la plus étendue du pays.

- **Le matorral :**

On peut le diviser en matorral¹² moyen, dense et lâche. Le premier, on le retrouve dans la partie sud du palier intermédiaire constitué d'Oléastre, Tizra et Jujubier, tandis que le deuxième enveloppe les parties hautes du palier inférieur composé de Tizra, Lentisque et Oléastre. Le dernier situé dans la dépression orientale couverte par des arbustes isolés et Chétifs.

On note également la présence dans la zone des sites d'Intérêt Biologique et Écologique (SIBE). À cet égard, on peut citer, à titre d'exemple Korifla, Oued Cherrat, Dayt Roumi...etc...Leurs patrimoine faunistique et floristique permettent de protéger et conserver la biodiversité écologique.

I.3.1.7 Ressource en eau

Selon l'ABHBC¹³, le potentiel en eau du bassin du Bouregreg provient aussi bien des eaux de surface que des eaux souterraines.

¹¹ Annexe 4

¹²Type de végétation méditerranéenne relativement aérée, reconnaissable par la présence de chênes de petite taille

¹³ L'agence du bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia

- **Les eaux de surface :**

Le bassin hydrographique du Bouregreg inclut à la fois l'oued Bouregreg et ses affluents (figure 3) et des oueds situés sur la côte atlantique comme (N'Fifikh, Mellah, Cherrat..). Le potentiel en eau de surface est d'environ $674mm^3$.

- **Les eaux souterraines**

La zone possède essentiellement 3 nappes :

- ✓ La nappe de Témara située dans la municipalité de Témara avec un potentiel d'environ $15mm^3$;
- ✓ La nappe de Tanoubert situé dans la province de Khémisset avec un potentiel de $10mm^3$;
- ✓ La nappe de Sehoul situé entre la ville de Sala-Jadida et l'oued du Bouregreg avec un potentiel de $2.5mm^3$.

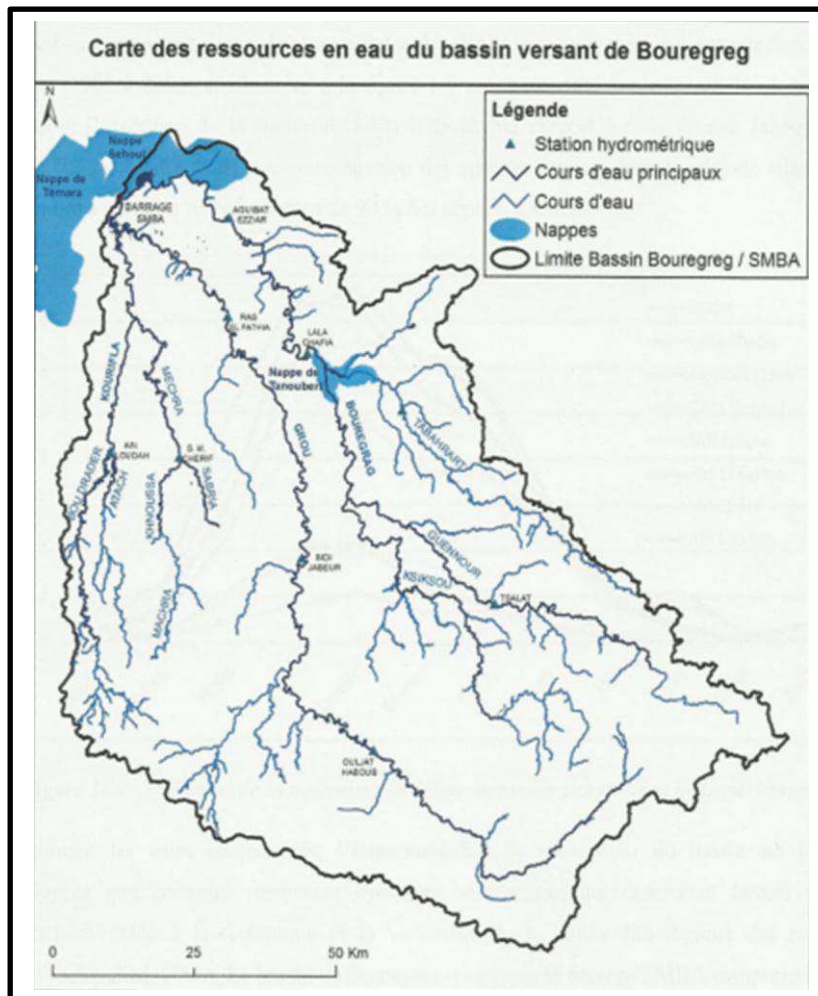


Figure 3 : Carte des ressources en eau du bassin versant du Bouregreg (S. Lahlou)

I.3.2 Activité humaine

I.3.2.1 Démographie

Selon le dernier recensement qui a eu lieu en 2004 (Tableau 2). La population du Bouregreg a atteint les 2,37 millions d'habitants dont 76% habitent dans des communes urbaines (Témara, Agdal Ryad, Harhoura) et 24% dans des communes rurales et des Douars¹⁴ telle que (Ait Malek et Ait Ammar et Braksa).

Tableau 2 : La population du Bouregreg dans les années 2004, 1994,1982. Source : la direction de la statistique (Haut-commissariat au Plan)

Bassin du Bouregreg	1982	1994	2004
Totale de la population	1 518 447	2 022 445	2 366 142
Population Rurale	469 149	546 527	565 721
Population urbaine	1 049 298	1 475 918	1 800 421

En 2004, on constate que la population du Bouregreg a continué d'augmenter par rapport au recensement de 1982 et celui de 1994.

Selon (Bounouira 2007), la répartition de la population est liée à sa situation géomorphologique qui va conditionner l'utilisation des terres.

On retrouve les Zaers et Zemmour (Tribus Berbères) dans le palier inférieur et intermédiaire, ces deux populations vivent essentiellement de l'agriculture et l'élevage et les tribus de Zayane appartenant à la famille Amazigh¹⁵ dans le haut pays et la dépression orientale, l'élevage constitue la source de revenue principale pour cette population de semi-nomades.

I.3.2.2 Activité économique

L'agriculture et l'élevage sont considérés comme les activités économiques les plus importantes dans les zones rurales, tandis que les activités artisanales, touristiques ainsi que la pêche côtière représentent les premières sources de revenu dans les centres urbains.

- **L'agriculture**

Les deux modes d'agriculture qui existent dans bassin versant du Bouregreg sont :

¹⁴ Un groupement d'habitations rurales

¹⁵ Ensemble d'ethnies d'Afrique du Nord

- ✓ L'agriculture en bour (non irriguée) : C'est le mode d'agriculture qu'on retrouve dans la majorité des terrains agricoles, ce mode est fortement lié au climat ;
- ✓ L'agriculture irriguée : Selon le (DPAE 1996), cette agriculture se situe essentiellement dans les régions de Tiddas, d'Oulmès et de Maaziz . Les surfaces sont de l'ordre de 8 850 ha, c'est une surface assez faible et cela peut être expliqué par la rareté des ressources en eau souterraines et par le coût considérable des matériaux d'irrigation.

Les principales cultures sur le bassin versant du Bouregreg :

- ✓ Les céréales : environ (69% des surfaces) situées essentiellement dans les communes de Maaziz, Tiddas, Merchouch et Rommani ;
- ✓ Les légumineuses ;
- ✓ les cultures maraîchères ;
- ✓ les cultures fourragères.

- **L'élevage**

En principe, le bassin versant du Bouregreg est caractérisé par un élevage extensif. L'élevage bovin est le plus exercé¹⁶, on le retrouve surtout dans les alentours des centres urbains (Rommani et Salé). La structure génétique du troupeau est composée d'un pourcentage de races locales, et d'un autre pourcentage de races croisées et améliorées, Cela peut être justifié par la volonté des éleveurs d'augmenter les niveaux de production.

À cela vient s'ajouter l'élevage ovin et caprin, le premier est pratiqué dans le moyen atlas composé essentiellement de races locales, l'élevage caprin (celui des chèvres) est présent dans les zones de montagnes, il fait preuve d'une grande souplesse, on le retrouve dans les régions les plus pauvres, où les ovins et bovins ne peuvent pas subsister. On parle de population caprine de montagne. Il est exploité pour la production de viande.

Le système pastoral est celui qui domine, se base sur l'exploitation de la végétation, parcours et forêt pour alimenter les besoins alimentaires des cheptels.

¹⁶ Annexe 5

- **La pêche**

La zone Bouregreg est bordée par l'océan atlantique, l'activité de pêche maritime est présente surtout à Rabat. Le port de Rabat assure juste 0,45% de l'activité du secteur au niveau national et cela à cause de sa dimension et de ses faibles moyens.

- **Les activités artisanales**

La zone est connue par sa richesse et sa diversité artisanale avec plusieurs productions telles que (Menuiserie, Tapis, Cuir, Ferronnerie...).

- **Tourisme**

Le tourisme est centré essentiellement à Rabat et dans quelques communes rurales, c'est grâce à la richesse de leurs patrimoines et à leurs atouts écologiques et naturels que la région est considérée comme un vrai site d'attraction pour les touristes.

- **Industrie**

L'existence dans la région et précisément sur le plateau d'Oulmès d'une importante unité industrielle exploitant et commercialisant les eaux des sources minérales telles que (Eau d'Oulmès et Eau de Sidi Ali).

I.3.3 Conclusion

Maintenant qu'on a présenté les différentes caractéristiques du bassin versant du Bouregreg qui favorisent et accélèrent le processus érosif. Nous essayerons dans le prochain chapitre, d'adopter une démarche méthodologique adéquate pour atteindre nos objectifs.

II Méthodologie

Ce chapitre présentera dans un premier temps les données et les outils utilisés dans ce travail, ensuite, il décrira la méthodologie employée dans l'étude diachronique de l'occupation du sol et dans la modélisation des processus érosifs dans le bassin versant du Bouregreg.

La modélisation des processus érosifs nécessite un ensemble de données qui sont malheureusement indisponibles, nous nous sommes contentés alors des données existantes, et nous nous sommes inspirés de plusieurs études pour réaliser notre modèle.

II.1 Données utilisées

Les images satellitaires constituent un outil important dans la cartographie de l'occupation du sol ainsi que dans la planification et la gestion des ressources, elles sont descriptives et apportent une information spatiale et spectrale, beaucoup plus importante par rapport aux autres sources d'information (Pouchin, 2001) permettant la caractérisation des objets dans une large bande spectrale. L'interprétation visuelle ou automatique permet d'identifier des objets et d'extraire de l'information.

II.1.1 Les images Satellitaires Landsat

Le satellite Landsat de l'agence spatiale américaine (NASA) évolue à une altitude moyenne de 705 Km sur des orbites circulaires quasi polaires caractérisées par une inclinaison de 98,2°.

Dans cette étude de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le bassin versant du Bouregreg, nous avons travaillé avec quatre images satellitaires multi spectrales Landsat géoréférencées sans couverture nuageuse.

Ces images¹⁷ sont téléchargeables gratuitement à partir du site <http://glovis.usgs.gov> ou bien <http://earthexplorer.usgs.gov>.

¹⁷ Annexe 6

Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques des quatre images utilisées dans cette étude diachronique.

Tableau 3 : Caractéristiques des quatre images satellitaires

Path	Row	Date d'acquisition	Capteur	Mode	Bandes spectrales				
					Bande	Bande spectrale	Résolution spatiale		
202	36	23-avr-00	ETM+	Multispectral	1(Bleu)	0,45 – 0,515	30		
					2(Vert)	0,52 – 0,605	30		
201	37	02-mai-00			3(Rouge)	0,63 – 0,69	30		
					4(Infrarouge)	0,76 – 0,90	30		
					5(Infrarouge)	1,55 – 1,75	30		
					6(Infrarouge thermique)	10,42 – 12,50	60		
					7(Infrarouge)	2,09 – 2,35	30		
					8(Panchromatique)	0,50 – 0,90	15		
202	36	06-avr-85			TM5	Multispectral	1(Bleu)	0,45 – 0,52	30
201	37	15-avr-85					2(Vert)	0,52 – 0,60	30
			3(Rouge)	0,63 – 0,69			30		
201	37	11-mars-07	4(Infrarouge)	0,76 – 0,90			30		
201	37	09-mai-11	5(Infrarouge)	1.55-1.75			30		
			6(Infrarouge thermique)	10.42-12.50			60		
202	36	20-mai-11	7(Infrarouge)	2.08-2.35			30		

II.1.2 Carte topographique (papier et scanné)

On dispose :

- ✓ D'un mosaïquage de carte topographique de type Raster non géoréférencé de l'ensemble de notre zone d'étude. Ces cartes ont été publiées en 1984 d'une échelle de (1 :100000), utilisées principalement pour corriger les différentes images satellitaires ;

- ✓ D'un ensemble de cartes topographiques papier de notre zone d'étude qui vont servir pour géoréférencer la carte topographique numérique.

II.1.3 Image Aster

Le GDEM ASTER (Global Digital Elevation Model) est un Modèle Numérique d'Élévation qui couvre le monde entier, téléchargeable gratuitement à partir du site <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>, il appartient au programme Aster ("Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer") coproduit par le MITI et la NASA. Il a une résolution de 30 mètres. Ce modèle¹⁸ va permettre d'avoir un Modèle Numérique de Terrain de notre zone d'étude, ce dernier va être exploité pour ressortir des cartes d'inclinaison et des longueurs de pentes.

II.1.4 Données statistiques

Nous avons travaillé avec les données du recensement de la population des années 82, 94 et 2004, ces données ont été livrées en format papier et en couche SIG par la direction de la statistique (Haut-commissariat au Plan).

II.2 Outils de travail

Ce chapitre présentera les outils de travail qui ont permis de manipuler les données collectées, ces outils sont essentiellement des logiciels de traitement numérique d'image et SIG.

II.2.1 Logiciel ERDAS Imagine 2011 version 11.0.2

Erdas imagine, un logiciel de traitement numérique des images de Leica Geosystems Geospatial Imaging, nous avons utilisé ce logiciel dans :

- ✓ les corrections radiométriques et géométriques ;
- ✓ L'assemblage des bandes ;
- ✓ Le mosaiquage ;
- ✓ Le découpage de notre zone d'étude ;
- ✓ La classification supervisée des images satellitaires ;

¹⁸ Annexe 7

- ✓ L'évaluation de notre classification ;
- ✓ La programmation de l'arborescence logique.

II.2.2 Logiciel Arcgis Version 10

Arcgis est un logiciel SIG de ESRI (Environmental Systems Research Institute), il est développé pour faciliter la gestion et l'analyse des données spatiales afin de répondre à une problématique donnée.

Ce logiciel a été utilisé dans ce travail pour :

- ✓ La création, l'habillage et l'édition des cartes ;
- ✓ La détection de changement entre les différentes images satellitaires ;
- ✓ L'analyse de quelques données statistiques.

II.2.3 Logiciel Idrisi Taiga version 16.0

C'est un logiciel de traitement numérique des images, ce logiciel nous a permis de calculer les longueurs de pentes du bassin versant du Bouregreg à partir du MNT(AsterGdem).

II.2.4 Google Earth

C'est un Logiciel de Google qui permet de visualiser la terre à partir d'un mosaïquage de photographies aériennes ou satellitaires.

II.3 Étude diachronique de l'occupation du sol

Pour étudier l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant du Bouregreg et par la suite créer une carte de sensibilité à l'érosion, nous avons adopté une méthodologie (figure 4) qui s'appuie sur la classification supervisée après prétraitements des images satellitaires. Cette méthodologie a été utilisée par plusieurs auteurs dans la réalisation de leurs études spatio-temporelles.

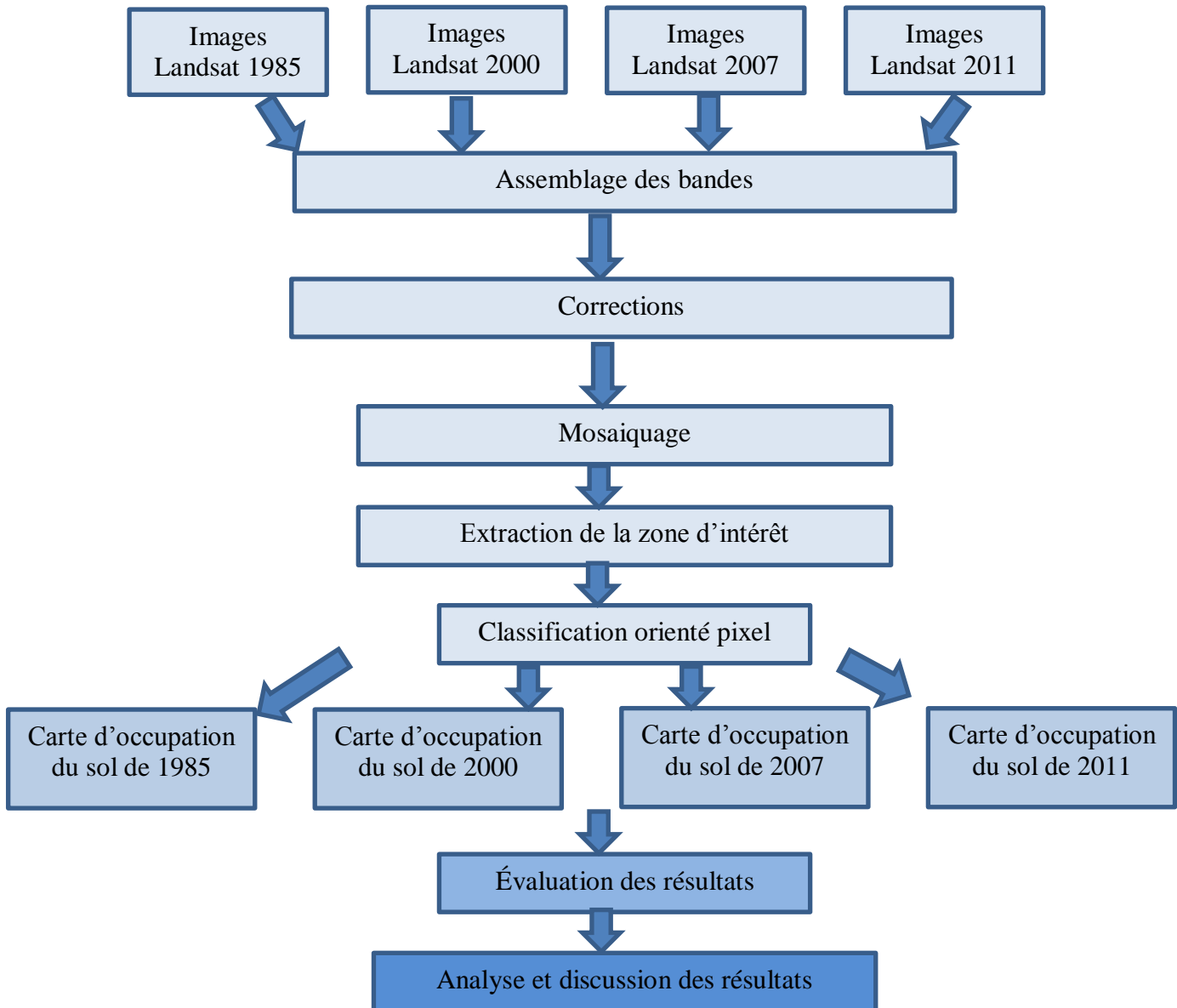


Figure 4: Méthodologie suivie dans l'étude diachronique de l'occupation du sol

Dans un premier temps, on applique les traitements préliminaires :

II.3.1 Prétraitement des données

Le prétraitement des données englobe l'ensemble des opérations nécessaires avant l'analyse principale, ces opérations s'effectuent dans le but de rendre notre lot de données de notre zone d'étude lisible et bien superposable. Parmi les prétraitements, on mentionne les corrections géométriques et les corrections radiométriques.

II.3.1.1 Assemblage des bandes

Une fois que le téléchargement des images landsat est terminé, on a un dossier Zip, la première chose à faire, c'est de le dézipper, on observe alors la présence de

plusieurs fichiers (des bandes) qui ont comme extension .TIF. Pour procéder à des traitements sur l'image, il a fallu rassembler ces bandes, pour cela, on s'est servi de l'outil Layer Stack de Erdas Imagine qui va permettre d'empiler ces bandes pour avoir comme fichier sortie une seule image multi bandes qui a comme format .IMG.

II.3.1.2 Corrections radiométriques

L'amélioration radiométrique consiste à corriger les effets des différents artefacts qui perturbent la mesure radiométrique, notamment les défauts du capteur et le voile atmosphérique. Le traitement le plus simple consiste à redistribuer les niveaux de gris (ou les couleurs) de manière à mieux utiliser la palette disponible. On parle d'étalement de l'histogramme ou de stretching. (Polidori, ESGT).

II.3.1.3 Corrections géométriques

Elle consiste à rectifier les images satellites de manière à les rendre superposables à d'autres images ou à des documents cartographiques de référence (Shlien, 1997).

La carte topographique numérique a été corrigée grâce à l'ensemble des cartes topographiques papier récupérées auprès de l'ANCFCC¹⁹. Cette opération a été réalisée en sélectionnant des points d'appui bien dispersés sur la carte dont on connaît leurs coordonnées dans le système de projection marocain²⁰.

La méthode polynomiale utilisée est d'ordre 1 (t=1), elle permet de convertir les coordonnées source en coordonnées carte. Le nombre minimum de points de contrôle terrain nécessaire est :

$$\frac{(t + 1) * (t + 2)}{2}$$

Pour perfectionner nos résultats, nous avons utilisé plus de points que le nombre minimum.

À partir de cette carte topographique corrigée, on a remanié les images satellitaires Landsat.

¹⁹ Agence nationale de la conservation foncière, du cadastre et de la cartographie

²⁰ Annexe 8

II.3.1.4 Mosaiquage

Les images sont acquises avec une certaine largeur de bande sur l'orbite du satellite. Cette largeur dépend du capteur du satellite (Geographic information management). Dans notre cas, notre zone d'étude est plus large. Cependant, on doit procéder à un assemblage d'images afin de recouvrir toute la zone faisant objet de l'étude. On a réalisé le mosaiquage grâce à l'outil Mosaïque Pro de Erdas Imagine.

II.3.1.5 Extraction de notre zone d'intérêt

Notre zone d'étude a été délimitée après le mosaiquage par l'outil Subset & Chip de Erdas imagine.

II.3.2 La classification des images

La classification choisie est celle supervisée (ou "classification dirigée"). En se basant sur notre connaissance du terrain et sur la signature spectrale, on a défini pour chaque pixel de notre image sa classe d'appartenance. L'algorithme utilisé est celui du maximum de vraisemblance qui repose sur la règle de Bayes et permet de calculer pour chaque pixel sa probabilité d'appartenir à une classe plutôt qu'une autre. Le pixel est affecté à la classe dont la probabilité d'appartenance est la plus élevée.

La démarche suivie se résume en quatre étapes :

- ✓ L'interprétation visuelle des images satellitaires en se basant à la fois sur les caractéristiques des classes d'occupation du sol et notre connaissance du terrain ;
- ✓ La sélection d'un nombre de zone d'entraînement pour les classes voulues ;
- ✓ L'évaluation de la fiabilité de notre classification et le contrôle du résultat obtenu.

Dans cette étude, cinq classes d'occupation du sol ont été définies (Tableau 4) :

Tableau 4 : Les classes d'occupation du sol

Classe	Description
Eau	Cette classe est constituée par : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Les lacs ; ✓ Les Dayas¹ ; ✓ Un barrage ; ✓ Les Oueds¹.
Parcelles agricoles	Rentre dans cette catégorie, les surfaces cultivées ayant un couvert végétal peu dense au moment de prise de vue des images satellitaires. Les surfaces labourées ne rentrent pas dans cette classe.
Sols nus	Les espaces ou la couverture végétale est absente, cette classe contient aussi les terres labourées.
Espace Bâti	Les zones urbanisées.
Forêts	Les espaces couvertes par la forêt.

II.3.2.1 L'interprétation visuelle des images satellite

L'œil humain n'étant sensible qu'au rayonnement visible, on ne peut présenter par le jeu des couleurs qu'au plus trois séries d'informations complètes que le cerveau pourra tenter de déchiffrer (Bonn et Rochon, 1992).

La composition la plus utilisée dans ces études est donnée dans le tableau 5. Selon (Girard et Girard, 1999), cette composition permet de bien séparer l'eau des autres classes et permet aussi de différencier la végétation des sols nus.

Tableau 5 : Composition colorée réalisée à partir de canaux Landsat TM (source : Girard et Girard, 1999)

Couleurs/Canaux			Caractéristiques des grands thèmes d'occupation du sol			
Bleu	Vert	Rouge	Eau	Végétaux	Sol nu	Bâti
2	3	4	Bleu sombre à clair (clarté augmentant Avec la turbidité)	-Chlorophylliens : magenta. -Peu Chlorophylliens : brun-ver.	Bleu ou cyan plus ou moins clair	Bleu très clair à blanc

II.3.2.2 L'évaluation statistique de la classification

Pour évaluer la fiabilité de notre classification, nous avons choisi la méthode basée sur les résultats statistiques de la classification, cette dernière est effectuée sous le logiciel

Erdas-Imagine, le principe de cette méthode consiste à prélever aléatoirement des points puis les comparer avec des points de référence.

Le résultat est donné sous forme d'une matrice dite matrice de confusion qui contient deux indices qui seront utilisés pour la validation finale :

- ✓ La précision globale : Elle est égale au nombre total de pixels correctement classifiés (diagonale de la matrice de confusion) divisé par le nombre total de pixels de vérification (Singh, 1986).
- ✓ L'indice de Kappa : Il indique comment les données à classer s'accordent aux données de référence. Il constitue une mesure fiable dans l'évaluation des classifications thématiques car il examine tous les éléments dans la matrice de confusion et prend en compte à la fois des erreurs d'omissions et de commissions (Rosenfiel et Filzpatrick-lins, 1986).

II.3.3 Conclusion

La carte d'occupation du sol est un élément déterminant dans la modélisation du processus érosif mais il faut la combiner avec d'autres facteurs pour modéliser le phénomène. Le prochain chapitre exposera la modélisation d'érosion et détaille les autres paramètres implémentés dans le modèle réalisé.

II.4 La modélisation des processus érosifs

Notre modèle (figure 5) a été réalisé en utilisant essentiellement trois données disponibles en l'occurrence : la topographie, l'érodabilité du sol et le couvert végétal.

Nous avons combiné l'ensemble de ces données et nous les avons classées en fonction de leur rôle et importance dans le processus érosif. Tout cela a été réalisé en se servant des fonctionnalités de Knowledge Engineer de Erdas Imagine 2011.

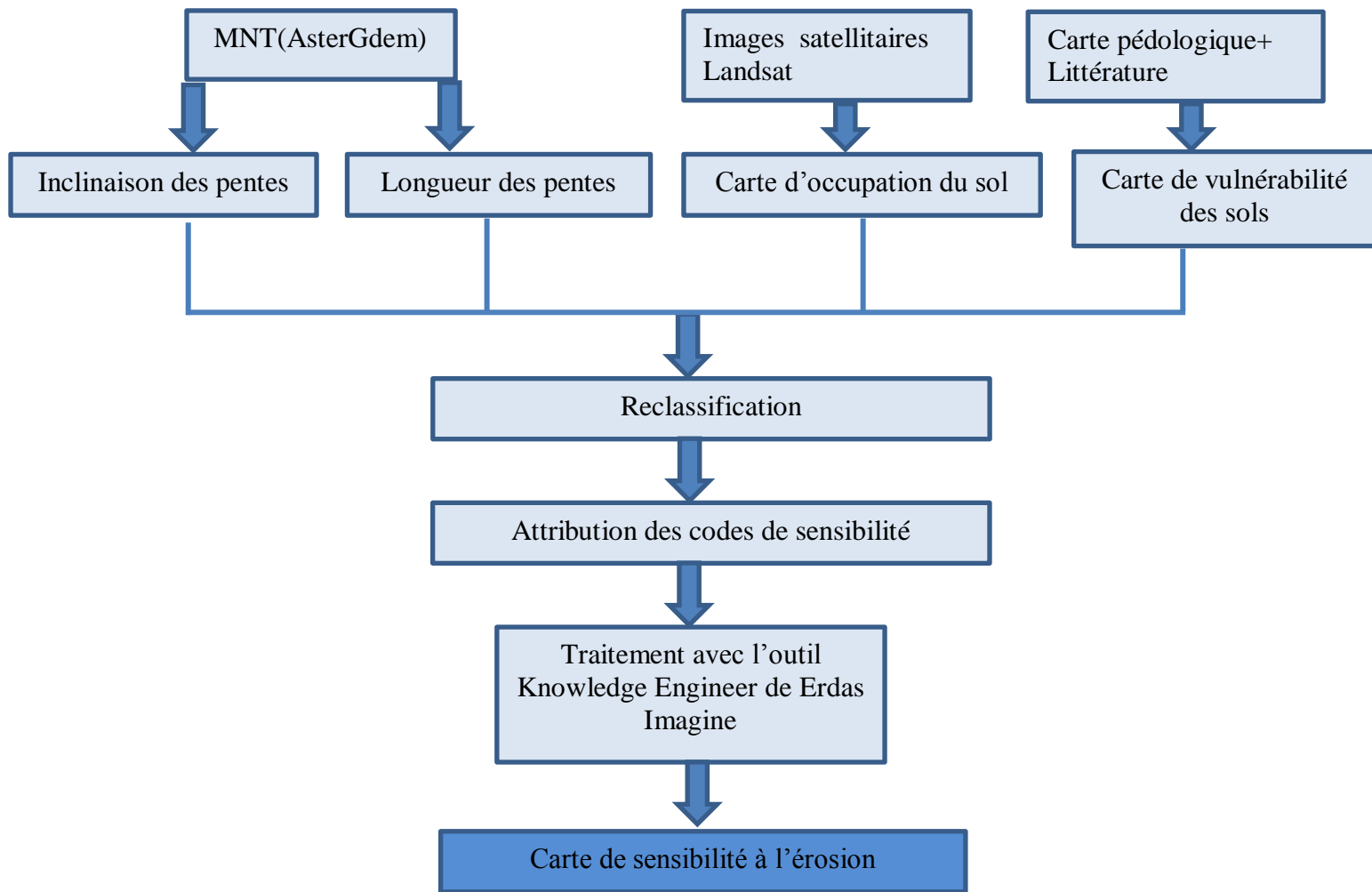


Figure 5 : Méthodologie suivie pour la modélisation des processus érosifs

II.4.1 Réalisation

L'une des difficultés majeure pour mettre en place un modèle sur les processus érosifs dans un bassin versant c'est la collecte des données.

Les données nécessaires à intégrer dans le modèle sont citées ci-après :

II.4.1.1 La couverture végétale

Selon (Roose, 1994), le couvert végétal est un facteur très important dans le processus d'érosion. Ce dernier est négligeable si on a un sol bien couvert de végétations toute l'année même si la pente du terrain est forte et les précipitations sont intenses et le sol est vulnérable à l'érosion.

Nous avons reclassifié notre carte d'occupation et nous avons attribué un indice à chaque classe²¹.

II.4.1.2 L'inclinaison de pente

L'inclinaison de pente²² intervient dans le processus d'érosion, elle permet d'accélérer le ruissellement. Toutes les études qui ont été réalisées sur l'influence de la pente sur l'érosion ont montré que le phénomène s'intensifie avec la pente.

En s'inspirant des données de la littérature et du terrain, l'inclinaison de la pente va intervenir en deuxième position dans notre arborescence logique.

Tous ceux qui ont travaillé sur ce thème ont l'habitude de travailler avec une classe d'inclinaison de pente faible, puisque ce phénomène se produit souvent dans des terrains qui ont des pentes faibles. La pente moyenne dans le bassin versant du Bouregreg est de 17,21% et la battance des sols n'est pas la cause principale de ce phénomène.

Nous avons réalisé la carte d'inclinaison des pentes du bassin versant du Bouregreg à partir du MNT GDEM Aster (Global Digital Elevation Model), c'est un Modèle Numérique d'Élévation qui couvre le monde entier et il est téléchargeable gratuitement sur www.asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp.

Une phase de prétraitements a été indispensable pour extraire notre zone d'intérêt.

Nous avons classifié notre carte de pentes en quatre classes et nous avons attribué des indices²³ à ces classes en fonction de leur rôle dans le processus érosif. L'indice le plus grand correspond à la pente la plus forte.

II.4.1.3 La longueur de pente

Les études effectuées par (Zing ,1940) et (Hudson ,1973) montrent que la longueur de pente est un facteur indispensable dans la modélisation de l'érosion.

La carte des longueurs de pentes²⁴ a été réalisée par le logiciel Idrissi-Taiga²⁵ en utilisant la fonctionnalité SLOPELENGTH du logiciel et en calculant au préalable la

²¹ Annexe 9

²² Annexe 10

²³ Annexe 9

²⁴ Annexe 11

direction du flux de chaque pixel du MNT. Les longueurs sont des nombres entiers compris entre 0 et 255. Par la suite, ces longueurs ont été reclassifiées et on a attribué à chaque classe un indice²⁶.

II.4.1.4 L'érodibilité

La sensibilité des sols à l'érosion est influencée par les paramètres intrinsèques du sol (stabilité structurale, croûte de battance, état dispersé, matière organique, texture ((Roose et Sarrailh, 1990))).

Dans notre zone d'étude, certains sols sont plus vulnérables que d'autres, mais la majorité est sensible voire très sensible à l'érosion.

Le bassin versant du Bouregreg est caractérisé par la dominance des lithosols et régosols, des sols évolués (sols bruns, sols rouge), ainsi que des sols sableux (hydromorpes ou lessivés) développés sur granite ou sur l'argile.

Nous avons réalisé la carte de vulnérabilité des sols²⁷ à l'érosion dans le bassin versant, cela a été fait à partir d'un ensemble d'études bibliographiques (Bensalah, 2008, Beaudet, 1969, Ghanem, 1981) et des études qui ont été réalisées sous le cadre du projet SIGMED sur la même zone d'étude ainsi que grâce à la carte pédologique et la base de données sur les sols de la FAO.

Ces différentes données ont permis d'une part de mesurer la sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance et d'autre part de voir la capacité des sols à infiltrer l'eau de pluie.

Nous avons aussi attribué un indice pour chacune des classes de la carte, l'indice le plus fort correspond à la classe la plus exposée à l'érosion²⁸.

II.4.1.5 Bilan

L'ordre défini ci-dessous correspond à l'ordre d'importance de ces facteurs dans le processus érosif pour notre modèle :

²⁵ Logiciel de traitement d'images

²⁶ Annexe 9

²⁷ Annexe 12

²⁸ Annexe 9

- ✓ La couverture du sol ;
- ✓ L'inclinaison de pente (en degré) ;
- ✓ La longueur de pente ;
- ✓ La vulnérabilité des sols.

II.4.1.6 La justification des choix de l'arborescence logique

L'arborescence logique²⁹ a été effectuée en s'inspirant des études de (Pinte, 2006 ; Nekhay ; Arriaza ; Boerboom, 2009) sur la même problématique. Nous avons cherché à réaliser une modélisation fiable et adaptée à notre zone d'étude ne nécessitant que les données en notre possession.

- **Nombre de classes par facteur**

La technique qui permet de diminuer l'importance d'un facteur est de lui attribuer moins de classes. Les décisions prises sont listées ci-dessous.

- ✓ Les facteurs topographiques

Selon le type de couvert végétal, nous avons hiérarchisé les classes de pente.

Le critère qu'on a suivi dans cette hiérarchisation est le suivant :

- ❖ Les deux facteurs topographiques (Inclinaison et longueurs des pentes) interviennent plus dans les surfaces peu ou non couvertes par la végétation. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser seulement trois classes d'inclinaison des pentes pour les surfaces bien couvertes par la végétation et travailler avec la totalité des classes pour les surfaces non couvertes par la végétation et nous avons aussi décidé de rassembler les classes 1 et 2 des longueurs des pentes en présence des surfaces bien couvertes de végétation et travailler avec la totalité des classes en présence des surfaces non couvertes par la végétation.

²⁹ Annexe 13

✓ L'érodibilité

Le facteur sol est important en présence d'une faible couverture végétale. Dans le cas d'une surface bien couverte par la végétation, nous n'avons pas fait de distinction entre les sols, puisque ces derniers sont protégés par celle-ci contre l'érosion. Par ailleurs, nous n'avons pas fait également de distinction entre les sols en présence d'une surface non couverte par la végétation située dans des zones à forte pente, Le processus érosif dans ce cas, va se déclencher quel que soit le type du sol.

Pour les classes 1 et 2 du facteur (longueurs des pentes), on va utiliser tous les types des sols, par contre ce dernier, il ne va pas intervenir dans les classes 3 et 4 ou il y'a une forte concentration de l'eau, dans ce cas, on n'est pas face au phénomène de l'érosion mais face à la propagation de l'érosion.

II.4.1.7 Attribution d'indices finaux

La dernière phase dans la création de notre arborescence logique est celle d'attribuer des indices à chaque combinaison de facteurs (figure 6).

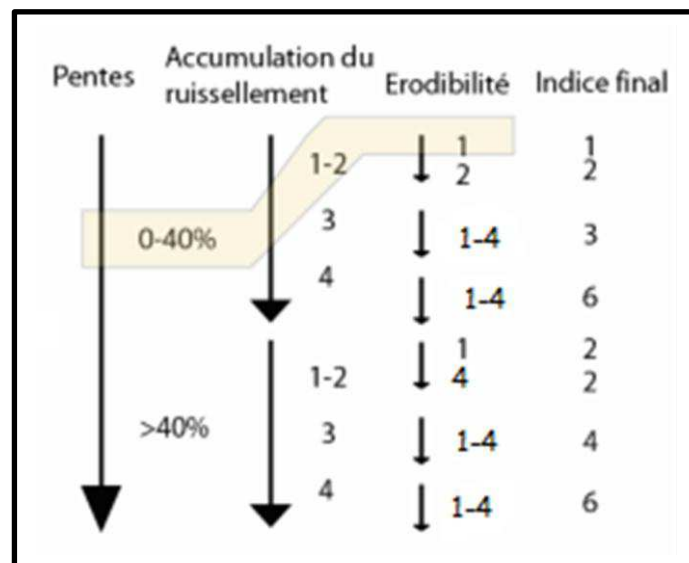


Figure 6 : Construction de l'arborescence

L'indice le plus faible 1 correspond à la combinaison des facteurs les plus faibles (Pente faible – Longueur de pente faible – sol peu vulnérable à l'érosion).

L'indice 2 correspond à la combinaison des facteurs faibles avec le passage à un indice fort pour l'érodibilité. Le passage à un indice plus grand en longueurs de pente explique l'attribution des indices 3 et 6. Au moment du passage à une inclinaison de pente

plus grande, on retrouve les mêmes règles que ceux en haut mais avec une majoration d'une unité.

II.4.2 Conclusion

Ce chapitre a décrit toutes les étapes suivies pour aboutir à nos objectifs. Le chapitre prochain sera consacré à la présentation et l'analyse des résultats obtenus avec ces deux méthodologies.

III Résultats et analyses

Le bassin versant du Bouregreg a connu en l'espace de 26 ans de nombreux changements sous l'effet de plusieurs facteurs.

Nous commencerons cette partie par exposer le résultat issu de la classification, en suite, on va analyser l'évolution que le bassin a connue pendant la période (1985-2011).

À la fin, on va examiner la fiabilité de nos résultats grâce à plusieurs études et données qui ont été réalisées dans le bassin versant du Bouregreg.

III.1 La dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant du Bouregreg

III.1.1 Cartes d'occupation du sol

III.1.1.1 Géoréférencement des données

La carte topographique a été numérisée sous le format TIFF à une résolution de 300 dpi. Le géoréférencement de la carte a été réalisé à l'aide du logiciel Erdas Imagine, en se basant sur des points dont on connaît les coordonnées. Dans notre cas, nous avons utilisé 20 points de calage afin d'assurer une surabondance de l'évaluation de la correction géométrique. Les résultats montrent que l'erreur moyenne quadratique égale à 1,01m, une valeur qui est inférieure à la moitié de la résolution de l'image Landsat, ce qui montre que la correction est valide.

Grâce à cette carte, nous avons pu géoréférencer nos images satellitaires. Pour chacune des images corrigées, nous avons obtenu une précision moins d'un demi du pixel, ce qui les rend toutes bien superposables et leur correction géométrique est acceptable.

III.1.1.2 La classification supervisée

On a appliqué une classification supervisée sur les quatre images Landsat (1985, 2000, 2007 et 2011).

Les figures 7, 8, 9 et 10 présentent les différentes cartes d'occupation du sol qu'on a établies.

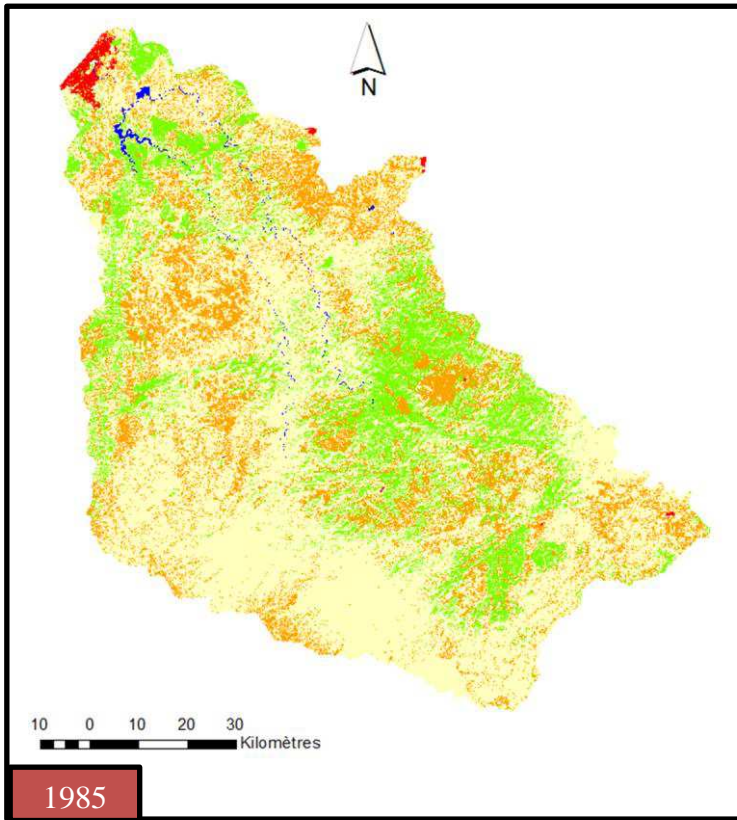


Figure 8 : Occupation du sol du Bouregreg (1985)

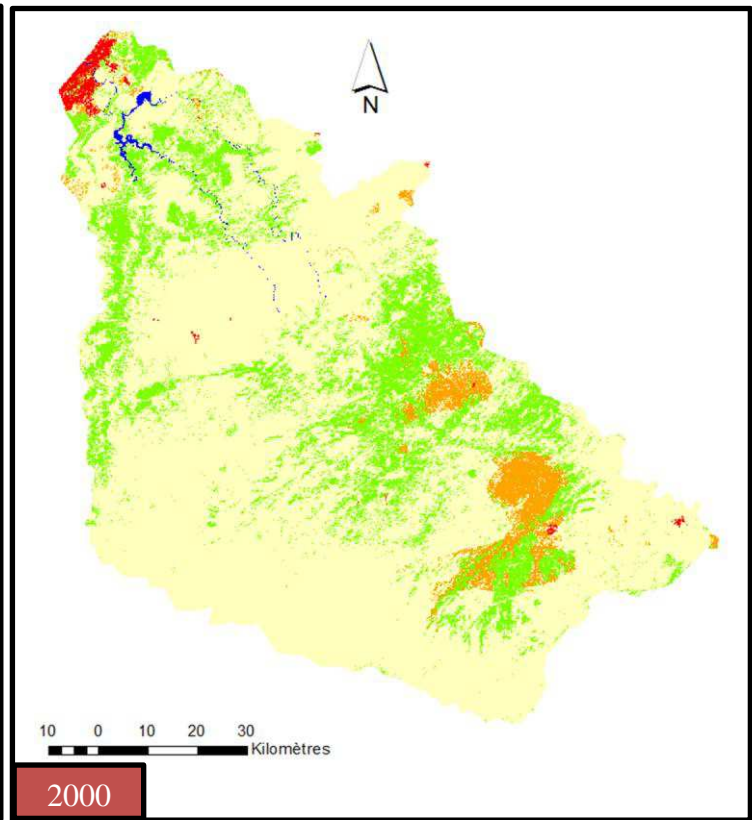


Figure 7 : Occupation du sol du Bouregreg (2000)

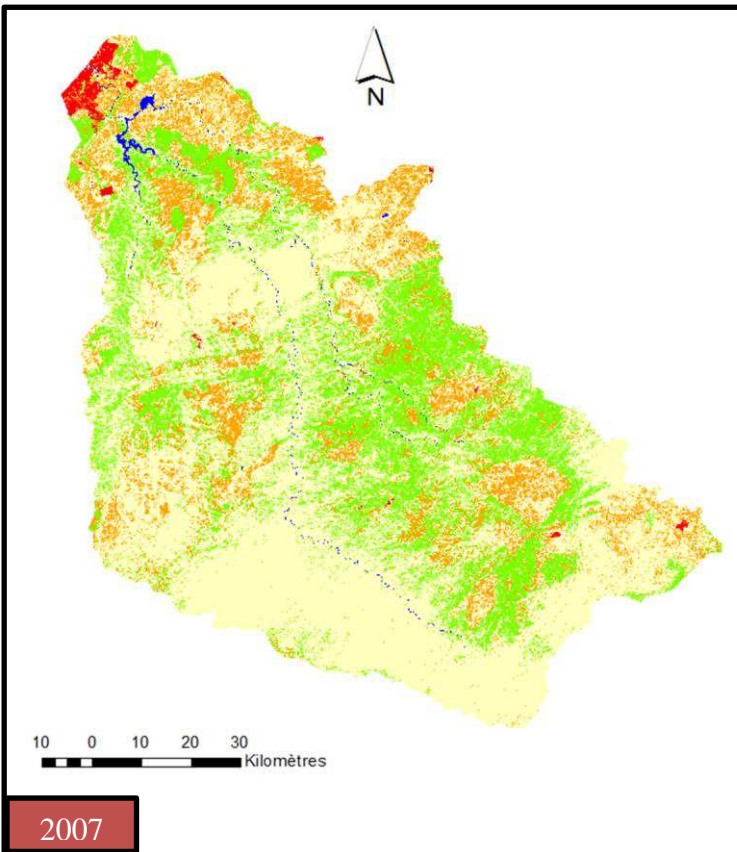


Figure 10 : Occupation du sol du Bouregreg (2007)

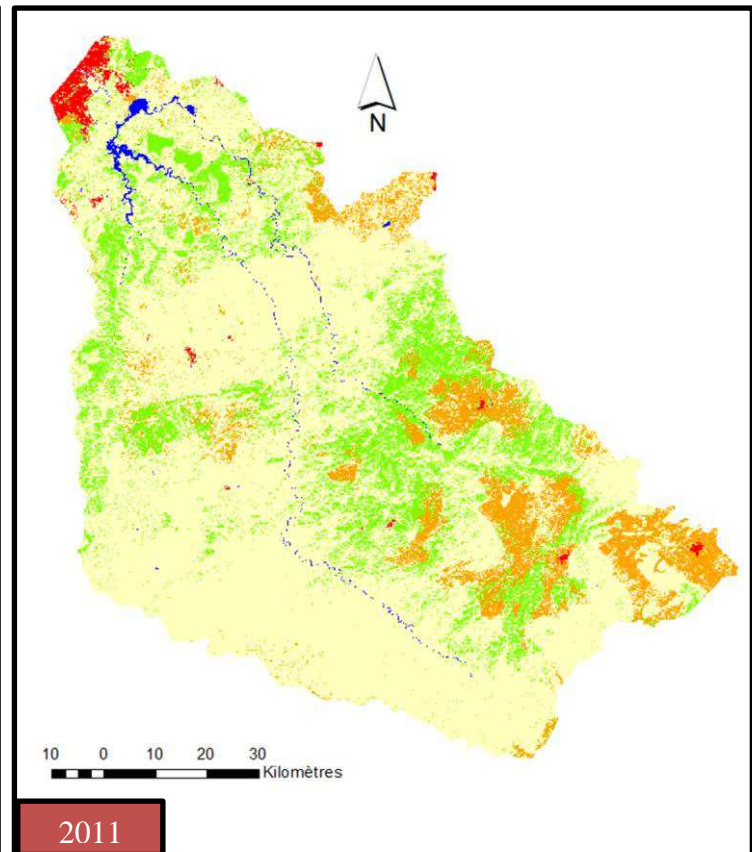


Figure 9 : Occupation du sol du Bouregreg (2011)

Eau
 Bâties
 Parcelles agricoles
 Forêts
 Sols nus

III.1.2 Évaluation

Nous avons vérifié l'exactitude et la fiabilité de nos résultats à partir d'une matrice appelée matrice de confusion. Cette dernière est basée sur une comparaison entre les zones d'entraînement classées par l'utilisateur grâce à sa connaissance du terrain et entre ces mêmes zones reclassées par le logiciel. Les résultats de ces comparaisons sont exprimés en pourcentage. Selon (Afro, Descplnoy, 2010), une classification est fiable et exploitable si, et seulement si les pourcentages sont supérieurs à 80%.

Dans notre cas, le pourcentage de la précision globale et le coefficient de Kappa pour nos quatre classifications dépassent largement les 80% (tableau 6). Ce qui permet de déduire que notre classification est fiable et exploitable.

Tableau 6: Résultats de l'évaluation de la classification

Années	1985	2000	2007	2011
Classes	Indice de Kappa			
Parcelles agricoles	73,06%	100%	100%	85,36%
Forêts	100%	100%	100%	92,67%
Eau	85%		100%	100%
Sols nus	100%	75%	81,48%	82,55%
Bâti	100%			
Précision globale	89,25%	86,11	91,53%	87,67%

Avant d'attaquer l'analyse des résultats statistiques, on va réaliser un bref état d'art sur les conditions de la pluviométrie dans cette période d'étude. L'étude de la pluviométrie dans le bassin versant suffirait pour constater l'impact substantiel des précipitations et donc de la pluviométrie, sur les changements de couvertures du sol.

III.1.3 Effets des précipitations sur l'occupation du sol

L'étude des précipitations au niveau du bassin versant révèle une grande variation de la pluie entre les années 1980 et 2010, la moyenne enregistrée dans cette période est de 370mm. Les années 1995 et 2009 ont été marquées par des saisons pluvieuses avec des pluies annuelles respectives de 625,7 et 662,5mm.

On constate également (figure 11) que les années 1993, 1994 et 2006 ont connu un déficit avec des pluies annuelles de 200mm et 202mm.

Le reste des années a été caractérisé par des pluies annuelles souvent proches de la moyenne de référence.

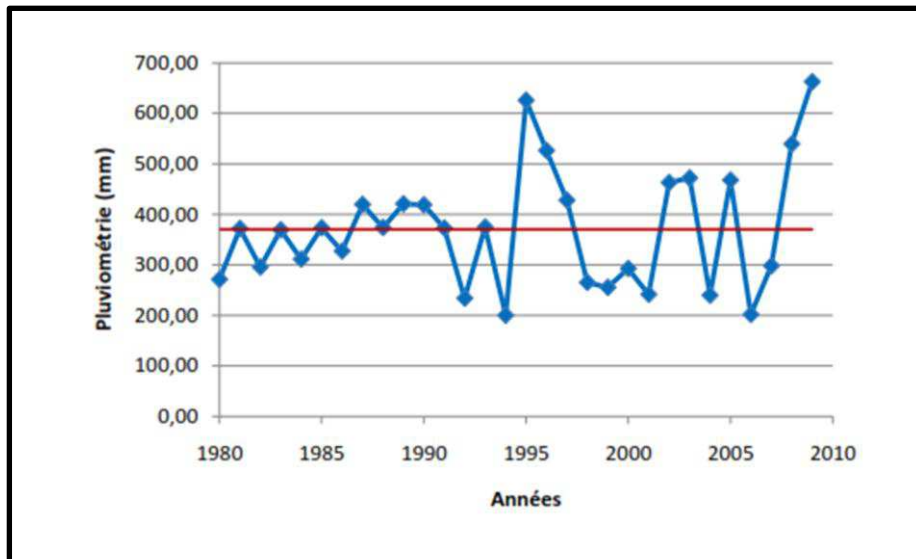


Figure 11 : Hauteur des pluies moyennes annuelles à l'échelle du bassin versant du Bouregreg (1980-2009) (source : SIGMED)

On a complété la figure précédente (figure 8) par le calcul de la somme cumulée des écarts annuels des précipitations par rapport à la moyenne de référence (figure 12).

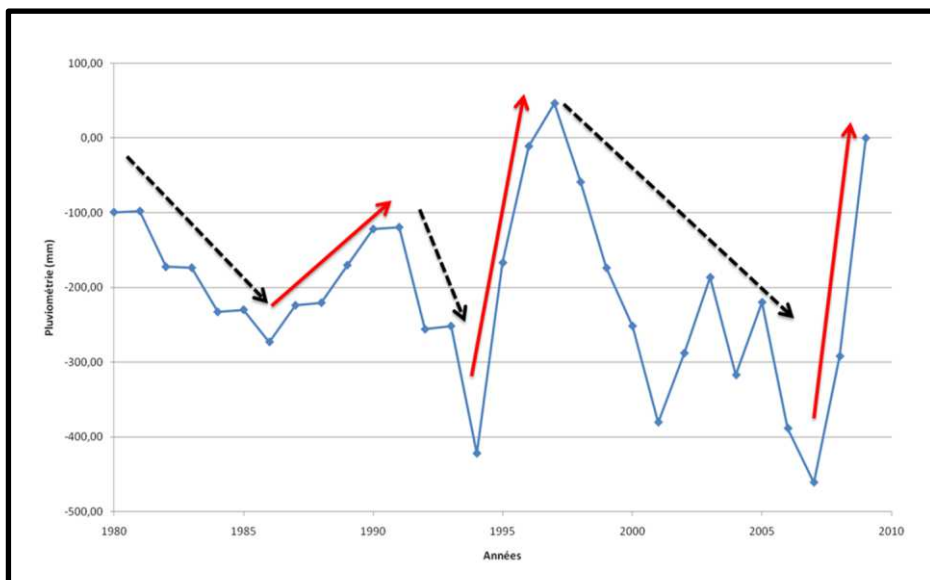


Figure 12 : Tendances générales de la pluviométrie sur le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009 : variation du « CUSUM »

On peut subdiviser alors la pluviométrie entre 1980 et 2010 en 6 périodes :

- ✓ 1980-1986 : sèche ;
- ✓ 1986-1991 : humide ;
- ✓ 1991-1994 : sèche ;
- ✓ 1994-1997 : humide ;
- ✓ 1997-2007 : sèche ;

✓ 2007-2009 : humide.

III.1.4 Résultats et analyses des cartes d'occupation du sol

Ce chapitre exposera les résultats statistiques de toutes les classes en surface et en pourcentage obtenus lors de la classification supervisée et analysera ces résultats année par année en se basant sur les données pluviométriques et les données issues des campagnes agricoles afin de démontrer que pendant la période de l'étude, le bassin a subi un ensemble de variation d'origine naturelle ou humaine, ce qui a rendu ce dernier très sensible aux phénomènes de dégradation des sols et précisément à l'érosion.

- **En 1985**

Le graphe ci-après illustre les résultats issus de la classification supervisée pour le mois d'avril de l'année 1985 :

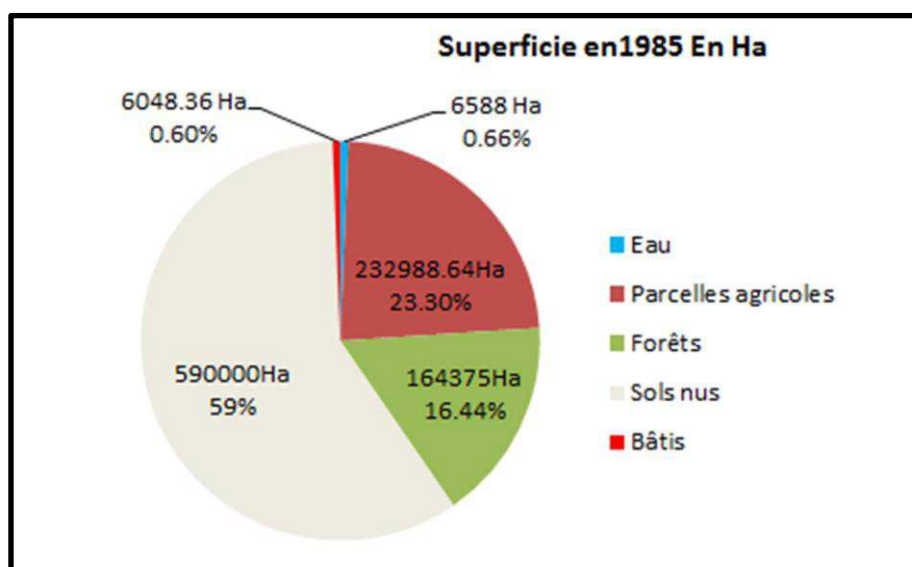


Figure 13 : Occupation du sol de l'année 1985 en pourcentage et en surface

L'image satellitaire Landsat TM5 de 1985 a été prise le mois d'avril, la figure 14 montre qu'on était face à une saison pluvieuse (humide).

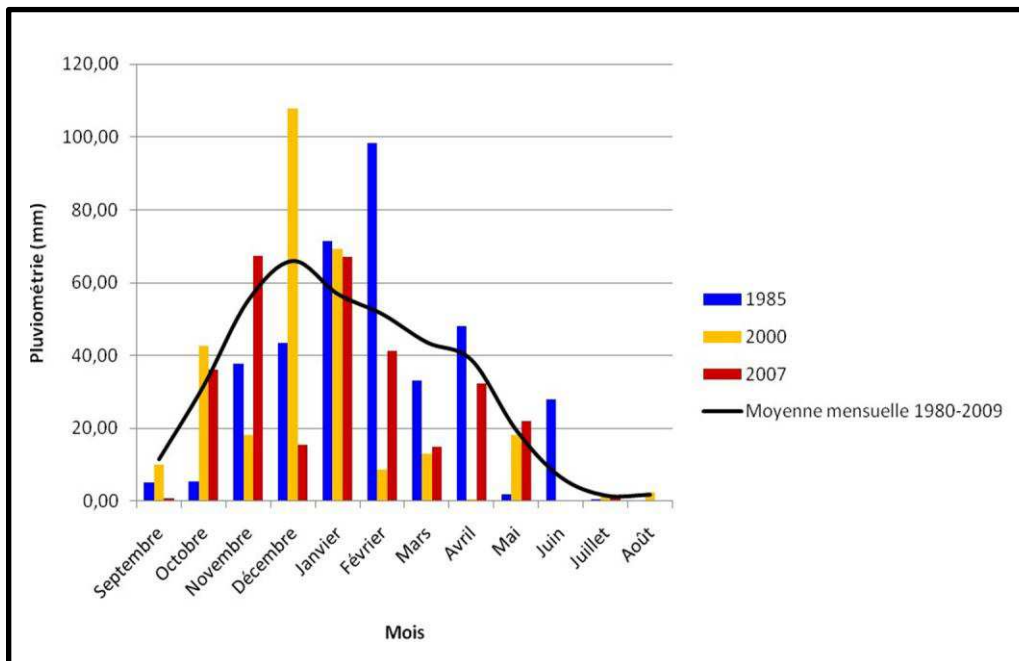


Figure 14 : Pluviométrie moyenne mensuelle à l'échelle du bassin versant du Bouregreg en 1985, 2000, 2007

Deux mois avant la prise de vue de l'image, le bassin a connu d'importantes précipitations avec une pluviométrie de 100 mm, le mois de mars, la pluviométrie est restée proche de la moyenne mensuelle dans la période de 1980 et 2009.

Cela peut justifier les résultats obtenus à partir de la classification, les pluies tombées dans les deux mois qui précédaient la date de prise de vue de l'image ont favorisé le bon développement des surfaces agricoles et du couvert végétal même si la période entre 1980 et 1986 est considéré comme sèche.

- **En 2000**

L'image satellitaire Landsat de 2000 a été prise le mois de mai. Cette année a été marquée par une sécheresse qui a frappé notre zone d'étude, seuls les mois de décembre et janvier ont connu des précipitations importantes avec une pluviométrie qui a dépassé légèrement la moyenne mensuelle de cette période. Les mois qui ont précédé la date de prise de vue de l'image ont été marqués par un déficit de précipitation surtout le mois d'avril avec une pluviométrie de seulement 1mm sachant que la moyenne dans cette période est de 39mm.

Ce manque de pluie justifie les résultats statistiques de la carte d'occupation du sol de l'année 2000 avec un taux de recouvrement des parcelles agricoles de seulement 3,88% (figure 15).

Il faut noter que cette image satellitaire a été prise par un capteur ETM+, ce dernier est différent de ceux des autres images.

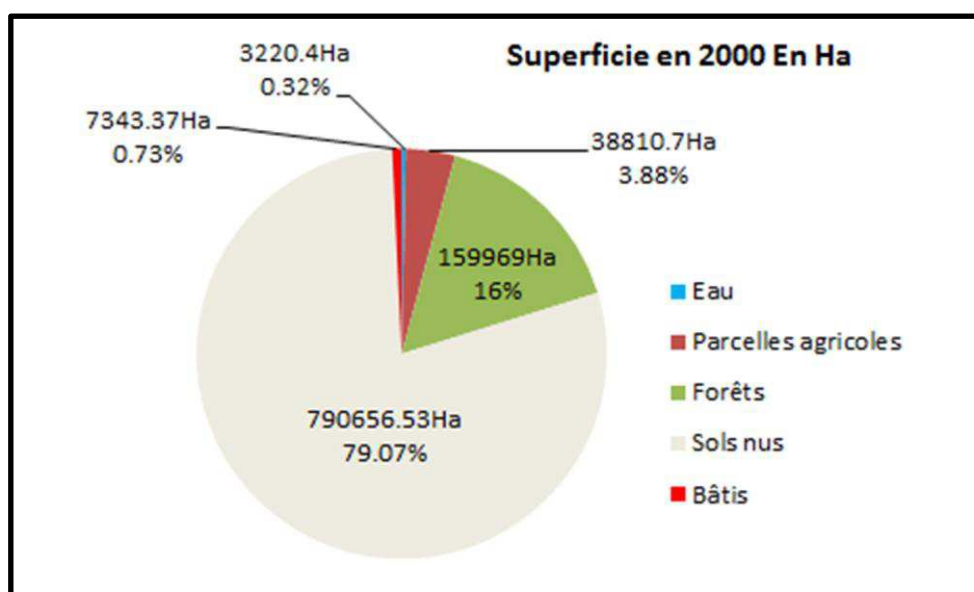


Figure 15 : Occupation du sol de l'année 2000 en pourcentage et en surface

Les conséquences de cette sécheresse apparue à partir du mois de février ont été catastrophiques pour l'agriculture (figure 16) et c'est remarquable aussi dans le graphe (figure 15) surtout dans la région de Maaziz et Rommani ainsi que dans le nord-est du bassin dans la commune rurale de Sehoul.

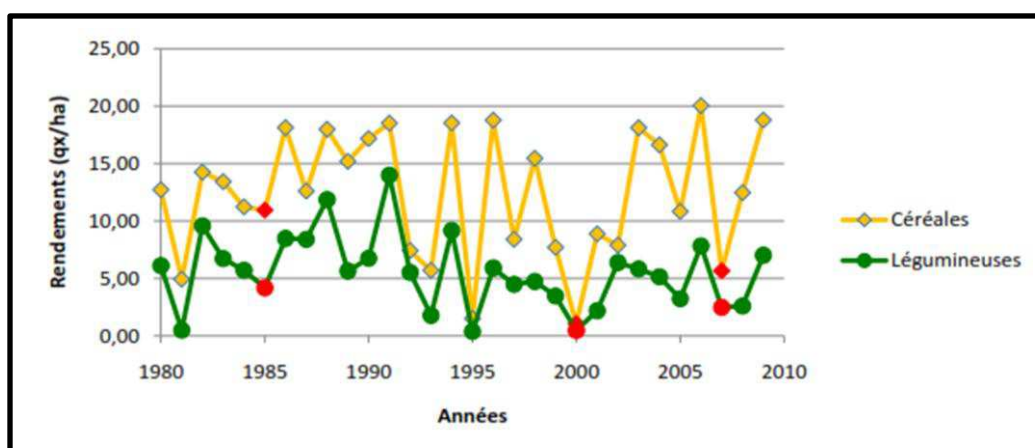


Figure 16 : Evolution des rendements céréaliers et de légumineuses de 1980 à 2009 sur les provinces de Rabat et de Khémisset (source : Campagnes agricoles, Ministère de l'Agriculture)

Durant cette année, les sols ont été fragilisés à cause de la diminution considérable de la couverture végétale et l'augmentation des sols nus favorisant ainsi le ruissellement et la formation d'une croute de battance dans les prochaines fortes précipitations.

- **En 2007**

À l'exception du mois de décembre, la pluviométrie était favorable pour satisfaire les besoins des cultures, les mois qui précédaient la date de prise de vue de l'image (mois de mars) ont connu d'importantes précipitations. La pluviométrie était de 68mm (figure 14) en janvier ce qui correspond un peu près à la moyenne mensuelle dans la période de 1980-2009, la même chose pour le mois de février avec 41mm. Ces conditions pluviométriques ont permis d'avoir un rendement inférieur deux fois à celui de l'année 1985. Le rendement des céréales est de 5.65 qx par ha et celui des légumineuses est de 2.46qx/ha (figure 16).

Les résultats de la classification supervisée sont illustrés dans la (figure 17).

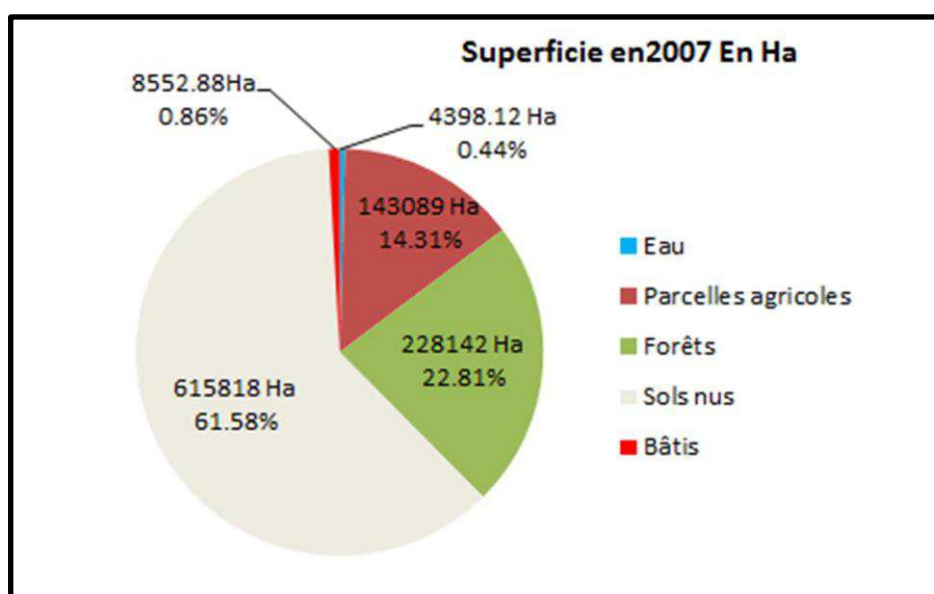


Figure 17 : Occupation du sol de l'année 2007 en pourcentage et en surface

- **En 2011**

Cette image a été prise au mois de mai. Suite à un manque de données de cette année, on a procédé à une série de témoignages pour connaître les conditions pluviométriques de cette année-là. Ces témoignages ont indiqué que cette année a été marquée par une pluviométrie importante, du coup, on peut inclure cette année dans la période humide qui a débuté en 2007.

Les résultats de la classification supervisée montrent un fort pourcentage de la classe sols nus, cela peut être justifié non pas par le manque des précipitations cette année-là, mais à la date de prise de vue de l'image qui coïncide avec la période de récolte (début mai). Donc une grande partie des sols nus ne sont en réalité que des parcelles agricoles.

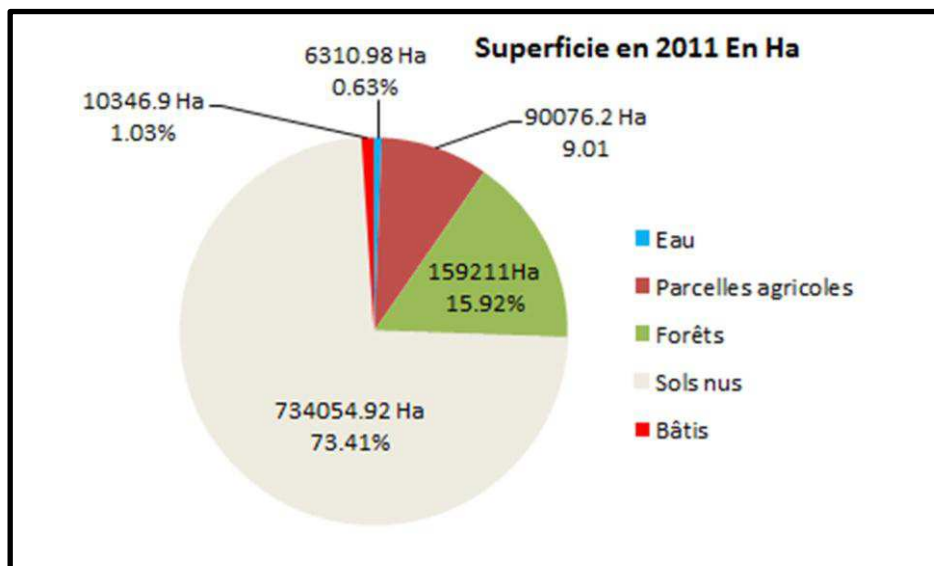


Figure 18 : Occupation du sol de l'année 2011 en pourcentage et en surface

Dans cette période, la forêt a subi des dégradations essentiellement à cause du :

- ✓ Défrichage (figure 19) : On met l'espace boisé en culture, en pâturage ou on l'urbanise ;
- ✓ Prélèvement du bois : La destruction du bois de forêts pour des utilisations illégales ;
- ✓ Surpâturage : la surexploitation des ressources végétales et le prolongement des périodes de séjour dans un même endroit ont des effets négatifs et favorisent le phénomène d'érosion;
- ✓ Les incendies : La forêt marocaine méditerranéenne est inflammable. Selon le HCEF, la quasi-totalité des feux de forêts est d'origine humaine soit par imprudence, soit d'une façon intentionnelle.



Figure 19 : Changement de destination de la forêt entre 1985 et 2011

Le bassin a été marqué surtout entre les années 2007 et 2011 par une augmentation des surfaces en eau, cela est lié essentiellement à la hausse de la hauteur d'eau du barrage (Sidi Mohammed Ben Abdellah) comme on peut le constater sur les images ci-dessous.

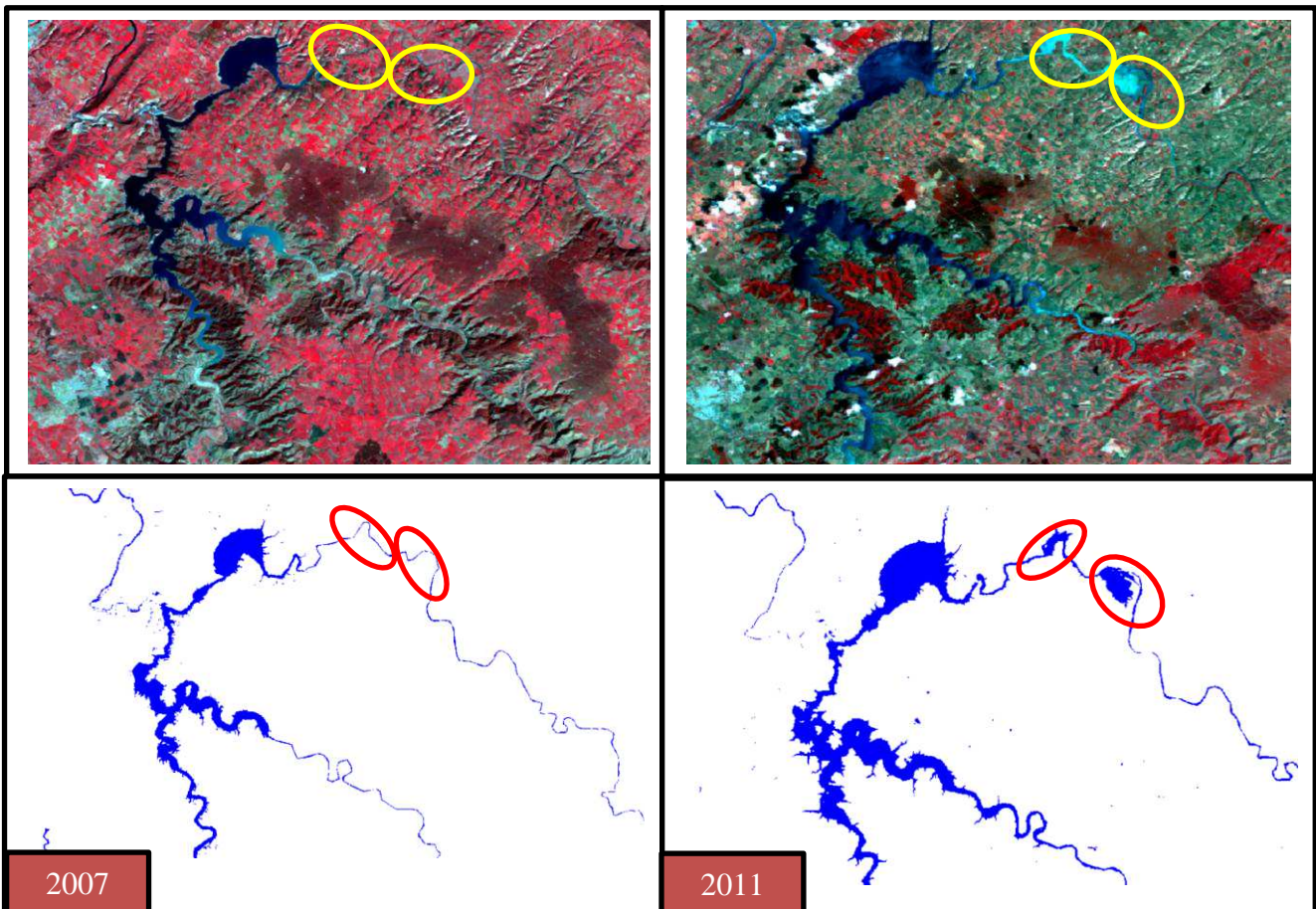


Figure 20: Différence entre le cours d'eau principal en 2007 et 2011

- **Conclusion**

Cette période a été marquée par l'instabilité spatio-temporelle des régimes pluviométriques. La succession d'années climatiques défavorables dans le bassin versant du Bouregreg ont conduit à une régression remarquable du couvert végétal et à l'affaiblissement de la capacité de certaines espèces à se régénérer, sans oublier, les interventions négatives de l'homme (incendies-urbanisation-déforestation..). Ce qui a exposé le bassin du Bouregreg à plusieurs phénomènes de dégradations et pertes des terres et plus particulièrement à l'érosion.

III.1.5 L'évolution du bâti entre 1985 et 2011

Dans ce chapitre, on va analyser l'évolution de la classe (Bâti) qu'on peut librement comparer sans contrainte de la date de prise de vue ou bien des conditions météorologiques.

Cette période a été marquée par une progression remarquable de la superficie du bâti qui a progressé de 71,07% durant cette phase.

L'évolution et la répartition de la population dans le bassin versant du Bouregreg entre 1982 et 2004 sont illustrées dans le tableau7 et la figure 21.

Tableau 7 : L'évolution de la population entre 1982-1994 et entre 1994-2004 et entre 1982-2004

Bouregreg	1982-1994		1994-2004		1982-2004	
	TC(%)	TCAM(%)	TC(%)	TCAM(%)	TC(%)	TCAM(%)
Population totale	33,19	2,42	16,99	1,58	55,83	2,04
Population Rurale	16,49	1,28	3,51	0,35	20,58	0,85
Population urbaine	40,66	2,88	21,99	2	71,58	2,48

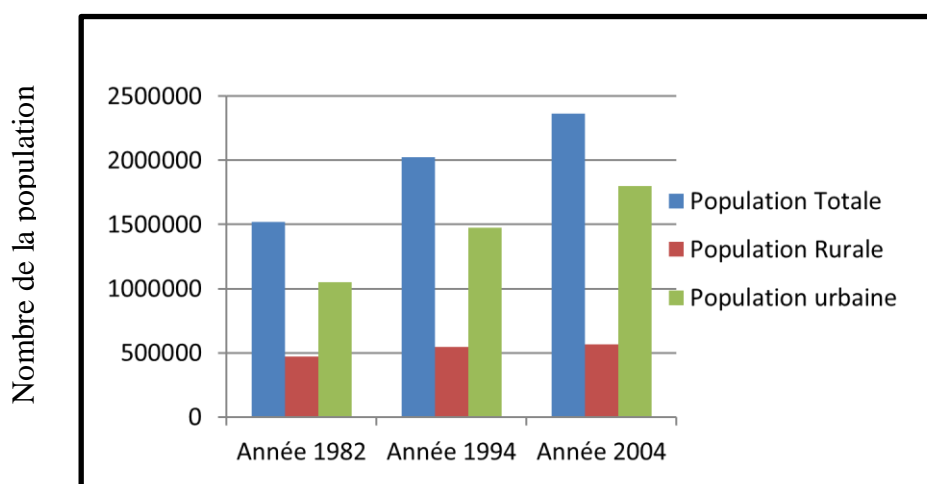


Figure 21 : Répartition de la population dans le bassin versant du Bouregreg

Cette évolution, est due aux changements socio-économiques qu'a connus la population au cours des 10 dernières années, lesquels ont eu des répercussions appréciables sur les mentalités et les attitudes vis-à-vis de la procréation. Les difficultés et les contraintes économiques, le désir de plus en plus assoiffé d'ascension sociale, l'accès à l'information sous toutes ses formes, sont autant de facteurs qui ont été à la base de ces changements. (HCP 2004).

Cependant, la période entre 1994 et 2004 a connu un ralentissement de l'accroissement démographique, cette baisse peut être justifié par :

- ✓ La politique de planification familiale instauré par l'état ;
- ✓ La fécondité, son indice a baissé entre les années 1994 et 2004, le nombre moyen d'enfants par femme était de 2,7 enfant dans les années 90, ce chiffre a été réduit à 2,1 en 2004 ;
- ✓ L'âge au premier mariage des femmes a relativement augmenté.

On note aussi l'accroissement considérable de sa population urbaine, cette dernière qui ne représentait que 40,66 % en 1982 a dépassé le cap de 70% en 2004 avec une augmentation de 751 123 personnes passant de 1 049 298 en 1982 à 1 800 421 en 2004, soit un taux d'accroissement annuel moyen de 2,04%.

Contrairement à la population urbaine, la population rurale s'est accrue seulement de 96 572 personnes passant de 469 149 en 1982 à 565 721 en 2004, soit un accroissement annuel moyen de 0,85%.

En 2004, cette population représente environ 24% de la population totale du Bouregreg et reste inégalement répartie entre les différentes provinces du bassin. La province de Khémisset englobe à elle seule 49 % de la population rurale suivie de la province de Khénifra.

Parmi les causes de cette concentration urbaine, on cite l'exode rurale, les zones urbaines du Bouregreg accueille non seulement la population rurale de cette région mais aussi la population rurale des autres villes du pays, la cause principale de cette migration est principalement économique (mauvaises récoltes entraînées par les années de sécheresse, le chômage, manque d'infrastructure ...).

Les villes concernées par ce fléau social (l'exode rural) sont essentiellement la province de salé avec une augmentation de la population entre 1982 et 2004 d'environ

410 000 personnes suivies par la province de Skhirat-Témara avec une augmentation de 190 900 personnes.

La population à la recherche d'emplois et d'un mode de vie meilleur s'installe dans de ces deux villes, tout d'abord pour rester proche de la capitale administrative du pays Rabat, ville où il y'a plus d'opportunité de trouver un emploi, et ensuite pour éviter le coût foncier de la ville de Rabat.

Cette forte migration et augmentation de la population a provoqué l'extension et la construction de nouvelles agglomérations urbaines telles que (salé el Jadida à proximité de Salé et Tamesna à proximité de Témara) au détriment de l'espace vert (figure 22).

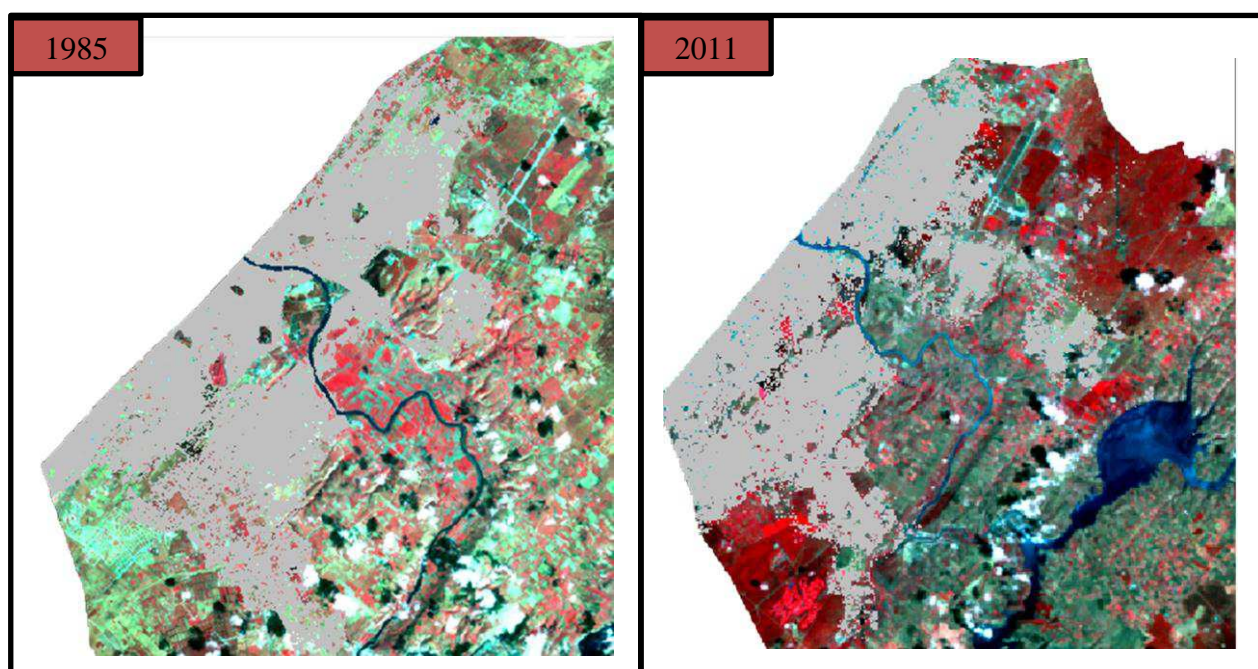


Figure 22 : L'évolution du bâti entre 1985 et 2011(Source : Résultats de la classification supervisée)

On constate, à partir de ces données statistiques que le bassin versant du Bouregreg subit une urbanisation intensive qui a entraîné la région dans des problèmes socio-économiques dans l'avenir.

La croissance et l'extension du bâtis se traduisent par la modification des conditions naturelles du sol, ce qui va modifier le cycle naturel de l'eau. La conséquence de ces modifications est l'augmentation des volumes d'eau qui ruissellent sur le sol. C'est pourquoi, les sols deviennent très sensibles à l'érosion.

III.1.6 Conclusion

Dans la période entre 1985 et 2011, le bassin versant a connu une forte croissance démographique et plusieurs modifications dans son paysage sous l'effet surtout du climat ce qui a rendu ce bassin très sensible à l'érosion.

Le prochain chapitre quant à lui va exposer les résultats de notre modélisation des processus érosifs dans le bassin versant du Bouregreg.

III.2 La modélisation des processus érosifs

L'érosion est présente partout dans le bassin versant du Bouregreg. L'identification des zones sensibles à l'érosion est une obligation. D'où l'intérêt de notre étude. Dans cette partie, nous avons généré les diverses cartes thématiques correspondant aux divers facteurs. L'érosion est donc modéliser grâce aux croisements de ces cartes et en se servant de l'outil Knowledge Engineer qui nous permis de programmer notre arborescence.

III.2.1 La carte d'inclinaison des pentes³⁰

L'inclinaison des pentes est un facteur essentiel dans la modélisation de l'érosion. D'après la carte des pentes, 27,58% sont des pentes faibles, cette catégorie, on la retrouve dans le palier inférieur et intermédiaire. Les pentes forte et très forte représentent quant à eux 22,88 % de la surface du bassin versant, elles sont localisées dans le haut pays dans la zone montagneuse du bassin versant du Bouregreg.

III.2.2 La carte d'érodibilité³¹

La carte d'érodibilité des sols dans le bassin versant du Bouregreg indique que ce dernier est fortement sensible à l'érosion. Seulement 13,5 % de la surface du bassin n'est pas vulnérable à l'érosion et un peu près les deux tiers du bassin est fortement voire très fortement vulnérables.

III.2.3 La carte de sensibilité à l'érosion

La carte de sensibilité à l'érosion (Figure 23) a été effectuée en combinant les trois facteurs suivant l'arborescence³². Cette dernière a généré six classes en fonction de leur

³⁰ Annexe 10

³¹ Annexe 12

sensibilité à l'érosion. Chaque pixel de cette carte dispose d'un indice de vulnérabilité compris entre 1 et 6.

Le résultat de la modélisation du risque érosif dans le bassin versant du Bouregreg nous a permis de distinguer six types d'aléa dans la zone :

- ✓ Les zones à vulnérabilité nulle correspondent aux bâtis et au cours d'eau ;
- ✓ Les zones à vulnérabilité très faible (Érosion type 1) ;
- ✓ Les zones à vulnérabilité faible (Érosion 2) ;
- ✓ Les zones à vulnérabilité moyenne (Érosion 3) ;
- ✓ Les zones à vulnérabilité forte (Érosion 4) ;
- ✓ Les zones à vulnérabilité très forte (Érosion 5) ;
- ✓ Les zones à vulnérabilité maximale (Érosion 6).

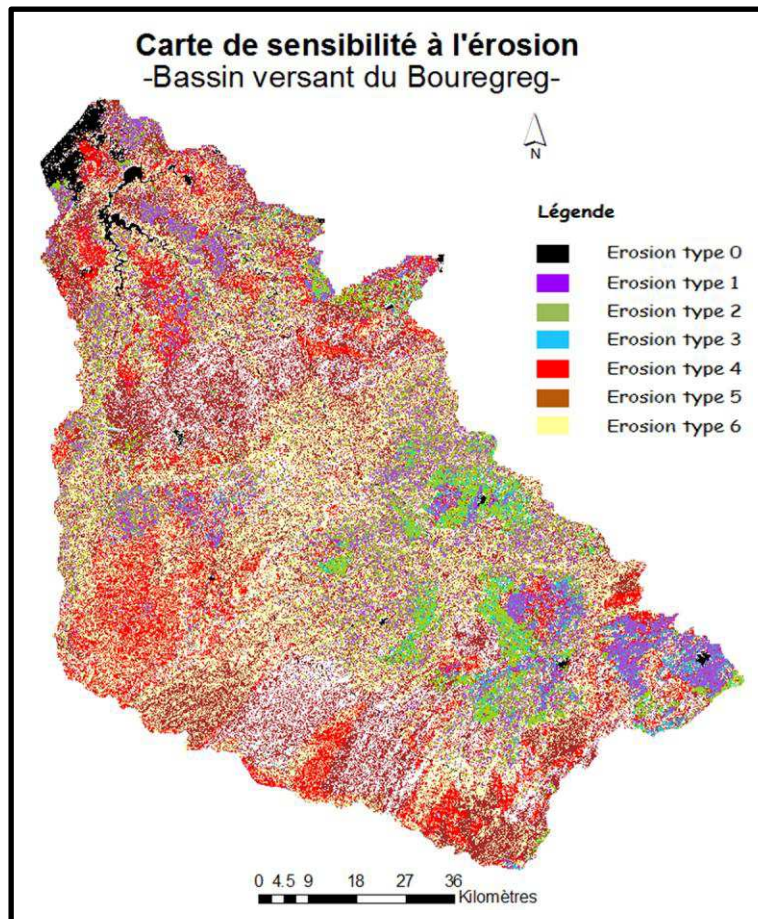


Figure 23 : Carte de sensibilité à l'érosion

III.2.4 Conclusion

Sur notre dernier résultat, nous obtenons une carte ayant comme gamme de sensibilité à l'érosion de 1 à 6. Cela permet de mettre en évidence le potentiel érosif du bassin versant du Bouregreg. L'effort fourni pour la gestion et la protection des bassins versants est crucial et onéreux et nécessite souvent l'application des modèles lourds et exigeants en matière de temps, du matériel et d'information.

Conclusion et recommandations

L'analyse des cartes d'occupation du sol fruit d'une classification supervisée des images Landsat TM5 et ETM+5 a montré que le bassin versant du Bouregreg a été marqué dans les trente dernières années par une évolution et un changement remarquables de son paysage sous l'effet bien évidemment de plusieurs facteurs.

Les changements les plus tangibles concernent le bâti qui a progressé d'une façon éminente surtout dans les villes limitrophes de la capitale du royaume Rabat et la croissance démographique qui s'est faite de manière importante.

Les conséquences de cette forte croissance démographique résident dans l'obligation de trouver de nouveaux espaces pour urbaniser au détriment de la forêt et les zones agricoles. Ces derniers en plus des sols nus ont connu aussi un changement, la surface des sols nus calculé par la classification est due certes au phénomène de l'érosion responsable de cette dégradation des sols, mais aussi à la date de prise de vue de ces images qui coïncide avec la période de la récolte des terres.

La modélisation des processus érosifs montrent que le bassin versant du Bouregreg est fortement exposé à l'érosion d'où la nécessité pour l'État et pour les collectivités et les agences locales d'intervenir pour lutter contre ce fléau qui a des répercussions surtout au niveau socio-économique.

Les résultats obtenus dans cette recherche viennent confirmer le rôle de télédétection et les SIG dans les études spatio-temporelles de l'occupation du sol ainsi que dans la modélisation de certains phénomènes naturels tels que l'érosion.

Toutefois, on peut lister un certain nombre de recommandations susceptible d'améliorer nos résultats :

- ✓ Dans l'étude spatio-temporelle, nous recommandons d'utiliser des images à très haute résolution (Images Spot par exemple) et d'adopter la méthode de classification orientée objet, méthode qui donnera sans aucun doute plus de détails et plus de précisions sur l'occupation du sol dans le bassin versant du Bouregreg ;
- ✓ On peut enrichir notre modélisation par d'autres facteurs et notamment la carte d'occupation du sol issu de la classification orientée objet et une carte des précipitations et introduire aussi les interventions négatives de l'homme;

- ✓ Créer une base de données opérationnelle et à jour pour les prochains stagiaires pour leur aider à trouver facilement les données sur le bassin versant du Bouregreg pour leurs études.

Bibliographie

- **AUZET, A.V., KIRKBY, M.J., VAN DIJK, P.**, 2005. *Surface characterisation for soil erosion forecasting*. *Catena*, vol. 62, n° 2–3, p: 77–78 ;
- **BATTI A. ET DEPRAETERE C., (2007)**. *Overview of methods for modeling erosion in island settings*. Integrated Coastal Management - GERSA Project Spatial Approach - Remote Sensing, 26p;
- **BEAUDET G.**, 1969. Le plateau central marocain et ses bordures. Étude géomorphologique. Thèse es-Sciences, Université Mohamed V, Rabat (Maroc), 478 p ;
- **BEAUDIN, I.**, 2006. *La mobilité du phosphore*. Revue de littérature réalisée pour le comité ad hoc mobilité du phosphore du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada, 111p ;
- **BEN ABDELLOUAHAD S.**, 2006. Structure, dynamique et typologies physico-chimiques et phytoplanctoniques de l'estuaire du Bouregreg (Côte Atlantique marocaine). Thèse de doctorat, Université Mohamed V – AGDAL, Faculté des sciences, Rabat (Maroc), 293 p ;
- **BENKRID E.**, 2008. Etude de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la plaine du Bas Chélif (Algérie). Mémoire de Master, UMR HSM, Montpellier (France), 54p ;
- **BENSAID A.**, 2006. SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble (France), 318p ;
- **BENSALAH N.**, 2008. Indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion en vue d'une gestion durable des eaux et des sols (Bassin versant de Bouregreg). Thèse de doctorat de géographie, Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Rabat (Maroc) ;
- **BOGGS G.S., DEVONPORT C, EVANS K.G., SAYNOR M.J. ET MOLIERE D.R.**, 2001. Development of a GIS based approach to mining risk assessment. Supervising Scientist Report, n° .159, Environment Australia, Darwin, 49 p;
- **BOU KHEIR R., GIRARD M., SHABAN A., KHAWLIE M., GHALEB F., DARWICH T.**, 2001. *Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban*", *Revue Télédétection*, vol. 2, n° 2, p : 79-90 ;

- **BOUNOUIRA H.**, 2007. Etude des qualités chimiques et géochimiques du bassin versant du Bouregreg. Thèse de doctorat en sciences physiques, Université Ibn Tofail, Faculté des sciences, Marrakech (Maroc) ,295 p ;
- **CEFLCD**, 1994. Plan National d'Aménagement des Bassins Versants. Rapport desynthèse : 47p ;
- **CHETOUANI Y.**, 2012.Impact de l'urbanisation sur les terres agricoles irriguées : cas du périmètre El Beht(Maroc). Mémoire de TFE, ESGT, Le Mans (France), 92 p ;
- **CORINE**, 1992. *Soil Erosion Risk and Important Land Resources in the Southern Regions of the European Community*. EUR 13233, Luxembourg;
- **Direction de la planification agricole et de l'economie**, 1996. Recensement Général Agricole. Régions Rabat-Salé-Zemmours-Zaers ;
- **DUMAS, P. ET PRINTEMPS J.**, 2010. *Assessment of Soil Erosion Using USLE Model and GIS for Integrated Watershed and Coastal Zone Management in the South Pacific Islands* .Proceedings Interpraevent, International Symposium in Pacific Rim, Taipei, Taiwan, pp. 856-866.
- **EL GAROUANI A., CHEN H., LEWIS L., TRIBAK A., ABAHROUR M.**, 2008. *Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du Sig Idrisi au Nord-Est du Maroc*. Revue Télédétection, vol. 8, n° 3, p :193-201 ;
- **FAO**, Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (CGES). Bulletin Pédologique de la FAO n°70, 420p ;
- **GEORGES Y.**, (2008). Contribution à l'évaluation de l'érosion dans le bassin versant de la rivière grise en Haiti. Mémoire de Master, faculté universitaire des sciences agronomiques, Liège(Belgique) ,90p ;
- **GHANEM H.**, 1981.Classification et répartition des sols dans la région des Zairs, de la basse Chaouia et des Sehouls, Méséta Atlantique Marocaine. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Gand, (Belgique) ;
- **HADIR S.**, 2010. Modélisation du ruissellement et de l'érosion par le modèle STREAM dans le bassin versant de l'Oued Saboun. Mémoire de PFE, IAV, Rabat (Maroc) ,175p;

- **KARROUMI M.**, 2009. Apport de l'analyse d'image basée objets pour l'élaboration d'une carte d'occupation urbaine à partir d'une image à THRS. Mémoire de PFE, IAV, Rabat (Maroc) ,93p ;
- **L'AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DU BOUREGREG ET DE LA CHAOUIA.** Les bassins hydrauliques du Maroc, 147-167 ;
- **LAHLOU H., HAOUJAR F.**, 2011. Extraction des objets cartographiques à partir des images satellitaires à THRS. Mémoire de PFE, IAV, Rabat (Maroc), 94p ;
- **LE BISSONNAIS Y.,THORETTE J., BARDET C., DAROUSSIN J.**, 2002. *L'érosion hydrique des sols en France.* INRA, IFEN, 106p ;
- **MATI B.M., MORGAN R.P.C., GICHUKI F.N., QUINTON J.N., BREWER T.R. ET LINIGER H.P.**, 2000. *Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: A case study of the Upper EwasoNg'iro North basin of Kenya .* International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation , vol. 2, n° .2, p: 78-86;
- **MINISTERE DE L'AGRICULTURE.** Campagnes agricoles de 1980 à 2009. Provinces de Rabat et de Khémisset. ;
- **MOUSSOUFOU T.**, 2009.Méthodologie et application de détection de changements à partir d'images satellitaires. Mémoire de PFE, IAV, Rabat (Maroc), 108p ;
- **NEKHAY O., AZZIAZA M., BOERBOOM L.**, 2009. *Evaluation of soil erosion risk using Analytic Network Process and GIS: A case study from Spanish mountain olive plantations,* Journal of Environmental Management, p: 3091–3104;
- **PINTE K.**, 2006. Diagnostic de l'érosion sur le bassin versant de la baie du Robert en Martinique. Mémoire de Master, Institut national agronomique Paris-Grignon, 124 p ;
- **ROOSE E., DUGUE P. ET RODRIGUEZ L**, 1992. *La GCES, une nouvelle stratégie de lutte antiérosive appliquée à l'aménagement de terrasses en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso.* Revue Bois et Forêts des Tropiques, no 233, 3^e trimestre;
- **Roose E.** 1977. Erosion et Ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesurée parcelles expérimentales. Travaux et Doc. ORSTOM Paris n° 78, 108 p ;
- **Roose E.**, 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO ;

- **Royaume du Maroc, Haut-Commissariat au Plan.** Dynamique urbaine au Maroc et bassins migratoires des principales villes. P 91 et 71 ;
- **Royaume du Maroc, Haut-Commissariat au Plan.** Dynamique urbaine au Maroc et bassins migratoires des principales villes ;
- **Royaume du Maroc, Haut-Commissariat au Plan.** Caractéristiques socio-économiques et démographiques de la population de la région de : Rabat-Salé-Zemmour-Zaer. D'après le Recensement Général de la population et de l'habitat de 2004.
- **SAMAALI H.,** 2011. Etude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Mejerda par télédétection et systèmes d'informations géographiques. Thèse du Doctorat en Géographie, Université de Tunis, Tunis(Tunisie), 390p ;
- **VANMAERCKE M., MAETENS W., POESEN J., JANKAUSKAS B., JANKAUSKIENE G., VERSTRAETEN G, DE VENTE J.,**2012. *Regional comparison of hillslope erosion rates with catchment sediment yields for Europe.* Journal of Soils and Sediments 12, p: 586-602;

Résumé

Notre zone d'étude porte sur le bassin versant du Bouregreg au nord-ouest du Maroc. Il a une superficie totale de l'ordre de 10 000 km² et une forme elliptique. La région recèle des richesses naturelles immenses (eau douce, bois, produits agricoles, poissons...) ainsi qu'une forte productivité de ses écosystèmes.



Figure 24 : Photo de notre zone d'étude

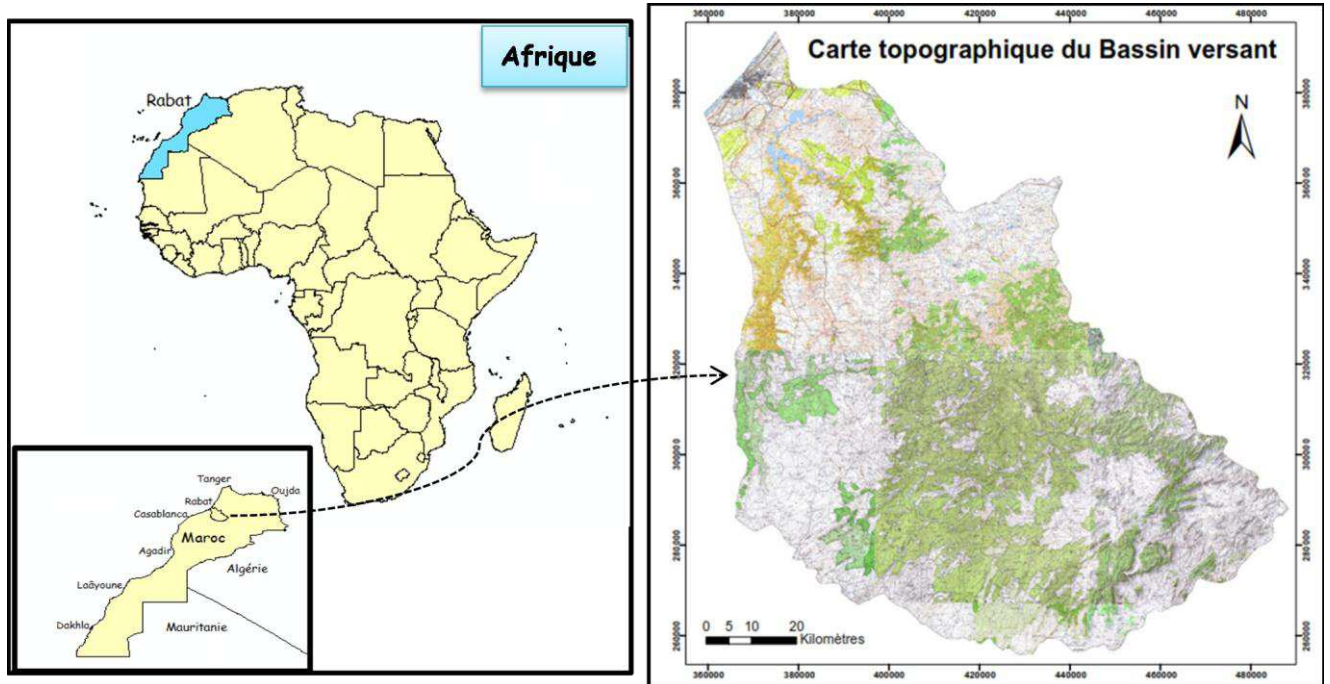


Figure 25 : Situation géographique du bassin versant du Bouregreg

Les forts cumuls de pluie, les occupations peu couvrantes du sol, les pentes fortes, les pentes longues, la déforestation, les surpâturages, l'artificialisation et l'imperméabilisation des surfaces contribuent à accentuer les effets importants de l'érosion des sols dans le bassin versant.

Les conséquences occasionnées par l'érosion sont généralement des dégâts environnementaux (la pollution des eaux, la perte en sol et en éléments nutritifs, la désertification) accompagnés de dégâts matériels à court et à long terme.

Le bassin versant du Bouregreg connaît effectivement de sérieux problèmes qui se traduisent par une forte sensibilité du bassin aux différents facteurs de l'érosion, ce qui nous a poussés à choisir ce bassin pour notre étude.

L'objectif de cette étude était dans un premier temps, d'étudier le changement de l'occupation du sol dans le bassin versant du Bouregreg à partir des images satellitaires couvrant la zone d'étude et dans un second temps, la recherche du modèle qui permet de représenter le processus érosif du bassin à travers l'intégration d'un ensemble de facteurs favorisant ce phénomène pour faire ressortir à la fin du travail une carte de risques, document servant les planificateurs et les décideurs à l'aménagement et à la gestion de l'espace.

Pour étudier l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant du Bouregreg et par la suite créer une carte de sensibilité à l'érosion. La démarche a été tout d'abord d'appliquer des prétraitements (les corrections géométriques et les corrections radiométriques) sur les données spatiales utilisées qui sont quatre images satellitaires multi spectrales Landsat datant successivement des années 1985,2000 ,2007 et 2011. Ensuite, d'effectuer une classification supervisée qui a généré cinq classes d'occupation du sol grâce au logiciel de traitement des images ERDAS imagine 2011. L'évaluation de la fiabilité de notre classification a donné un pourcentage de la précision totale de la classification et du coefficient Kappa qui dépassent les 80%. Ces valeurs ont été jugé fiables et exploitable dans la suite de notre étude.

Les résultats de ces classifications ont dévoilé que le bassin versant du Bouregreg a été marqué dans les trente dernières années par une vraie dynamique de l'occupation du sol sous l'effet de plusieurs facteurs. Les changements les plus tangibles concernent le bâti qui a progressé d'une façon éminente surtout dans les villes limitrophe de la capitale du royaume Rabat.

La variation des conditions climatiques a influencé directement le couvert végétal qui joue le rôle de protecteur des sols contre le phénomène d'érosion. La succession d'année de sécheresse a conduit à une régression de ce couvert ce qui a rendu les sols très sensibles favorisant ainsi le ruissellement et la formation d'une croute de battance.

Les images classifiées obtenues ont été exploitées par la suite dans notre modèle d'érosion qui a été réalisé en utilisant essentiellement trois données disponibles en l'occurrence : La couverture du sol, l'inclinaison de pente (en degré), la longueur de la pente et la vulnérabilité des sols. Nous les avons classés en fonction de leur rôle et importance dans le processus érosif. Tout cela a été réalisé en créant une arborescence logique. Cette dernière a été exécutée en se servant des fonctionnalités de KnowledgeEngineer d'Erda Imagine 2011.

Le résultat est sous forme d'une carte de sensibilité à l'érosion du bassin versant. Cette dernière fait ressortir six classes en fonction de leur sensibilité à l'érosion. Chaque pixel de cette carte dispose d'un indice de vulnérabilité compris entre 1 et 6.

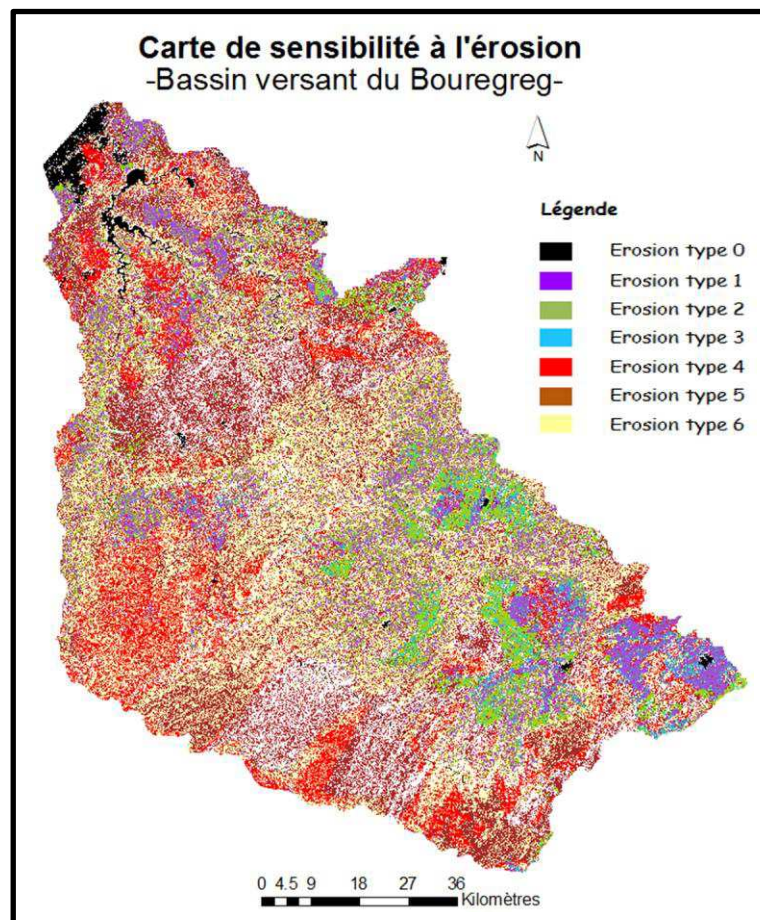


Figure 26 : Carte de sensibilité à l'érosion

L'étude de toutes les caractéristiques physiques du bassin versant du Bouregreg a permis de connaître les facteurs qui contribuent à l'érosion des sols et par conséquent, la mise en œuvre du modèle d'érosion à composante spatiale. Les résultats de la modélisation des processus érosifs étaient satisfaisants et ils ont montré que le bassin versant du

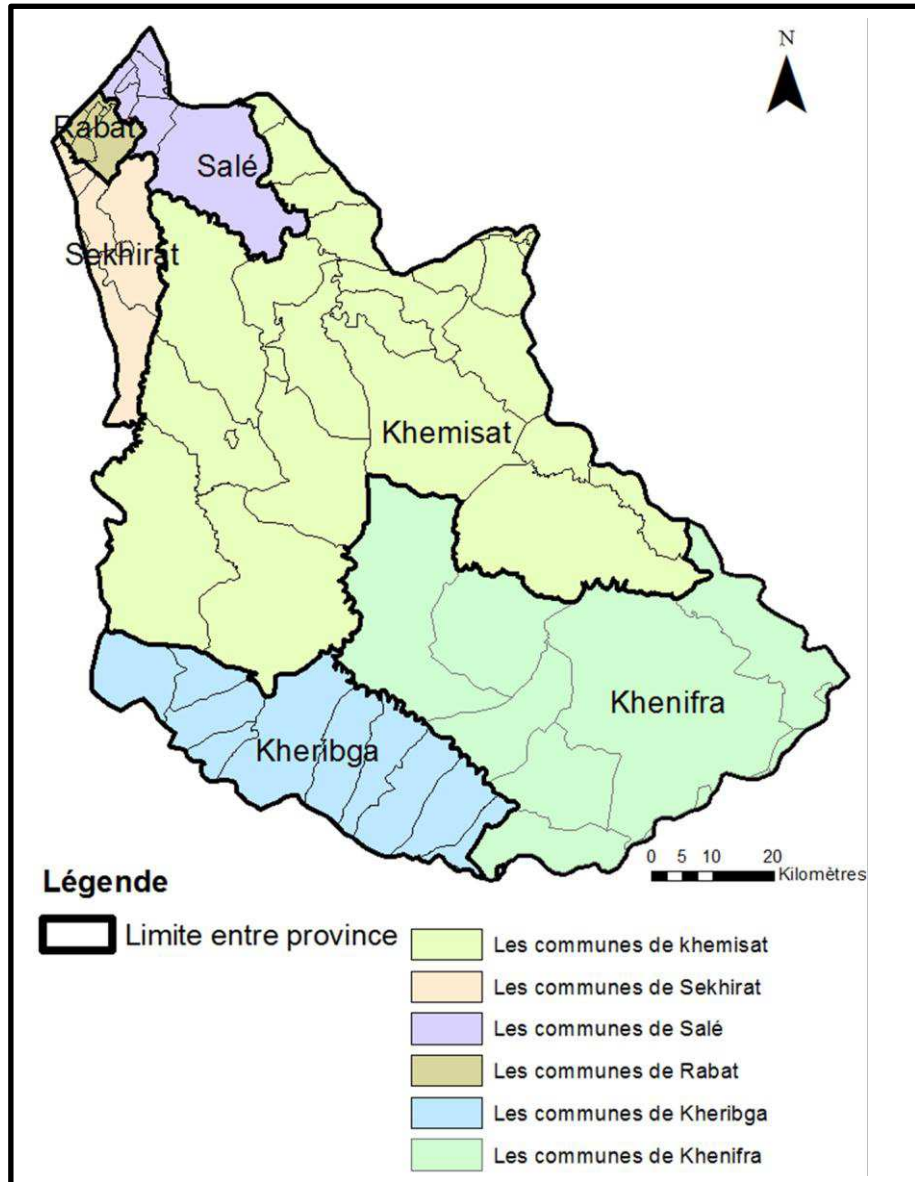
Bouregreg est fortement exposé à l'érosion. Ce travail est fastidieux car il nécessite la collecte d'une base de données spatio-temporelles multi-sources et multi-disciplines. Toutefois, Pour mieux comprendre les risques d'érosion et, par conséquent, les possibilités d'aménagement, il est nécessaire d'améliorer la résolution des données spatiales pour mieux valoriser l'apport des images satellitaires dans l'étude ce qui permet aussi l'application de la classification orienté objet dans l'élaboration de la carte d'occupation du sol et par conséquent le perfectionnement du modèle réalisé.

Table des annexes

Annexe 1 Le découpage administratif du bassin versant	71
Annexe 2 Moyennes des précipitations mensuelles et annuelles de 1980 jusqu'à 2009(Source : Sighed).....	72
Annexe 3 Carte pédologique du bassin versant du Bouregreg (Source : Sighed)	73
Annexe 4 La carte de végétation du bassin versant du Bouregreg (Source : Sighed).....	74
Annexe 6 Les cartes satellitaires Landsat.....	76
Annexe 7 Le MNT du bassin versant du Bouregreg.....	77
Annexe 8 Projection utilisée au Maroc (Lambert conforme-zone 1).....	78
Annexe 9 Les classes et les indices de chaque facteur.....	79
Annexe 10 La carte des pentes	80
Annexe 11 La carte des longueurs de pentes.....	81
Annexe 12 La carte de vulnérabilité des sols à l'érosion	82
Annexe 13 Arborescences logiques	83
Annexe 14 Images du bassin versant du Bouregreg	85

Annexe 1

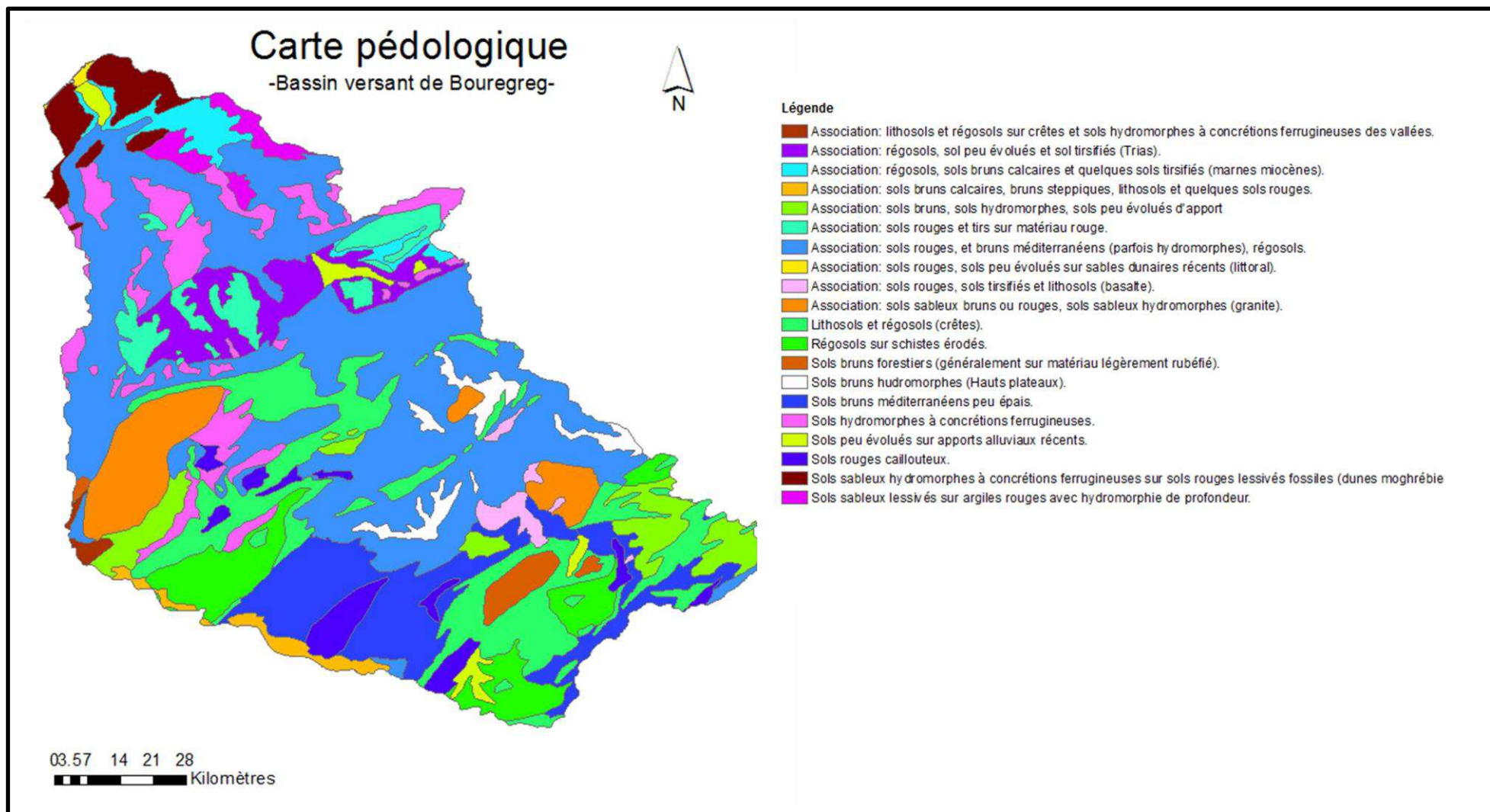
Le découpage administratif du bassin versant



Annexe 2
Moyennes des précipitations mensuelles et annuelles de 1980 jusqu'à
2009(Source : Sigmed)

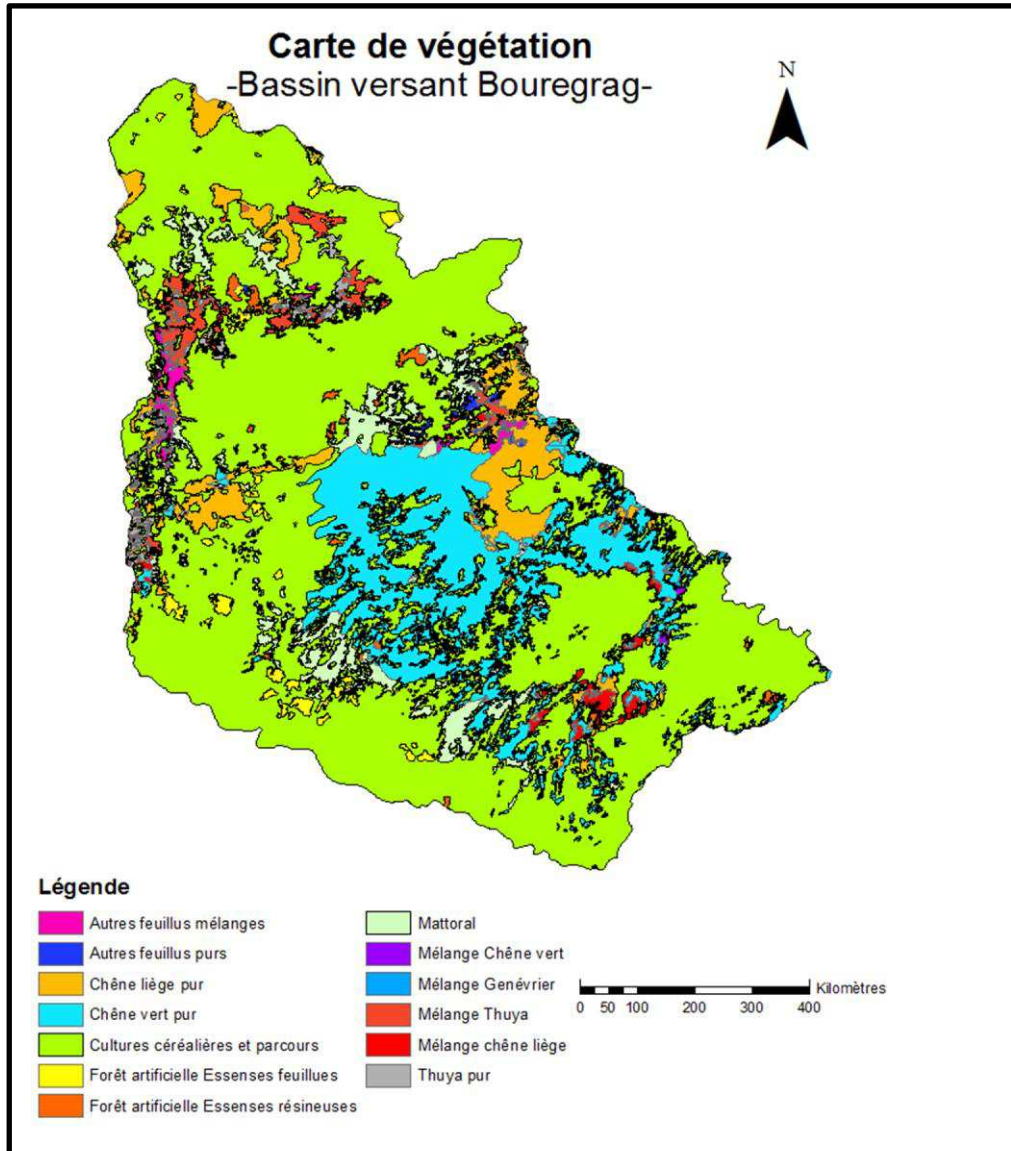
Stations	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Total Annuel
Sidi Jabeur	12,4	29,0	45,2	48,1	45,4	41,9	36,5	30,3	17,5	6,9	0,9	0,8	314,9
Aguibat Ezziar	9,5	34,8	68,7	76,1	67,8	56,6	46,6	42,7	22,4	6,9	0,5	0,9	433,5
Ras El Fathia	10,3	31,1	60,5	69,9	59,1	53,0	45,3	37,4	16,1	5,3	0,8	1,4	390,2
Lalla Chafia	12,1	30,4	49,2	52,8	51,0	45,4	40,9	40,1	17,6	5,2	0,3	0,6	345,6
Ouljet Haboub	11,9	22,0	33,3	40,5	30,6	37,6	33,6	28,4	17,6	9,5	3,5	3,9	272,4
Ain Loudah	11,0	28,7	54,3	56,9	54,3	50,1	38,0	33,2	16,6	3,9	0,9	1,2	349,1
Tsalat	16,3	34,8	62,7	77,9	67,5	64,7	55,6	42,6	27,9	11,1	5,6	4,6	471,3
Rabat-Salé	8,6	42,8	67,3	104,8	79,0	61,3	52,0	55,2	20,4	4,0	0,2	1,2	496,8
Max	16,3	42,8	68,7	104,8	79,0	64,7	55,6	55,2	27,9	11,1	5,6	4,6	496,8
Min	8,6	22,0	33,3	40,5	30,6	37,6	33,6	28,4	16,1	3,9	0,2	0,6	272,4
Moyenne mensuelle	11,5	31,7	55,2	65,9	56,8	51,3	43,6	38,7	19,5	6,6	1,6	1,8	384,2

Annexe 3
Carte pédologique du bassin versant du Bouregreg (Source : Sigmed)



Annexe 4

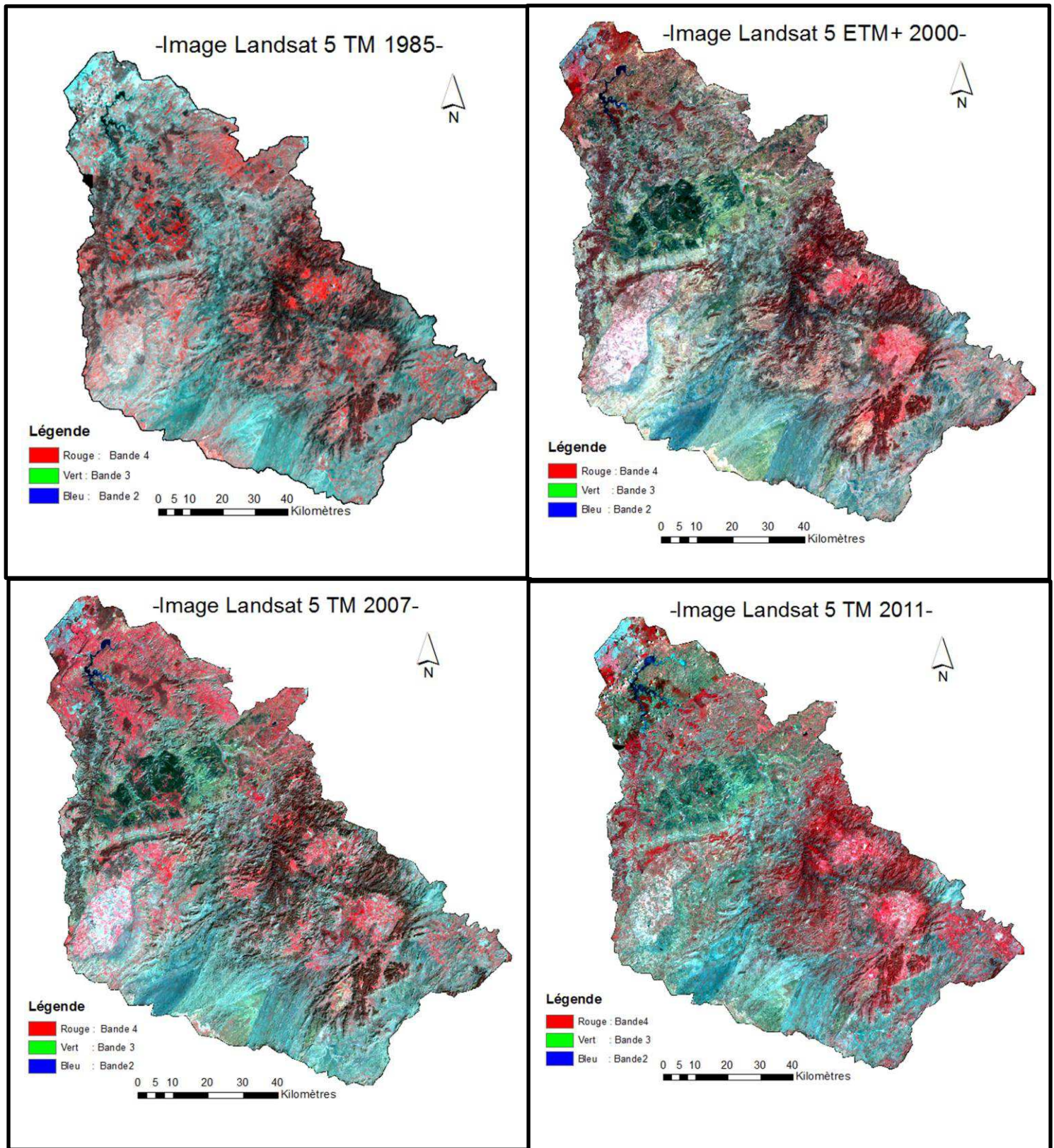
La carte de végétation du bassin versant du Bouregreg (Source : Sigmed)



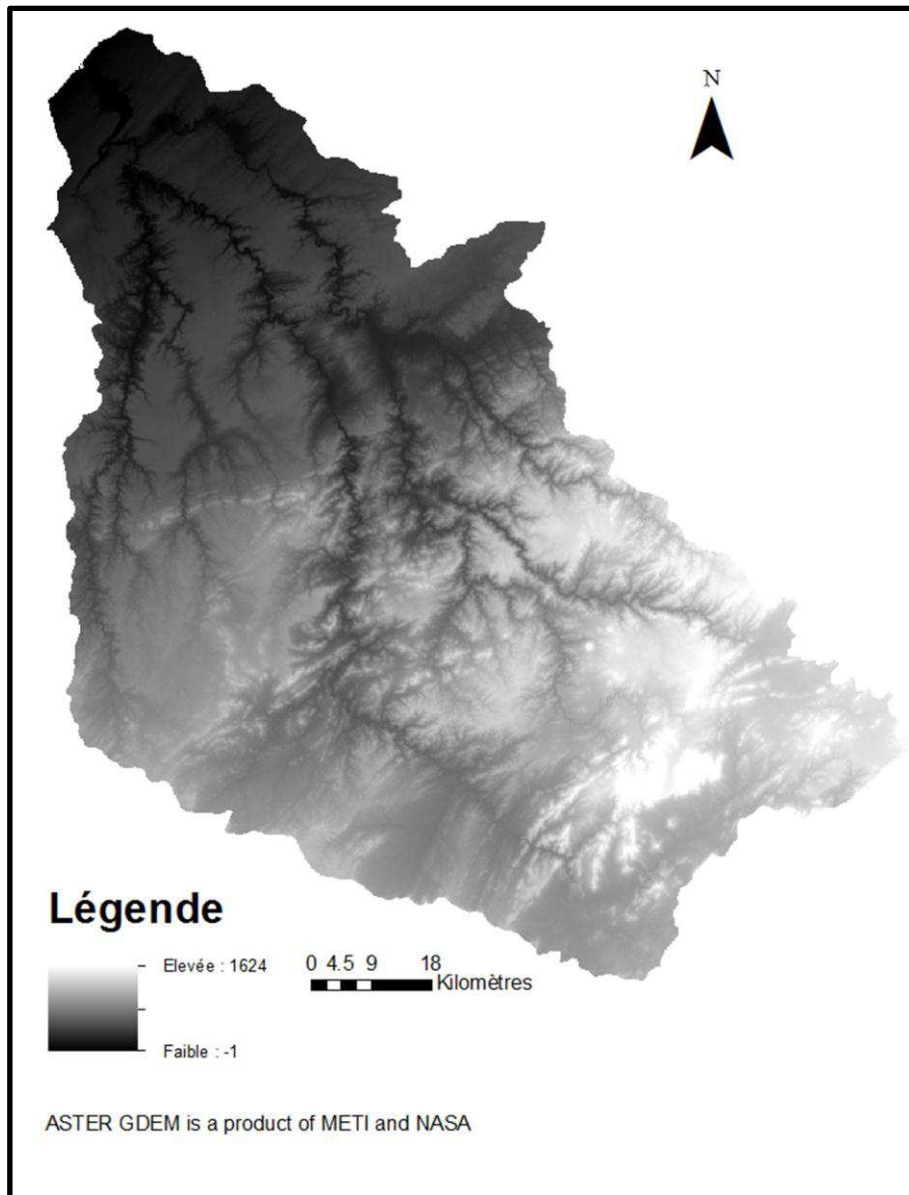
Annexe 5
Répartition de l'occupation agricole du sol à l'échelle des cercles, sur le
bassin versant du Bouregreg (source : Recensement Générale Agricole,
D.P.A.E., 1996)

Cercles	Céréales	Légumineuses	Cultures Maraich.	Cultures Oléag.	Cultures Indus.	Cultures Fourrag.	Plantations Fruitières	Jachère
Tiflet	26 200	366	2 051	102	2	384	3 097	10 703
Oued Zem	45 350	21	132	0	0	143	554	14 800
Oulmes	52 306	2575	606	9	174	456	2 305	15 701
Rommani	86 904	9 496	499	214	0	1 086	1 716	20 123
Khenifra	55 905	97	287	2	7	1 267	789	28 633
Bejaad	24 829	16	62	0	0	117	439	5 490
Salé	18 460	468	3 918	430	2	1 287	2 217	3 334
Rabat	868	5	418	0	0	82	514	578
Ain et Aouda	15 436	64	699	7	2	3 582	2 144	3 091
Temata	695	3	1 570	0	0	69	250	125
Khemisset	18 864	441	459	45	57	169	1 014	4 192
Total	345 817	13 552	10 701	809	244	8 642	15 039	106 770

Annexe 6 Les cartes satellitaires Landsat



Annexe 7
Le MNT du bassin versant du Bouregreg



Annexe 8
Projection utilisée au Maroc (Lambert conforme-zone 1)

Paramètres de projection	Lambert conique conforme Maroc-Zone1-
Ellipsoïde	Clarke 1880
Référentiel géodésique associé	Merchich
Latitude 1ère parallèle automécoïque	34° 52' 12" N
Latitude 2ème parallèle automécoïque	31° 43' 48" N
Latitude d'origine	33° 18'00" O
Excentrement en X	500 000 m
Excentrement en Y	300 000 m

Annexe 9

Les classes et les indices de chaque facteur

Inclinaison de pente

Longueurs de la pente	Indices attribuées
Longueurs petite	1
Longueur moyenne	2
Longueur élevée	3
Longueur très élevée	4

Érodibilité

Carte pédologique	Indices attribuées
Peu vulnérable	1
Moyennement vulnérable	2
vulnérable	3
Très vulnérable	4

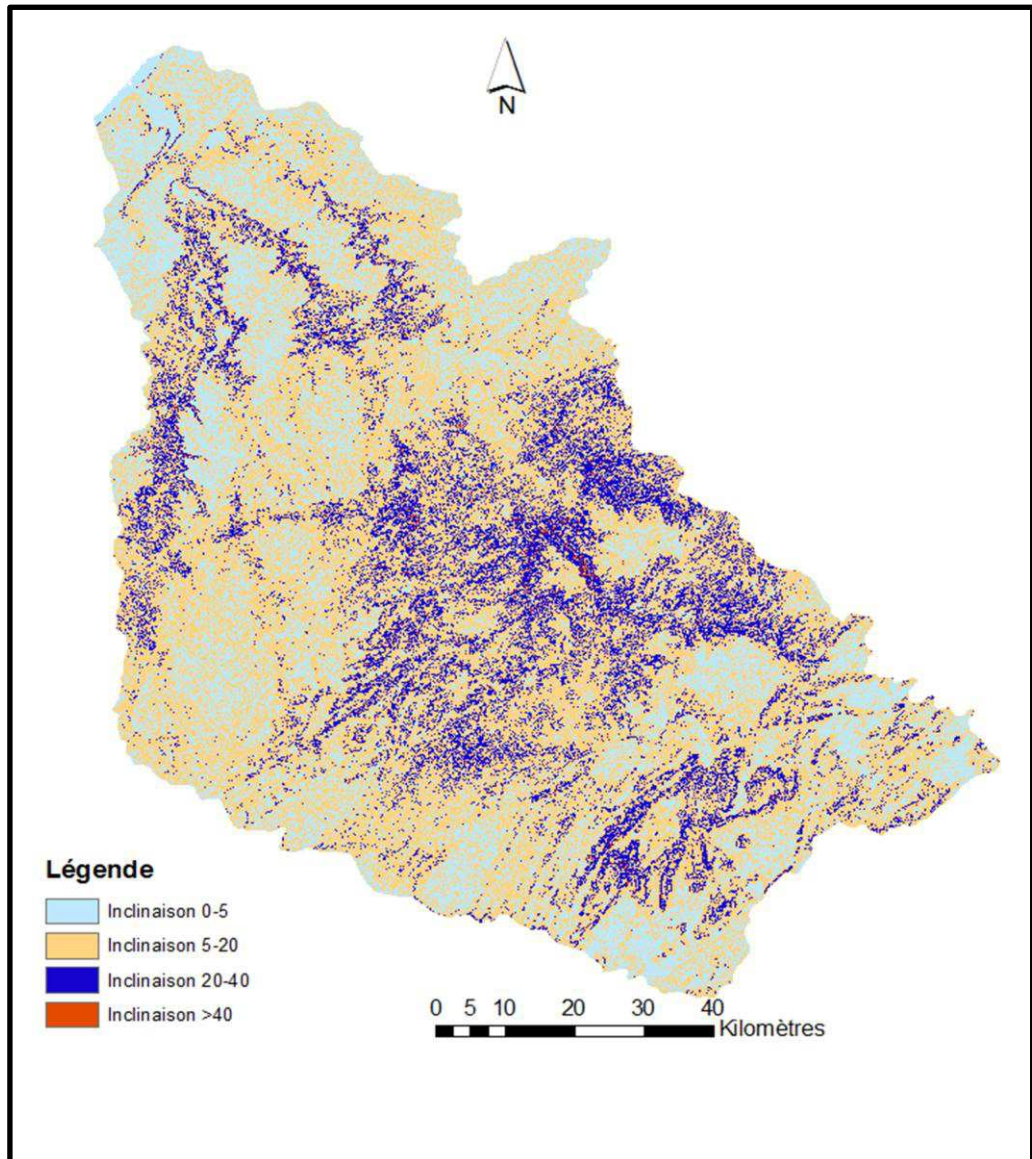
Couverture du sol

Occupation du Sol	Indices attribuées
Forêts	1
Parcelles agricoles	2
Sols nus	3
Eau	0
Zone urbanisée	0

Longueurs de la pente

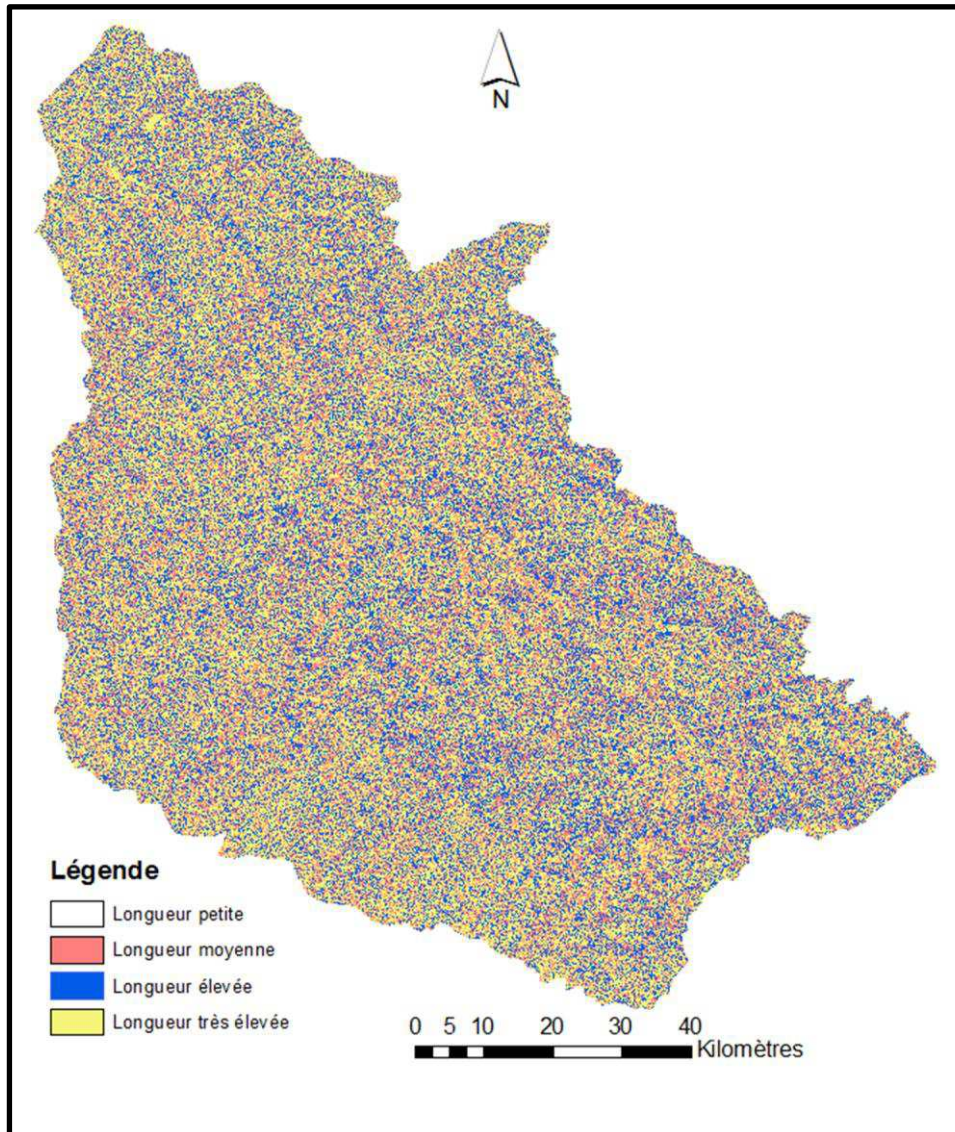
Inclinaison en %	Indice attribué
De 0-5%	1
De 5-20%	2
De 20-40%	3
Inclinaison > 40%	4

Annexe 10 La carte des pentes



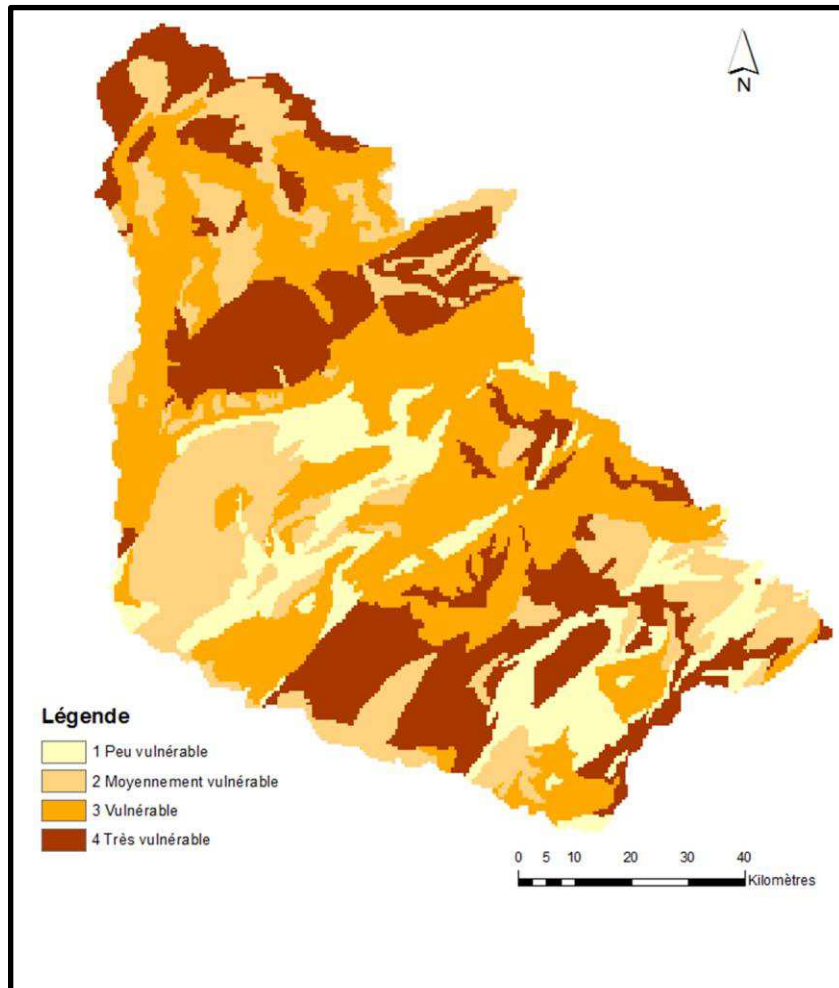
Annexe 11

La carte des longueurs de pentes

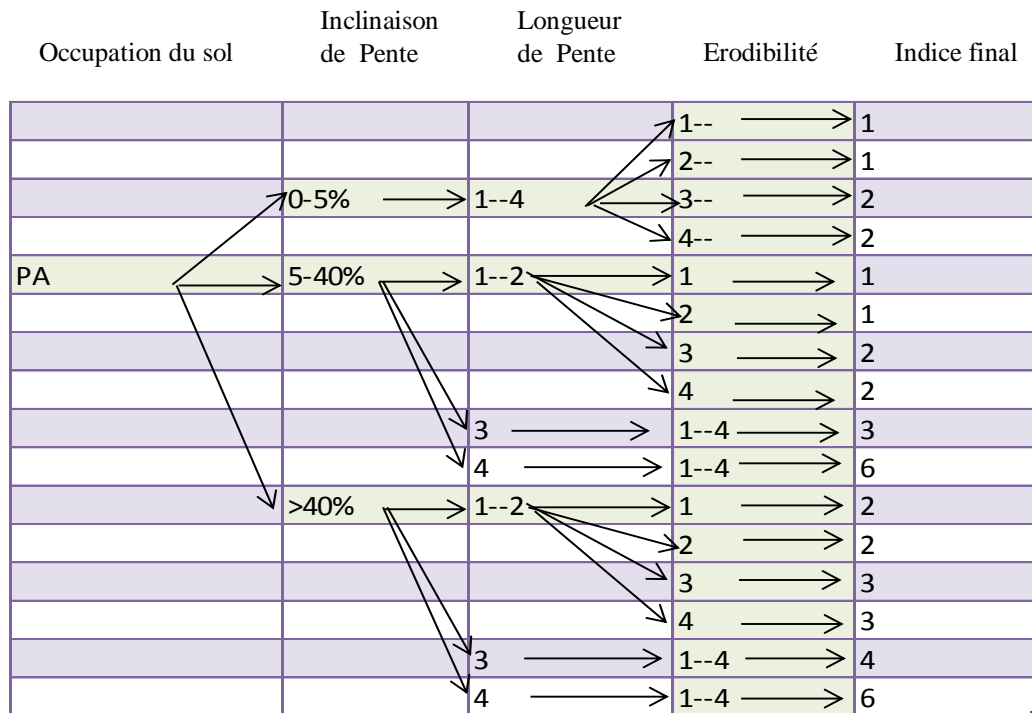
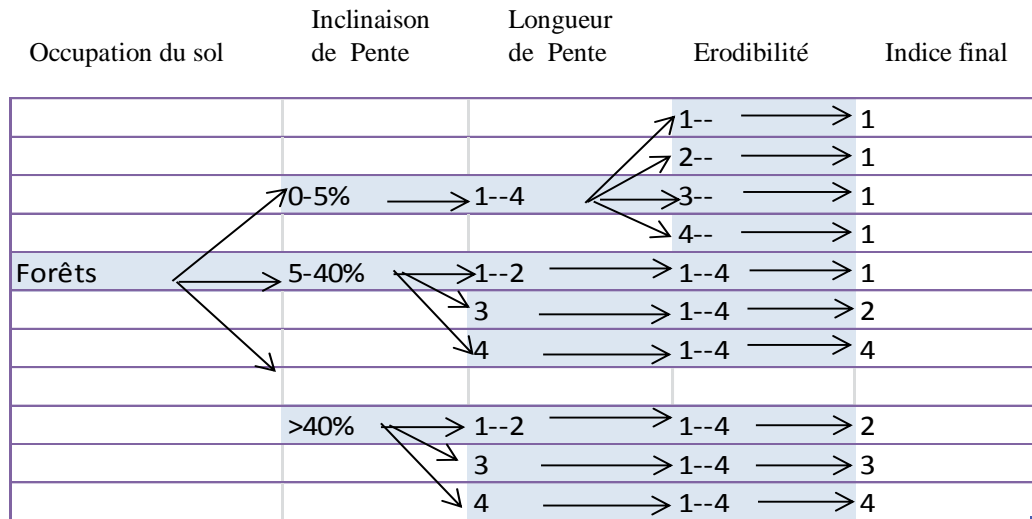


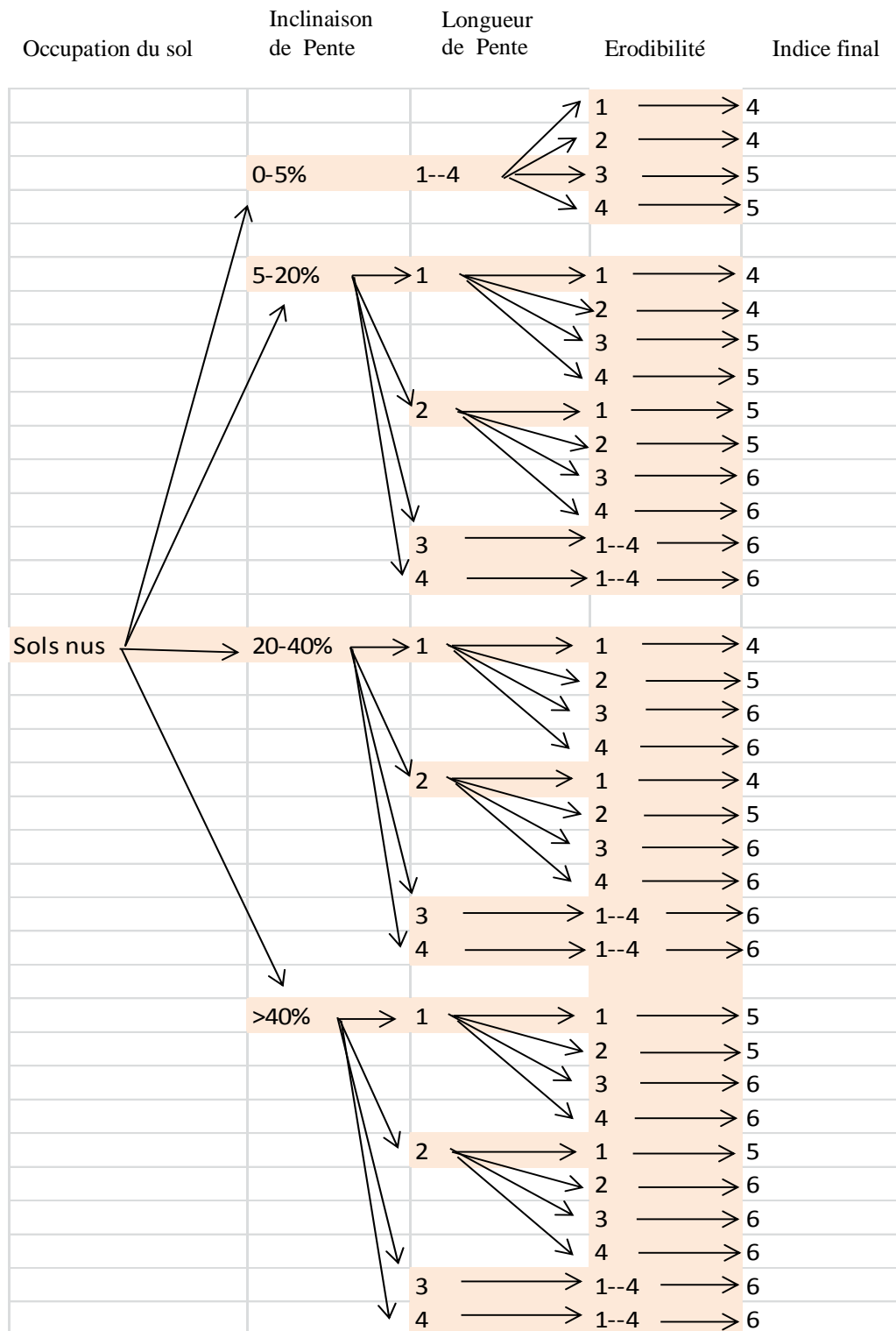
Annexe 12

La carte de vulnérabilité des sols à l'érosion



Annexe 13 Arborescences logiques





Annexe 14 Images du bassin versant du Bouregreg



Figure 27 : Bovin-Ovin



Figure 28 : Caprin



Figure 29 : Matorral lâche



Figure 31 : Forêts



Figure 32 : Parcelles agricoles



Figure 33 : Eau



Figure 34 : Trace de dégradation des sols

Liste des figures

Figure 1 : La zone d'étude.....	20
Figure 2:Carte géomorphologique du bassin versant du Bouregreg	21
Figure 3 : Carte des ressources en eau du bassin versant du Bouregreg (S. Lahlou).....	25
Figure 4:Méthodologie suivie dans l'étude diachronique de l'occupation du sol	33
Figure 5 : Méthodologie suivie pour la modélisation des processus érosifs	38
Figure 6 : Construction de l'arborescence.....	42
Figure 8 : Occupation du sol du Bouregreg (2000)	45
Figure 7 : Occupation du sol du Bouregreg (1985)	45
Figure 9 : Occupation du sol du Bouregreg (2011)	45
Figure 10 : Occupation du sol du Bouregreg (2007)	45
Figure 11 : Hauteur des pluies moyennes annuelles à l'échelle du bassin versant du Bouregreg (1980-2009) (source : SIGMED)	47
Figure 12 : Tendances générales de la pluviométrie sur le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009 : variation du « CUSUM »	47
Figure 13 : Occupation du sol de l'année 1985 en pourcentage et en surface.....	48
Figure 14 : Pluviométrie moyenne mensuelle à l'échelle du bassin versant du Bouregreg en 1985, 2000, 2007	49
Figure 15 : Occupation du sol de l'année 2000 en pourcentage et en surface.....	50
Figure 16 : Evolution des rendements céréaliers et de légumineuses de 1980 à 2009 sur les provinces de Rabat et de Khémisset (source : Campagnes agricoles, Ministère de l'Agriculture)	50
Figure 17 : Occupation du sol de l'année 2007 en pourcentage et en surface.....	51
Figure 18 : Occupation du sol de l'année 2011 en pourcentage et en surface.....	52
Figure 19 : Changement de destination de la forêt entre 1985 et 2011	53
Figure 20: Différence entre le cours d'eau principal en 2007 et 2011	53
Figure 21 : Répartition de la population dans le bassin versant du Bouregreg.....	54
Figure 22 : L'évolution du bâti entre 1985 et 2011(Source : Résultats de la classification supervisée)	56
Figure 23 : Carte de sensibilité à l'érosion.....	59
Figure 24 : Photo de notre zone d'étude	66
Figure 25 : Situation géographique du bassin versant du Bouregreg.....	66
Figure 26 : Carte de sensibilité à l'érosion.....	68
Figure 27 : Bovin-Ovin	85
Figure 28 : Caprin.....	85
Figure 29 : Matorral lâche.....	85
Figure 30 : Traces de dégradation des sols.....	85
Figure 31 : Forêts.....	85
Figure 32 : Parcelles agricoles.....	85
Figure 33 : Eau	85
Figure 34 : Trace de dégradation des sols	85

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales villes de Bouregreg.....	20
Tableau 2 : La population du Bouregreg dans les années 2004, 1994,1982. Source : la direction de la statistique (Haut-commissariat au Plan).....	26
Tableau 3 : Caractéristiques des quatre images satellitaires.....	30
Tableau 4 :Les classes d'occupation du sol.....	36
Tableau 5 : Composition colorée réalisée à partir de canaux Landsat TM (source : Girard et Girard, 1999).....	36
Tableau 6:Résultats de l'évaluation de la classification.....	46
Tableau 7 : L'évolution de la population entre 1982-1994 et entre 1994-2004 et entre 1982-2004	54

RÉSUMÉ

Cette étude réalisée dans le bassin versant du Bouregreg a pour objectifs d'étudier l'évolution de l'occupation du sol dans la période 1985-2011 à partir des données de télédétection (image satellitaire Landsat) et de modéliser les processus érosifs dans le bassin à partir d'une combinaison de facteurs dans un SIG après numérisation et géoréférencement en l'occurrence : l'inclinaison et la longueur de la pente, l'occupation du sol et la vulnérabilité des sols.

Les quatre cartes d'occupation du sol issues de la classification supervisée des images Landsat ainsi que la carte de sensibilité du bassin versant à l'érosion montre que :

- Entre 1985 et 2011, Le bassin versant a été marqué par une dynamique dans l'occupation du sol sous l'effet essentiellement des conditions climatiques et les interventions de l'homme ;
- le bassin versant du Bouregreg est fortement exposé au phénomène de l'érosion d'où la nécessité immédiate d'une intervention pour limiter les pertes et la dégradation des sols.

Mots clés : Bassin versant, Bouregreg, occupation du sol, télédétection, processus érosifs.

Diachronic study of land use and modeling of erosion processes in the watershed Bouregreg (Morocco)

Abstract

This study conducted in the watershed Bouregreg, aims to study the evolution of land use in the period 1985-2011, from remote sensing data (Landsat satellite image) and to model the erosive process in the basin from a combination of factors in a GIS after scanning and georeferencing namely: the steepness and length of slope, land use and soil vulnerability. The four maps of land use from the supervised classification of Landsat images and the sensitivity map to erosion of the watershed erosion show that:

- The watershed between 1985 and 2011 was marked by a dynamic land use mainly due to climatic conditions and human intervention;
- The Bouregreg watershed is heavily exposed to the erosion phenomenon, hence the immediate need for an intervention to limit soil loss and degradation.

Key words: Watershed, Bouregreg, Land use, Remote Sensing, Erosive Process